



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**CARACTERIZACIÓN DE LAS MASAS INERCIALES
EN UN DINAMÓMETRO DE CHASIS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

MECÁNICA - TERMOFLUIDOS

P R E S E N T A

GARCÍA PUERTOS JOSÉ FERNANDO

TUTOR:

DR. GONZÁLEZ OROPEZA ROGELIO

2009

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. SANTILLÁN GUTIÉRREZ SAÚL D.
Secretario: DR. JAZCILEVICH DIAMANT ARÓN
Vocal: DR. GONZÁLEZ GONZÁLEZ LEOPOLDO A.
1^{er}. Suplente: M. EN I. ZEPEDA SÁNCHEZ ANTONIO
2^{do}. Suplente: DR. VICENTE Y RODRÍGUEZ WILLIAM

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

C.U. UNAM MÉXICO, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. GONZALEZ OROPEZA ROGELIO

FIRMA

CARACTERIZACIÓN DE LAS MASAS INERCIALES EN UN DINAMÓMETRO DE CHASIS

CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN.	4
1.	CONCEPTOS PRELIMINARES .	5
	1.1 <i>El vehículo</i>	5
	1.2 <i>El motor y el combustible</i>	9
	1.3 <i>Normas y estándares internacionales de emisiones</i>	12
2.	LABORATORIO DE CONTROL DE EMISIONES.	20
	2.1 <i>Docencia, servicios</i>	20
	2.2 <i>Investigación</i>	21
	2.3 <i>Infraestructura y equipo.</i>	25
	2.4 <i>Proceso de certificación .</i>	27
3.	DINAMÓMETRO DE CHASIS .	29
	3.1 <i>Descripción del equipo .</i>	30
	3.2 <i>Sistemas adicionales .</i>	32
	3.3 <i>Normas aplicables .</i>	34
4.	VOLANTES DE INERCIA .	36
	4.1 <i>Determinación de parámetros .</i>	36
	4.2 <i>Caracterización .</i>	44
	4.3 <i>Verificación experimental .</i>	47
	CONCLUSIONES .	51
	ANEXO A ESTÁNDARES DE LÍMITE DE EMISIONES .	52
	ANEXO B DINAMÓMETRO DE CHASIS .	59
	BIBLIOGRAFÍA .	67

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la tecnología de los vehículos no sólo contempla mejorar las prestaciones del motor y el confort de sus ocupantes, sino disminuir el nivel de sus emisiones contaminantes. Incluso, si en una ciudad o región se tienen condiciones críticas respecto a la calidad del aire, seguramente existirán normas que regulen los niveles de emisiones y métodos específicos para medirlas en los vehículos que circulan por esa ciudad o región.

En este contexto, se instaló un sistema de volantes de inercia en el dinamómetro de chasis del Laboratorio de Control de Emisiones* (**LCE**), con el cual ya se puede considerar la influencia de la masa de un vehículo durante la simulación de su comportamiento dinámico, mejorando de esta manera la medición de su consumo de combustible y de sus emisiones contaminantes. Para ello se requirió realizar antes la caracterización de sus masas inerciales, con el propósito de aplicar la inercia equivalente# en función del peso del vehículo.

La información presentada se ha dividido en cuatro capítulos, los cuales se describen someramente a continuación:

El primero proporciona algunos conceptos básicos utilizados en el cuerpo del trabajo, proporcionando al lector términos como: vehículo, motor y combustible, así como una muestra de la normatividad internacional de las emisiones contaminantes respectivas.

El segundo brinda una visión general del **LCE** para situar el trabajo de esta tesis en un contexto adecuado, incluyendo una breve descripción de su proceso de certificación, al cual sirve esta actualización del dinamómetro de chasis.

El tercero se enfoca en este último equipo y sus diversos sistemas (excluyendo el sistema de inercia, abordado en el siguiente capítulo), que lo distinguen de otros que existen en la actualidad porque han sido diseñados y construidos por trabajos de licenciatura y maestría de la **UNAM**.

El cuarto se refiere a su sistema de inercia, incluyendo su análisis y caracterización, lo cual ha resultado en la aportación de una expresión para el cálculo de la inercia equivalente y un procedimiento para su verificación experimental en el dinamómetro de chasis del **LCE**.

De este modo, ahora es posible aplicar la inercia equivalente al acoplar uno o varios volantes de inercia a dicho dinamómetro de chasis, cumpliendo con la norma para la prueba de vehículos ligeros (**PBV** < 2722 kg) que emplean un motor de combustión interna. Teniéndose como consecuencia un comportamiento del vehículo sometido a prueba, semejante al que se obtiene cuando se efectúan mediciones de sus emisiones contaminantes con un sistema de muestreo a volumen constante (**CVS**, por sus siglas en inglés), a pesar de que el equipo que realiza estas mediciones en el laboratorio, registra dichos valores en % del volumen de la muestra analizada.

* **UNAM, C.U.**

que se utiliza para simular la potencia correspondiente a la inercia debida a la masa del vehículo, lo cual se explica más detalladamente en el **Capítulo 4** de este trabajo.

1. CONCEPTOS PRELIMINARES

1.1 El Vehículo

Un vehículo es aquel medio de transporte o cosas¹, de los cuales los del tipo motorizado son aquellos que cuentan con la capacidad de moverse por sí mismos, y de este último grupo, este trabajo se enfoca a los que circulan sobre carretera. Además, al seleccionar la gasolina como el combustible que se emplea en ellos, se puede delimitar aún más las clasificaciones existentes de los mismos.

Por ejemplo, en Estados Unidos se toma como base su **GVWR (Gross Vehicle Weight Rating)**, igual al peso del vehículo más la capacidad de carga (**tabla 1.1.1.**), a su vez, el primer tipo de vehículos que se define así, se divide en categorías en función también de su uso (**tabla 1.1.2.** y **tabla A.1.**) [9], [15].

Tabla 1.1.1. Tipos de vehículos de acuerdo a su GVWR (E.U.).

VT Vehicle Type	GVWR
LDV Light Duty Vehicles	GVWR < 8 500 lbs
MDPV Medium Duty Passenger Vehicles	8 500 lbs ≤ GVWR ≤ 10 000 lbs
HDV Heavy Duty Vehicles	GVWR > 10 000 lbs

VT - Tipo de vehículo

LDV - Vehículos de uso ligero.

MDPV - Vehículos de uso medio.

HDV - Vehículos de uso pesado.

Por su parte, en México la clasificación está hecha de manera similar, en función de su **PBV (Peso Bruto Vehicular)**, especificado por el fabricante así como su uso (**tabla 1.1.3.**) [11], [12].

La anterior clasificación hace referencia a otro tipo vehículo existente en estos dos países, e incluso en otros, cuya definición abarca varios de los tipos mencionados, con una denominación en cada una de estas naciones (**tabla 1.1.4.**). Además en México los **vehículos utilitarios** se clasifican de manera similar a los camiones ligeros (**tabla 1.1.5.**) [9], [11], [12], [15].

¹ Diccionario de La Real Academia de la Lengua

Tabla 1.1.2. Tipo de vehículos de uso ligero (LDV) de acuerdo a su GVWR y uso (E.U.).

VT	GVWR y uso		
LDV Light Duty Vehicles	PV Passenger Vehicles	LDT Light Duty Trucks	
		LLDT Light Light Duty Trucks GVWR ≤ 6 000 lbs	HLDT Heavy Light Duty Trucks GVWR > 6 000 lbs

- PV** - Autos de pasajeros.
LDT - Camiones ligeros de uso ligero.
LLDT - Camiones ligeros de uso ligero.
HLDT - Camiones pesados de uso ligero.

Tabla 1.1.3. Tipos de vehículos de acuerdo a su PBV y uso (México).

TV Tipo de Vehículo	PBV y uso
VP Vehículos de Pasajeros	VP
CL Camiones Ligeros	CL 1 y CL 2: $PBV \leq 2\,722\text{ kg}$ CL 3 y CL 4: $2\,722\text{ kg} < PBV \leq 3\,586\text{ kg}$
CM Camión Mediano	$3\,586\text{ kg} < PBV \leq 8\,864\text{ kg}$
CP Camión Pesado	$PBV > 8\,864\text{ kg}$

- VP** - Automóvil o su derivado, excepto el vehículo de uso múltiple o utilitario o remolque, diseñado para el transporte de hasta 10 personas.
CL 1 - Camión ligero clase 1.
CL 2 - Camión ligero clase 2.
CL 3 - Camión ligero clase 3.
CL 4 - Camión ligero clase 4.

Tabla 1.1.4. Vehículos utilitarios (E.U. y México).

		País	
		E.U.	México
VT TV	Utilitario	SUV Sport Utility Vehicles incluye las minivans y camionetas pick up.	VU Vehículo Utilitario diseñado para transporte de personas y/o cosas, con o sin chasis, o con equipo especial para operar ocasionalmente fuera del camino.

Tabla 1.1.5. Categorías de vehículos utilitarios (México).

TV	mr		
Utilitario VU	Clase 1 $mr \leq 1\,305 \text{ kg}$	Clase 2 $1\,305 \text{ kg} < mr \leq 1\,760 \text{ kg}$	Clase 3 $mr > 1\,760 \text{ kg}$

mr - Masa de referencia.

En la Comunidad Europea (Europa) en adición a la definición dada para los vehículos de tipo motorizado (que emplean gasolina) se especifica que cuenten con al menos cuatro ruedas. En este caso se presenta como ejemplo: la clasificación en función de lo que transportan y la masa que poseen (tabla 1.1.6.), y los rangos de masa (**RW**) para el tipo de vehículos N_1 definido (tabla 1.1.7.) [15], [17].

Tabla 1.1.6. Tipos de vehículos de acuerdo a lo que transportan y su masa (Europa).

		Transporte			
		Pasajeros		Bienes	
TV	AP_VCL	M₁		N₁ $mm \leq 3.5 \text{ ton}$	
	CUP	M₂ $mm \leq 5 \text{ ton}$	M₃ $mm > 5 \text{ ton}$	N₂ $3.5 \text{ ton} < mm \leq 12 \text{ ton}$	N₃ $mm > 12 \text{ ton}$

AP_VCL - Automóviles de pasajeros y vehículos comerciales ligeros.

CUP - Camión uso pesado.

M_i - Vehículos con no más de 8 asientos en adición al del conductor.

mm - Masa máxima.

Tabla 1.1.7. Clases de vehículos N₁, de acuerdo a su rango de masa (Europa).

TV	RW		
N₁	Clase I RW ≤ 1 250 kg RW ≤ 1 305 kg	Clase II 1 250 kg < RW ≤ 1 700 kg 1 305 kg < RW ≤ 1 760 kg	Clase III RW > 1 700 kg RW > 1 760 kg

Con los mismos parámetros utilizados hasta ahora para el vehículo y el combustible empleado; se presentan como ejemplo, la clasificación de vehículos en Japón de acuerdo a su uso (**tabla 1.1.8.**), así como las categorías (**CTG**) del tipo de vehículos **T&B** definido en función de su **GVW** (**Gross Vehicle Weight**) (**tabla 1.1.9.**) [16].

Tabla 1.1.8. Tipos de vehículos de acuerdo a su uso (Japón).

	Use
TV	PC Passengers Cars
	T&B Trucks and Buses

Use - Uso.

PC - Autos de Pasajeros.

T&B - Camiones y Autobuses.

Tabla 1.1.9. Categorías de vehículos T&B (Japón).

TV	CTG Categorias			
T&B	Mini	LD Light Duty GVW ≤ 1.7 ton.	MD Medium Duty 1.7 ton. < GVW ≤ 3.5 ton.	HD Heavy Duty GVW > 3.5 ton.

LD - Uso Ligero.

MD - Uso Medio.

HD - Uso Pesado.

También se han definido otros conceptos que se muestran en la **tabla 1.1.10**. ([9], [11], [12], [15], [16] y [17]), que permiten obtener grupos de vehículos que abarcan a los tipos presentados hasta ahora.

Tabla 1.1.10. Grupos de vehículos (E.U., México, Europa, Japón).

	Concepto	Definición
	nuevos	referente a los vehículos fabricados en planta.
	en circulación	aquellos que integran el parque vehicular.
AM	año modelo	cuya producción corresponde al período definido del primero de mes de un año al siguiente.
V_UT o DRB	vida útil o durabilidad	número de años o kilometraje determinado a partir de su producción.

El siguiente apartado del capítulo aborda los conceptos del motor a fin de ofrecer un contexto completo de los medios de transporte automotores por carretera, así como del combustible e información relacionada.

1.2 El Motor y el Combustible

Una máquina está definida como un conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra, producir un efecto determinado². Un motor es una máquina destinada a producir movimiento³. Al agregarse la denominación de combustión interna, quiere decir que utiliza una reacción (combustión) en el interior de la máquina, para que el calor desprendido de la misma sea absorbido por el fluido de trabajo (gases dentro del cilindro).

Por esto último algunos autores denominan este tipo de motores como "endotérmicos", un adjetivo utilizado en Química, que indica una reacción que se produce con absorción de calor. Además se les califica como "alternativos", que se refiere al movimiento del elemento llamado pistón, que permite comprimir el fluido de trabajo, y expandir los productos de la combustión. Dicha característica los hace diferentes de otros motores como el Wankel o la turbina de gas, que también son máquinas de combustión interna, pero rotatorias.

^{2,3} Diccionario de la Real Academia de la Lengua

La operación del motor de combustión interna alternativo sigue un ciclo que consiste en la admisión, compresión, explosión y escape de la mezcla. La tercera de ellas se realiza en una cámara, a la cual se le han dado diversas formas y tamaños para procurar el mayor aprovechamiento del calor (rendimiento).

A pesar de haberse intentado, en un principio y en alguno de estos motores, el empleo de combustibles en estado sólido, han sido los combustibles líquidos y gaseosos (fundamentalmente derivados del petróleo) los que han sido empleados hasta la fecha.

Una mezcla de aire - gasolina se utiliza en los **MECH (motores de encendido por chispa)**, el fluido de trabajo (mezcla) se enciende mediante una bujía después de ser comprimido. En los **MEC (motores de encendido por compresión)** ingresa aire únicamente al motor para ser comprimido, a fin elevar la temperatura y presión de éste, y al mezclarse con el combustible (diesel) al ser inyectado dentro de la cámara enciende el fluido de trabajo (combustión).

Un motor diesel suele tener un mayor tamaño (en comparación con uno de gasolina), ya que este combustible puede soportar mayor compresión sin explotar. La resistencia a la detonación (auto-ignición) es denominada con un número, llamado de octano, para el caso de los motores de encendido por chispa, y en los motores de encendido por compresión, número de cetano, que indica la facilidad que tiene el combustible para quemarse con una cierta compresión.

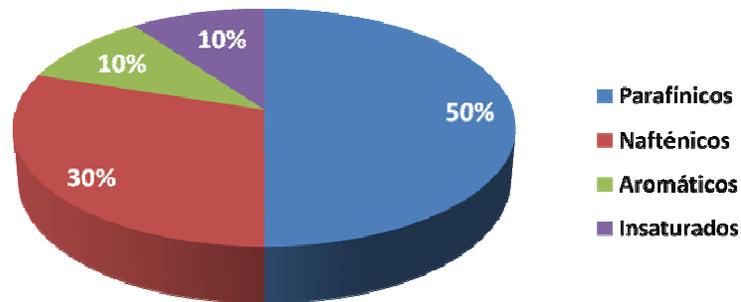
Debido al carácter no renovable del petróleo, de donde se obtiene la gasolina y el diesel, se han utilizado otros combustibles llamados "alternos" para alimentar al motor. En el caso de la gasolina: **el etano** generado a partir de alcohol obtenido de la cosecha de ciertos cultivos, **el metano** que además de que se puede obtener de productos agrícolas, también se obtiene del procesamiento de la basura, y finalmente **el hidrógeno**, cuya naturaleza, ha provocado un interés particular en su manejo y transporte.

El diesel tiene igualmente un sustituto llamado biodiesel, que puede obtenerse del aceite proveniente de ciertos cultivos o de la grasa animal (basura). De cualquier manera, no importando el combustible alterno que sea, el propósito es tener la mejor relación entre su volumen y energía, propia de los de origen fósil.

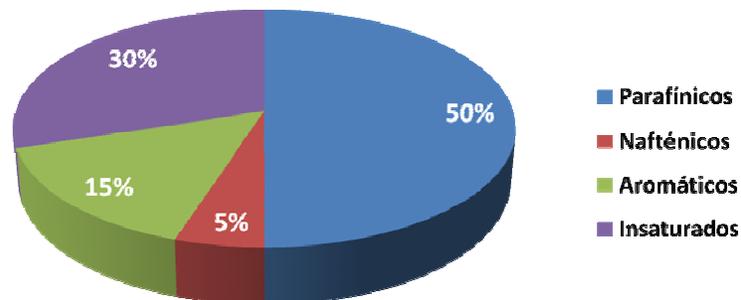
Resulta interesante que el combustible utilizado en motores muy especiales, instalados en coches de competencia de la categoría **fórmula 1**, tiene los mismos componentes que son empleados en un vehículo normal (de calle), la diferencia está en las proporciones que poseen (**figura 1.2.1. [14]**). De esta forma se tienen dos grandes grupos de dicho combustible, de acuerdo al número de átomos de hidrógeno disponibles:

- Saturados: aquellos cuyas moléculas contienen un número suficiente de éstos para saturar los átomos de carbono.
 - Parafinas (cadenas lineales con enlaces simples)
 - Nafténicos (cadenas cerradas con enlaces simples)
- No Saturados: aquellos cuyas moléculas no contienen un número suficiente de éstos para saturar los átomos de carbono.
 - Aromáticos (cadena cerrada con enlace doble y simple alternado, con lo que cuenta con un núcleo bencénico)
 - Diolefinas (cadenas lineales con enlaces dobles)
 - Acetilenos (cadenas lineales con enlaces triples)

Figura 1.2.1. Componentes del Combustible: Normal vs. F1



Combustible Normal



Combustible de Categoría F1

Una vez dado un breve vistazo al vehículo así como al motor y el combustible responsable de su movimiento, ahora es necesario enfocarse a la serie de desechos que no son utilizados en la propulsión, generados durante su funcionamiento. Al igual que antes, sólo se consideran los que resultan del uso de gasolina y considerando únicamente una parte de los tipos de vehículos dados en el primer apartado de este capítulo.

1.3 Normas y estándares internacionales de emisiones

Distintas condiciones, tales como: carencia o exceso de oxígeno durante la combustión, incremento controlado de la temperatura, formulación del combustible, anormalidades en las condiciones de operación del motor, etc. provocan las emisiones que resultan contaminantes (al entorno). Entre las más importantes se tienen: los hidrocarburos no quemados (**HC**), monóxido de carbono (**CO**), el oxígeno (**O₂**), los óxidos de nitrógeno (**NO_x**) y las partículas suspendidas (**PM**).

De acuerdo con la normatividad de cada país, se establecen ciertas clasificaciones respecto a las emisiones contaminantes. En toda la información que se muestran en este apartado, se ha seleccionado la gasolina como combustible del vehículo, que junto con la información antes mostrada (**tablas 1.1.1. a 1.1.10.**) sirve para una redacción más clara y en la elaboración de las siguientes tablas dadas como ejemplo con los valores de **HC**, **CO**, **NO_x**, etc., sin ocuparse nuevamente en lo ya visto.

En Estados Unidos los estándares (**EST**) para los **camiones ligeros de uso ligero (LDT) nuevos** están definidos por medio de las enmiendas al aire limpio (**ACCC**) de 1990 (**tabla 1.3.1.**) [**15**].

Tabla 1.3.1. Estándares de Emisiones (E.U.).

EST	Límites máximos permisibles
Tier 1	publicados como regla final el 5 de Junio de 1991, y aplicados de forma progresiva entre 1994 y 1997.
Tier 2	Adaptados el 21 de diciembre de 1999 y programados para aplicarse del 2004 al 2009.

Los **vehículos de uso ligero (LDV) nuevos** que utilizan gasolina como combustible, tienen límites en gramos por milla [**g/mi**] obtenidos de acuerdo al **federal test procedure (FTP 75)**, valores que corresponden a los estándares **Tier 1 y 0 (tabla 1.3.2.)**. Su implementación dependerá del año modelo (**AM**) y el tipo vehículo (**GVWR**), por lo que el estándar **Tier 1** aplica a un porcentaje mínimo de dichos vehículos, mientras al resto le corresponde el estándar **Tier 0**.

(tablas A.2. a A.6.). Además se tienen valores adicionales de NMHC, V_UT, y cambios en este último para los estándares Tier 1 y 0 ya definidos (tablas A.7. y A.9.) [9].

Tabla 1.3.2. Estándares de Emisiones en g/mi para LDV nuevos (E.U.).

VT	V_UT	EST	THC	NMHC	CO	NOX	PM
PV	INTM ^{5/50}	Tier 0	0.41	----	3.4	1.0	----
		Tier 1	0.41	0.25	3.4	0.4	0.08
	TOT ^{10/100}	Tier 0	----	----	----	----	----
		Tier 1	----	0.31	4.2	0.60	0.10
LLDT							
LDT1 ^A	INTM ^{5/50}	Tier 0	----	----	----	----	----
LDT2 ^A		Tier 1	----	0.25	3.4	0.4	0.08
		Tier 0	----	----	----	----	----
LDT1 ^A		Tier 1	----	0.32	4.4	0.7	0.08
	TOT ^{10/100}	Tier 0	0.80	----	10	1.2	----
Tier 1		0.80	0.31	4.2	0.6	0.10	
Tier 0		0.80	----	10	1.7	----	
Tier 1		0.80	0.40	5.5	0.97	0.10	
HLDT							
LDT3 ^A	INTM ^{5/50}	Tier 0	----	----	----	----	
LDT4 ^A		Tier 1	----	0.32	4.4	0.7	0.10
		Tier 0	----	----	----	----	
0 - 3750 ^{LVW}		Tier 1	----	0.39	5.0	1.1	0.12
	TOT ^{11/120}	Tier 0	0.80	----	10	1.2	----
> 3750 ^{LVW}		Tier 0	0.80	----	10	1.7	----
LDT3 ^A		Tier 1	0.80	0.46	6.4	0.98	0.10
LDT4 ^A		Tier 1	0.80	0.56	7.3	1.53	0.12

THC - Total Hydrocarbons.

NMHC - Non-Methane Hydrocarbons.

LVW - Loaded Vehicle Weight. Peso del vehículo cargado.

^A - Clasificación de LDT (Tabla A.1.)

INTM^{5/50} - Intermedia. 5 Años o 50 000 millas, lo que ocurra primero.

TOT^{10/100} - Total. 10 Años o 100 000 millas, lo que ocurra primero.

El estándar **Tier 2** (tabla A.8. □) introduce límites de emisión más rigurosos que los establecidos por la **Tier 1** (tabla I.3.2.), realiza una serie de cambios adicionales para los vehículos más grandes, de manera que la aplicabilidad se extiende para los **medium duty passengers vehicles (MDPV)**. Así que los fabricantes de vehículos deben escoger entre uno de los varios niveles de certificación con un cierto rigor impuesto para cada uno (8 permanentes: **PRMNT** y 3 temporales: **TMPRL**) llamados "BINS" y un estándar promedio de flota □ para las emisiones de **NOx [15]**.

Los **vehículos de uso ligero en circulación (in use)** que utilizan gasolina como combustible, tienen como límites en gramos por milla [**g/mi**] obtenidos de acuerdo al **federal test procedure (FTP 75)**, valores que corresponden a los estándares **Tier 1, 1T** y **0**. Por lo tanto, se muestran únicamente (tabla I.3.3.) los valores que difieren de la tabla I.3.2. En este caso su implementación también dependerá del año modelo (**AM**) y el tipo vehículo (**GVWR**), que a diferencia de los vehículos nuevos de este tipo contempla para su aplicación un porcentaje mínimo de vehículos para el estándar más riguroso (**Tier 1** o **Tier 1T**), mientras al resto será del estándar **Tier 1T** o **Tier 0** respectivamente (tablas A.10. a A.13.) [9].

Tabla I.3.3. Estándares de Emisiones en g/mi para LDV en circulación (E.U.)

V_UT	VT	EST	THC	NMHC	CO	NOX	PM
PV							
	INTM^{5/50}	Tier 1T	0.41	0.32	3.4	0.4	
LDT							
LDT1^A	INTM^{5/50}	Tier 0	0.80	----	10	1.2	----
		Tier 1T	0.80	0.32	5.2	0.4	
		Tier 1	0.80	0.25	3.4	0.4	0.08
LDT2^A		Tier 0	0.80	----	10	1.7	----
		Tier 1T	0.80	0.41	6.7	0.7	
		Tier 1	0.80	0.32	4.4	0.7	0.08
0 - 3750^{LVW}	INTM^{5/50}	Tier 0	0.80	----	10	1.2	----
> 3750^{LVW}		Tier 0	0.80	----	10	1.7	----
LDT3^A		Tier 1T	0.80	0.40	5.5	0.88	
		Tier 1	0.80	0.32	4.4	0.7	0.10
LDT4^A		Tier 1T	0.80	0.49	6.2	1.38	
		Tier 1	0.80	0.39	5.0	1.10	0.12

Otro ejemplo se observa en México, al tomar de la norma **NOM-042-SEMARNAT-2003** los límites en gramos por kilómetro [**g/km**] permisibles de emisión de gases provenientes del escape para **vehículos de pasajeros, camiones ligeros, y vehículos utilitarios (VP, CL y VU) nuevos**, que utilizan gasolina como combustible. Por lo que un grupo de tres estándares (**EST, tabla 1.3.4.**) define los valores para estos vehículos en función de su **durabilidad (DRB, tablas 1.3.5.a. y 1.3.5.b.)**. [12].

Tabla 1.3.4. Estándares de Emisiones (México).

EST	Límites máximos permisibles
A	para vehículos año 2004 y hasta 2009 . [*]
B	para vehículos 2007 y hasta " Año 3 ". [*]
C	aplicables a partir de " Año 1 " [*] y posteriores.

^{*} - tablas *A.14.* y *A.15.*

Un ejemplo más se tiene de la norma **NOM-041-ECOL-2006** en México, donde están los límites en gramos por kilómetro [**g/km**] máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape (**tabla 1.3.6.**), así como su implementación (**tablas A.14 y A.15.**) para los **vehículos de pasajeros, camiones ligeros y vehículos utilitarios (VP, CL y VU) en circulación**, que utilizan gasolina como combustible en función de su año modelo (**AM**) [11].

La Unión Europea (**UE**) establece los límites de emisiones para los **automóviles de pasajeros y los vehículos comerciales ligeros (AP_VCL)** en la **Directiva 70/220/EEC**, cuya base cual ha sido modificada varias ocasiones, dando lugar a importantes enmiendas (**tabla 1.3.7.**) [13], [16]. De esta manera se presenta como ejemplo, los límites en gramos por kilómetro [**g/km**] máximos permisibles en las emisiones de los gases contaminantes para los vehículos de este tipo **nuevos** de las categorías **M₁** y **N₁** definidas anteriormente que usan gasolina como combustible (**tablas 1.3.8.a. y 1.3.8.b.**) [15], [17].

En Japón el ministerio del ambiente (**Ministry Of Environment**), desarrolla y establece los límites de emisiones, en Marzo de 2003 finalizó la formulación de las normas para el 2005 [13]. Así por ejemplo, se presentan los valores en gramos por kilómetro [**g/km**] de **CO, NMHC y NOx**, obtenidos de acuerdo a cierto tipo de prueba para **autos de pasajeros, camiones y autobuses (PC, T&B) nuevos** que utilizan gasolina como combustible (**tabla 1.3.9.**) [16].

Tablas 1.3.5.a. y 1.3.5.b. Estándares de Emisiones en g/km para VP, CL y VU Nuevos (México).

	EST	TV	CO	HCNM	NOx
Durabilidad a 80 000 km	A	VP	2.11	0.156	0.25
		CL 1 y VU			
		CL 2 y VU	2.74	0.200	0.44
		CL 3 y VU			
		CL 4 y VU	3.11	0.240	0.68
	B	VP	2.11	0.099	0.249
		CL 1 y VU			
		CL 2 y VU	2.74	0.121	
		CL 3 y VU			
		CL 4 y VU			
	C	VP	2.11	0.047	0.068
		CL 1 y VU			
		CL 2 y VU		0.087	0.124
		CL 3 y VU			
		CL 4 y VU			

CO. - Monóxido de carbono.

HCNM. - Hidrocarburos no metano.

NOx. - Óxidos de nitrógeno.

	EST	TV	CO	HCNM	NOx
Durabilidad a 100 000 km	B	VP	2.11	0.125	0.100
		CL y VU Clase 1			
		CL y VU Clase 2	2.26	0.162	0.125
		CL y VU Clase 3	2.83	0.200	0.137
	C	VP	1.00	0.10	0.08
		CL y VU Clase 1			
		CL y VU Clase 2	1.81	0.13	0.10
		CL y VU Clase 3	2.27	0.16	0.11

Tabla 1.3.6. Estándar de Emisiones para VP, CL_n, VU en circulación (México).

TV	AM	HC [ppm]	CO [% Vol.]	O ₂ [% Vol.]
VP CL _n	1986 ←	500	4.0	3.0
	1987 a 1993	400	3.0	3.0
	1994 →	200	2.0	3.0
VU	1985 ←	600	5.0	3.0
	1986 a 1991	500	4.0	3.0
	1992 a 1993	400	3.0	3.0
	1994 →	200	2.0	3.0

n = 1...4 - clase de camión ligero.

AM → - año modelo y posteriores.

AM a AM - del año modelo al año modelo.

AM → - año modelo y posteriores.

[ppm] - partes por millón.

[% Vol.] - porcentaje en volumen.

Tabla 1.3.7. Estándares de Emisiones (UE).

EST Estándares	Directiva(s)
Euro 1	(EC 93) Directiva 91/41/EEC o 93/59/EEC
Euro 2	Directiva 93/12/EC o 96/69/EEC
Euro 3/4	Directiva 98/69/EC enmiendas totales en 2002/80/EC.
Euro 5	sustituye a la Euro 4 , contemplando una reducción en los límites de emisiones de NO_x y PM (entrará en vigor a partir de octubre del 2009).

Tablas 1.3.8.a. y 1.3.8.b. Estándares de Emisiones en g/km para AP_VCL nuevos (UE).

AP - M₁*

EST	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM
Euro 1[§]	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro 2	2.2	-	0.5	-	-
Euro 3	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro 4	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro 5^φ	1.0	0.075	-	0.06	0.005 ^a

* - Antes de **Euro 5**, AP > 2500 kg fueron del tipo aprobado como categoría N₁.

§ - Valores entre paréntesis en conformidad de los límites de producción (COP).

φ - Propuesto.

^a - aplicables para vehículos que usan motores **DI**.

VCL

N ₁	EST	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM
Clase I	Euro 1	2.72	-	0.97	-	-
	Euro 2	2.2	-	0.50	-	-
	Euro 3	2.3	0.20	-	0.15	-
	Euro 4	1.0	0.1	-	0.08	-
	Euro 5^φ	1.0	0.075	-	0.06	0.005 ^a
Clase II	Euro 1	5.17	-	1.40	-	-
	Euro 2	4.0	-	0.65	-	-
	Euro 3	4.17	0.25	-	0.18	-
	Euro 4	1.81	0.13	-	0.10	-
	Euro 5^φ	1.81	0.10	-	0.075	0.005 ^a
Clase III	Euro 1	6.90	-	1.70	-	-
	Euro 2	5.0	-	0.80	-	-
	Euro 3	5.22	0.29	-	0.21	-
	Euro 4	2.27	0.16	-	0.11	-
	Euro 5^φ	2.27	0.12	-	0.082	0.005 ^a

Tabla 1.3.9. Estándares de Emisiones en g/km para PC, T&B nuevos (Japón).

TV	Prueba	Año	Emisión	VLRG
PC	10 - 15 M + 11 M	2005	CO	1.15
			NMHC	0.05
			NOx	0.05
T&B				
Mini	10 - 15 M	2002	CO	3.30
			HC	0.13
			NOx	0.13
	11 M		CO	38.0
			HC	3.50
			NOx	2.20
LD	10 - 15 M + 11 M	2005	CO	1.15
			NMHC	0.05
			NOx	0.05

VLRG - Valor regulatorio (Promedio).

10 - 15 M - Ciclo de manejo urbano para la certificación de emisiones y determinación de economía del combustible.

11 M - Ciclo de manejo usado para la certificación de emisiones.

El contenido de este capítulo permite observar que el presente trabajo tiene un alcance que no abarca la totalidad de los vehículos, sólo de aquellos con un **PBV ≤ 2 722 kg (tabla 1.1.3)**, que utilizan gasolina como combustible y circulan sobre carretera, además de que, abordar todas las variantes de las clasificaciones internacionales es excesivamente ambicioso, e inoperante (bajo nuestro punto de vista), dado que ya existen las normas y clasificaciones respectivas.

2. Laboratorio de Control de Emisiones

2.1 Docencia, Servicios

El LCE apoya la docencia a través de cursos con contenidos prácticos y actuales en el ámbito de motores de combustión interna alternativos, tanto para alumnos de carreras afines así como para profesionistas y técnicos que los requieran. Para ello se deben programar (de acuerdo a las necesidades de los grupos de profesionales que los soliciten) y organizar los contenidos en una secuencia lógica, estipulando los objetivos que se pretenden alcanzar.

Asimismo se busca que los alumnos ayuden a alcanzar dichas metas e inclusive que sean ellos quienes propongan el método de evaluación. Para el caso de licenciatura y posgrado, ya se tienen estructurados los cursos, con programas, referencias, objetivos y actividades docentes: como dinámicas grupales y evaluaciones sugeridas.

El LCE ofrece también servicios y asesoría para evaluar sistemas y dispositivos que reduzcan las emisiones contaminantes y el consumo de combustible en Motores de Combustión Interna Alternativos. Un ejemplo de lo anterior lo constituye el informe generado para la empresa SYATM, S.A. de C.V. referente al consumo de combustible y emisiones contaminantes al usar el tratamiento para motores de combustión interna denominado *NGR [18]*.

Las pruebas realizadas en motor de encendido por chispa se llevaron a cabo en un dinamómetro de chasis, con un vehículo Nissan, Tsuru sedán modelo 2000 (**fotografía 2.1.1.**). Asimismo se efectuó el seguimiento de tres ciclos de manejo característicos del Valle de México (Centro, Noreste y Sureste), registrando segundo a segundo: consumo de combustible, temperatura del aceite, velocidad del vehículo y concentración de los siguientes gases: CO, CO₂, O₂, HC y NO_x.



Fotografía 2.1.1. Instrumentación del vehículo y seguimiento de un ciclo de manejo.

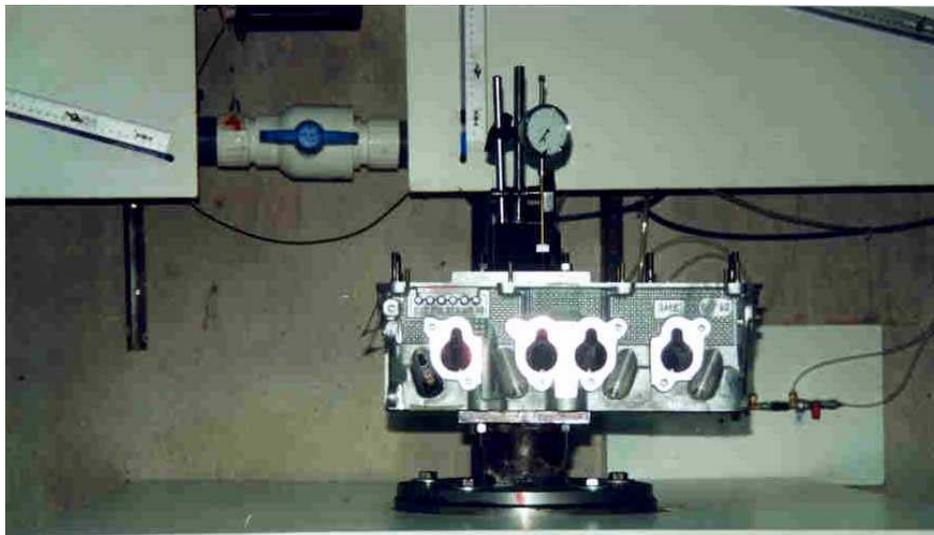
Un ordenamiento conveniente de los resultados obtenidos permitió operarlos estadísticamente, llevando a una serie de varias conclusiones. La influencia del *NGR* en la cantidad de emisiones de los diferentes gases no sólo presentó ciertas reducciones para varios de ellos, también se tuvieron aumentos en algunos intervalos, tal como se presentó para el caso del monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno.

En cuanto al consumo de combustible se manifestó una reducción al usar el *NGR*, de manera porcentual éste fue desde el 8.76% (Ciclo Centro) y 9.3% (Ciclo Sureste) hasta el 34.6% (Ciclo Noreste), donde se tuvo una diferencia más acusada. Por otra parte, el *LCE* pretende contribuir también en un área vital para el país a través del desarrollo de conocimientos, tecnología y equipo relacionados con las labores que puede realizar, lo cual se describe y ejemplifica a continuación.

2.2 Investigación

Este ámbito comprende el desarrollar métodos, técnicas, tecnología y herramientas para el control de las emisiones contaminantes y reducción del consumo de combustible de los motores de combustión interna alternativos. Lo anterior incluye su uso, así como la obtención de ciclos de manejo característicos de una ciudad o zona específicos, instrumentación y monitoreo de vehículos, desarrollo de equipo de medición, medición del desempeño de una culata o de colectores de admisión.

Es importante mencionar que los servicios prestados por el Laboratorio de Control de Emisiones pueden incluir lo referente al área de Investigación, ejemplo de ello lo constituyen los trabajos realizados para una empresa automotriz de reconocido prestigio, a la cual llamaremos **HCR** y para el **Gobierno**.

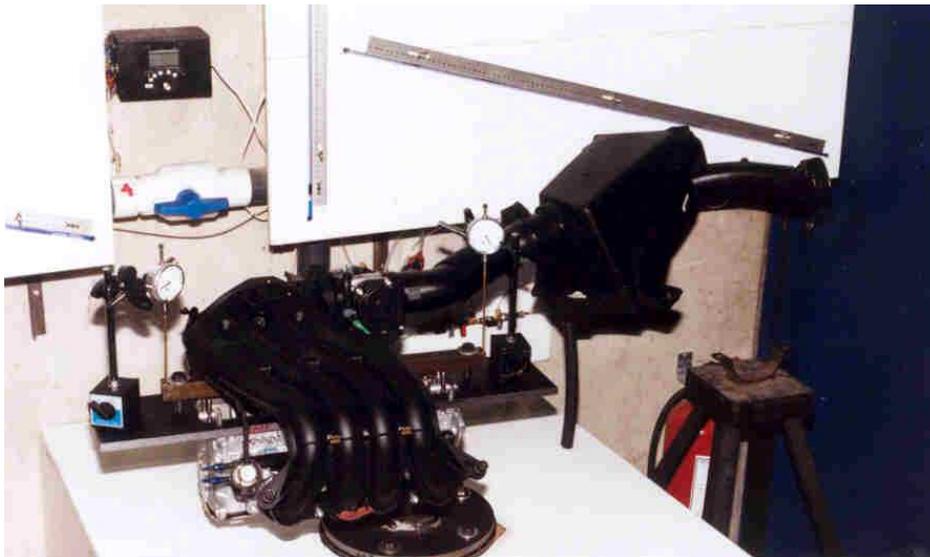


Fotografía 2.2.1. Montaje de la culata del motor 2L al banco de flujo estacionario.

Para la primera se utilizó el banco de flujo estacionario del laboratorio para realizar el estudio comparativo de dos colectores de admisión de un motor 2 L de inyección, en donde se analizó de forma exhaustiva la influencia de las variaciones de su geometría y material con que fueron elaborados (aluminio y plástico). Para ello fue necesario caracterizar el colector de admisión por sí solo (**fotografía 2.2.1.**), y las pérdidas en la presión (a partir de la entrada del aire) de los diferentes elementos que conforman el sistema de admisión para ambos tipos de colectores. (**fotografías 2.2.2. y 2.2.3.**).



Fotografía 2.2.2. Montaje del colector de admisión (aluminio), la caja de mariposa, conducto intermedio, portafiltro, filtro y el conducto final a la culata del motor 2L.



Fotografía 2.2.3. Montaje del colector de admisión (plástico) y los elementos que conforman el sistema de admisión a la culata del motor 2L.

Los datos obtenidos son procesados en un programa numérico que calcula el gasto real, coeficiente de flujo, sección efectiva y el número de Reynolds para cada posicionamiento de la válvula de admisión. Estos nuevos valores se procesan en una hoja de cálculo.

Lo anterior resulta fundamental ya que caracterizan el proceso de renovación de la carga de un motor de este tipo, afectando directamente al mezclado del aire con el combustible. Finalmente se estableció que son los colectores los que provocan una pérdida de carga alrededor de un 4.6% mayor a las pérdidas de los otros elementos que intervienen en el sistema de admisión. Por otro lado, se observa que el colector de plástico presenta una pérdida mayor alrededor de 0.5% respecto al colector de aluminio.

Para el **Gobierno** se ha diseñado un banco de motocicletas que permite reproducir las condiciones reales de funcionamiento, siguiendo un ciclo de manejo y aplicando una carga de camino (que simula la inercia de la motocicleta, la resistencia de rodadura y la pendiente de carretera) se puede medir la potencia motriz del vehículo. El desarrollo de dicho equipo sirve de sustento sólido a la norma generada para controlar las emisiones de contaminantes respectivas.

El banco está compuesto por una estructura metálica robusta que puede dividirse en tres partes. Una de ellas, aloja un rodillo metálico cuya longitud y radio son de 90 y 40 cm respectivamente. Las otras dos partes - una rampa y una estructura de soporte - se utilizan para colocar y mantener la motocicleta en posición vertical. Asimismo se tiene una base para colocar un mouse o ratón de computadora, desde donde el operador - montado en la motocicleta - puede controlar el funcionamiento, como es el caso del accionamiento de unas mordazas que sirven para sujetar o liberar la rueda delantera de la motocicleta durante el desarrollo de una prueba, o al término de la misma respectivamente (**fotografía 2.2.4.**).

Una computadora personal sirve para operar el sistema, el cual cuenta con un analizador de cinco gases comunicado a través de una interface serial, que permite medir la concentración de los gases contaminantes provenientes del escape de la motocicleta. Para el caso de la instrumentación se abarcaron aspectos de hardware y software, con el uso combinado de instrumentación virtual y tradicional.

Para el caso del hardware, la adquisición de señales y control de los dispositivos se efectúa mediante una serie de tarjetas electrónicas, las cuales fueron diseñadas y construidas con dicho fin. Sus funciones principales son la medición de las rpm, la determinación del par y el control de la unidad de potencia. Esta última hace posible el evaluar el desempeño del motor al aplicar diferentes intensidades de frenado, con lo que se puede observar por ejemplo, consumo de combustible (rendimiento), nivel de ruido, potencia, velocidad, temperatura, par, etc.

Para el desarrollo del software del sistema, se incluyó uno comercial adaptándolo para la instrumentación virtual de aplicaciones. El programa que controla los equipos utilizados está compuesto por cinco rutinas básicas (cada una corresponde a una tarea). La tercera de ellas, la prueba de la motocicleta, despliega en pantalla un ciclo de manejo - representación gráfica de una manera de conducir en una localidad específica - que el usuario tiene que seguir. El protocolo de prueba que el software utiliza para evaluar las mediciones de una motocicleta cambia

dependiendo de las características de la misma (número de cilindros, carrera), en función de ello escoge uno de los seis ciclos desarrollados para este fin.



Fotografía 2.2.4. Vista parcial del banco de motocicletas del LCE.

Para obtener estos ciclos se hizo necesario instrumentar diferentes motocicletas para conocer su desempeño en distintas áreas. Después de un gran número de recorridos y un análisis estadístico exhaustivo se encontraron las formas características en que la gama de motocicletas del parque vehicular es conducida. Asimismo el sistema analiza la constancia del usuario para seguir la ruta marcada por el ciclo de manejo, de tal forma que invalida la prueba si considera que no la está siguiendo suficientemente bien (figura 2.2.1.).

Ciudad de México (Centro)

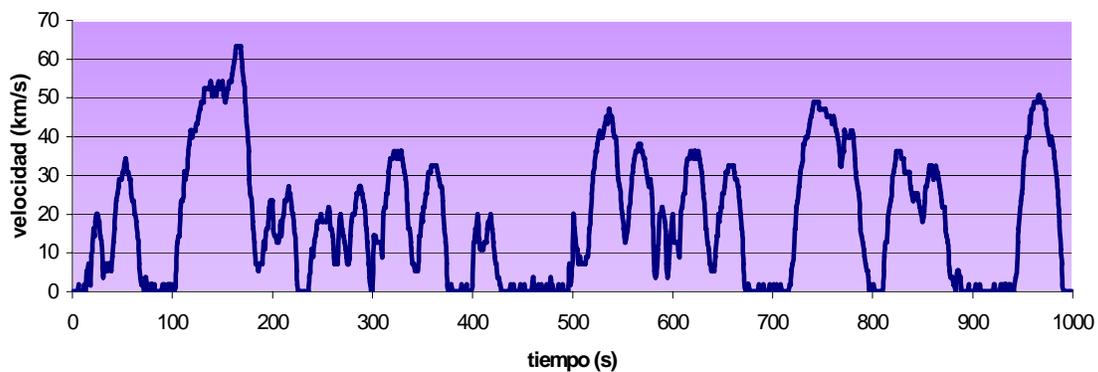


Figura 2.2.1. Ciclo de Manejo. velocidad máxima: 63 km/h, velocidad promedio: 18.5 km/h, duración 995 seg, distancia recorrida: 5.16 km.

Para el caso de algún curso que se ofrezca en estas instalaciones, existen 2 espacios suficientes hasta para 15 personas, se tiene pantalla fija, pizarrones y demás equipo audiovisual que la misma Facultad de Ingeniería ofrece. La iluminación es suficiente, tanto para la docencia como para la realización de ensayos. La instalación sanitaria consta de 2 tarjas, diferentes drenes en la fosa de inspección y en la sala donde está el banco de ensayos. Se cuenta con energía eléctrica a 220, como a 120 VCA y un sistema de tierras seguro (**figura 2.3.2.**); red telefónica y fibra óptica para Internet. Además de servicios sanitarios al lado del LCE, tanto para hombres como para mujeres (**figura 2.3.3.**).

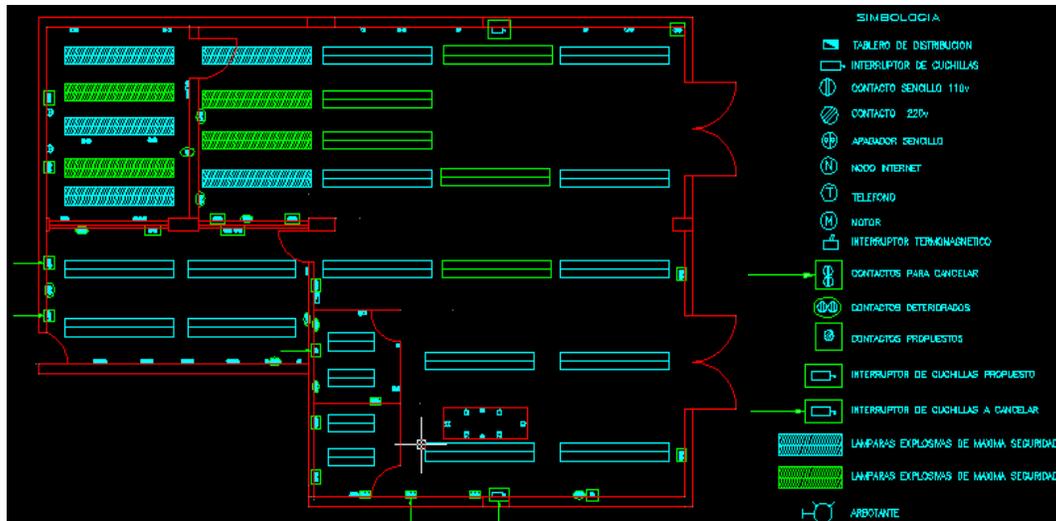


Figura 2.3.2. Instalación eléctrica del LCE.

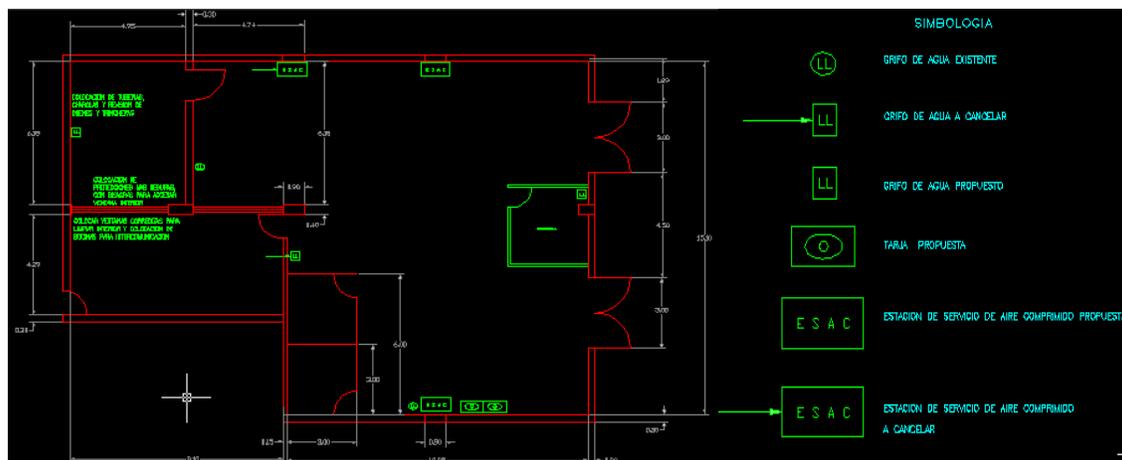


Figura 2.3.3. Instalación hidráulica y sanitaria del LCE.

Fuera del LCE, en la parte posterior, se encuentran los combustibles con la ventilación adecuada y extinguidores colocados estratégicamente. Los equipos que incluye el circuito hidráulico para alimentar al dinamómetro de banco y el enfriamiento de los motores son, una torre de enfriamiento, una bomba y una cisterna, así como las válvulas y líneas hidráulicas para alimentar la cisterna, desaguarla y un hidrante en la zona de combustible.

El aire acondicionado propio del laboratorio permite escoger la humedad y la temperatura del medio ambiente, que puede utilizarse para el confort de las personas que ahí laboran, el acondicionamiento de vehículos y motores o el equipo que va a operarse. Es importante mencionar que el LCE tiene herramientas propias de la actividad que se realice, automotrices o electrónicas. En el caso de máquinas herramienta u otros instrumentos especiales se tiene la opción de solicitarlos temporalmente a la dependencia correspondiente de la Facultad.

La infraestructura con la que cuenta el laboratorio asegura su competencia técnica y la seguridad de sus usuarios de acuerdo al Reglamento de Seguridad del LCE. Sin embargo, se busca que la calidad de su funcionamiento y operación sea reconocida no únicamente por la UNAM, para esto último se requieren diversos elementos, expuestos en la última parte de este capítulo.

2.4 Proceso de certificación del laboratorio

Para que el Laboratorio de Control de Emisiones (LCE) funcione de manera eficaz se identifican y gestionan numerosas actividades relacionadas entre sí. Una actividad que utiliza recursos, y su gestión permite que los elementos de entrada se transformen en resultados, se puede considerar un proceso. Un sistema de gestión de la calidad permite ofrecer servicios de calidad y confiables, logrando la satisfacción del cliente y optimizar los recursos.

Se debe establecer, documentar, implementar y mantener un sistema de gestión de calidad y mejorar continuamente. Adoptar un enfoque basado en procesos puede alcanzarse mediante el cumplimiento de requisitos, por lo tanto la organización involucrada tiene que identificar los procesos que le son necesarios, así como su aplicación e interacción dentro de la misma.

Asimismo se determina el alcance que tendrá el sistema, puede abarcar a toda la organización y sus procesos o tan sólo algunos de ellos. En este caso se pretende certificar el laboratorio en únicamente dos de los procesos que realiza: "Impartición de cursos" y "Realización de una prueba para medir emisiones contaminantes y/o consumo de combustible en vehículos ligeros, mediante un dinamómetro de chasis".

Por ello se requiere establecer los criterios y métodos necesarios para asegurar la eficacia en la operación y su control, al tiempo de asegurar la disponibilidad de recursos necesarios e información necesaria así como su seguimiento. Al realizar esto último, su medición y análisis, además de la implementación de las acciones necesarias permite alcanzar los resultados planificados y la mejora continua.

El sistema de gestión de calidad proyectado debe documentarse a manera de incluir: las declaraciones documentadas de la política y objetivos de la calidad, los procedimientos requeridos; y la elaboración de un manual de calidad, así como los documentos necesarios por la organización para asegurar la eficaz planeación, operación y control de procesos, y los registros requeridos.

De manera que después de efectuar la implementación, se requiere que alguna entidad externa (en este caso a la **UNAM** y al **LCE**) evalúe los diferentes elementos que constituyen el sistema, para así proceder a emitir un documento de certificación.

En México el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (**INMC**) cuenta la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación (**EMA**), además de personal capacitado para prestar dicho servicio. Al iniciar el proceso de certificación se debe especificar el alcance que se busca, además de implementar el correspondiente sistema de gestión de calidad.

Después de una revisión documental, donde debe encontrarse el alcance del sistema de gestión así como los procedimientos referidos y la interacción entre ellos; se procede con la auditoria de certificación, la cual consiste en la visita a las instalaciones por parte de un grupo técnico del **INMC** para verificar la implementación y conformidad del sistema de gestión calidad con la respectiva norma de referencia.

Si el resultado del dictamen generado por la auditoria es positivo, se recibe un certificado y número de registro, que tienen un cierto período de validez. Para mantener la certificación es necesario cada cierto tiempo pasar una auditoria de vigilancia, la cual verifica que se siga cumpliendo con las condiciones establecidas. Lo anterior puede servir también para preverificar el estado de la organización, con objeto de tener una segunda auditoria de certificación en caso de no haber tenido un resultado de dictamen positivo en la primera.

Las auditorías internas se incluyen en las revisiones efectuadas, las cuales pueden resultar en ciertas acciones preventivas o correctivas. Todo esto sirve para mantener la certificación, con el propósito de mantener los niveles de calidad, el cumplimiento de los requisitos y elementos verificados por las respectivas auditorias.

Este apartado se incluye en el presente trabajo de tesis, debido a la importancia de la actualización del dinamómetro de chasis para la certificación del **LCE**, con la cual las pruebas que realice este último con dicho equipo tendrán validez ante las instituciones nacionales que regulan las emisiones contaminantes de los gases de escape de un vehículo.

3. DINAMÓMETRO DE CHASIS

En la actualidad existen dinamómetros de chasis que son diseñados, construidos e instalados por empresas especializadas en ello, por lo que dichos equipos tienen un alto costo (**figuras 3.1, 3.2 y 3.3**) [19], [20], [21]. [22] y [23]. Por esta razón, la UNAM ha desarrollado su propio dinamómetro de chasis, gracias a trabajos de licenciatura y maestría, como éste que constituye una actualización en su parte mecánica.

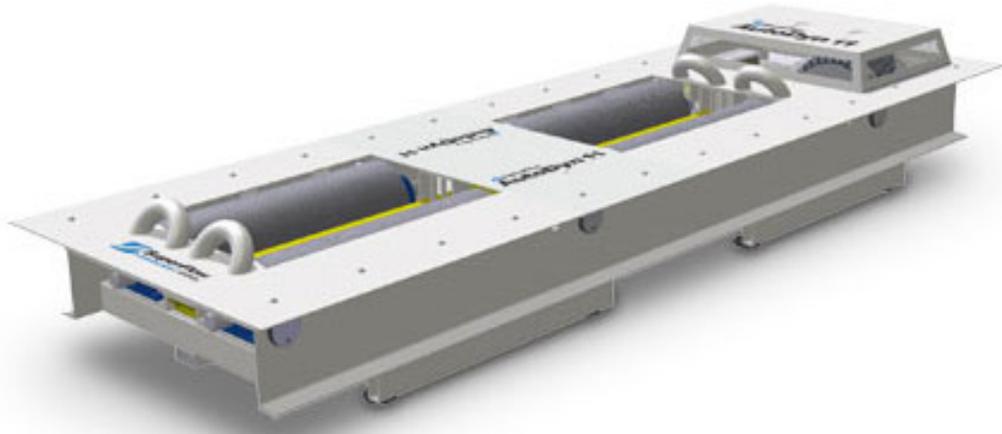


Figura 3.1. Dinamómetro de chasis: *AutoDyn 11* (4 rodillo, freno electromagnético).



Figura 3.2. Dinamómetro de chasis: *Dinamotor* (4 rodillos, freno hidráulico) .

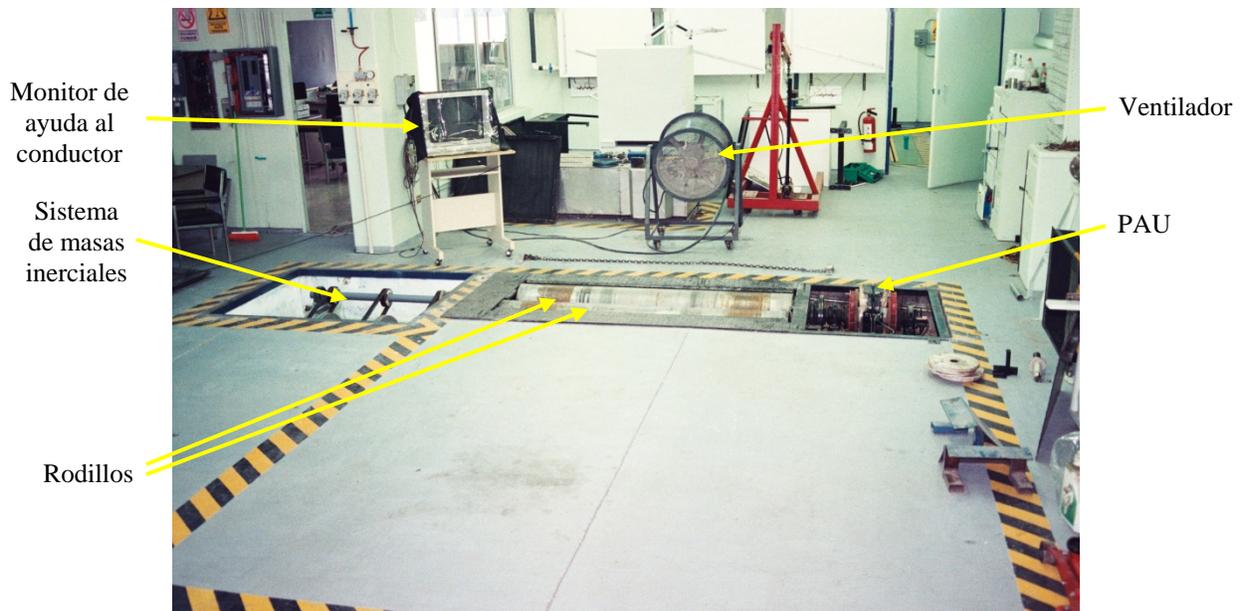


Figura 3.3. Dinamómetro de chasis: TAT (2 rodillos, freno electromagnético).

A continuación se presenta una descripción sucinta de dicho dinamómetro de chasis, de los sistemas que complementan las masas inerciales instaladas (a las cuales se dedica el siguiente capítulo), así como una muestra de la normatividad que rige las características físicas y mecánicas de estos equipos.

3.1 Descripción del equipo

El dinamómetro de chasis (rodillos) instalado en el LCE permite ensayar el motor de un vehículo ligero (no más de 2722 kg de peso bruto vehicular) sin necesidad de separarlo de éste último. Puede observarse el equipo en su conjunto y algunos aditamentos en la **fotografía 3.2.1.**



Fotografía 3.2.1. Vista general (Dinamómetro de chasis, aditamentos)

Para su operación el vehículo es colocado sobre el par de rodillos, al aplicar la carga proporcionada por la PAU y la sección de inercia se puede simular el comportamiento al circular sobre la carretera (parte de ello es la contribución de este trabajo), haciendo posible efectuar mediciones de diferentes gases provenientes del vehículo durante su funcionamiento.

Durante una prueba se coloca un ventilador frente al vehículo, correspondiente al flujo de aire que sirva para enfriar el motor del mismo durante su desplazamiento. La persona encargada de la conducción puede observar la información referente a la prueba en todo momento desde su asiento, gracias a un monitor ubicado a su lado, que le permite seguir el correspondiente ciclo de manejo.

Un analizador de cinco gases permite medir las concentraciones en volumen de: oxígeno O_2 (%), monóxido de carbono CO (%), bióxido de carbono CO_2 (%), hidrocarburos HC (ppm) y óxidos de nitrógeno NO_x (%). La correspondiente señal generada de dicho dispositivo, así como la que controla la aplicación de la carga en función de la intensidad de la corriente sobre las bobinas de la PAU son parte de una computadora personal, base del sistema.

Asimismo esta última actúa como estación de análisis de datos y se encarga del estado de otros parámetros de mecanismos del dinamómetro, tal es el caso de una válvula solenoide para actuar sobre un colchón de aire que sujeta o libera las ruedas colocadas sobre los rodillos. Conjuntamente otro grupo de dispositivos electrónicos conectados entre sí, operan de modo que pueden recibir y transmitir señales, algunos inclusive pueden procesarlas (transductores).

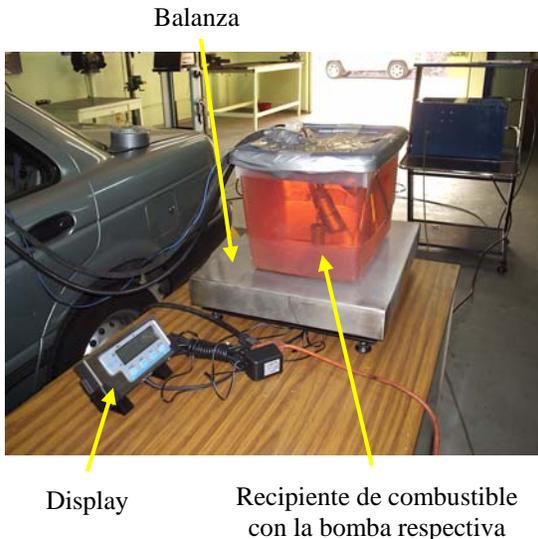
Con esto se tiene la información respectiva a la velocidad angular (rodillo o rueda del vehículo), el par (obtenida a través de una celda de carga y el brazo de palanca respectivo), la temperatura (en diferentes puntos incluyendo la del aceite de lubricación del motor) y el régimen de giro del motor.

Además se cuenta con lecturas básicas de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa de una estación meteorológica. Toda esta información permite aplicar los factores de corrección correspondientes a las mediciones de los gases de los vehículos sometidos a prueba o el conocimiento de las condiciones iniciales de la misma.

El sistema tiene un software que se encarga de controlar los dispositivos del dinamómetro en forma automática, desplegar las bases de interés y generar una base de datos. Proporciona además una interfase para el usuario, el programa está diseñado para llevar a cabo la prueba y obtener la información recabada durante el periodo de operación.

3.2 Sistemas adicionales

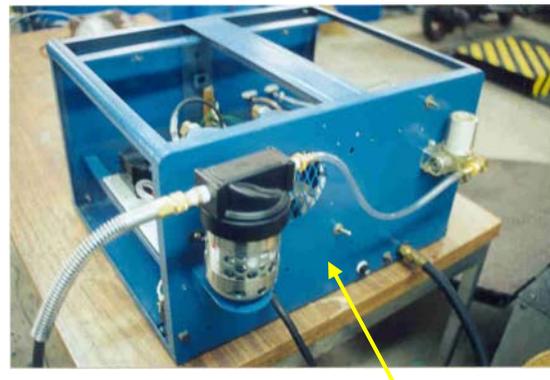
Este apartado describe brevemente algunos de los sistemas diseñados y fabricados (o ensamblado) en la UNAM para este dinamómetro de chasis, y se muestran en tres grupos: **1)** aquellos que efectúan la medición de algunos parámetros, **2)** aquellos que están encargados de aplicar la carga de camino y de inercia a un vehículo sometido a prueba, y **3)** el sistema encargado del accionamiento de los volante de inercia, que utilizan embragues neumáticos y válvulas neumáticas.



Fotografía 3.1.1. Consumo de combustible

El consumo de combustible del vehículo de pruebas se obtiene a partir de una báscula digital, marca **Salter Brecknell** con una resolución 0.002 kg y rango desde 0.001 a 30 kg (**fotografía 3.1.1.**), sobre la cual se coloca un recipiente con el combustible para alimentar el motor del vehículo mediante su respectiva bomba de transferencia. Así al obtener la variación en el peso del combustible conforme éste es utilizado por el motor, puede determinarse el consumo del mismo y considerando la distancia recorrida uno puede obtener el rendimiento en **km/l** o **km/kg** de combustible.

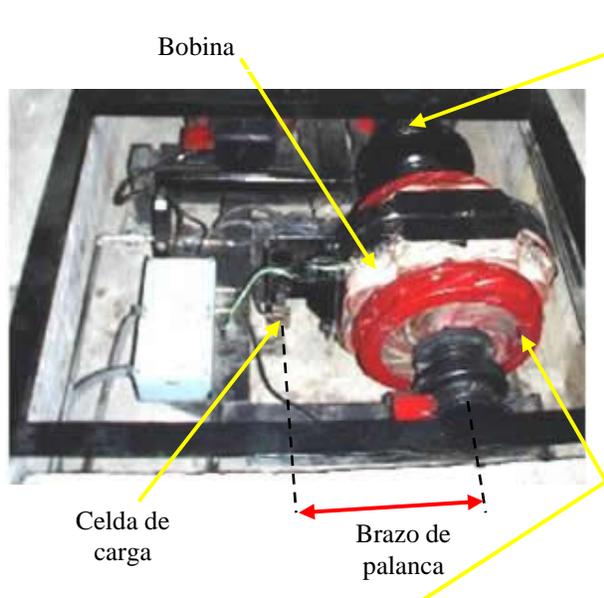
El analizador de cinco gases, es un instrumento de configuración propia, acorde a las necesidades que se tengan (**fotografía 3.1.2.**). Su carácter modular le permite utilizarse con otros equipos además del dinamómetro de chasis, como lo son: el banco de motores o el de motocicletas (referido en el anterior capítulo). El sistema de muestreo con que cuenta le permite un adecuado análisis en tiempo real (segundo a segundo), de los gases contaminantes que contemplan las normas ecológicas nacional e internacionales que se comentan en el **Apartado 1.3.**



Fotografía 3.1.2. Analizador de cinco gases contaminantes.

Respecto a la carga de inercia, ésta se aplica mediante el conjunto de volantes instalado que puede embragarse al eje motriz, en unión con los rodillos, por tanto permite emplearlos de acuerdo al peso del vehículo. Conectado al mismo eje se tiene la Unidad de Absorción de Potencia (**PAU**), un freno electromagnético que proporciona una variación de la intensidad aplicada sobre su rotor (eje motriz) en función de la corriente aplicada sobre sus bobinas. La

intensidad del par sobre dicho eje puede obtenerse mediante la fuerza registrada por una celda de carga multiplicada por su correspondiente brazo de palanca (**fotografía 3.1.3.**).



Fotografía 3.1.3. PAU



Fotografía 3.1.4. Acoplamiento de los volantes de inercia.

Para acoplar cada volante (**fotografía 3.1.4.**) se tiene en cada una de sus flechas un embrague neumático (**figura 3.1.1.**), que es accionado mediante un conjunto de válvulas para lograr que la respectiva banda ejerza el efecto deseado sobre los volantes (**fotografía 3.1.4.**). Todo ello permite aplicar diferentes grados de carga, debidas al rodamiento y los efectos inherentes al movimiento.

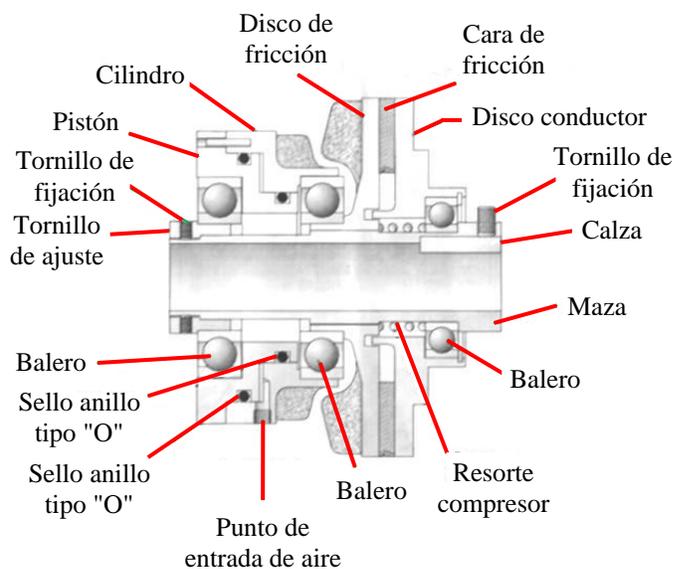
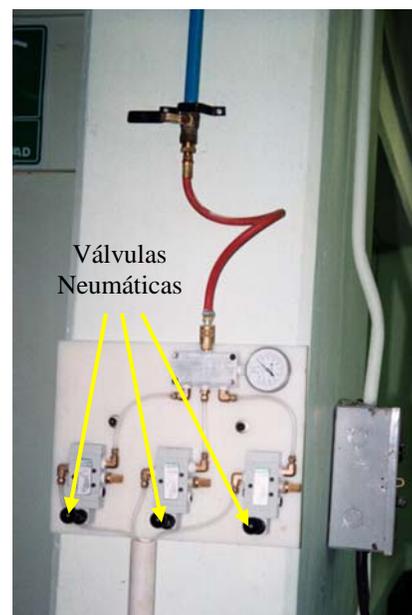


Figura 3.1.1. Embrague Neumático (diagrama)



Fotografía 3.1.5. Sistema de Accionamiento de los volantes

De manera que una vez identificados las partes generales del dinamómetro del LCE, describir algunos de sus sistemas, el siguiente apartado de este capítulo da una muestra de la normatividad que rige las características físicas y mecánicas de estos equipos.

3.3 Normas aplicables

Así como los vehículos y sus emisiones contaminantes han dado origen a una normatividad en cada país, ésta posee también las características referentes del equipo utilizado para su revisión. Un ejemplo de ello puede apreciarse en la Norma Oficial Mexicana NOM-047-ECOL-1999¹, donde están determinadas las especificaciones para el dinamómetro de chasis a utilizar.

Esta última establece que el dinamómetro cuente con los rodillos necesarios para sostener las ruedas motrices de los vehículos a examinar y permitir su rotación continua. Asimismo que la potencia generada por el motor que pasa a los rodillos a través de las llantas será transmitida a una unidad de absorción de energía, cuyo diseño permitirá variar y controlar la carga aplicada (en incrementos de 0.1 kilowatt).

De igual manera refiere que su marco y conjuntos del rodillo (del dinamómetro) deberán colocarse al nivel del piso de forma tal que permitan que los vehículos de cualquier marca se coloquen fácilmente sobre los rodillos y los frenos de estos últimos permitan una entrada y salida rápida de los vehículos.

Por lo que además de las características anteriores el dinamómetro deberá tener los siguientes valores de capacidad:

- Los rodillos deben soportar un peso máximo de 3500 kg en el eje durante una prueba funcional.
- Cada rodillo debe tener un diámetro mínimo (D) de 20.32 cm (8 pulgadas).
- La distancia entre los ejes de un par de rodillos debe ser acorde a la siguiente expresión:

$$\text{Distancia entre ejes} = (61.913 + D) * \text{sen } 31.62^\circ$$

- Los rodillos deben alojar vehículos con una separación mínima interior entre las llantas de 86 cm y una distancia máxima entre las caras exteriores de los neumáticos de 250 cm.
- La inercia total rotativa del dinamómetro debe estar en el rango de 272.15 a 907.18 kg (600 a 2000 lbs) y con una tolerancia máxima de + 18.14 kg (40 lbs).
- Todos los dinamómetros deben tener la capacidad de absorber 19 kW a cualquier velocidad que sea superior a 22 kilómetros por hora de forma continua en pruebas con una duración de 5 minutos con 30 segundos de reposo entre prueba y prueba.
- El dinamómetro debe permitir la realización de pruebas a cualquier velocidad entre 0 y 100 km/h.

¹ Que establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los vehículos definidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-041-Ecol-1999.

Todo lo cual con el objeto de contar con una incertidumbre del dinamómetro determinada, que para el caso del sistema total deberá ser inferior a ± 0.186 kW o $\pm 2\%$ de la carga requerida, lo que resulte mayor; mientras que para auditorías de campo el límite de aprobación es de ± 0.37 kW.

Igualmente el error por simulación de inercia deberá ser menor a $\pm 1\%$ para velocidades entre 15 y 100 km/h, en tanto la medición de la velocidad debe contar con una incertidumbre inferior a 0.1 kilómetro por hora.

La información contenida en la norma a este respecto concluye con la expresión de carga del dinamómetro, los períodos requeridos para la calibración estática y dinámica, el criterio a cumplir en cada una de ellas, así como las consecuencias de no aprobarlas.

De este modo el siguiente paso es enfocarse en la potencia requerida por el dinamómetro para la simulación de un vehículo, producida de la inercia y la fricción de los elementos del mismo; con el propósito de lograr la caracterización mencionada al inicio de este trabajo, así como su verificación posterior.

4. VOLANTES DE INERCIA

4.1 Determinación de parámetros

Los volantes de inercia empleados en dinamómetros de chasis son discos, por lo general contruidos de acero, cada uno de ellos dimensionado para simular un valor de inercia lineal. De manera que un vehículo de peso x (en [N] o [lb]) requiere de un volante con un determinado momento de inercia para la simulación de la inercia de dicho vehículo al desplazarse. Dicho valor recibe el nombre de *peso inercial*, el cual toma un rango de pesos de los vehículos debido a que no es posible que sea exacto para cada uno de ellos.

El análisis efectuado al dinamómetro de chasis del LCE, permitió determinar en primer lugar la potencia debida a la inercia (masa) de sus elementos¹ (figura 4.1.1.), a partir de su volumen (Vol_x), calculado como el de un cuerpo cilíndrico (ecs. (23) a (31) anexo B.II.), o de su peso² (W_x). Entonces la magnitud de la masa de cada elemento (tabla 4.1.1.) se calculó a través de las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

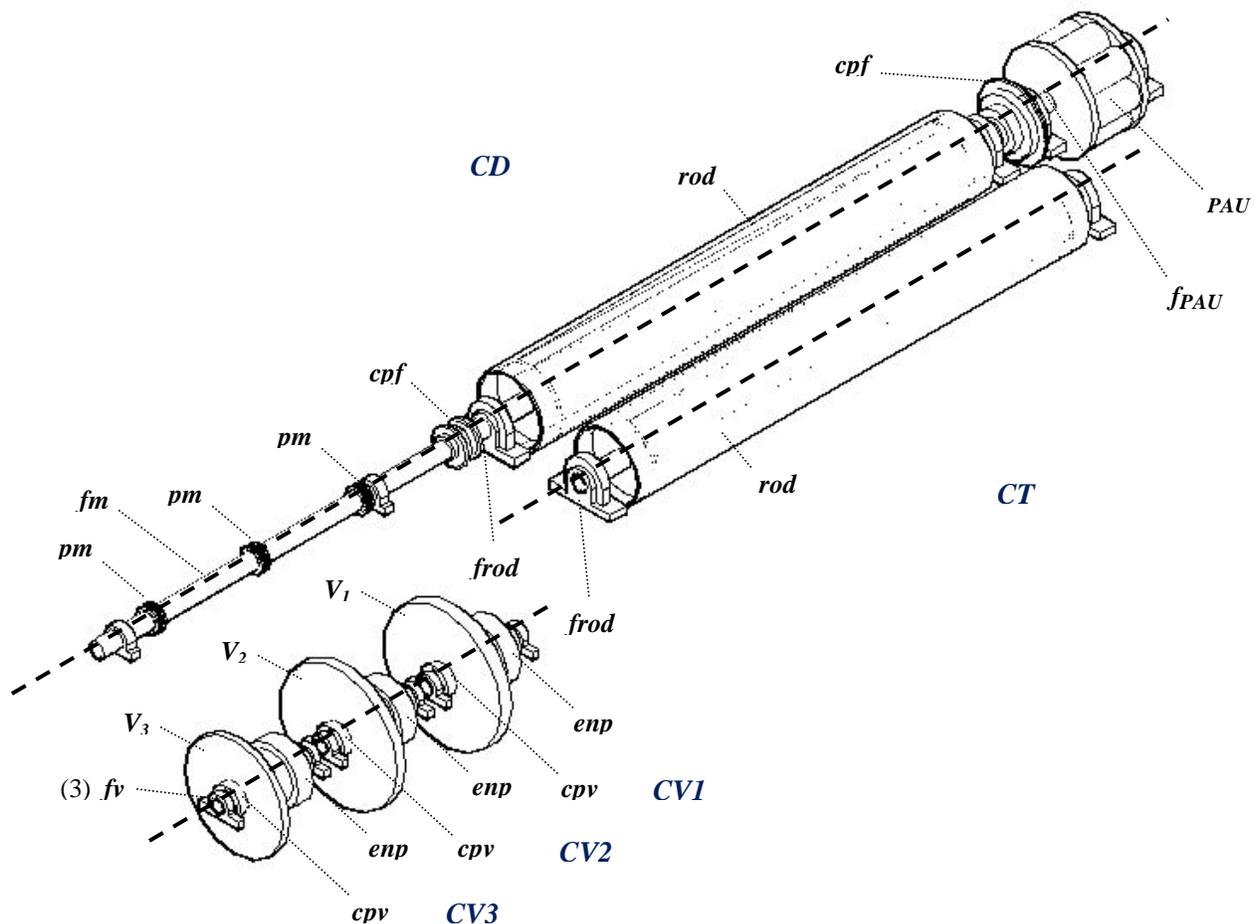


Figura 4.1.1. Elementos y conjuntos del dinamómetro de chasis.

¹ la denominación de los elementos y los conjuntos de l dinamómetro de chasis está en el **Anexo B.I.**

² obtenido experimentalmente.

$$m_x = \rho_{acero} Vol_x \quad (1) \qquad m_x = \frac{W_x}{g} \quad (2)$$

$$\rho_{acero} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

x - denominación del elemento (**figura 4.1.1**)

Tabla 4.1.1. Masa de los elementos del dinamómetro de chasis.

m_1	91.9434	m_2	73.3225	m_3	34.7640	m_{cpv}	2.8474	[kg]
m_{fv}	8.7235	m_{fm}	41.6759	m_{frod}	64.8855	m_{fPAU}	19.8883	[kg]
m_{enp}	16.6152	m_{pm}	0.9430	m_{PAU}	42.4812	m_{rod}	101.2632	[kg]
m_{cpf}	4.9397	[kg]						

Además, el cálculo del momento de inercia de cada elemento (I_x) se hizo determinando el radio de giro (R_x) (3), de cada elemento de acuerdo a su geometría (**tabla 4.1.2.**). De manera que para cada conjunto que integra al dinamómetro (**figura 4.1.1.**), se obtuvo un momento de inercia sumando los momentos de cada elemento de dicho conjunto (**tabla 4.1.3.**).

$$I_x = m_x R_x^2 \quad (3)$$

Tabla 4.1.2. Radio de giro y momento de inercia de masa de los elementos del dinamómetro de chasis.

R_1	0.2731	R_2	0.2731	R_3	0.2286	R_{cpv}	0.0618	[m]
I_1	3.4275	I_2	2.7333	I_3	0.9083	I_{cpv}	0.0109	[kg . m ²]

R_{fv}	0.0282	R_{fm}	0.03175	R_{frod}	0.03175	R_{fPAU}	0.03175	[m]
I_{fv}	0.0069	I_{fm}	0.0420	I_{frod}	0.0654	I_{fPAU}	0.0200	[kg . m ²]

R_{enp}	0.1016	R_{pm}	0.0762	R_{PAU}	0.2499	R_{rod}	0.1524	R_{cp}	0.0635	[m]
I_{enp}	0.0858	I_{pm}	0.0027	I_{PAU}	1.3269	I_{rod}	1.1760	I_{cpf}	0.0100	[kg . m ²]

Tabla 4.1.3. Momento de inercia de masa de los conjuntos del dinamómetro de chasis.

I_{CD}	3.8332	[kg . m ²]	I_{cv1}	7.3642	[kg . m ²]
I_{CT}	1.2448	[kg . m ²]	I_{cv2}	6.6701	[kg . m ²]
			I_{cv3}	4.8451	[kg . m ²]

La aportación al par de torsión (torque) del dinamómetro debido a la inercia de cada conjunto del dinamómetro de chasis, está en función del cambio de su velocidad angular, y la correspondiente potencia, depende asimismo de su velocidad angular como lo muestran las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$T_{i q} = I_q \alpha_q \quad (4)$$

$$N_{i q} = \frac{T_q \omega_q}{746} \quad (5)$$

donde:

$T_{i q}$ - par de torsión del conjunto q debido a su inercia. [N . m]

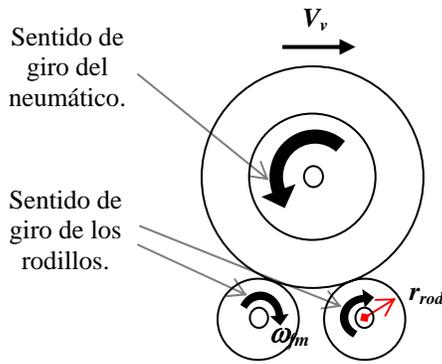
α_q - aceleración angular del conjunto q . [rad/s²]

$N_{i q}$ - potencia del conjunto q debido a su inercia. [W]

746 - factor de conversión [W] → [HP]

q - denominación del conjunto (**figura 4.1.1.**)

La velocidad de la flecha motriz (f_m) así como el radio correspondiente, determina la velocidad y la aceleración angular propia de cada elemento y conjunto que integra el dinamómetro de chasis. La relación de éstas últimas y la velocidad lineal del vehículo (**figura 4.1.2.**) que les da origen, se calculan a través de las ecuaciones (6) a (9).



$$RP = \frac{r_{pm}}{r_{enp}} \quad (6)$$

$$\omega_{fv} = RP \omega_{fm} \quad (7)$$

$$\alpha_{fv} = RP \alpha_{fm} \quad (8)$$

$$\omega_{fm} = V_v r_{rod} \quad (9)$$

Figura 4.1.2. Neumático sobre los rodillos de rodadura.

Al existir diferentes ciclos de manejo en todo el mundo, algunos más rápidos que otros³, y con el propósito de que este dinamómetro sea capaz de reproducir cualquier ciclo de manejo; la UVI se diseñó en función de las condiciones más críticas, esto es que para la selección del elemento que transmite la potencia de los volantes de inercia, hacia los rodillos de rodadura, se estableció una condición de operación de máxima potencia y de máximo par que asegure su funcionamiento.

Así, la aceleración angular de la flecha motriz (α_{fm}) se calculó con el lapso entre dos velocidades angulares definidas, como lo muestra la ecuación (10). Dichos valores se obtuvieron de las velocidades lineales de un vehículo de peso promedio, de 0 a 100 km/h, calculados mediante la ecuación (9), estableciéndose un tiempo entre ellas de 4 segundos (el fabricante del vehículo suele proporcionar dicho valor, el cual suele ser mucho mayor).

$$\alpha_{fm} = \frac{d\omega_{fm}}{dt} = \frac{\omega_{fm i+1} - \omega_{fm i}}{\Delta t} \quad (10)$$

³ es decir que alcanzan velocidades más elevadas o tasas de aceleración más pronunciadas, unos que otros.

donde:

α_{fm} - aceleración angular de la flecha motriz [rad/s²]

ω_{fm} - velocidad angular de la flecha motriz [rad/s]

i - instante inicial

$i + 1$ - instante final

Δt - lapso entre i e $i + 1$ [s]

Los valores de par y potencia inercial⁴ obtenidos para cada elemento y conjunto del dinamómetro de acuerdo a las ecuaciones anteriores: (4) a (10), se muestran en las **tablas 4.1.4., 4.1.5. y 4.1.6.**, las cuales dan sustento al análisis hecho para el uso de bandas que transmiten la potencia de la UVI, y que se muestra en el **anexo B.III.** (ecuaciones (32) y (33))

Tabla 4.1.4. Par o torque inercial de cada elemento del dinamómetro de chasis.

α_{fv}	34.1754	rad/s ²	α_{fm}	45.5672	rad/s ²	$V_v \rightarrow 0 - 100$ km/h en 4 s
T_{i1}	117.1356	[N . m]	T_{iPAU}	60.46116	[N . m]	
T_{i2}	93.4126	[N . m]	T_{irod}	53.5851	[N . m]	
T_{i3}	31.0432	[N . m]	T_{ipm}	0.1248	[N . m]	
T_{ienp}	2.9307	[N . m]	T_{icpf}	0.4538	[N . m]	
T_{ifv}	0.2370	[N . m]	T_{ifm}	1.9144	[N . m]	
T_{icpv}	0.3722	[N . m]	T_{ifrod}	2.9805	[N . m]	
			T_{ifPAU}	0.9136	[N . m]	

Tabla 4.1.5. Potencia inercial de cada elemento del dinamómetro de chasis.

ω_{fv}	136.7017	[rad/s]	ω_{fm}	182.2689	[rad/s]	$V_v = 100$ km/h
N_{i1}	21.4647	[HP]	N_{iPAU}	14.7724	[HP]	
N_{i2}	17.1175	[HP]	N_{irod}	13.0924	[HP]	
N_{i3}	5.6885	[HP]	N_{ipm}	0.0305	[HP]	
N_{ienp}	0.5370	[HP]	N_{icpf}	0.1109	[HP]	
N_{ifv}	0.0434	[HP]	N_{ifm}	0.4677	[HP]	
N_{icpv}	0.0682	[HP]	N_{ifrod}	0.7282	[HP]	
			N_{ifPAU}	0.2232	[HP]	

⁴ llamados así porque tienen como base la inercia del elemento del dinamómetro.

Tabla 4.1.6. Potencia inercial de cada conjunto del dinamómetro de chasis.

N_{iCD}	29.5836	[HP]	N_{iCV1}	22.1133	[HP]
N_{iCT}	13.8206	[HP]	N_{iCV2}	17.7662	[HP]
			N_{iCV3}	6.3372	[HP]

Por otra parte, la pérdida de potencia en el dinamómetro⁵ se calculó del par de rozamiento en cada rodamiento del mismo. Siguiendo con los cálculos, se obtienen las fuerzas de reacción en cada chumacera, con las cuales se determina la fuerza radial resultante respectiva, por medio de la ecuación (11).

$$F_{r_j} = (jY^2 + jZ^2)^{1/2} \quad (11)$$

donde

r - fuerza resultante radial en el rodamiento j .
 j - punto de aplicación - chumacera - (figura 4.1.3.)

Entonces, el par debido a la fricción en cada chumacera se determinó tal como lo explica la referencia [6] para un rodamiento de bolas. Los valores de par así obtenidos (T_{fr_j}), fueron sumados para obtener el **par de oposición total** al movimiento en cada conjunto del dinamómetro. (T_{OP_q} , ecuación (12) figura 4.1.3.)

$$T_{OP_q} = \sum_{j \in q} T_{fr_j} \quad (12)$$

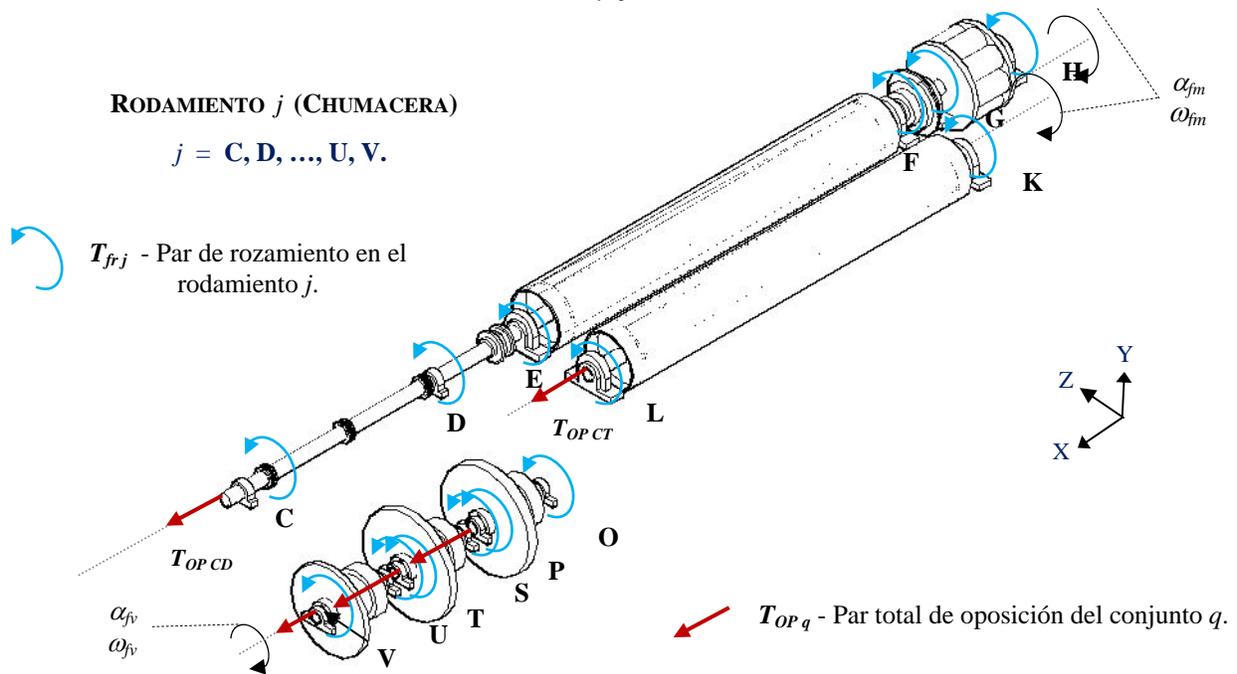


Figura 4.1.3. Par de rozamiento en cada rodamiento y de oposición de los conjuntos del dinamómetro.

⁵ Debido a que este análisis ya fue realizado en [4], únicamente se presenta un breve resumen del mismo en este apartado del capítulo y en el anexo B.IV. (ecuaciones (34) a (43))

Resumiendo, la potencia pérdida por fricción del dinamómetro depende de todos los resultados obtenidos anteriormente y la velocidad de cada conjunto (ecuación (13)).

$$N_{fr} = \sum (T_{OPq} * \omega_q) \quad (13)$$

En efecto, la potencia del dinamómetro que actúa sobre el vehículo, como lo muestra la ecuación (14), es igual a su potencia inercial ($\sum N_{iq}$, que incluye el (los) volante(s) acoplado(s)), la que demanda o absorbe la unidad de absorción de potencia (N_{PAU}) y la que se pierde por la fricción en los rodamientos (N_{fr}).

$$N_{din} = \sum N_{iq} + N_{PAU} - N_{fr} \quad (14)$$

Dicho valor de potencia en el dinamómetro, se igualó a aquella que un vehículo requiere para una velocidad dada. Para todo esto, se consideró el movimiento acelerado de un vehículo sobre una pendiente, por tratarse del caso más general (figura 4.1.4).

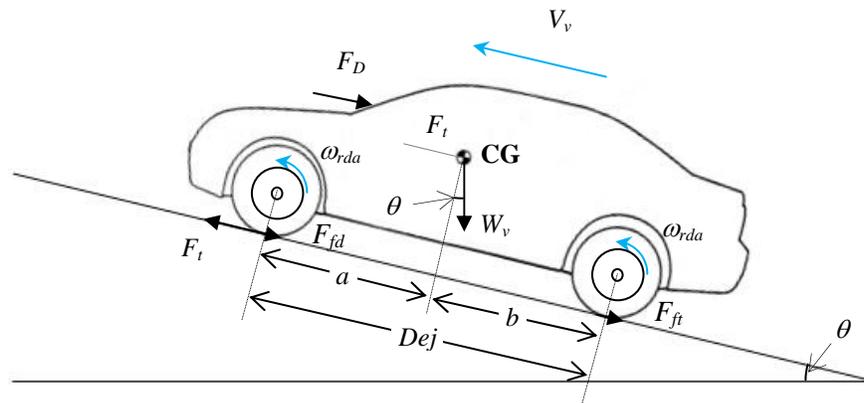


Figura 4.1.4. Diagrama de un vehículo en movimiento sobre una pendiente.

donde:

- V_v - velocidad lineal del vehículo [m/s]
- W_v - peso total del vehículo. [N]
- Dej - distancia entre los ejes del vehículo. [m]
- a, b - distancia de su centro de gravedad - CG - a la rueda delantera, trasera. [m]
- F_{frl}, F_{frt} - fuerzas de resistencia al rodamiento de las ruedas - delanteras, traseras. [N]
- F_D - fuerza resultante de la resistencia del aire. [N]
- ω_{rda} - velocidad angular de las ruedas. [rad/s]
- F_t - fuerza tractiva. [N]
- θ - ángulo de inclinación del camino. [°]

La sumatoria de fuerzas en la dirección de su movimiento permite obtener la fuerza de inercia correspondiente (15) ([1], [2]).

$$F_i = F_t - F_f - F_D - W \text{sen} \theta \quad (15)$$

Por supuesto, la última expresión cambia al considerar una superficie de desplazamiento horizontal ($\theta = 0^\circ$) para el vehículo, y como el motor no está se aplica ($F_t = 0$)⁶. Por lo que la fuerza de inercia (F_i) resultó únicamente función de la fuerza de resistencia al rodamiento (F_f ⁷ = $F_{fd} + F_{ft}$) y la fuerza de resistencia al aire (F_D), como lo muestran las ecuaciones (16) y (16a).

$$F_i = F_f + F_D \quad (16)$$

o

$$m_v V_v \frac{dV_v}{dt} = Wf + \frac{1}{2} \rho A_{fv} C_D V_v^2 \quad (16a)$$

donde:

m_v - masa del vehículo. [kg]

$\frac{dV_v}{dt}$ - aceleración lineal del vehículo [m/s²]

f - coeficiente de resistencia al rodamiento.

ρ - densidad del aire. [kg/m³]

A_{fv} - área frontal del vehículo. [m²]

C_D - coeficiente de resistencia al aire.

La última expresión desarrollada requiere de la densidad del aire, que desde luego estará en función de las condiciones atmosféricas (17) [2]. A su vez, el coeficiente de resistencia al rodamiento, se determina mediante diversas ecuaciones empíricas (18) (anexo B.IV. ecuaciones (44) a (47) [3], [7]), y el área frontal del vehículo mediante la ecuación (19) [2] (figura 4.1.5.), y el coeficiente de arrastre, que más adelante se explica con detalle.

$$\frac{\rho}{2} = \frac{P_0'}{(574 * T_0')} \quad (17) \quad \Rightarrow \quad @ \quad \begin{matrix} P_0' = 760 \text{ mm Hg} \\ T_0' = 15^\circ \text{C} \end{matrix} \quad \frac{\rho}{2} = 0.0127 \text{ kg/m}^3$$

$$f = \left(\frac{1}{P^{0.64}} \right) \left[0.02 + \left(\frac{V_v^{3.7}}{P^{1.44} * 142 * 10^7} \right) \right] \quad (18)$$

donde:

P - Presión absoluta de aire en el neumático. [kg/cm²]

V - velocidad lineal del vehículo. [km/h]

$$A_{fv} = c_{ll} BH \quad (19)$$

⁶ ensayo cost-down.

⁷ agrupando los valores de la fuerza de fricción en su sólo término debido a que se diferencia en poca magnitud la de las ruedas delanteras - F_{fd} - de las traseras - F_{ft} -.

donde:

c_{fl} - coeficiente de llenado del aire (0.7 - 0.85)

B - vía delantera del automóvil, según figura 4.1.5. [m]

H - altura máxima del automóvil. [m]

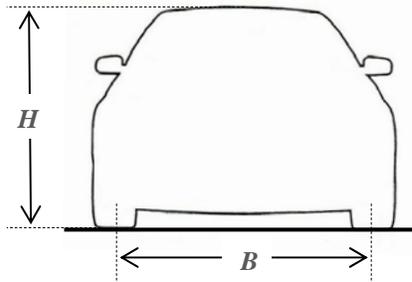


Figura 4.1.5. Dimensiones del vehículo para la determinación de su área frontal - A_{fv} -.

Y como es imposible tener una expresión de la magnitud del coeficiente de arrastre (C_D) para todos los vehículos, se recurrió a la información recopilada a ese respecto, ejemplo de ello lo constituyen las figuras 4.1.6. y B.IV.1. [1].

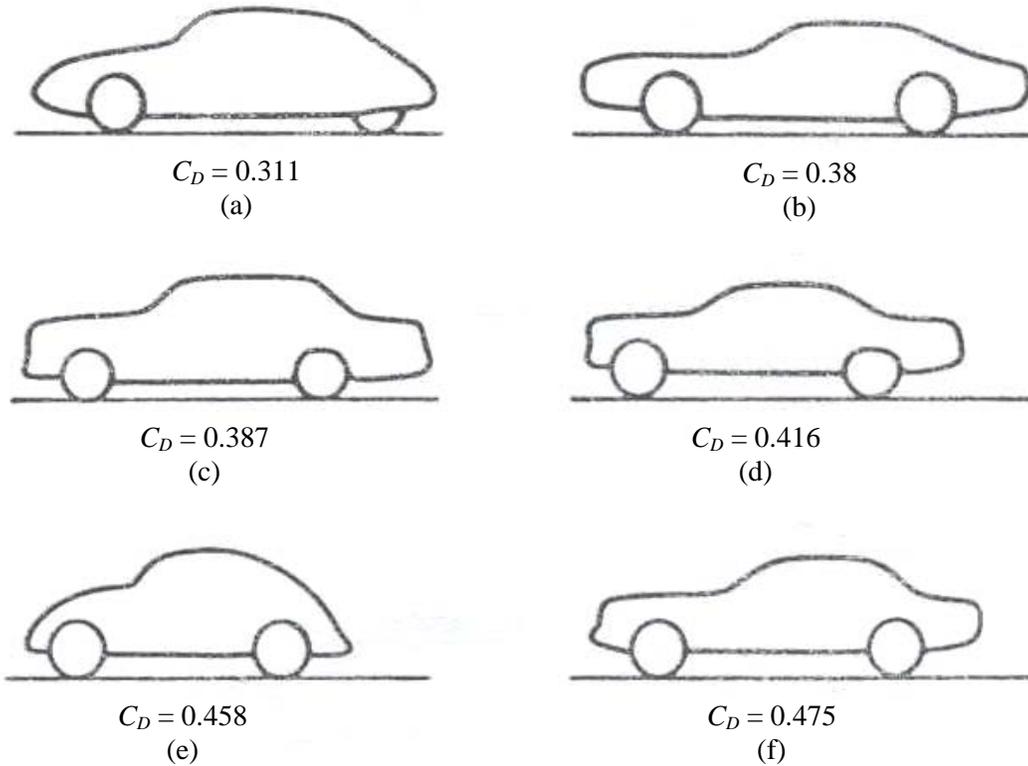


Figura 4.1.6. Coeficiente de arrastre - C_D - para diferentes automóviles de pasajeros. (a) Citroen DS 19, (b) Oldsmobile Toronado, (c) Mercedes Benz 300 SE, (d) Ford Falcon Futura, (e) VW 1200, (f) Ford Mustang.

Además existen tablas que contienen los valores de área frontal y el coeficiente de arrastre para diferentes de vehículos, los cuales son resultado de mediciones hechas mediante software CAD y ensayos en túneles de viento, un ejemplo de ello se muestra en la **tabla B.IV.1**.

Tomando en consideración todo lo anterior, es posible calcular la potencia del vehículo seleccionado (N_v) al multiplicar la fuerza total de inercia (F_i) por la velocidad del mismo vehículo (V_v).

$$N_{din} = N_v = F_i * V_v = (F_t + F_D) V_v \quad (20)$$

4.2 Caracterización

De acuerdo a la norma NMX-AA-11-1993-SCFI [13], vigente en nuestro país, un vehículo de pruebas debe vencer la carga en un dinamómetro de rodillos a 80 km/h. Asimismo esta norma establece un procedimiento para fijar la carga de camino en el dinamómetro, además de la carga de inercia.

Por lo que efectuando un proceso de desaceleración libre⁸ de los rodillos de rodadura del dinamómetro de chasis, es posible obtener la potencia absorbida por el movimiento de sus elementos (N , [HP]). Dicho valor depende de la inercia equivalente de los mismos (W_i , [lb])⁹, así como del intervalo de tiempo (Δt , [s]) para que se modifique la velocidad del vehículo (V_v , [ft/s]) utilizado para impulsarlos, de acuerdo a la ecuación (21)¹⁰.

$$N = \frac{W_i (V_{v1}^2 - V_{v2}^2)}{2 \times 32.2 \times 550 \Delta t} \quad (21)$$

donde:

V_{v1} - Velocidad inicial del vehículo (80.67 ft/s = 88 km/h)

V_{v2} - Velocidad final del vehículo (66 ft/s = 72 km/h)

Esta última ecuación representa la cantidad de movimiento de los elementos del dinamómetro de chasis, al igual que la potencia inercial calculada anteriormente para los mismos por medio de la ecuación (5), de manera que se igualaron ambas con el propósito de obtener el valor de su inercia equivalente (W_i) - expresión (a) -.

$$\frac{T_q \omega_q}{746} = \frac{W_i (V_{v1}^2 - V_{v2}^2)}{2 \times 32.2 \times 550 \Delta t} \quad (a)$$

⁸ ensayo cost-down.

⁹ la cual genera un valor de potencia acorde al momento de inercia de un vehículo al desplazarse. (**Apartado 4.1**)

¹⁰ cuyas variables deben tener unidades del sistema inglés.

En consecuencia al despejar la inercia equivalente (W_i) de la expresión (a), se encontró que ésta depende del par generado por un grupo de elementos del dinamómetro de chasis (T_q) a cierta velocidad angular (ω_q)¹¹, de las velocidades inicial y final del vehículo en el proceso de desaceleración libre (V_{v1} y V_{v2}) y de un grupo de términos constantes - expresión (b) -.

$$W_i = \left(\frac{2 \times 32.2 \times 550}{746} \right) \frac{T_q \omega_q \Delta t}{(V_{v1}^2 - V_{v2}^2)} \quad (\text{b})$$

Porque si bien dichos valores de velocidad del vehículo son establecidos por la norma [13], no se sustituyeron en la expresión (b) debido a la dificultad para registrarlos exactamente al efectuar las pruebas en el dinamómetro de chasis del LCE - expresión (c) -.

$$W_i = 47.4798 \frac{T_q \omega_q \Delta t}{(V_{v1}^2 - V_{v2}^2)} \quad (\text{c})$$

Posteriormente se sustituyó el par mencionado anteriormente (T_q) en la expresión (c), por la inercia del grupo de elementos del dinamómetro (I_q) y la aceleración angular (α_q) de los mismos que lo originan de la ecuación (4) - expresión (d) -.

$$W_i = 47.4798 \frac{(I_q \alpha_q) \omega_q \Delta t}{(V_{v1}^2 - V_{v2}^2)} \quad (\text{d})$$

Para finalmente sustituir la aceleración angular (α_q) en la expresión (d) a partir de la ecuación (10), desglosándola en los valores inicial y final de velocidad angular de los elementos ($\omega_{q\ i+1}$, $\omega_{q\ i}$) y el intervalo de tiempo (Δt) que la constituyen - expresión (e) -.

$$W_i = 47.4798 \frac{I_q (\omega_{q\ i+1} - \omega_{q\ i}) \omega_q \Delta t}{\Delta t (V_{v1}^2 - V_{v2}^2)} \quad (\text{e})$$

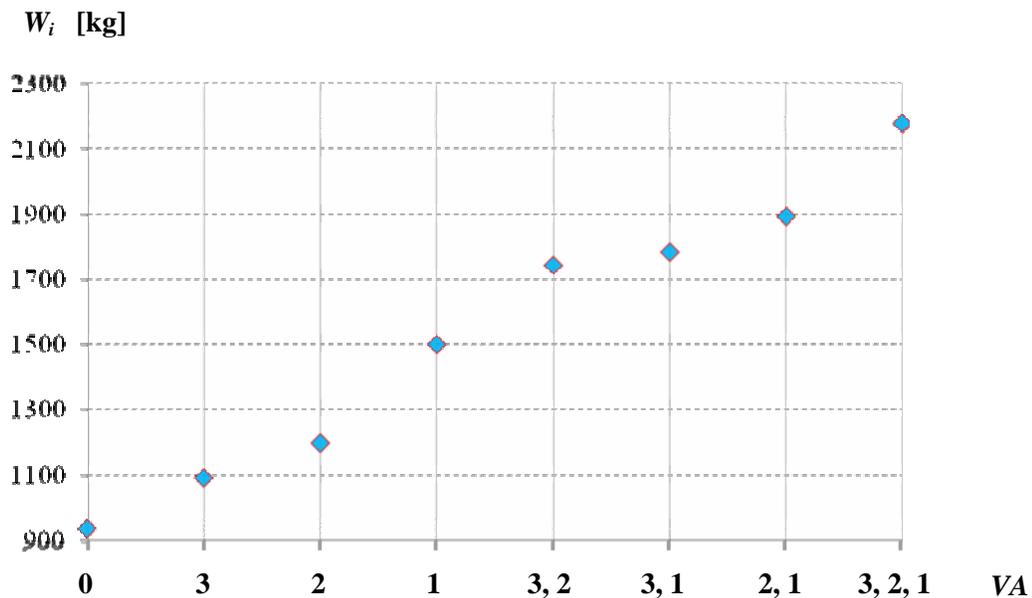
Por lo que al sustituir los subíndices utilizados para identificar las velocidades angulares y lineales que aparecen en la última expresión, y eliminar el mismo intervalo de tiempo (Δt) de su numerador y denominador, el resultado es la ecuación (22).

¹¹ a 80 km/h de velocidad del vehículo.

$$W_i = 47.4798 \frac{I_q (\omega_{q_{i+2}} - \omega_{q_i}) \omega_{q_{i+1}}}{(V_{v1}^2 - V_{v2}^2)} \quad (22)$$

estableciendo que la inercia equivalente (W_i) de un grupo de elementos del dinamómetro depende de su inercia (I_q), de su velocidad angular (ω_q), y de la velocidad lineal del vehículo que los impulsa (V_v) en tres instantes determinados (88 km/h cuyo subíndice es q_{i+2} o bien v_1 , 80 km/h cuyo subíndice es q_{i+1} o bien v_2 y 72 km/h cuyo subíndice es q_i).

Así que la inercia equivalente de acuerdo a la ecuación (22), al utilizar los valores de inercia calculados (tabla 4.1.3.) y los valores de velocidad definidos en el párrafo anterior se muestran en la gráfica 4.2.1.



Gráfica 4.2.1. Inercia equivalente en función de uno o varios volantes acoplados al dinamómetro de chasis.

Estos últimos valores se verificaron en el laboratorio, para lo cual se estableció una prueba que permitió determinar la inercia equivalente con el dinamómetro de chasis, una muestra de ello y los resultados obtenidos se presentan en el siguiente apartado del capítulo.

4.3 Verificación experimental

En un proceso de desaceleración libre del vehículo de prueba, la potencia que detiene su movimiento proviene de la que se utiliza para cambiar la aceleración y velocidad lineal del vehículo¹². Esto último sirvió de base para plantear una prueba, con el propósito de obtener la magnitud de la inercia equivalente mediante de la ecuación (22).

Descripción del ensayo cost-down (vehículo)

1. Se coloca el eje motriz del vehículo sobre los rodillos de rodadura del dinamómetro para llevar ambos a su temperatura de operación (motor y rodamientos principalmente), al mantener funcionando el vehículo a una velocidad a 80 km/h (50 mph) por espacio de 30 min.
2. Después del calentamiento se da inicio a la prueba acelerando el vehículo a 105 km/h (65 mph).
3. Así al alcanzar dicha velocidad se coloca la transmisión en posición neutral, pisando el pedal del embrague (clutch)¹³ y permitiendo que el vehículo pierda velocidad, sin tocar los frenos o soltar el clutch¹⁵ durante el ensayo.
4. Se registra la velocidad lineal del vehículo más cercana a los 88, 80 y 72 km/h, así como la velocidad angular respectiva de los rodillos de rodadura del dinamómetro de chasis.
5. De este modo cuando la velocidad del vehículo es menor a los 72 km/h (45 mph), pero mayor a los 64 km/h (40 mph) se engrana la transmisión para acelerar a los 88 km/h (55 mph).
6. Se repitieron los pasos de 3. a 5. hasta efectuar tres ensayos, en los cuales la velocidad del vehículo no disminuya de las (65 mph) por más de un minuto durante cada prueba.
7. Se inicia otro ciclo de pruebas desde el paso 2. para completar los vehículos de la **tabla 4.3.1.**, registrando los valores de velocidad requeridos para calcular la inercia equivalente, proporcionada por cada combinación de los volantes de inercia del dinamómetro de chasis por medio de la ecuación (22).

Después de realizar las pruebas en el dinamómetro de chasis con varios vehículos (**tabla 4.3.1.**), se utilizaron los datos registrados para obtener los valores de inercia equivalente a partir de la ecuación (22), ejemplo de ello lo constituye la **tabla 4.3.2.**, que proporcionan la aportación de cada conjunto de los volantes de inercia del dinamómetro obtenidos de los ensayos con la Ford Ecosport.

¹² cuando éste impulsa los rodillos, sin olvidar que la intensidad de frenado de la **PAU** en el proceso cost-down es igual a 0.

¹³ en vehículos con transmisión manual.

Tabla 4.3.1. Rangos de peso de los vehículos [13] así como los seleccionados para representarlos.

	[kgf] W <i>vehículo con carga</i>	[kgf] W_T <i>(vehículo + conductor)</i>	Vehículo
1	852 a 962	960	Chevrolet Chevy
2	963 a 1080	1053	Nissan Tsuru TM
3	1081 a 1193	1162	Volkswagen Lupo 1.6 L
4	1194 a 1305	1275	Ford Ecosport 2.0
5	1306 a 1480	1475	Renault Scenic II 2.0 16V
6	1481 a 1705	1655	Pontiac Gran Am
7	1706 a 1930	1914	Mercury Grand Marquis
8	1931 a 2160	2145	Dodge Ram 1500 3.7 V6

Tabla 4.3.2. Inercia equivalente debida a los conjuntos de los volantes de inercia, calculada de las pruebas con un vehículo Ford Ecosport.

CONJUNTO (VOLANTE)	q	[kg · m ²] I_q	[rad/s] $\omega_{q\ i+2}$	[rad/s] $\omega_{q\ i}$	[rad/s] $\omega_{q\ i+1}$	[km/h] V_{v1}	[km/h] V_{v2}	[lb] W_i	[kg]
pequeño	CV3	4.84	119.72	97.34	110.65	87.57	71.21	131.92	291.54
mediano	CV2	6.67	120.32	100.37	110.65	88.02	73.42	178.62	394.76
grande	CV1	7.36	119.72	101.58	110.65	87.57	74.31	309.24	683.42

Así que al comparar los valores de inercia equivalente obtenidos con los establecidos por norma (tabla 4.3.1.) [13], se determinó la combinación de volantes de inercia que se deben acoplar al dinamómetro de chasis del LCE, para la prueba de un vehículo de cierto peso (tabla 4.3.3.)

Tabla 4.3.3. Número de volantes de inercia del dinamómetro (LCE) que se deben acoplar para obtener la inercia equivalente en función del rango de peso del vehículo.

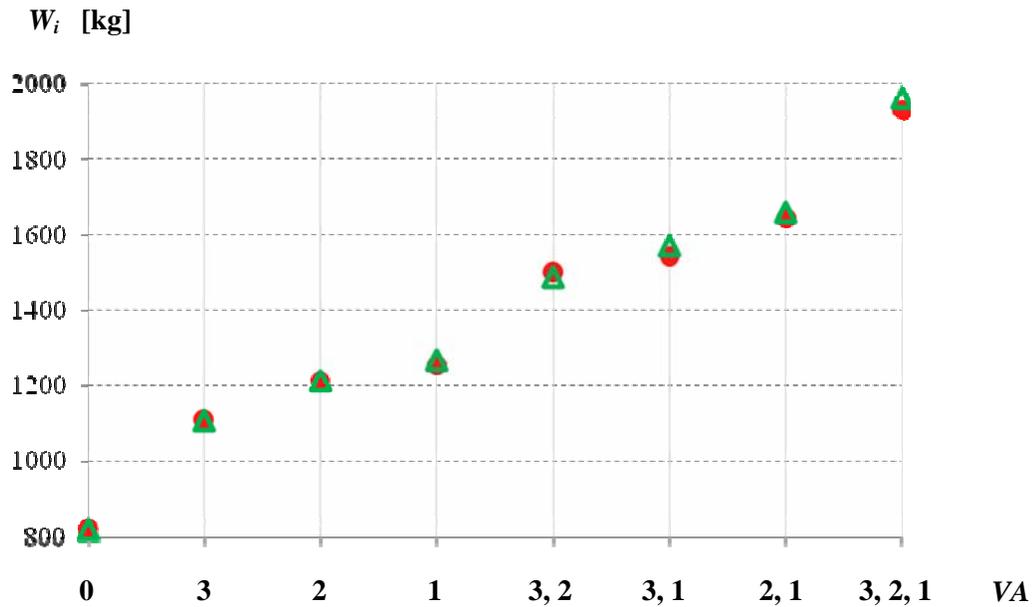
	[kg] <i>W</i> <i>vehículo con carga</i>	[kg] <i>W_i</i> <i>inercia equivalente</i>	VA <i>volantes acoplados al dinamómetro de chasis del LCE</i>							
			0	3	2	1	3,2	3,1	2,1	3,2,1
1	852 a 962	910	X							
2	963 a 1080	1025	X							
3	1081 a 1193	1135		X						
4	1194 a 1305	1230			X					
5	1306 a 1480	1365				X				
6	1481 a 1705	1590					X			
7	1706 a 1930	1820							X	
8	1931 a 2160	2040								X

Por otra parte, se observó que algunos de los valores calculados de las pruebas en el laboratorio para la inercia equivalente, resultaron ser mayores en un vehículo de menor masa que otro para la misma combinación de acoplamiento de volantes de inercia del dinamómetro de chasis, tal como se muestra en la **tabla 4.3.3**.

Tabla 4.3.3. Inercia equivalente en función de uno o varios volantes acoplados al dinamómetro de chasis.

<i>denominación en la figura 4.1.1.</i>	VA <i>volantes acoplados</i>	Ford Ecosport	Dodge Ram Van
		<i>W_i</i> [kg]	<i>W_i</i> [kg]
↓	0	820.12239	817.62104
v. pequeño	3	1111.672	1108.2814
v. mediano	2	1214.8917	1213.4741
v. grande	1	1254.7793	1268.1081
	3, 2	1503.5444	1490.0184
	3, 1	1544.7126	1572.382
	2, 1	1646.2005	1661.6002
	3, 2, 1	1934.4404	1966.2844

Tal comportamiento es contrario a lo establecido por norma para los vehículos nuevos, cuya tecnología y desgaste difieren de los vehículos viejos, con los cuales se efectuaron las pruebas mencionadas (**gráfica 4.3.1**). De manera que al considerar ese factor, entonces se concluye que para fijar el valor de la inercia equivalente para la simulación de dichos vehículos, es aconsejable obtenerlo previamente para cada uno de ellos, mediante la prueba establecida en este trabajo.



Gráfica 4.2.1. Inercia equivalente en función de uno o varios volantes acoplados al dinamómetro de chasis, calculada de las pruebas con los vehículos de la tabla 4.3.3.

CONCLUSIONES

Con las aportaciones de este trabajo, el dinamómetro de chasis o de rodillos del Laboratorio de Control de Emisiones (LCE) permitirá simular la inercia que posee un vehículo durante su desplazamiento sobre el pavimento, al acoplar el o los volantes de inercia necesarios de acuerdo a la **tabla 4.3.2.** (como se menciona en el **capítulo 4**).

Como resultado del diseño y construcción del sistema de masas inerciales, que constituye la parte medular de esta tesis, se obtuvo una expresión para calcular la inercia equivalente de los vehículos de prueba, a partir de los elementos móviles del dinamómetro de chasis (**apartado 4.2**).

Se establece un procedimiento para efectuar una calibración fundamental que requiere un dinamómetro de chasis, la que se refiere a la inercia equivalente, mediante el protocolo cost-down (cuesta abajo, **apartado 4.3.**)

Con esta actualización, incluyendo el sistema de masas inerciales, el LCE podrá realizar pruebas semejantes a las que se llevan a cabo en una celda de muestreo a volumen constante (CVS), es decir se podrá simular el desempeño de vehículos ligeros (**PBV < 2722 kg**) en carretera.

El LCE tiene limitaciones en su equipamiento, de forma que no se puede medir, por ejemplo, aldehídos o formaldehídos, gases de escape diluidos con aire atmosférico, etc. Sin embargo, se pretende escalar todas estas posibilidades, en la medida de sus recursos financieros, tal es caso de las masas inerciales que se han instalado ya y la instrumentación requerida para medir el gasto de los gases de escape que se tendrá en un futuro muy próximo.

ANEXO A. ESTÁNDARES DE LÍMITE DE EMISIONES.

E.U.

Tabla A.1. Clasificación de los vehículos LDT (categorías).

LDT Light Duty Trucks	TT Truck Type	LVW [lbs] Loaded Vehicle Weight	ALVW [lbs] Adjusted Loaded Vehicle Weight
LLDT Light Light Duty Truck	LDT1	0 - 3750	
	LDT2	3751 - 5750	
HLDT Heavy Light Duty Trucks	LDT3		3751 - 5750
	LDT4		> 5750

LVW - Peso del vehículo cargado.

ALVW - Peso ajustado del vehículo cargado.

TT - Tipo de camión.

Tabla A.2. Aplicación del estándar de emisión Tier 1, porcentaje los límites que establece para LDV nuevos.

VT Vehicle Type	AM Año Modelo	% de los límites establecidos por la Tier 1
PV Passengers Vehicle	1994 →	tabla A.3.
	1996 →	100
	2000 →	tabla A.3.
LLDT Light Light Duty Truck	1994 →	tabla A.4.a. o A.4.b.
	1997 →	100
	2000 →	tabla A.5.
HLDT Heavy Light Duty Trucks	1994 →	100
	1997 →	100
	2002 →	tabla A.6.

AM → - AM y posteriores.

Tabla A.3. Implementación del estándar Tier 1 en función del año modelo para PV.

	1994 →	2000 →	
	AM		% de los límites establecidos por la Tier 1
HC, CO,	1994	2000	40
NOx,	1995	2001	80
PM	D 1995	2002	100

AMD - después de AM

Tablas A.4.a. y A.4.b. Implementación del estándar Tier 1 en función del año modelo para LLDT de año modelo 1994 y posteriores

	1994 →		1994 →		
	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	
HC, CO, NOx	1994	40	PM	1994	0
	1995	80		1995	40
	D 1995	100		1996	80
		D 1996		100	

Tabla A.5. Implementación del estándar Tier 1 en función del año modelo para LLDT de año modelo 2000 y posteriores.

	2000 →	
	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1
HC, CO,	2000	40
NOx,	2001	80
PM	2002	100

Tabla A.6. Implementación del estándar Tier 1 para HLDT de año modelo 2000 y posteriores.

		2000 →	
		AM	% de los límites establecidos por la Tier 1
NMHC	2002	40	
	2003	80	
	2004	100	

Tabla A.7. Límites en las emisiones en g/mi de NMHC adicionales a la Tier 1 para LDV.

AM	TV Tipo de Vehículo	V_UT Vida Útil	NMHC
2000 →	PV	INTM ^{5/50}	0.25
		TOT ^{10/100}	0.31
LLDT			
2000 →	LDT1	INTM ^{5/50}	0.25
	LDT2		0.32
	LDT1	TOT ^{10/100}	0.31
	LDT2		0.40
HLDT			
2002 →	LDT3	INTM ^{5/50}	0.32
	LDT4		0.39
	LDT3	TOT ^{11/120}	0.46
	LDT4		0.56

INTM^{5/50} - **Intermedia.** 5 Años o 50 000 millas, lo que ocurra primero.
 TOT^{10/100} - **Total.** 10 Años o 100 000 millas, lo que ocurra primero.

Tabla A.8. Estándares de emisiones Tier 2 en g/mi para LDV y MDPV nuevos.

	BIN#	V_UT	CO	NOx	PM	HCO
TMPRL	11 MDPV ^c	INTM ^{5/50}				
		TOT ^{~120}	7.3	0.9	0.12	0.032
	10 ^{a,b}	INTM ^{5/50}	3.4 (4.4)	0.4	--	0.015 (0.018)
		TOT ^{~120}	4.2 (6.4)	0.6	0.08	0.018 (0.027)
	9 ^{a,b}	INTM ^{5/50}	3.4	0.2	--	0.015
		TOT ^{~120}	4.2	0.3	0.06	0.018
PRMNT	8 ^b	INTM ^{5/50}	3.4	0.14	-	0.015
		TOT ^{~120}	4.2	0.20	0.02	0.018
	7	INTM ^{5/50}	3.4	0.11	-	0.015
		TOT ^{~120}	4.2	0.15	0.02	0.018
	6	INTM ^{5/50}	3.4	0.08	-	0.015
		TOT ^{~120}	4.2	0.10	0.01	0.018
	5	INTM ^{5/50}	3.4	0.05	-	0.015
		TOT ^{~120}	4.2	0.07	0.01	0.018
	4	INTM ^{5/50}	-	-	-	-
		TOT ^{~120}	2.1	0.04	0.01	0.011
	3	INTM ^{5/50}	-	-	-	-
		TOT ^{~120}	2.1	0.03	0.01	0.011
	2	INTM ^{5/50}	-	-	-	-
		TOT ^{~120}	2.1	0.02	0.01	0.004
	1	INTM ^{5/50}	-	-	-	-
		TOT ^{~120}	0.0	0.00	0.00	0.000

HCO -

a - BIN eliminado al final del año modelo 2006 (2008 para vehículos HLDT).

b - Los valores temporales más altos de CO y HCO aplican únicamente a los vehículos HLDT y MDPV y expiran después del 2008.

c - BIN temporal restringido a los vehículos MDPV, expira después del año modelo 2008.

^ - LDV o LLDT = 10 y HLDT o MDPV = 11.

- estándar promedio de la flota NOx = 0.07 g/mi, para vehículos Tier 2.

Tabla A.9. Vida útil de función del estándar de emisiones para LLDT.

VT Vehicle Type	V_UT	EST
LDT1	\perp TOT ^{10/100}	TIER 1
LDT2		
LDT1	\perp TOT ^{11/120}	TIER 0
LDT2		

TOT^{11/120} - Total. 11 Años o 120 000 millas, lo que ocurra primero.

Tabla A.10. Aplicación de los estándares de emisiones para LDV en circulación.

VT	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	% de los límites establecidos por la Tier 1T
PV	1994 →	tabla A.11.a. o A.11.b.	
	1994 - 1995		tabla A.11 a. o A.11.b.
	1996 →	tabla A.11. a. o A.11.b.	
	1998 →	100	
LLDT	1994 - 1995		tabla A.12.
	1996 - 1997	tabla A.12.	
	1998 →	tabla A.12.	
	1999 →	100	
HLDT	1994 - 1997		tabla A.13.
	1998 →	tabla A.13.	
	1999 →	100	

Tablas A.11.a. y A.11.b. Implementación de los estándares (Tier 1 y Tier 1T) para PV.

	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	% de los límites establecidos por la Tier 1T		AM	% de los límites establecidos por la Tier 1
HC, CO, NOx	1994	40	0	PM	1994	40
	1995	80	0		1995	80
	1996	60	40		D 1995	100
	1997	20	80			
	D 1997	0	100			

Tablas A.12. Implementación de los Estándares Tier 1 y Tier 1T para LLDT.

	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	% de los límites establecidos por la Tier 1T
HC, CO, NOx, PM, NMHC	1994	40	0
	1995	80	0
	1996	60	40
	1997	20	80
	1998	0	100

Tablas A.13. Implementación de los estándares Tier 1 y Tier 1T para HLDT.

	AM	% de los límites establecidos por la Tier 1	% de los límites establecidos por la Tier 1T
HC, CO, NOx, PM	1994	0	0
	1995	0	0
	1996	0	50
	1997	0	100
	1998	50	20
	D 1998	100	0

MÉXICO

Tabla A.14. Porcentaje de introducción de los estándares de emisiones (A, B).

EST	2007 %	2008 %	2009 %	2010 %
A	75	50	30	0
B	25	50	70	100

A - vehículo Año Modelo 2004 y posteriores

B - vehículo Año Modelo 2007 y posteriores

Tabla A.15. Porcentaje de introducción de los estándares de emisiones (A + B, C).

EST	Año 1 %	Año 2 %	Año 3 %	Año 4 %
A + B	75	50	30	0
C	25	50	70	100

A + B - Mezcla de Vehículos AM 2004 y posteriores, AM 2007 y posteriores según la Tabla A.14.

C - Año 1 y posteriores

NOTA: Para efectos de esta tabla, a partir del año 2010 en adelante, la mezcla de vehículos que cumplan con los estándares "A + B" será aquella compuesta por un 100% de vehículos que cumplen con el estándar B.

ANEXO B. DINAMÓMETRO DE CHASIS

I. ELEMENTOS Y CONJUNTOS

Tabla *B.I.I.* Elementos que integran los conjuntos delantero y trasero del dinamómetro de chasis.

<i>ELEMENTO</i>	<i>CONJUNTO</i>	
	<i>CD</i> - Delantero	<i>CT</i> - Trasero
<i>PAU</i> - Unidad de Absorción de Potencia.	X	
<i>fPAU</i> - Flecha de la PAU.	X	
<i>fm</i> - Flecha Motriz.	X	
<i>cpf</i> - Cople de Flecha.	X	
<i>pm</i> - Polea Motriz.	X	
<i>rod</i> - Rodillo.	X	
<i>frod</i> - Flecha del Rodillo.	X	

Tabla *B.I.I.* Elementos que integran los conjuntos de volante (1, 2 y 3) del dinamómetro de chasis.

<i>ELEMENTO</i>	<i>CONJUNTO CV</i>		
	de Volante		
	1	2	3
<i>V₁</i> - Volante Grande.	X		
<i>V₂</i> - Volante Mediano.		X	
<i>V₃</i> - Volante Chico.			X
<i>cpv</i> - Cople del Volante.	X		
<i>enp</i> - Embrague Neumático con Polea.	X		
<i>fv</i> - Flecha del Volante.	X		

II. VOLUMEN DE SUS ELEMENTOS

El área de base (A_x) y el volumen (Vol_x) de un cuerpo cilíndrico se calculó por medio de las ecuaciones (23) y (24) respectivamente, cuyos parámetros se determinaron en función del elemento del dinamómetro (**figuras B.II.1. y B.II.1.**), utilizando para ello las ecuaciones (25) a (31).

$$A_{bx} = \pi r_x^2 \quad (23)$$

$$Vol_x = A_{bx} l_x \quad (24)$$

1. VOLANTES DE INERCIA Y COPLES DE VOLANTE (**figura B.II.1.**)

$$r_x - \text{radio [m]: elemento } x \rightarrow r_x^2 = r_z^2 - r_{fv}^2 \quad (25) \quad r_z = r_n \text{ o } r_{cpv} \quad (26)$$

r_n - volante n (denominación **figura 4.1.1.**)
 r_{cpv} . cople (volante) cpv (denominación **figura 4.1.1.**)
 r_{fv} - flecha del volante fv (denominación **figura 4.1.1.**)

$$l_x - \text{altura [m]: elemento } x \rightarrow l_x = sp_n \text{ o } sp_{cpv} \quad (27)$$

sp_n - espesor del volante n
 sp_{cpv} - espesor del cople (volante)

2 . FLECHAS (**Figura B.II.2.**)

$$r_x - \text{radio [m]: flecha } fk \rightarrow r_x = r_{fk} \quad (28) \quad fk \text{ (ubicación } \mathbf{figura 4.1.1.})$$

$$l_x - \text{altura [m]: flecha } fk \rightarrow l_x = l_{fk} \quad (29)$$

$$A_{bx} - [\text{m}^2]: \rightarrow A_{bx} = A_{bn}, A_{bcpv}, A_{bfk} \quad (30)$$

$$Vol_x - [\text{m}^3]: \rightarrow V_x = V_n, V_{cpv}, V_{fk} \quad (31)$$

m_x - masa [kg]:

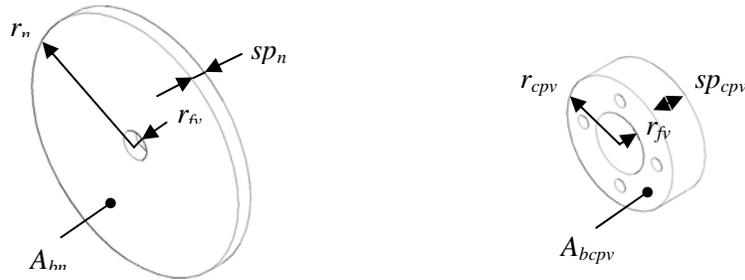


Figura B.II.1. Diagrama de un volante de inercia y de un cople de volante del dinamómetro.

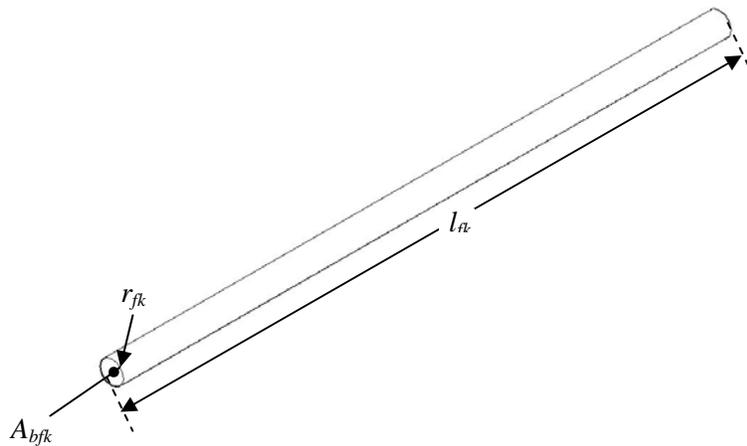


Figura B.II.2. Diagrama de una flecha del dinamómetro.

III. TRANSMISIÓN DE POTENCIA (UVI)

La transmisión de potencia [HP] para el tipo de banda que se ha seleccionado, para la relación de poleas de 6:8 con que se cuenta es:

$$\frac{N_{trans}}{banda} = 7.37 @ 1750 rpm \quad (32)$$

de manera que la potencia máxima [HP] que pueden transmitir las cuatro bandas es

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{N_{trans}}{banda} * 4 = 7.37 * 4 = 29.48 HP \quad (33)$$

Los cálculos efectuados muestran que la potencia que pueden soportar las bandas es mayor a la que puede desarrollar un auto normal.

$$22.11 HP < 29.48 HP$$

El par de torsión que llega a transmitir el embrague neumático es menor que el máximo permisible, tal como se observa de:

$$117.135 N*m < 300 N*m (0.85)$$

ya que de acuerdo al fabricante, el par dinámico corresponde al 85% del presentado en la figura B.III.1.

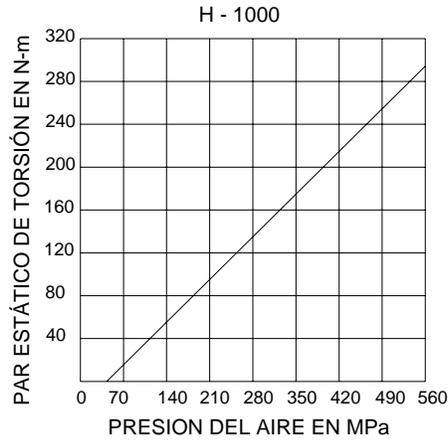


Figura B.III.1. Desempeño del embrague neumático.

IV. ANÁLISIS DINÁMICO

Ya que el análisis realizado en [4] contiene las expresiones utilizadas en este trabajo, únicamente se presentan las figuras y ecuaciones diferentes a la referencia mencionada, que corresponden al cálculo de las fuerzas de reacción resultantes en las chumaceras (rodamientos) del dinamómetro de chasis.

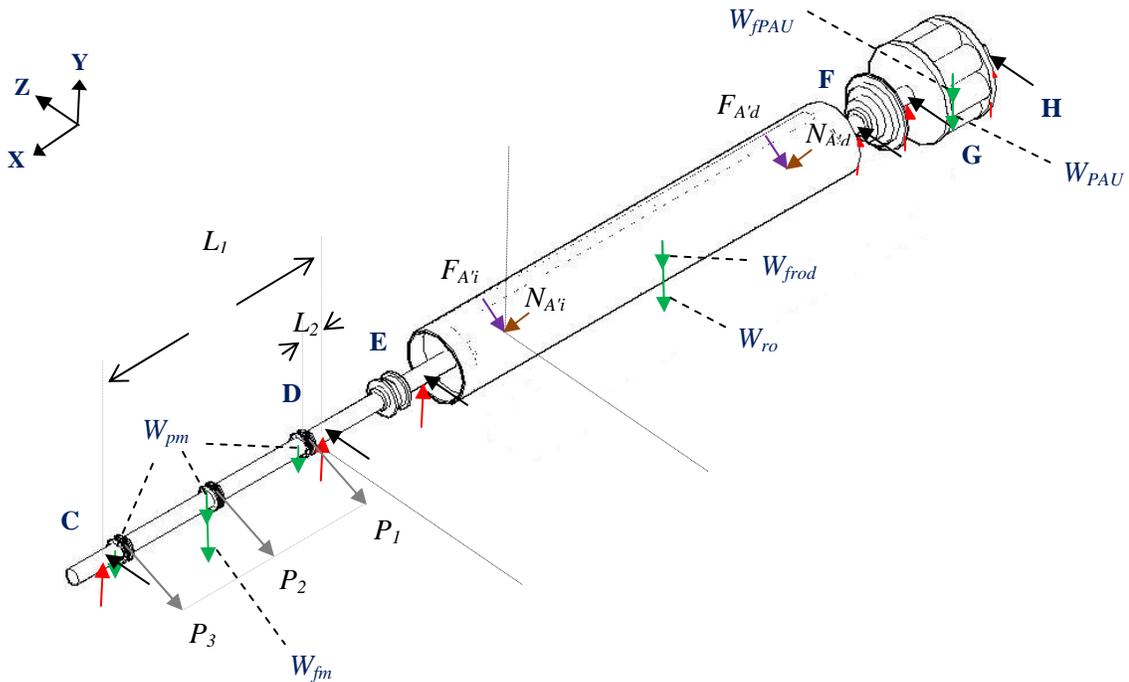


Figura B.IV.1. Diagrama de cuerpo libre del conjunto delantero (CD) del dinamómetro.

$$CY = DY = 0.5 \cdot (W_{fm} + W_{pm}) + \sum (Cf_n * P_n \text{sen} \gamma) \quad (34)$$

$$EY = FY = 0.5 \cdot (W_{frod} + W_{rod}) + (F_{Ai} \cos \alpha + N_{Ai} \text{sen} \alpha) \quad (35)$$

$$GY = HY = 0.5 \cdot (W_{fPAU} + W_{PAU}) \quad (36)$$

$$CZ = DZ = Cf_n * P_n \cos \gamma \quad (37)$$

$$EZ = FZ = F_{A'd} \text{sen} \alpha \quad (38)$$

$$GZ = HZ = 0 \quad (39)$$

El punto de aplicación del peso de los elementos (excluyendo las poleas motrices¹) para el conjunto delantero (**figura B.IV.1.** y ecuaciones (34) a (39)), se consideró que estaba entre las chumaceras que daban soporte a la respectiva flecha.

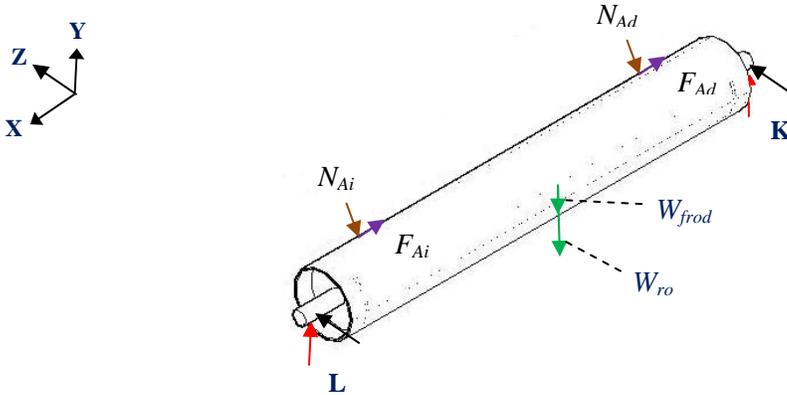


Figura B.IV.2. Diagrama de cuerpo libre del conjunto trasero (CT) del dinamómetro.

$$KY = LY = 0.5 \cdot (W_{frod} + W_{rod}) + N_{Ai} \text{sen} \alpha \quad (40)$$

$$KZ = LZ = F_{A'd} \cos \alpha + N_{A'd} \text{sen} \alpha \quad (41)$$

En el caso del conjunto trasero, la consideración respecto al peso de elementos fue la misma, mientras que para los conjuntos de los volantes, únicamente se aplicó a la flecha respectiva (**figuras B.IV.2., B.IV.3.** y ecuaciones (40), (41)).

¹ que en este caso correspondió al centro de cada elemento. (**figura B.IV.4.**).

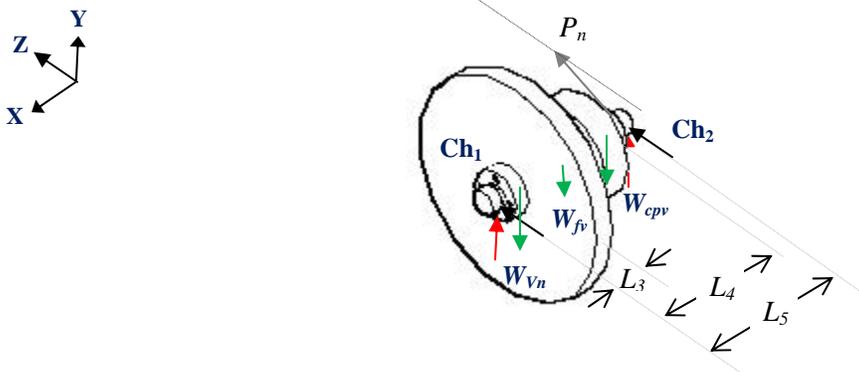


Figura B.IV.3. Diagrama de cuerpo libre de un conjunto de volante (CVn) del dinamómetro.

Además para los volantes se realizó un solo análisis, ya que es el mismo, obteniendo los resultados de cada uno de ellos al sustituir la información respectiva (ecuaciones (42) y (43)).

$$Ch_1 Y = 0.5(W_{fv}) + [W_{vn} (L_3) + W_{cpv} (L_4) + P_n \text{sen} \gamma (L_4)] / L_5 \quad (42)$$

$$Ch_2 Z = 0.5(W_{fv}) [W_{vn} (L_5 - L_3) + P_n \text{sen} \gamma (L_5 - L_4) +] / L_5 \quad (43)$$

Ch1 = P o T o V.

Ch2 = O o S o U.

A continuación se enumeran las fuerzas, ángulos y coeficientes que no se proporcionan en los capítulos de este trabajo para completar las designaciones en las figuras B.IV.1., B.IV.2. y B.IV.3.

- $N_{A'i}$ - Fuerza normal en A', en la rueda izquierda.
- $N_{A'd}$ - Fuerza normal en A', en la rueda derecha.
- N_{Ai} - Fuerza normal en A, en la rueda izquierda.
- N_{Ad} - Fuerza normal en A, en la rueda derecha.
- F_{Ai} - Fuerza de fricción en A, en la rueda izquierda.
- F_{Ad} - Fuerza normal en A, en la rueda derecha.
- $F_{A'i}$ - Fuerza de fricción en A', en la rueda izquierda.
- $F_{A'd}$ - Fuerza de fricción en A', en la rueda derecha.
- P_n - Fuerza resultante en la polea motriz del volante n , al ser acoplado al dinamómetro.
- Cf_n - coeficiente de P_n , dependiente del número y posición de(de los) volante(s) utilizado(s).

Plano (Y - Z)

α - ángulo entre los centros de los rodillos y el eje de la rueda. [°]

γ - ángulo entre el eje del volante y la horizontal (eje de la flecha motriz). [°]

Plano (X - Y)

L_1 - Distancia entre las chumaceras **C** y **D**. [m]

L_2 - Distancia de la polea motriz más cercana a una chumacera (**C** o **D**).

L_3 - Distancia del volante a la chumacera más cercana.

L_4 - Distancia de la polea (embrague neumático) a la misma chumacera que el volante.

L_5 - Distancia entre las chumaceras de la flecha del volante.

La siguiente designación es repetida con fines prácticos.

n - denominación del volante = 1, 2, 3.

V. POTENCIA DE CAMINO

Expresiones para el cálculo del coeficiente de resistencia al rodamiento en un vehículo:

Automóvil

$$\text{Llantas radiales} \quad f = 0.0136 + 0.40 \times 10^{-7} V^2 \quad (44)$$

$$\text{Llantas no radiales} \quad f = 0.0169 + 0.19 \times 10^{-6} V^2 \quad (45)$$

V - velocidad del vehículo en km/h (50 a 80)

$$\text{Llantas radiales} \quad f = 0.006 + 0.23 \times 10^{-6} V^2 \quad (46)$$

Camioneta

$$\text{Llantas no radiales} \quad f = 0.007 + 0.45 \times 10^{-6} V^2 \quad (47)$$

V - velocidad del vehículo en km/h (> 100)

Tabla B.V.I. Valores de área frontal (A_f) y coeficiente de arrastre (C_D) para automóviles de pasajeros.

Vehículo	C_D	A_f	
		m ²	ft ²
Minis			
Honda Civic 1.2	0.37 - 0.39	1.72	18.51
Nissan Micra GL	0.40 - 0.41	1.78	19.16
Medianos Pequeños			
VW Jetta GT	0.36 - 0.37	1.91	20.56
Ford Escort 1.3 GL	0.39 - 0.41	1.83	19.70
Medianos			
BMW 318i	0.39 - 0.40	1.86	20.02
Honda Accord 1.8 EX	0.40 - 0.42	1.88	20.24
Medianos Grandes			
Mercedes 190E	0.33 - 0.35	1.90	20.45
BMW 518i	0.36 - 0.38	2.02	21.74
Lujosos			
Jaguar XLS	0.40 - 0.41	1.92	20.67
BMW 728i	0.42 - 0.44	2.13	22.93
Deportivos			
Porsche 924	0.31 - 0.33	1.80	19.38
VW Scirocco GTX	0.38 - 0.39	1.74	18.73

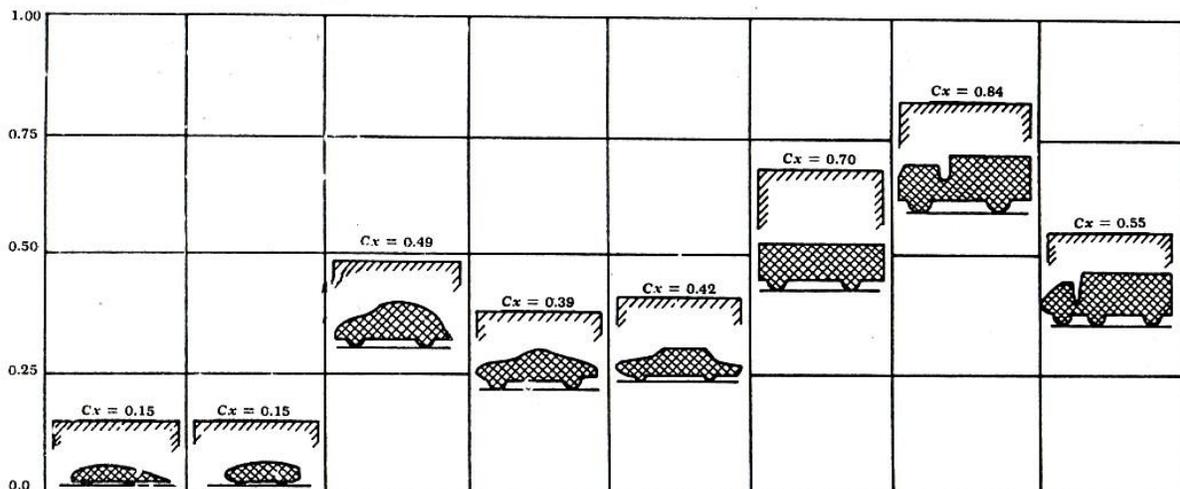


Figura B.V.I. Coeficiente de arrastre (C_D) para diferentes tipos de carrocería.

BIBLIOGRAFÍA

1. WONG, Jo Young. *Theory of Ground Vehicles*. 3a ed., Ed. J. Wiley. New York, E.U. 2001.
2. SZCEPANIAK, Cezary. *Fundamentos de Diseño del Automóvil*. Ed. CECSA. México. 2000.
3. OCAÑA O., Antonio. *Tratado del Automóvil*. Ed. Inversiones Editoriales. España. © 2000.
4. SÁNCHEZ GARCÍA, Gregorio. *Dinámica de un Dinamómetro de Chasis y Unidad de Volantes de Inercia - Tesis -*. Facultad de Ingeniería. C.U. UNAM, México. 2000.
5. *Manual de Calidad del Laboratorio de Control de Emisiones*. Facultad de Ingeniería. C.U. UNAM, México. 2006.
6. *Catálogo General SKF*. Ed. Stamperia Artistica Nazionale. Italia. 1997.
7. *SAE Handbook*. Ed. SAE. E.U. 1999.
8. *Diccionario de la Real Academia de la Lengua*. 22ª ed., Ed. Real Academia Española España. 2001.
9. Código Federal de Regulaciones (CFR). Capítulo 40. Apartado 86. Subapartados: A, B y H. E.U. 5 Octubre 2006.
10. Directiva 98/69/CE. Comunidad Europea. 1998.
11. Norma Oficial Mexicana. NOM-041-ECOL-2006.
12. Norma Oficial Mexicana. NOM-042-ECOL-2006.
13. Norma Mexicana. NMX-AA-11-1993.
14. Fuel F1. Technical net.
<http://www.f1technical.net/articles/19>
15. Diesel Exhaust Emissions Standards.
<http://www.dieselnet.com/standards/>
16. Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.
http://www.jama.or.jp/eco/exhaust/table_01.html#/
17. Enterprise - Automotive Industry - List of Directives on Motor Vehicles.
<http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/directives/vehicles/>

18. Reporte final del LCE al GRUPO ANUMEN S.A. DE C.V. sobre las pruebas de evaluación, referentes al consumo de combustible y emisiones contaminantes al usar el tratamiento para motores de combustión interna denominado *NRG*.
19. *Dinamómetros de chasis: AutoDyn 11 y AutoDyn 30.*
Superflow Technologies Group. 3512 North Tejon, Colorado Springs CO 80907
<http://www.superflow.com/>
20. *Dinamómetro de chasis: Dinamotor.*
Dinamotriz, contacto - dinamotriz@gmail.com
<http://dinamometros.blogspot.com/>
21. *TAT Chassis dynamometers (2 Rolling roads).*
Mess-Systeme. Gernweg 4, 75015 Bretten Germany
<http://www.chassisdyno.de/>
22. *Banco de potencia de rodillos modelo RAM 3000.* Sun Diagnostics Europe
C/ Travessera de Gràcia 56, 6º4ª 08006 Barcelona
<http://www.sun-diagnostics.com/>
23. *Chassis Dynamometers.* Land and Sea Inc.
25 Henniker Street; Concord, NH 03301-8528 USA
<http://www.land-and-sea.com/>