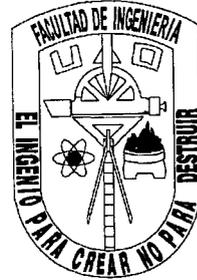




UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
FACULTAD DE INGENIERIA
AREA ELECTROMECHANICA



**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA EN EL DETERIORO DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES”**

TESIS PROFESIONAL QUE PARA
OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO ELECTROMECHANICO

PRESENTA:

ALEJANDRO RAMIREZ REYNOSO

DIRIGIDA POR:

M. C. J. ANTONIO ROMERO NAVARRETE

San Juan del Río, Qro, Abril de 1999

No Adq. H 59815

No. Título _____

Clas. 624.1513

R173e



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería



ACUERDO/36532/97
MAYO/20/97

SR. ALEJANDRO RAMIREZ REYNOSO,
P R E S E N T E .

En relación a su atenta solicitud relativa a la selección de opción de Tesis consistente en "ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES", me permito informarle que fue aceptado el Tema y el M.C. JOSE ANTONIO ROMERO NAVARRETE tuvo a bien ser el Director del Comité de Titulación.

El contenido aceptado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

TEMA:
"EL ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES".

OBJETIVO:
Mostrar esquemas para el uso de la infraestructura carretera, -- los cuales permitan un deterioro disminuido, cuantificable, de los pavimentos asfálticos.

- CONTENIDO:
- CAPITULO 1 INTRODUCCION
 - 1.1 Antecedentes
 - 1.2 Necesidades de investigación
 - 1.3 Objetivo y alcance
 - 1.4 Conclusiones al capítulo 1

 - CAPITULO 2 DESCRIPCION DE LOS MODELOS VEHICULO-PAVIMENTO EXISTENTES.
 - 2.1 Introducción
 - 2.2 Modelos de vehículos
 - 2.3 Modelo discreto de pavimento
 - 2.4 Modelo de deterioro del pavimento
 - 2.5 Conclusiones al capítulo 2

 - CAPITULO 3 MODELADO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL VEHICULO.
 - 3.1 Introducción
 - 3.1 Efecto de la temperatura ambiente en los neumáticos.
 - 3.1.1 Formulación
 - 3.1.2 Programación
 - 3.1.3 Pruebas



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería



- 3.2 Efecto de la temperatura ambiente en los amortiguadores.
 - 3.1.1 Formulación
 - 3.2.2 Programación
 - 3.3.3 Pruebas
- 3.3 Incorporación a los modelos existentes
- 3.4 Conclusiones al capítulo 3

- CAPITULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS
 - 4.1 Diseño de las pruebas
 - 4.2 Descripción de resultados
 - 4.2 Discusión
 - 4.3 Conclusiones al capítulo 4

- CAPITULO 5 CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA:

1. Romero, J.A. y Lozano, A., "An energy approach to model the - flexible pavement temperature effect on pavement damage". Enviado al - TRB. NRC.
2. Romero, J.A. "Consideración de la energía de deformación del pavimento en la simulación masiva de la interacción vehículo pesado -- pavimento flexible". Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México (En proceso).
3. Lozano, A., Romero, J.A. "Heavy vehicles, pavement tire suspension viscoelastic interaction modellung". 9 IFTOM Congress. Pp2589-2593.
4. Jakson, N.C., 1988, "Pavement performance - a state DOR perspective". SAE SP 765.
5. Cebon, D., y Winkler, C.B., 1991, "Multiple-sensor weigh-in-motion: Theory and experiments". Transportation Research Record 1311.- TRB. NRC. Pp 70-78.
6. Kenis, W.J., y McHanon, T.F., 1982, "verification and application of the VESYS structural subsystem". Memorias. 5 Int. Conf. On - - Struc. Design of asphalt pavements. Vol. 1. Pp 333-345
7. Monismith, C.L., Sousa, J. Y Lysmer, J., 1988, "Modern pavement design technology including dynamic load conditions". SAE SP 765.
8. Ullidtz, P. y Larsen, B.K., 1983, "Mathematical model for predicting pavement performance", Transportation Research record 949. -- Pp 45-55.
9. Nogemi, T., y Lam, Y.C., 1987, "two-parameter layer model for Analysis of slabs on elastic foundation", J. Engrg Mech ASCE. Vol 113-(9). Pp 1279-1291.
10. Fryba, L., 1972, "vibration of solids and structures under moving dynamic loads". Noordhoff International Publishing. Gronongen. Netherlands.



Universidad Autónoma de Querétaro

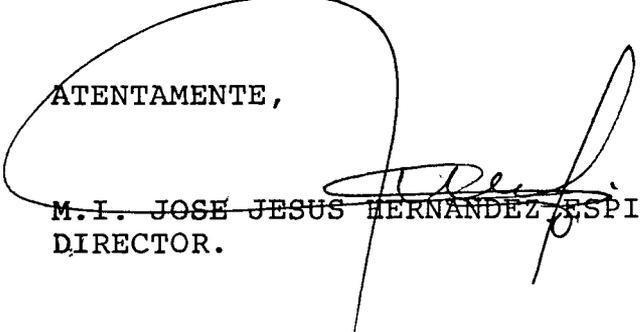
Facultad de Ingeniería



11. Batiatto, G., Verga, C., y Ronca, G., 1977 "Viscoelastic deformations in a two layered paving system predicted from laboratory-creep results". Transportation Research Record 640. Pp 34-38.
12. Kaussel, E., y Peek, R., 1982, "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution". Bull of the Seismological Society of America . Vol 75 (5). Pp 1459-1491.
13. Hardy, M.S.A., y Cebon, D., 1993, "response of continous pavements to moving dynamic loads, "Jounal of Engineering Mechanics. - Vol 119 (9). Pp 1762-1780.
14. OECD, 1992, "Dynamic loading of pavements". OECD Road Transport Research. 184 Pp.
15. Wong, J.Y., 1978, Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons. N.Y. 330 Pp.

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido de que antes de su Examen Profesional deberá cumplir los requisitos de nuestra Legislación y que el presente oficio se imprima en todos los ejemplares de su Tesis.

ATENTAMENTE,



M.I. JOSÉ JESÚS HERNÁNDEZ ESPINO,
DIRECTOR.

c.c.p. Archivo

Capítulo 1

Página

Introducción

1.1 Antecedentes	3
1.2 Necesidades de investigación	7
1.3 Objetivo y alcance	8
1.4 Conclusiones	9

Capítulo 2

Modelos de vehículos y del pavimento

2.1 Introducción	10
2.2 Modelos de vehículos	11
2.3 Modelo discreto de pavimento	19
2.4 Modelo de deterioro de pavimento	19
2.5 Conclusiones	20

Capítulo 3

Modelado del efecto de la temperatura sobre el vehículo

3.1 Introducción	21
3.2 Efecto de la temperatura ambiente sobre la rigidez y amortiguamiento de los neumáticos	22
3.3 Efecto de la temperatura ambiente sobre la constante de amortiguamiento de los amortiguadores	29
3.4 Conclusiones	36

Capítulo 4

Pruebas y resultados

4.1 Introducción	37
4.2 Diseño de las pruebas	38
4.3 Tráfico horario de los vehículos	39
4.4 Temperaturas de circulación	42
4.5 Resultados	48
4.6 Conclusiones	70

Capítulo 5

Página

Conclusiones generales

5.1 Sumario de conclusiones	71
5.2 Observaciones finales	72
5.3 Recomendaciones	73

Referencias

74

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El traslado de bienes y personas se ha dado desde los orígenes de la humanidad. La utilización de calzadas y caminos se ha efectuado también desde las primeras etapas de la civilización. Así, la preocupación por construir y mantener caminos que hiciesen más eficiente y rápido el traslado de bienes y personas data de 3000 años a. C. [1], con los egipcios construyendo caminos para la transportación de las piedras para construir sus pirámides, o los Mayas en la construcción de “pistas” sobre las que habrían de correr los mensajeros en esa sociedad. [2]

Aunque con antecedentes que van más allá del uso de los vehículos automotores (las carreras de carros tirados por varios caballos en el Coliseo Romano a principios de nuestra era podría ser una referencia clara), la preocupación por los efectos de la interacción vehículo - pavimento se hace más importante en la medida en que los vehículos son capaces de llevar más carga o bien, la misma carga, pero a mayor velocidad. Aunque las primeras preocupaciones habrían de centrarse en proporcionar mayor comodidad a los

usuarios del transporte, como lo denota el proceso de desarrollo de la suspensión elíptica usada en las antiguas diligencias, la cual data de 1804 [3], el empleo de vehículos automotores en Europa vendría a arrancar el auténtico desarrollo de investigaciones orientadas al estudio preciso de esta interacción vehículo - pavimento, existiendo inclusive legislaciones orientadas a privilegiar el uso de ciertos componentes en los vehículos. Este es el caso de la penalización en Inglaterra por el uso de ruedas rígidas, en vez de neumáticos [4].

De esta forma, las investigaciones en la interacción vehículo – pavimento, en particular vehículo pesado - pavimento se han dado de manera notable en la segunda mitad de este siglo, siguiendo el mismo tipo de motivación que en otros tiempos, esto es, el entender de mejor manera el efecto que los diferentes parámetros, asociados tanto al vehículo como al pavimento, tienen sobre el deterioro del mismo, el desgaste del vehículo, el daño a la carga y al conductor. De esta forma, la intención de los administradores de los caminos ha sido el disminuir los gastos en rehabilitación y conservación de los mismos, mediante el fomento de investigaciones orientadas al desarrollo de nuevas técnicas de construcción de pavimentos, así como a la aplicación de reglamentaciones racionales, enfocadas a disminuir el efecto nocivo de los vehículos sobre el pavimento [5].

De manera simple, la interacción vehículo pesado - pavimento puede describirse esquemáticamente partiendo de que el perfil asociado al camino induce la vibración de los vehículos. La vibración de los vehículos provoca que las fuerzas sobre la superficie del pavimento sean distintas de aquellas a velocidad cero, i.e., estáticas. Considerando las distintas configuraciones que los vehículos pueden tener, el valor de las componentes dinámicas de estas “fuerzas de llanta” involucra la respuesta dinámica del vehículo en su conjunto. De esta forma, al ser todos los componentes de éste susceptibles de vibrar, la variación y patrón de las cargas de los vehículos sobre el pavimento resulta más bien complicada.

Por cuanto al pavimento, éste consiste de un continuo deformable, cuyo comportamiento dependerá de las características de la fuerza de llanta (magnitud y

velocidad), así como de las condiciones ambientales. La interface llanta - pavimento sería la frontera del sistema asociado al vehículo y del sistema asociado al pavimento. Las irregularidades del pavimento, que conforman el perfil longitudinal del mismo, y que afectan la respuesta dinámica de los vehículos, se le conoce como rugosidad del camino [6].

Una revisión de la literatura respecto a la interacción vehículo pesado - pavimento se presenta en [7], por lo que no se reproducirá aquí. Sin embargo, por cuanto al estudio del efecto de la temperatura ambiente sobre el deterioro de los pavimentos flexibles, se reconoce una deficiencia en los estudios hasta ahora realizados. De esta manera, los pocos estudios publicados señalan la importancia que sobre el deterioro de los pavimentos tiene la temperatura ambiente [8,9]. Adicionalmente, el efecto de la temperatura sobre la respuesta dinámica de los vehículos al circular sobre los pavimentos, ha sido poco estudiada; reportándose en los estudios publicados, sin embargo, la importancia que la temperatura de operación tiene sobre las propiedades de los componentes tales como los amortiguadores [10]. Por otro lado, los efectos sobre el deterioro de los pavimentos sí han sido reportados como importantes en la literatura [11-13]. Esto es, se reporta, en general, el efecto de una falta de amortiguamiento en la magnitud de las fuerzas aplicadas al pavimento por los vehículos, pero no el efecto de la temperatura sobre precisamente el amortiguamiento provisto por estos elementos. Por otro lado, producto de la importancia reconocida a la presión de inflado respecto al deterioro de los pavimentos, se han discutido e implementado reglas para el control de la presión nominal de inflado de las llantas [33, 34], más no se han reportado, de manera consecuente con esta importancia, estudios de la variación de la presión de inflado durante el día por efecto de la temperatura ambiente.

Acerca del efecto que la temperatura ambiente tiene sobre la operación de los componentes de los vehículos, se reconoce aquí que existirá, producto de las condiciones de operación, un incremento consecuente de la temperatura de estos elementos, esto es, al circular por un camino rugoso o sinuoso, estos elementos sufrirán un incremento en su temperatura. Sin embargo, este incremento se dará a partir de las condiciones de temperatura ambiente.

Incorporando la temperatura ambiente al esquema simplificado descrito, esto es, que el vehículo vibre por efecto del perfil del camino y aplica a éste cargas dinámicas, producto de esta temperatura se tendrán cambios en las propiedades de los componentes del vehículo, afectando la capacidad de disipación de energía en los elementos amortiguadores y aumentando la presión de inflado de las llantas. Combinando estos dos efectos, se tendría que un incremento en la temperatura ambiente provocará un incremento en las fuerzas dinámicas aplicadas al pavimento, producto de un amortiguamiento disminuido y de una rigidez incrementada en las llantas, como consecuencia de una elevación de su presión de inflado. Por cuanto al pavimento flexible o asfáltico, su rigidez estará en función directa de la temperatura ambiente, al afectar ésta las propiedades de rigidez del aglutinante asfáltico. Ahora, combinando los efectos sobre el vehículo y sobre el pavimento, se tiene que la operación de los vehículos a temperaturas ambientales elevadas provocará un deterioro mayor de los pavimentos asfálticos, provocando con ello, a largo plazo, que los pavimentos provoquen una falta de confort y daño a la carga, así como elevados costos de rehabilitación y conservación de las infraestructuras.

Importancia económica de la interacción vehículo pesado – pavimento

Los efectos del deterioro de los pavimentos repercuten de manera destacada en las economías de los países [14-16]. Esto se deriva de los costos de conservación asociados al mantenimiento de las redes de caminos, así como de los costos de operación de los vehículos y de aquellos relativos al daño que las mercancías transportadas sufren durante su traslado sobre pavimentos en mal estado. Adicionalmente, es necesario mencionar que otro grupo importante de costos, poco cuantificados en México, engloba la seguridad de las carreteras y el daño a los conductores de los vehículos por efecto de las vibraciones recibidas como consecuencia de la interacción vehículo – pavimento dañado.

Según datos para el año de 1995, en México la inversión pública y privada en el subsector carretero, sumó 4,634 millones de pesos. De este monto el 80 %, esto es, 3,711 millones de pesos se invirtieron en reconstrucción y conservación [17]. Para tener una idea de la magnitud de estas cantidades, estos 3,711 millones de pesos representaron el 4.3 %

del producto interno bruto del sector educativo durante ese año de 1995 [17]. Esta importancia económica proviene, en el caso de México, de que el 73 por ciento de las necesidades de transportación de carga, medidas en toneladas – kilómetro, se satisfacen mediante la Industria del Autotransporte [17].

1.2 Necesidades de investigación

Hasta ahora, lo que se ha señalado es que, por un lado, existe una deficiencia de investigaciones específicas acerca del efecto de la temperatura ambiente sobre el deterioro de los pavimentos, tomando en cuenta sobre todo el efecto de esta temperatura sobre las propiedades de los vehículos. Por otro lado, se ha puesto de manifiesto la importancia económica del efecto de los vehículos sobre los pavimentos. Con estos dos elementos se identifica la necesidad de contar con estudios específicos del efecto de la temperatura ambiente sobre el deterioro de los pavimentos, permitiendo los resultados de este estudio cuantitativo efectuar algunas recomendaciones acerca de las políticas de uso de las infraestructuras. Es importante mencionar que esta necesidad se da en el contexto de la infraestructura tecnológica con que se cuenta actualmente, esto es, en el Instituto Mexicano del Transporte se han desarrollado formulaciones y programas de cómputo los cuales permiten evaluar de manera eficiente el efecto de los vehículos sobre el pavimento [18]. Sin embargo, estas formulaciones existentes no contemplaban hasta el momento de iniciar la investigación aquí reportada, los efectos que la temperatura ambiente tiene sobre las propiedades de rigidez y amortiguamiento de las llantas y suspensiones de los vehículos. Esto es, sólo consideraban el efecto de la temperatura sobre el pavimento y su deterioro potencial. Por lo tanto, es necesario complementar estas formulaciones con otras que consideren el efecto que la temperatura ambiente tiene sobre las características de los vehículos y el deterioro de los pavimentos.

1.3 Objetivo y alcance

El presente trabajo tiene como objetivo el contar con una herramienta computacional que permita establecer el efecto que la circulación de los vehículos a distintas temperaturas ambiente, tiene sobre el potencial deterioro de los pavimentos. Para esto, se desarrollan formulaciones del efecto que la temperatura ambiente tiene sobre las propiedades de los componentes de los vehículos (amortiguadores y llantas). Estas formulaciones son incorporadas en modelos dinámicos existentes de la interacción vehículo – pavimento, efectuándose las simulaciones necesarias para evaluar el efecto que distintas distribuciones horarias de los tráficos tienen sobre el potencial deterioro de los pavimentos. Este efecto potencial se mide empleando el concepto de que la energía almacenada en el pavimento está asociada al posterior deterioro del mismo, lo cual ha sido reportado en la literatura [7].

En el capítulo dos de esta tesis se describen los modelos matemáticos de los vehículos y pavimentos empleados, presentando resultados de la vibración y fuerzas aplicadas al pavimento de los distintos vehículos considerados, bajo distintas condiciones de operación.

En el capítulo tres se presentan formulaciones originales, desarrolladas para modelar el efecto que la temperatura ambiente tiene sobre la presión de inflado de los neumáticos y sobre las constantes de amortiguamiento de los amortiguadores. La formulación de la sensibilidad de la presión de inflado a la temperatura se asocia a la rigidez del neumático mediante el empleo de relaciones empíricas reportadas en la literatura, a su vez el efecto de esta variación en la presión sobre el amortiguamiento del neumático, es considerado. Finalmente, en este capítulo se presenta el algoritmo programado con objeto de calcular el efecto que la temperatura ambiente tiene sobre las propiedades de los neumáticos y amortiguadores.

Con objeto de evaluar el potencial “ahorro” en el deterioro de los pavimentos, en el capítulo cuatro se presentan resultados del efecto que distintas distribuciones horarias del tráfico, tienen sobre el potencial deterioro de los pavimentos, empleando como referencia flujos vehiculares medidos en campo y redistribuyendo dichos flujos para minimizar la

energía almacenada (deterioro) en los pavimentos. En el capítulo cinco se presentan las conclusiones del presente trabajo, destacando la importancia de los resultados mostrados y proponiendo trabajos de investigación futuros.

1.4 Conclusiones

La interacción vehículo pesado - pavimento incide de manera importante en la economía de los países, repercutiendo en las erogaciones que los gobiernos tienen que hacer para mantener en condiciones aceptables de operación a las infraestructuras, y en los costos que los usuarios de estas infraestructuras tiene que cubrir por efecto del deterioro de los componentes del vehículo involucrados en la respuesta dinámica de los vehículos a los perfiles de pavimento. Asimismo, se tienen efectos por cuanto al deterioro de los bienes transportados y a los conductores de estos vehículos, resultado de su vibración.

La atención al efecto que la temperatura tiene sobre el potencial efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento, no ha sido abordado de manera consecuente con su importancia. En este trabajo se presenta un enfoque original que permite establecer cuantitativamente el efecto de la temperatura sobre el deterioro de los pavimentos, atendiendo de manera integral tanto el efecto de la temperatura sobre los vehículos como sobre las propiedades de los pavimentos flexibles.

Capítulo 2

Modelos de vehículos y del pavimento

2.1 Introducción

En el capítulo 1 se ha planteado la necesidad de efectuar estudios orientados a la determinación del efecto de la temperatura ambiente sobre la interacción de los vehículos pesados con el pavimento, al incidir este factor en las propiedades tanto de los componentes de la suspensión y llantas de los vehículos, como en la rigidez del material asfáltico con que está hecho el pavimento. En este capítulo se presenta un resumen de la metodología y formulaciones desarrolladas en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), tanto para obtener la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, como la del pavimento a las fuerzas provenientes de los vehículos. Estas formulaciones y la metodología correspondiente, consisten en obtener las ecuaciones de movimiento a partir de aplicar la Segunda Ley de Newton a los diagramas de cuerpo libre de los vehículos, considerados éstos como un conjunto de masas rígidas acopladas por elementos flexibles carentes de masa; siendo resueltas las ecuaciones de movimiento resultantes mediante la aplicación del método de las Matrices de Transición [19].

2.2 Modelos de vehículos

Los vehículos considerados en este trabajo son los tipos más comúnmente encontrados en las carreteras Mexicanas [20]. En esta sección, primeramente, se describen estos tipos de vehículos, en función de sus características dinámicas.

Nomenclatura

En los diagramas presentados en este capítulo, la nomenclatura genérica empleada es la siguiente:

k : Rigidez de los elementos flexibles de la suspensión o de las llantas (N/m)

c : Constante de amortiguamiento de la suspensión o de las llantas (Ns/m)

Por otro lado, los subíndices empleados corresponden a las llantas delanteras (LO), las cuatro llantas de los ejes (L), y los elementos de la suspensión de cuatro resortes (s). Asimismo, los números de las suspensiones se han definido como se muestran en los diagramas correspondientes, siendo el subíndice I empleado para denotar la suspensión *walking beam* del eje trasero de los tractores, en las combinaciones vehiculares simuladas (T3S2, T3S3). En lo que se refiere a la notación de las longitudes, ésta se encuentra acotada en los distintos esquemas mostrados. Las perturbaciones desde el pavimento han sido designadas como $Y(t)$.

2.2.1 Descripción de los vehículos simulados

Vehículo C2

En la Figura 2.1 se muestra el esquema correspondiente para el vehículo unitario con dos ejes, así como su esquema de cuerpos rígidos acoplados por cuerpos flexibles. Este vehículo posee cuatro grados de libertad, uno en cada uno de sus ejes (z_0 para el eje

direccional y z_1 para el eje motriz), correspondiendo los otros dos al desplazamiento vertical (z_T) y al “cabeceo” (ϕ) de la masa suspendida.

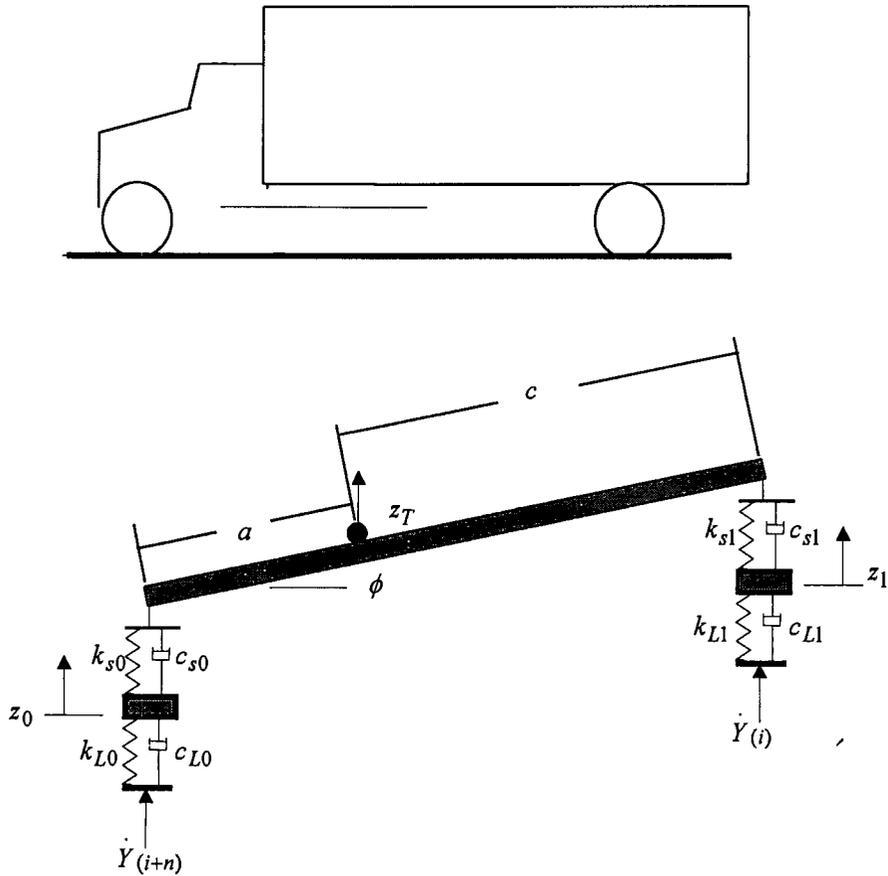


Figura 2.1 Vehículo unitario tipo C2

Vehículo C3

En la Figura 2.2 se muestra el esquema correspondiente para el vehículo unitario con tres ejes, así como su esquema de cuerpos rígidos acoplados por cuerpos flexibles. Este vehículo posee seis grados de libertad, uno en cada uno de sus ejes (z_0 para el eje direccional, z_3 para el eje delantero del tándem motriz y z_4 para el eje trasero del tándem motriz), otros en el desplazamiento vertical (z_T) y el “cabeceo” (θ) de la masa suspendida, y por último al giro del balancín de repartición de carga del tándem motriz, α .

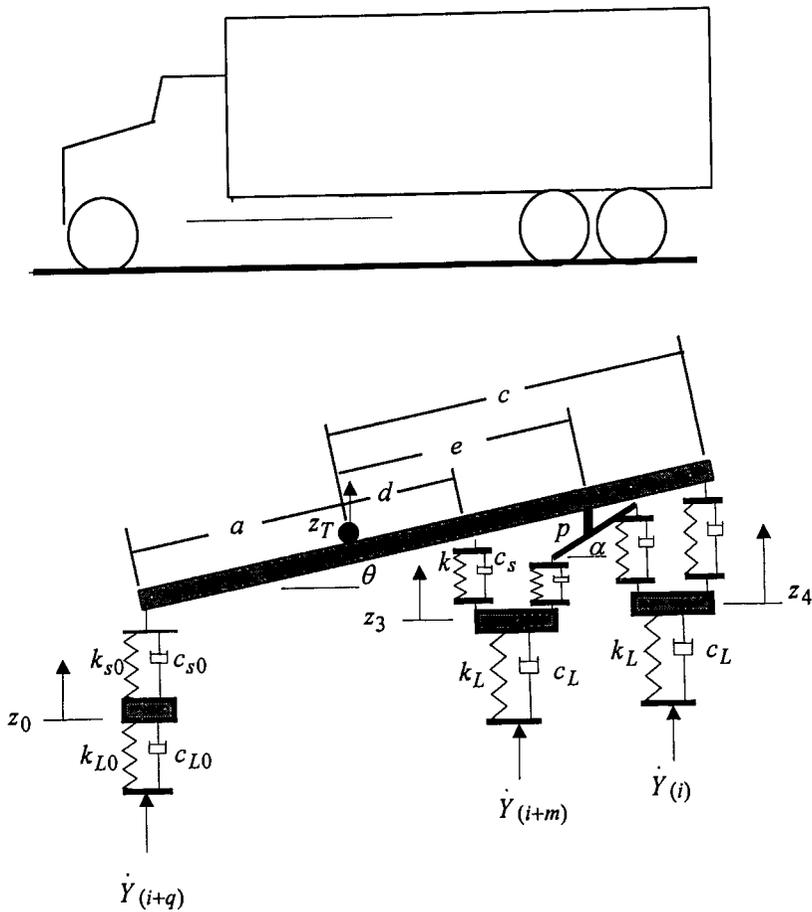


Figura 2.2. Vehículo unitario tipo C3.

Vehículo T3S2

En la Figura 2.3 se muestra el esquema correspondiente para la combinación vehicular consistente de un tractor con tres ejes y un semirremolque con dos ejes, así como su esquema de cuerpos rígidos acoplados. Bajo este esquema de cuerpos rígidos acoplados, el vehículo T3S2 posee nueve grados de libertad. Tres grados de libertad corresponden directamente a los ejes (z_0 para el eje direccional y z_3 y z_4 para los ejes delantero y posterior del semirremolque, respectivamente). Dos grados de libertad corresponden a la viga de la suspensión de balancín, “walking beam” (z_I para la posición vertical, ω para la posición angular). Asimismo, otros tres grados de libertad corresponden al doble péndulo formado por los cuerpos articulados del tractor y el semirremolque. El noveno grado de libertad esta dado por el balancín de repartición de carga del tándem del semirremolque.

Como se puede apreciar, diferentes tipos de suspensiones han sido consideradas para el tándem del tractor y el tándem del semirremolque. Esto es, para el tractor ha sido considerada una suspensión tipo viga oscilante (*walking beam*) y para el semirremolque una de cuatro muelles.

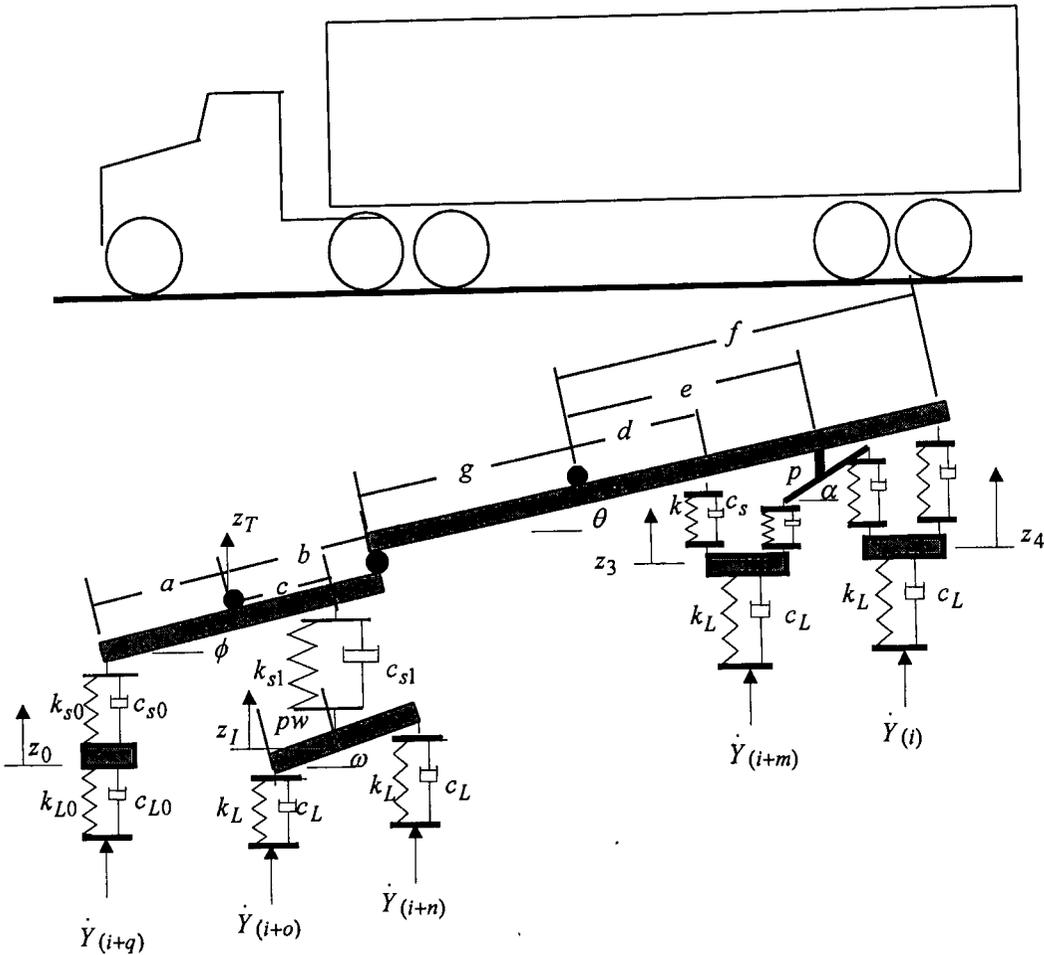


Figura 2.3. Combinación vehicular tipo T3S2.

Vehículo T3S3

En la Figura 2.4 se muestra el esquema correspondiente para la combinación vehicular consistente de un tractor con tres ejes y un semirremolque con tres ejes. Asimismo se muestra su esquema de cuerpos rígidos acoplados. Para esta combinación vehicular tractor-semirremolque se identifican once grados de libertad. Cuatro grados de libertad corresponden directamente a los ejes. Dos grados de libertad corresponden a la viga de la

suspensión de balancín. Al igual que para el caso del vehículo T3S2, otros tres grados de libertad corresponden al doble péndulo formado por los cuerpos del tractor y del semirremolque. Los dos restantes grados de libertad corresponden a los dos brazos o balancines de reparto de carga del eje triple del semirremolque (α y β).

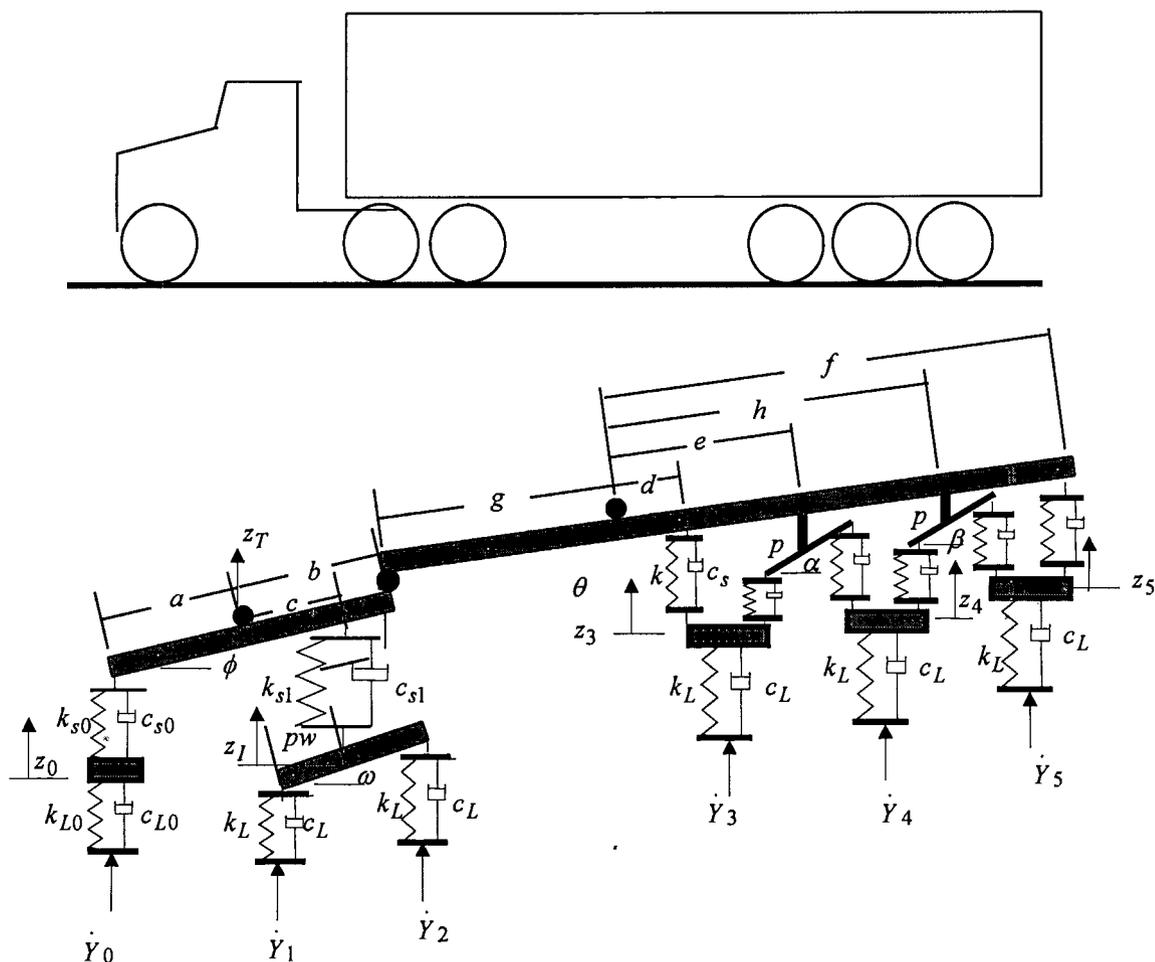


Figura 2.4. Combinación vehicular T3S3.

2.2.2 Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones de movimiento para los distintos tipos de vehículos toman la siguiente forma general, para cada grado de libertad de los vehículos:

$$\ddot{y}_i(t) = \sum_1^n a_i y_i(t) + \sum_1^n b_i \frac{d}{dt}(y_i(t)) \quad (2.1)$$

donde $y_i(t)$ es el i -ésimo grado de libertad, n es el número de grados de libertad, siendo a_i y b_i los coeficientes de las funciones y primeras derivadas, respectivamente. Dependiendo del grado de acoplamiento entre los distintos grados de libertad, algunos coeficientes a_i y b_i son cero.

2.2.3 Método de las matrices de transición

El método de las matrices de transición es la analogía, para muchos grados de libertad, de la respuesta dinámica de un sistema de primer orden. Un sistema de primer orden (Figura 2.5) tiene la siguiente ecuación de movimiento cuando no existe fuerza de perturbación:

$$\dot{z}(t) = -(k/c) z(t) \quad (2.2)$$

donde c y k corresponden a las constantes de amortiguamiento y rigidez de los elementos del sistema. La solución de esta ecuación está dada por [18]:

$$z(t) = Ce^{-(k/c)t} \quad (2.3)$$

donde el valor de la constante C puede calcularse al sustituir las condiciones iniciales, esto es, $z(0) = z_0$, por lo que la solución homogénea queda de la siguiente manera:

$$z(t) = z_0 e^{-(k/c)t} \quad (2.4)$$

Tomando en cuenta la respuesta particular, esto es, a una perturbación $F(\tau)$, la solución general queda [18]:

$$z(t) = z_0 e^{-(k/c)t} + F(\tau) \frac{1}{c} e^{-t/\tau} \quad (2.5)$$

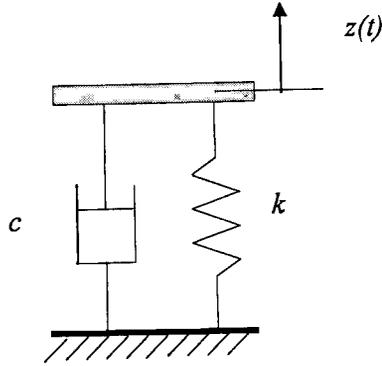


Figura 2.5. Esquema de un sistema de primer orden.

En el caso de un sistema masa – resorte – amortiguamiento, Figura 2.6, con derivadas segundas involucradas, la ecuación diferencial de movimiento es:

$$m\ddot{z}(t) = -F(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) \quad (2.6)$$

Esta ecuación puede expresarse, en función de variables de estado, como un sistema de primer orden, esto es [18]:

$$\{\dot{y}(t)\} = [A]\{y(t)\} + [B]\{Y(t)\} \quad (2.7)$$

donde :

$$\{\dot{y}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{z}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{Bmatrix}, \{y(t)\} = \begin{Bmatrix} z(t) \\ \dot{z}(t) \end{Bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k/m & c/m \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/m \end{bmatrix}$$

$$\{Y(t)\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -F(t) \end{Bmatrix}$$

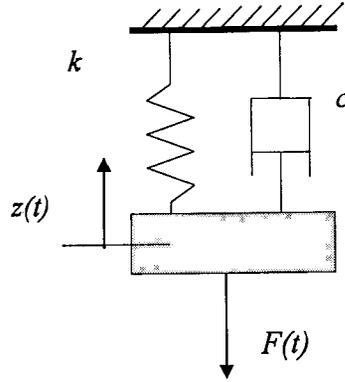


Figura 2.6. Sistema mecánico de segundo orden.

La solución completa del sistema de segundo orden expresado, resuelto como un sistema de primer orden, es:

$$\{y(t)\} = e^{[A]t} \{y(0)\} + \int_0^t e^{[A](t-\tau)} [B] \{Y(\tau)\} d\tau \quad (2.8)$$

Efectuando la discretización de la perturbación (pavimentos), de tal manera que la perturbación durante un intervalo de tiempo sea constante, y $Y(\tau)$ pueda ser extraída de la integral (2.7). La ecuación (2.7) para sistemas discretos es:

$$\{y(k+1)\} = [\Phi] \{y(k)\} + [\Gamma] \{Y(k)\}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

donde:

$$[\Gamma] = \int_0^T e^{[A]t} dt [B] \quad \text{y} \quad [\Phi] = e^{[A]T}$$

El cálculo de la matriz de respuesta particular ($[\Gamma]$) implica numéricamente la siguiente evaluación [21]:

$$[\Gamma] = A^{-1}([\Phi] - I)[B] \quad (2.10)$$

2.3 Modelo discreto de pavimento

El modelo de pavimento corresponde a una abstracción, en la que éste se compone de elementos discretos no acoplados tipo tabique, Figura 2.7, dependiendo las características de rigidez de estos elementos de la velocidad de aplicación de la carga, de la temperatura, entre otras propiedades intrínsecas del asfalto (contenido de huecos, viscosidad, temperatura de suavización) [7].

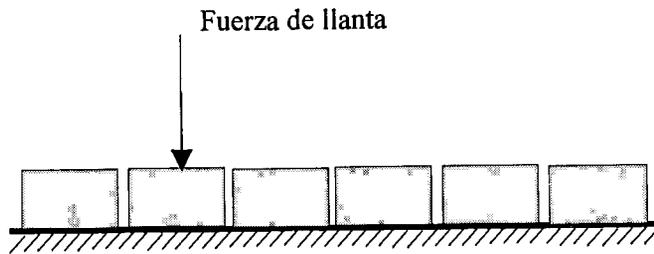


Figura 2.7. Modelo discreto de pavimento [18].

2.4 Modelo de deterioro del pavimento

Según se anota en [7], para el modelo de pavimento discreto anteriormente descrito, tipo tabique, la energía almacenada en el mismo, producto de la aplicación de las fuerzas de llanta, está relacionada con el deterioro del pavimento. La energía almacenada en el pavimento queda expresada como:

$$\text{Energía Almacenada} = (1/2)(\sigma^2 / E) \quad (2.9)$$

donde

σ es el esfuerzo, E es el módulo de rigidez y la Energía almacenada por el pavimento se expresa en Joules/m².

Tomando en cuenta el paso de un vehículo de n ejes sobre un pavimento compuesto de m elementos discretos o tabiques, la energía almacenada estará dada por:

$$\text{Energía Almacenada Total} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (1/2)(\sigma_{ij}^2 / E) \quad (2.10)$$

De esta manera, la estimación del deterioro causado por los vehículos al circular por el pavimento se establece siguiendo las siguientes etapas: cálculo de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, obteniendo las fuerzas de llanta; aplicación de las fuerzas de llanta al modelo de pavimento, cuya rigidez dependerá sensiblemente de la velocidad de aplicación de la carga y de la temperatura, según comportamientos obtenidos experimentalmente, reportados en [7].

2.5 Conclusiones

La consideración fundamental para el desarrollo de esta tesis, consiste en que la energía de deformación del pavimento está relacionada con el deterioro del mismo. El cálculo de esta energía implica diferentes etapas, que van desde la obtención de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, obteniendo con ello las fuerzas que éstos ejercen sobre el mismo, para después aplicar estas fuerzas a los bloques de pavimento asfáltico que se considera componen al pavimento. Del conocimiento de estas fuerzas y de las propiedades de rigidez del pavimento, es posible establecer la energía almacenada (deterioro) en el mismo. La aplicación dada en este trabajo a los modelos existentes, muestra la utilidad que formulaciones originales puede tener en el contexto de las investigaciones de la interacción vehículo pesado – pavimento.

Capítulo 3

Modelado del efecto de la temperatura sobre el vehículo

3.1 Introducción

En el capítulo uno se han mencionado en forma general algunos de los efectos que variables ambientales, en particular la temperatura, tienen sobre algunas variables asociadas al desempeño de algunos componentes de los vehículos. De esta manera, se ha indicado el efecto de la temperatura sobre la presión de inflado de los neumáticos y viscosidad del aceite en el interior de los amortiguadores.

En este capítulo se presenta la formulación del efecto que la temperatura ambiente tiene sobre los parámetros que rigen la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, esto es, la dependencia que de la temperatura tienen las constantes de rigidez y amortiguamiento de los neumáticos y la constante de amortiguamiento de los amortiguadores. Así, se aplica la Ley General de los Gases para obtener la dependencia de

la presión respecto a la temperatura, y se efectúan ajustes polinomiales de la relación entre la presión de inflado y las constantes de rigidez y amortiguamiento de los neumáticos. Asimismo se obtiene una expresión de la constante de amortiguamiento del aceite como una variable dependiente de la temperatura (ambiente).

Al final, se presenta una formulación para la temperatura ambiente como una función de la hora del día y de la estación del año. Con esto es posible obtener las propiedades de rigidez y de amortiguamiento de los componentes de la suspensión de los vehículos, como una función de la hora del día y de la estación del año. A partir de estas formulaciones se generan programas de cómputo que permiten la sistematización de los cálculos.

3.2 Efecto de la temperatura ambiente sobre la rigidez y amortiguamiento de los neumáticos

En esta sección se establecerá la relación entre la temperatura ambiente y la presión de inflado, y de ésta con la rigidez y amortiguamiento del neumático. Para la primera de estas relaciones será aplicada la Ley General de los Gases, mientras que para la relación presión de inflado - rigidez y de presión de inflado - amortiguamiento, serán empleadas curvas experimentales reportadas en la literatura.

3.2.1 Formulación del efecto de la temperatura sobre la presión de inflado

En este apartado se presentan dos aproximaciones para la estimación o cálculo de la presión de los neumáticos como una función de la temperatura del aire contenido. Primeramente se expone el enfoque que emplea la Ecuación de Estado de los Gases Ideales (EEGI), para después comparar este enfoque con lo reportado por los fabricantes de neumáticos.

Enfoque de la Ecuación de Estado de los Gases Ideales

La Ecuación de Estado de los Gases Ideales (EEGI) está dada por:

$$Pv = RT \quad (3.1)$$

donde

$R = Ru / M$, siendo Ru la Constante universal de los gases (8.314 kJ/kgmol⁰K) y M el peso molecular del gas,

T es la temperatura absoluta, expresada en ⁰K,

v es el volumen específico (m³/kg), y

P es la presión (Pa)

Para el caso particular del aire, $M = 28.96$ g/mol, por lo tanto $R = 0.287$ kJ / (kg ⁰K).

Considerando que el volumen del neumático permanece constante al modificar la temperatura del aire contenido, el volumen específico v permanecerá constante y la relación entre la temperatura y la presión, entre un estado inicial (0), y uno final (1), estará dada por:

$$v = \left(\frac{RT}{P} \right)_0 = \left(\frac{RT}{P} \right)_1$$

por lo tanto:

$$\left(\frac{T}{P} \right)_0 = \left(\frac{T}{P} \right)_1 \quad (3.2)$$

que resulta un caso particular de la Ley Combinada de los Gases [24].

Comparación de resultados aplicando la EEGI y la información del fabricante

De una consulta hecha a la información de distintos fabricantes [29,30] se obtuvo que como una regla aproximada (*rule of thumb*) la variación de la presión con la temperatura (VPT) es de 1 *psi* (6,894.8 Pa) por cada 10 ⁰F, esto es:

$$VPT = 1.243 \text{ kPa} / ^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

En la Figura 3.1 se muestra la gráfica de la ecuación (3.2) y la regla expresada en (3.3). Para la gráfica que toma la relación empírica (3.2), la ecuación de la recta resultante, tomando una presión nominal de 691 kPa (100 psi) a una temperatura de 0 °C, es:

$$p_n = 691 + 1.243T \quad (3.4)$$

Mientras que para la EEGI, despejando P_l de (3.2), se tiene que, tomando la misma referencia que para la línea de trazo empírico, la presión final está dada por:

$$p_l = 691 + 2.531T$$

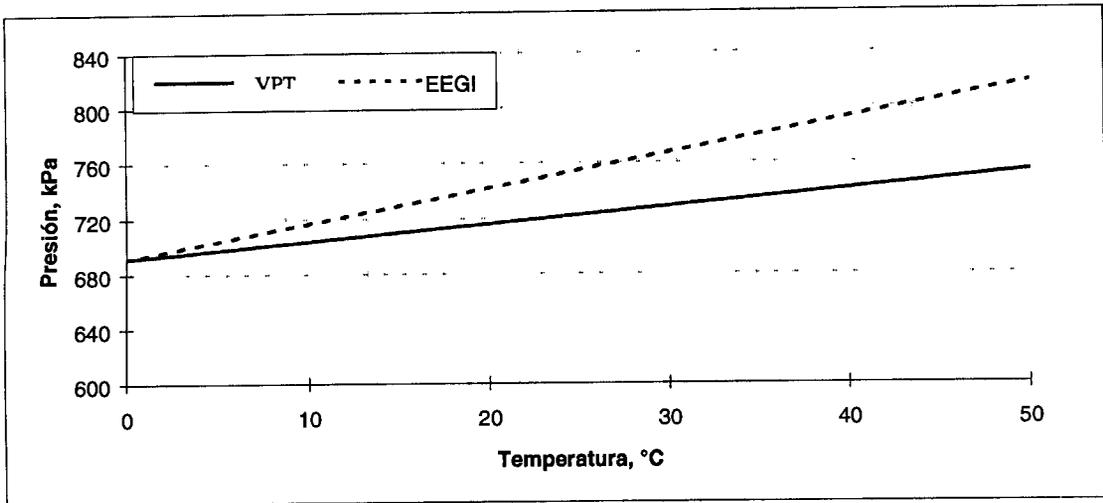


Figura 3.1 Variación de la presión con la temperatura, según la EEGI y la VPT

Discusión de resultados

De la Figura 3.1 se observa una diferencia entre ambos enfoques aplicados para obtener la dependencia de la presión de la temperatura del aire del neumático, presentando el enfoque teórico (EEGI) una sensibilidad mayor. Esto puede atribuirse a que como resultado del incremento de temperatura, el material con que está hecho el neumático sufre un incremento de volumen debido a:

- suavización y dilatación del material (caucho)
- deformación por una presión (esfuerzo) incrementado

La combinación de estos dos fenómenos trae como consecuencia una disminución de la presión de inflado del neumático. Como es posible observar en esta Figura 3.1, la relación (DIF) entre las pendientes de las respectivas líneas está expresada por:

$$\text{DIF} = \frac{2.531 \text{ kPa / C}}{1.243 \text{ kPa / C}} = 2.04 \quad (3.5)$$

Para tener una idea del incremento de volumen que explique el diferente comportamiento del neumático al tomar la EEGI y la información del fabricante, a continuación se efectúan los cálculos, empleando la Ley Combinada de los Gases [24], que es:

$$\left(\frac{T}{PV}\right)_0 = \left(\frac{T}{PV}\right)_1 \quad (3.6)$$

De acuerdo a la expresión empírica (3.4) y tomando como condiciones inicial y final de la temperatura y de la presión las siguientes:

$$P_0 = 691 \text{ kPa}, \quad T_0 = 273 \text{ }^0\text{K}, \quad P_1 = 753 \text{ kPa}, \quad T_1 = 323 \text{ }^0\text{K}$$

y considerando un volumen inicial (V_0) igual a la unidad, el volumen final, V_1 , es de

$$V_1 = 1.08V_0$$

lo cual indica que el efecto combinado de la suavización, de la dilatación y del esfuerzo incrementado implica, bajo un cierto criterio, sólo una pequeña variación del volumen del aire contenido.

3.2.2 Formulación del efecto de presión del neumático sobre su rigidez y amortiguamiento

Relación de la presión de inflado versus rigidez vertical del neumático

De lo indicado en la referencia [22], para los rangos comunes de operación de los neumáticos, es aceptable expresar la relación presión de inflado contra rigidez, mediante una línea recta. A partir de esto, se ha estimado la rigidez de un neumático bajo condiciones de inflado nominales (100 *psi* o 691 kPa), y a partir de ello se ha trazado una línea recta hasta un punto cercano al origen de los ejes.

Con objeto de tener un punto de referencia para la rigidez nominal del neumático, se emplea la relación entre la frecuencia natural y la rigidez reportada en la literatura, tomando una frecuencia natural de los ejes direccionales de un tractor como 20.4 Hz (125.6 rad/s) [23], y asignando a la masa del eje delantero un valor promedio de 600 kg [26], la rigidez k asociada a este eje (kN/m), compuesto de dos neumáticos, se expresa por $k = \omega^2 m$ [28], donde ω es la frecuencia natural [rad/s] y m es la masa del eje. Esto resulta en un valor de rigidez del par de llantas de 9465 kN/m. De lo anterior resulta una rigidez nominal de cada llanta de $9,465 / 2 = 4,732$ kN/m. Este valor coincide con lo que normalmente se toma para un vehículo *cuarto de carro* [27].

En la Figura 3.2 se muestra la aproximación lineal resultante para la relación presión de inflado del neumático (p_n) versus la rigidez (k_n) del neumático. La ecuación de la línea es:

$$k_n = 6.83 * p_n \quad (3.7)$$

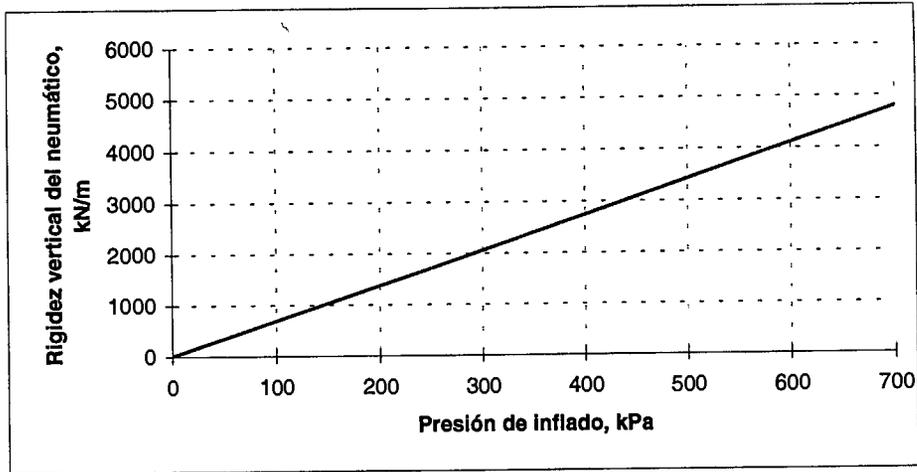


Figura 3.2 Variación de la rigidez vertical del neumático con la presión de inflado

Relación de presión de inflado- constante de amortiguamiento del neumático

A partir de valores experimentales para la relación presión de inflado contra constante de amortiguamiento (c_n) reportados en [22], a continuación se presenta una aproximación polinomial a las relaciones ahí reportadas.

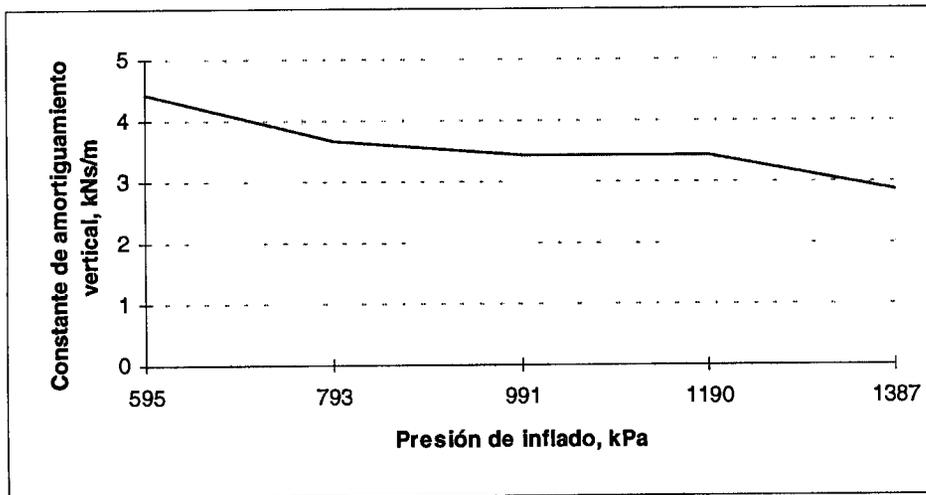


Figura 3.3 Variación de la constante de amortiguamiento vertical del neumático con la presión de inflado [22].

El ajuste polinomial de la curva de la Figura 3.3 da como resultado las siguientes expresiones:

$$\text{Ajuste Lineal: } c_n = 5.286 - (1.73E - 03 p_n)$$

$$\text{Ajuste Cuadrático: } c_n = 6.320 - (3.992E - 03 p_n) + (1.144E - 06 p_n^2)$$

$$\text{Ajuste Cúbico: } c_n = 16.09 - (3.669E - 02 p_n) + (3.571E - 05 p_n^2) - (1.162E - 08 p_n^3)$$

En la Figura 3.4 se muestran las gráficas correspondientes a los distintos ajustes polinomiales ensayados. De esta figura se puede concluir la pertinencia de emplear el ajuste cúbico.

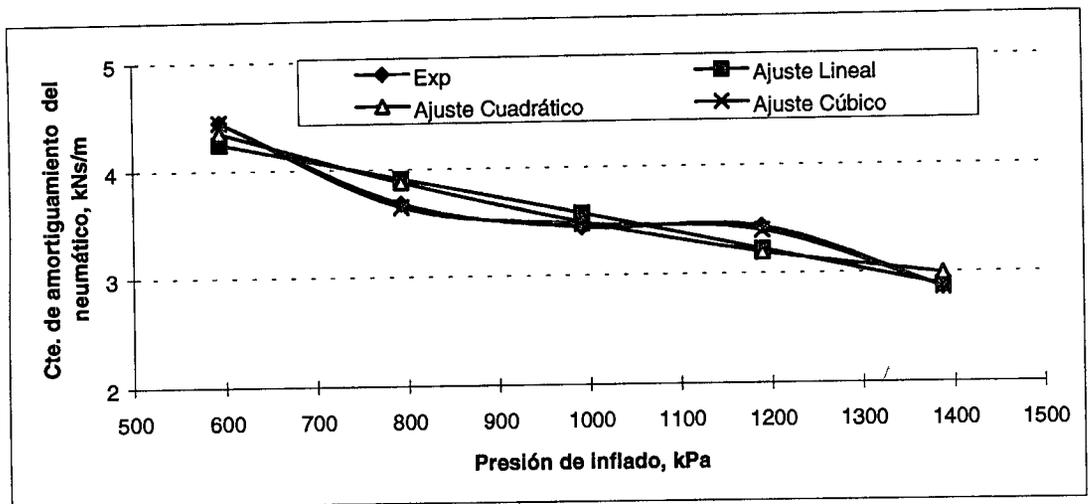


Figura 3.4 Diferentes ajustes polinomiales para la relación de la constante de amortiguamiento del neumático versus presión de inflado.

3.3 Efecto de la temperatura ambiente sobre la constante de amortiguamiento de los amortiguadores

En esta sección se establecerá la relación entre la temperatura ambiente y la viscosidad del fluido de los amortiguadores, y de ésta con la constante de amortiguamiento de los elementos amortiguadores de la suspensión

3.3.1 Formulación del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del fluido de los amortiguadores

A partir de valores reportados en la literatura, para la relación temperatura T contra viscosidad μ reportados en [25], se presenta una aproximación polinomial referente a dicha relación.

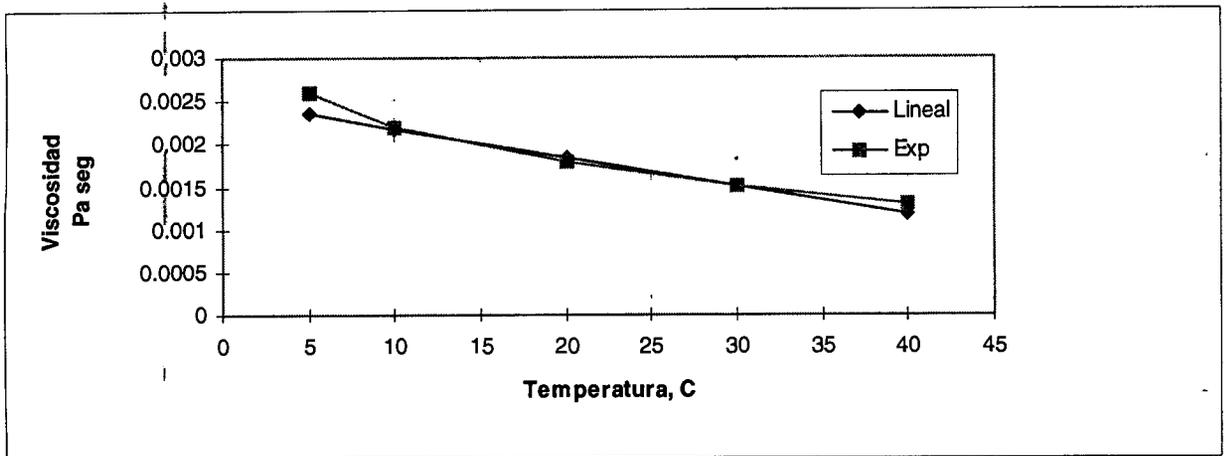


Figura 3.5. Ajuste polinomial para la relación de la viscosidad versus temperatura.

El ajuste polinomial de la curva de la Figura 3.5 da como resultado la siguiente expresión:

$$\mu = 0.02472 - 3.3018E - 04 * T \quad (3.8)$$

El ajuste se considera válido para el rango de temperatura ambiente, si se toma en cuenta que es el parámetro a considerar.

3.3.2 Formulación del efecto de la viscosidad sobre la constante de amortiguamiento de los amortiguadores

En este apartado se presenta un desarrollo para el cálculo de la constante de amortiguamiento c_a de los amortiguadores del sistema de suspensión de los vehículos, en función de la viscosidad μ .

A partir de la definición de viscosidad dinámica tenemos [25]:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (3.9)$$

Por otro la tensión cortante, está definida por:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

donde P es la fuerza cortante y A el área de aplicación de esta fuerza.

Igualando las ecuaciones (3.9) y (3.10), se tiene que:

$$\frac{P}{A} = \mu \frac{dv}{dy}$$

De esta expresión y para encontrar la expresión para la constante de amortiguamiento, se intercambian de lugar A y dv , con lo que

$$\frac{P}{dv} = \frac{\mu A}{dy} = c_a$$

donde

$$\frac{P}{dv} = c_a = \frac{\mu A}{dy}$$

se toma el lado derecho de la expresión

$$c_a = \frac{\mu A}{dy} \quad (3.11)$$

Según la figura (3.6), dy es el espesor del fluido dentro de los orificios del amortiguador; el área queda definida por la expresión:

$$A = \pi DL$$

donde D es el diámetro del orificio y L su longitud, entonces, si con un incremento Δy se iguala a dy , entonces

$$dy = \frac{D}{2}$$

por lo tanto, si se sustituyen estas expresiones para A y dy en (3.11), se obtiene:

$$c_a = \mu \left(\frac{\pi DL(2)}{D} \right) = 2\pi L\mu$$

y la relación que expresa la constante de amortiguamiento es:

$$c_a = 2\pi L\mu \quad (3.12)$$

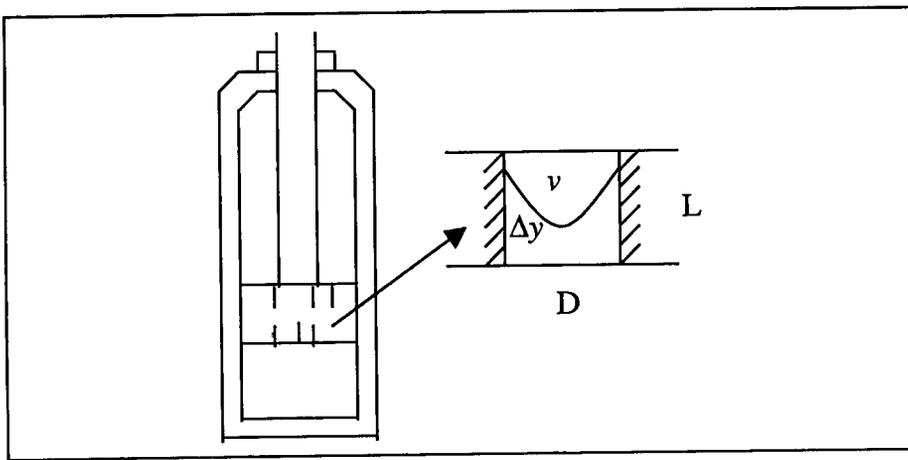


Figura 3.6. Amortiguador de líquido viscoso y orificios.

3.3.3 Distribución de la temperatura respecto a la hora del día

En este apartado se desarrolla una expresión para la temperatura ambiente como una función de la hora del día. La variación de la temperatura se ha considerado armónica, y se proponen diferentes parámetros para dicha ecuación, como una función de la estación del año. La forma general de la ecuación propuesta para la temperatura es:

$$T(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \beta) + T_p \quad (3.13)$$

donde

$T(t)$ es la temperatura en función de la hora del día, expresada en °C

A es la amplitud de la variación de la temperatura a lo largo del día en °C

ω es la frecuencia angular, expresada en rad/h

t es la hora del día, expresada en h

β es el ángulo de fase, en rad

T_p es la temperatura promedio en °C

A partir de la conversión de radianes a grados se tiene que la frecuencia angular es:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.14)$$

donde f es la frecuencia en Hz.

Tomando la frecuencia f igual a $f = \frac{1 \text{ ciclo}}{24 \text{ h}}$, la frecuencia angular estará dada por ecuación (3.13):

$$\omega = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{ciclo}} \frac{1 \text{ ciclo}}{24 \text{ h}}$$

entonces

$$\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{12 \text{ h}}$$

Para obtener el ángulo de fase β , se considera que la temperatura mínima se da a las 04 hrs, de tal manera que:

$$\beta = \frac{\pi}{12} 10 = \frac{\pi}{6} 5$$

Tomando en cuenta ω y β , la ecuación (3.13) queda:

$$T = A \text{ sen} \left(\frac{\pi}{12} t - \frac{5}{6} \pi \right) + T_p \quad (3.13)$$

Los datos considerados para las distintas estaciones del año son:

Primavera, T_{promedio} :	12 °C	Amp. 10 °C
Verano, T_{promedio} :	18 °C	Amp. 10 °C
Otoño, T_{promedio} :	8 °C	Amp. 10 °C
Invierno, T_{promedio} :	10 °C	Amp. 10 °C

Por lo tanto, las expresiones para cada estación del año quedan;

$$T = 10 \text{ sen} \left(\frac{\pi}{12} t - \frac{5}{6} \pi \right) + 12 \quad (3.15)$$

$$T = 10 \text{ sen} \left(\frac{\pi}{12} t - \frac{5}{6} \pi \right) + 18 \quad (3.16)$$

$$T = 10 \text{ sen} \left(\frac{\pi}{12} t - \frac{5}{6} \pi \right) + 8 \quad (3.17)$$

$$T = 10 \text{ sen} \left(\frac{\pi}{12} t - \frac{5}{6} \pi \right) + 5 \quad (3.18)$$

En la Figura (3.7) se muestra la gráfica de las ecuaciones 3.13, 3.14, 3.15, 3.16.

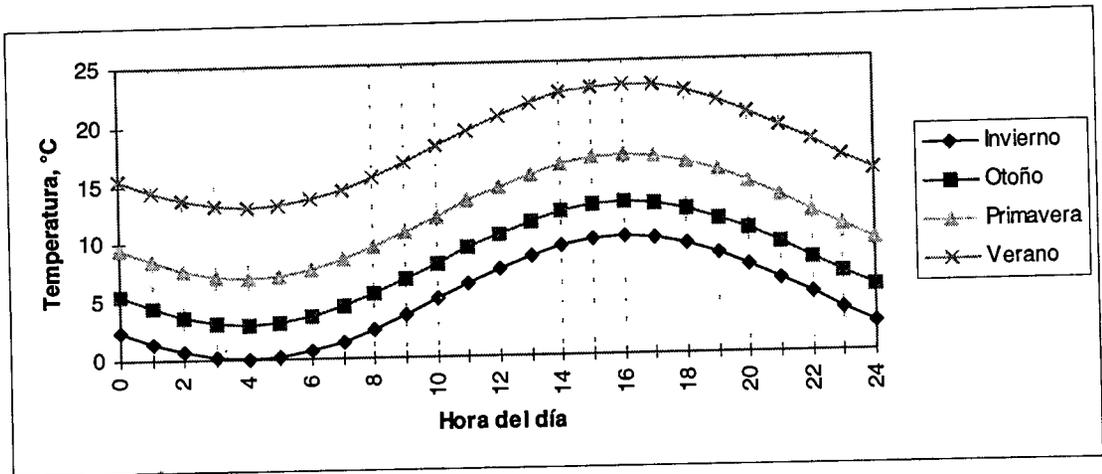


Figura 3.7. Variación estimada de la temperatura a lo largo del día, para diferentes estaciones del año

De la figura 3.7 se observa una diferencia en cuanto a la distribución de temperatura, presentándose una sensibilidad notable en las diferentes estaciones del año. Por otro lado, la influencia de la hora del día, es otro factor que determina el valor de dicha temperatura.

A continuación se muestra la secuencia de programación, donde se leen de un archivo la hora del día (t), la temperatura promedio (T_p) para la estación del año considerada. A partir de esto se inician los cálculos, con la temperatura (T), de acuerdo a la expresión (3.13)', la cual corresponde al valor de la temperatura a una determinada hora del día, posteriormente, se realiza el cálculo de la presión del neumático para con esto obtener la rigidez y la constante de amortiguamiento del mismo. Por cuanto al otro componente del sistema de suspensión, el amortiguador, se inicia con los cálculos de la viscosidad (μ) como una variable dependiente de la temperatura (T); finalmente se calcula la constante de amortiguamiento del amortiguador. Estas variables constituyen la entrada al modelo existente, desarrollado en el IMT para simular la interacción vehículo pesado – pavimento.

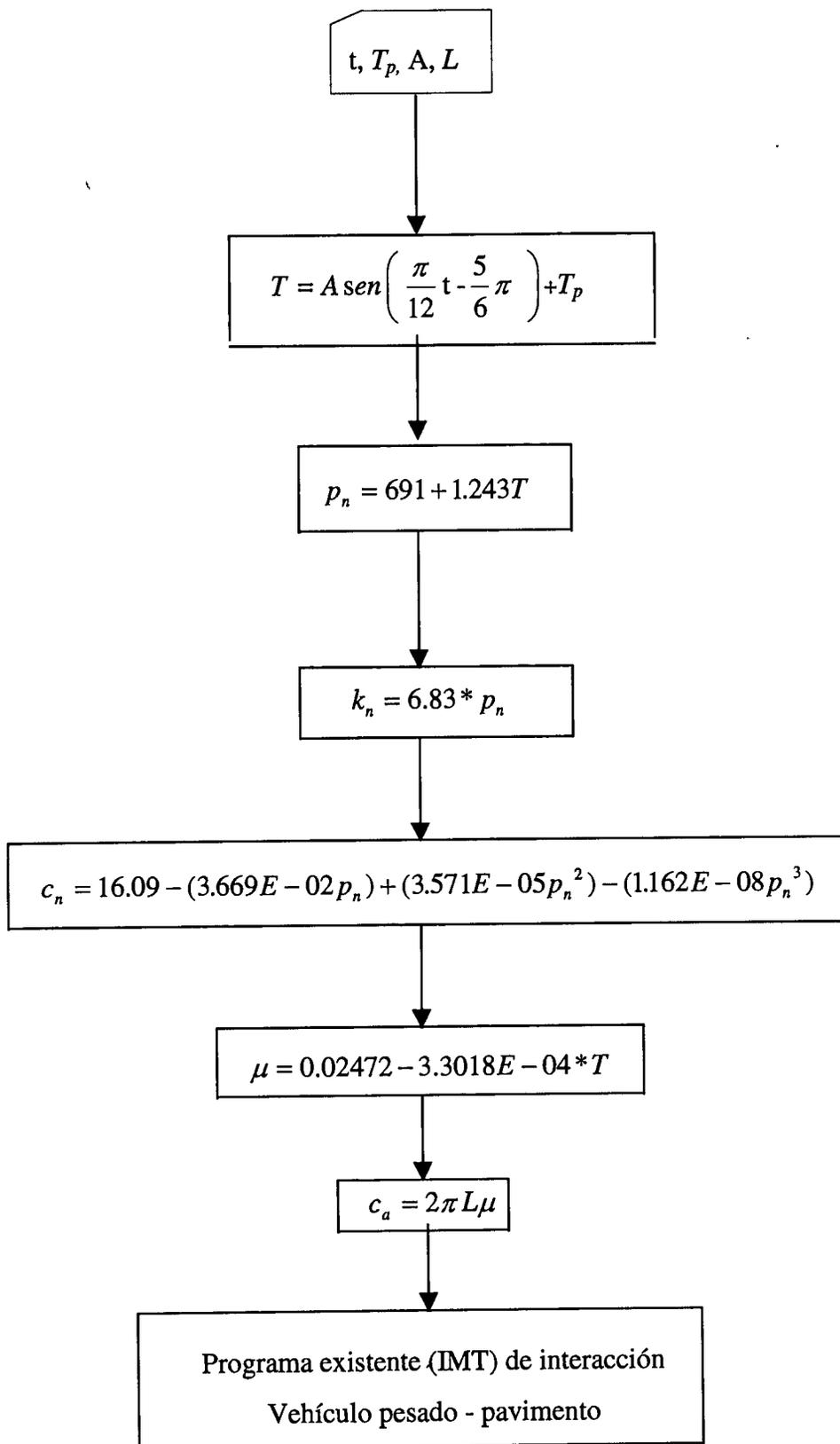


Figura 3.9. Secuencia de programación.

3.4 Conclusiones

La temperatura tiene un efecto importante en las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los neumáticos, lo cual habrá de reflejarse en los niveles de energía almacenada en el pavimento, producto de la distinta manera de responder el vehículo al perfil del mismo.

La aproximación basada en la General de los Gases para evaluar el efecto de la temperatura sobre la presión de inflado sobrestima este efecto al comparar los resultados con valores empíricos. Esto se atribuye a que la aproximación teórica no toma en cuenta otros efectos, relacionados fundamentalmente con el efecto que la temperatura tiene sobre las propiedades de rigidez del material de neumático. Por otro lado, este incremento en la presión afecta de manera sensible las características de rigidez y de amortiguamiento de los neumáticos. Esto, para los rangos de variación de la presión de inflado considerados, producto de las variaciones en la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre las características de los amortiguadores es notable, afectando consiguientemente la respuesta de los vehículos a los pavimentos. De esta manera, la sensibilidad mostrada en este caso es mayor respecto a la observada en el caso de los neumáticos, como era de esperarse.

Capítulo 4

Pruebas y resultados

4.1 Introducción

Hasta ahora, se han presentado las formulaciones para establecer el efecto que la temperatura ambiente tiene sobre el potencial daño en el pavimento por el tránsito de los vehículos. Estas formulaciones han incluido el efecto que las variaciones de esta temperatura tienen tanto sobre las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los componentes de los vehículos como sobre la rigidez del pavimento, evaluando estos efectos como cambios en las energías almacenadas en el pavimento, correspondiendo una mayor energía a un mayor daño sobre el pavimento. Como se ha visto en el capítulo dos; a mayores temperaturas del pavimento, corresponderán mayores cantidades de energía almacenada en el mismo, provocando con ello un incremento en el deterioro de la infraestructura. Así, a diferentes distribuciones horarias de un cierto tráfico total diario, corresponderán distintos niveles de deterioro de los pavimentos.

En este capítulo se aplican las formulaciones desarrolladas, para evaluar el efecto que distintas distribuciones horarias del tráfico, tienen sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento. De esta forma, una estadística del tráfico en un cierto tramo carretero nacional, es manejada con objeto de disminuir la energía almacenada en el pavimento, permitiendo ello la minimización del deterioro de la infraestructura. Esto es, se propone que un ahorro en el deterioro del pavimento puede lograrse tan sólo con una redistribución horaria de un mismo tráfico.

Es importante mencionar que lo que se ha atendido en este trabajo por cuanto a la distribución horaria, considera exclusivamente el deterioro potencial de la infraestructura, sin tomar en cuenta otros elementos importantes que podrían afectar una redistribución horaria del tráfico. Esto es, no se atienden otros factores tales como la seguridad del tránsito, la logística y el vandalismo.

4.2 Diseño de las pruebas

El análisis presentado aquí del efecto que la distribución horaria de los vehículos tiene sobre las cantidades de energía almacenada en el pavimento, considera la comparación de los montos de energía almacenada asociados a una distribución horaria medida del tráfico, con aquellos producto de otras distribuciones horarias de ese mismo tráfico diario total. En esta perspectiva se consideran dos distribuciones alternas a un tráfico medido (MEDIDA), la primera (UNIFORME) asume una distribución uniforme del tráfico horario, mientras que la segunda (NORMAL) consiste de una distribución normal con un pico de tránsito a la hora en que la temperatura del pavimento, y por ende su deterioro, es menor. De esta forma, con estas dos distribuciones horarias evaluadas, se valoran dos criterios para el uso de las infraestructuras. Por un lado se tendría la política de promover la eliminación de los picos en el uso de las carreteras, promoviendo una distribución uniforme del tráfico a lo largo del día. Por el otro lado, al emplear una distribución horaria normal con un pico nocturno, se evalúa el efecto que una distribución “óptima” en cuanto al uso de la infraestructura, tiene sobre el potencial ahorro en el deterioro de la misma.

El pavimento considerado en todas las pruebas realizadas, es uno en regular estado, que representa de mejor manera el estado promedio de los pavimentos nacionales [7].

4.3 Tráfico horario de los vehículos

La distribución de un tráfico a lo largo del día determina un cierto tráfico horario de los vehículos. Las características de este tráfico horario será función de las necesidades de la industria del autotransporte. Estas necesidades están definidas por los requerimientos logísticos y de seguridad asociados al tipo de bienes transportados. Por ejemplo, la industria automotriz, con esquemas productivos de “justo a tiempo”, implica que el transporte de los subproductos e insumos se efectúe de tal manera que éstos se encuentren en las fábricas en determinados horarios específicos. Otro ejemplo de transporte que tiene limitaciones logísticas se identifica en el traslado de bienes perecederos, al ser llevados éstos a los grandes centros de abastos, en donde su comercialización se inicia a las primeras horas del día. Otro tipo de limitaciones, de naturaleza no logística, para el transporte de ciertos bienes, implicaría el riesgo de circular los vehículos por determinadas rutas carreteras en ciertos horarios.

4.3.1 Distribución medida

Como distribución horaria de referencia para el estudio del efecto que ésta tiene sobre el deterioro de los pavimentos, se ha tomado un tránsito medido en una de las carreteras nacionales, el cual constituye una representación válida de lo que ocurre a escala nacional [17]. Este tránsito fue establecido como parte del Estudio de Pesos y Dimensiones, que actualmente lleva a cabo el Instituto Mexicano del Transporte [20]. El tránsito medido corresponde al 31 de octubre de 1996.

En la Figura 4.1 se muestra la distribución horaria medida, para los distintos tipos de vehículos, siendo el tránsito total, por tipo de vehículo, el siguiente:

	<i>Vehículos tipo</i>			
	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>T3S2</i>	<i>T3S3</i>
<i>Número de vehículos</i>	464	114	90	103

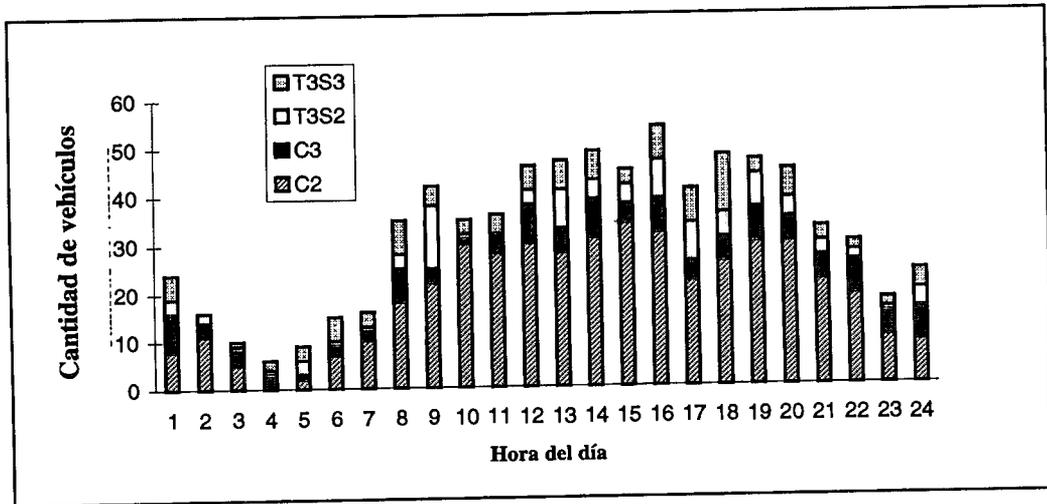


Figura 4.1 Distribución medida del tráfico en el tramo Toluca – Palmillas, del 31 de octubre de 1996 [20].

Algunas características estadísticas de este tráfico medido, para cada tipo de vehículo y cada hora, se muestran en la Tabla 4.1.

	<i>Vehículos tipo</i>			
	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>T3S2</i>	<i>T3S3</i>
<i>Media</i>	19.33	4.75	3.75	4.29
<i>Desviación estándar</i>				
<i>Valor</i>	10.59	2.18	3.03	2.47
<i>Por ciento</i>	54	45	80	57

Tabla 4.1 Estadísticas de tráfico medido, por cada hora.

Como se puede observar de la Tabla 4.1, la dispersión de los valores horarios del tránsito es muy grande, al observarse desviaciones estándar hasta del 80 por ciento en el caso del vehículo tipo T3S2. Al respecto, los valores promedios de estas desviaciones estándar en por ciento, resulta ser de 59.8.

4.3.2 Distribución normal con pico a las 3 AM

Asignando ahora una distribución normal o gaussiana, al tránsito diario medido descrito en el apartado anterior, tomando como hora de tránsito pico aquella en la que la temperatura del pavimento es menor, esto es, a las 3 am., en la Figura 4.2 se muestra la distribución horaria resultante. Para la asignación de los flujos horarios para esta distribución normal, se ha tomado la siguiente fórmula [31]:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-x^2}{2}}$$

donde: e y π son números irracionales

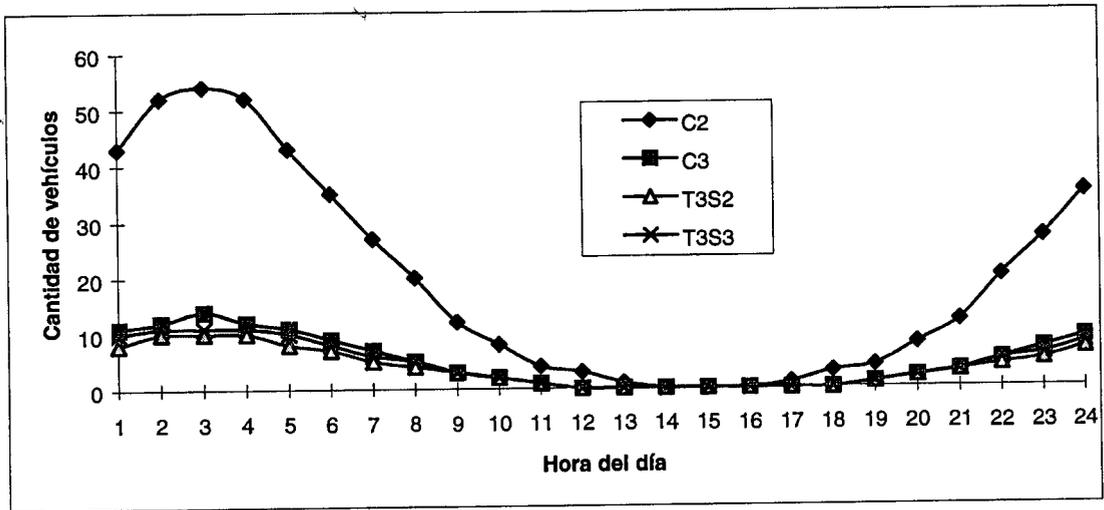


Figura 4.2 Distribución normal del tráfico en el tramo Toluca – Palmillas, del 31 de octubre de 1996.

4.4 Temperaturas de circulación

En esta sección se presentan las distintas temperaturas ambiente a las que estarían circulando los diferentes tipos de vehículos, para las cuatro estaciones del año y tres distribuciones de tráfico consideradas, esto es, la distribución medida, la normal con pico a las 3 am, y la uniforme. La variación de la temperatura a lo largo del día, ha sido tomada de las curvas de estimación presentadas en la Sección 3.3.3.

4.4.1 Distribución medida

Para la distribución horaria medida en campo, presentada en la Figura 4.1, en las Figuras 4.3 a la 4.6, se presentan, para cada tipo de vehículo, la distribución del número de vehículos transitando a las distintas temperaturas, para las cuatro estaciones del año.

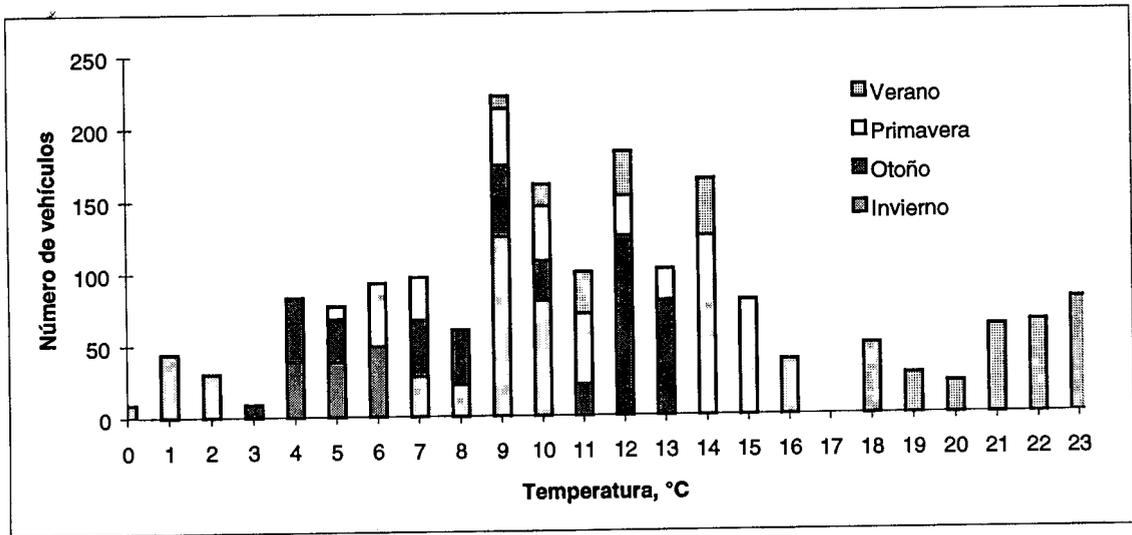


Figura 4.3 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo C2, para distintas estaciones del año y la distribución medida.

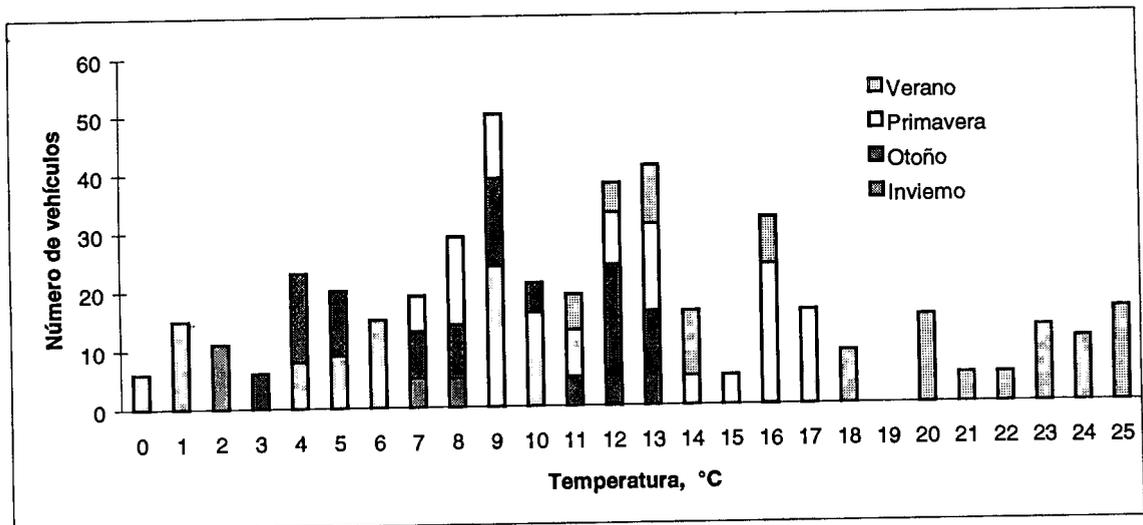


Figura 4.4 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo C3, para distintas estaciones del año y la distribución medida.

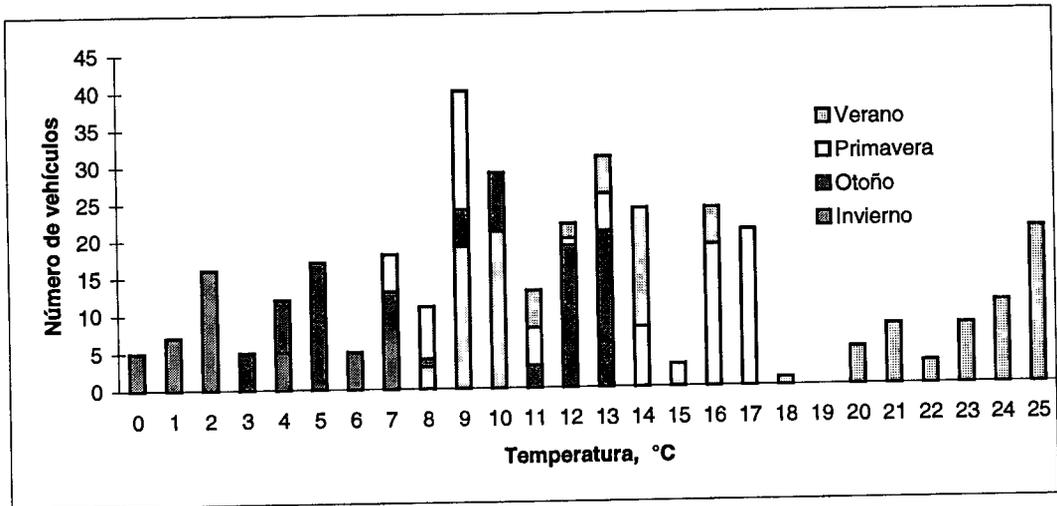


Figura 4.5 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo T3S2, para distintas estaciones del año y la distribución medida.

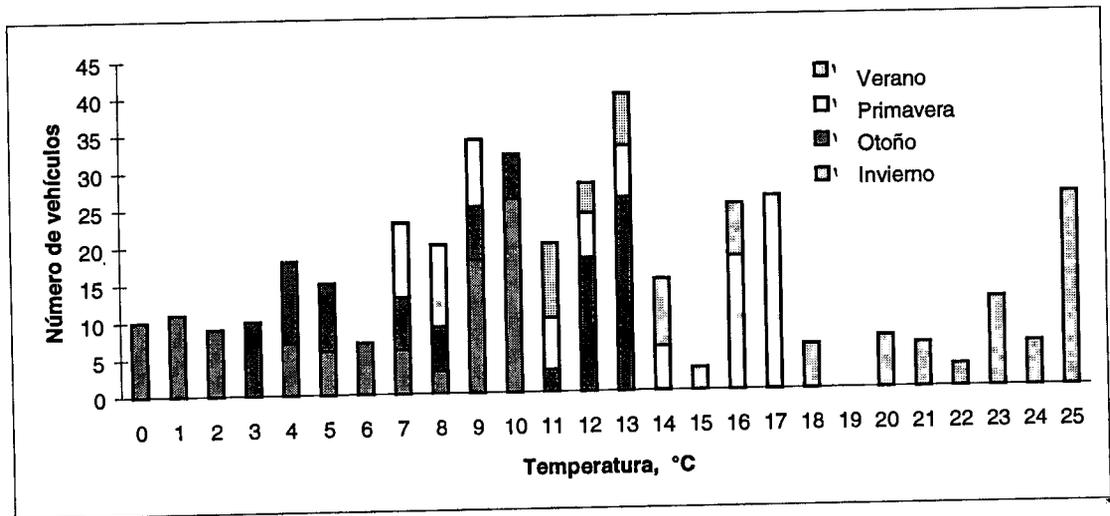


Figura 4.6 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo T3S3, para distintas estaciones del año y la distribución medida.

4.4.2 Distribución normal con pico a las 3 AM

Para la distribución horaria que minimiza el daño a los pavimentos, esto es, disminuye la cantidad de energía almacenada en el pavimento, en las gráficas de las Figuras 4.7 a la 4.10, se presentan, para cada tipo de vehículo, la distribución del número de éstos transitando a las distintas temperaturas, para las cuatro estaciones del año.

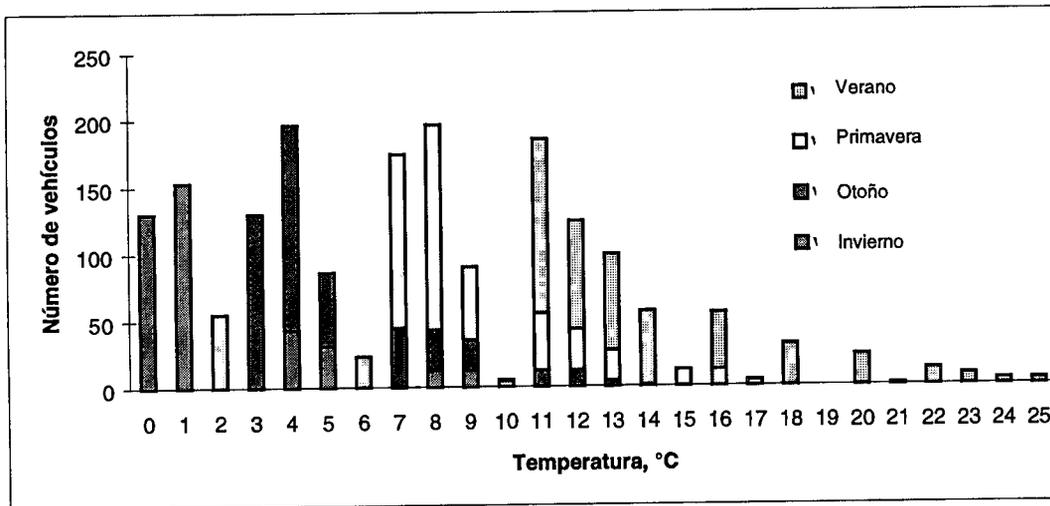


Figura 4.7 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo C2, para distintas estaciones del año y un tránsito con pico a las 3 am.

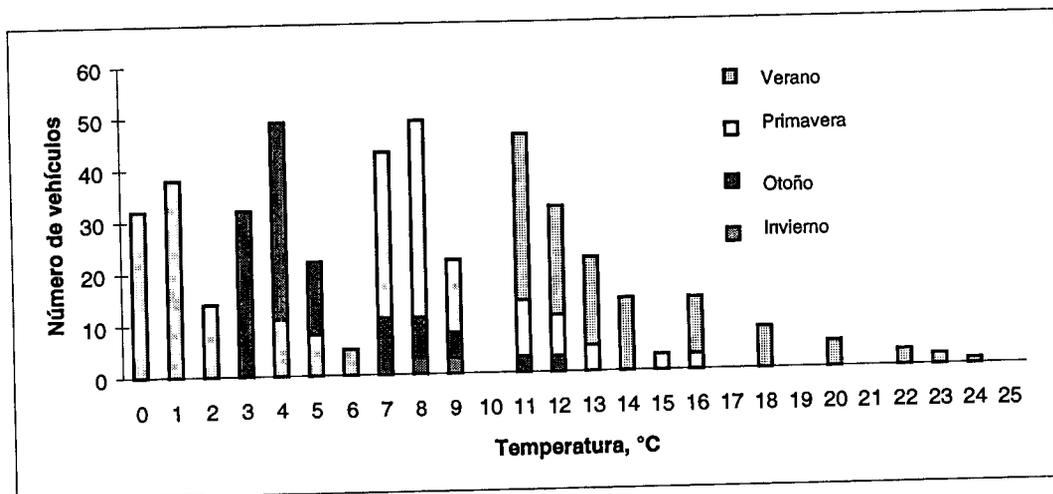


Figura 4.8 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo C3, para distintas estaciones del año y un tránsito con pico a las 3 am.

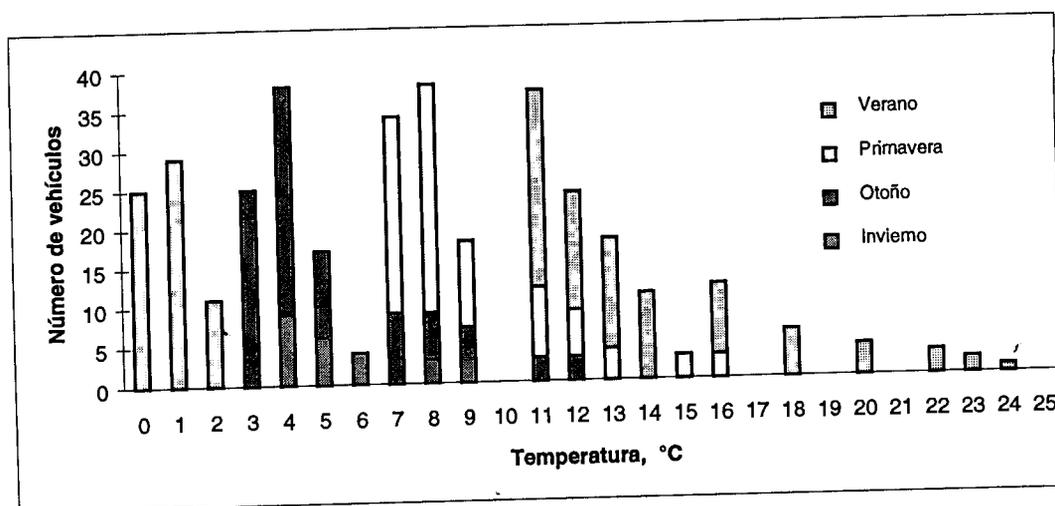


Figura 4.9 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo T3S2, para distintas estaciones del año y un tránsito con pico a las 3 am.

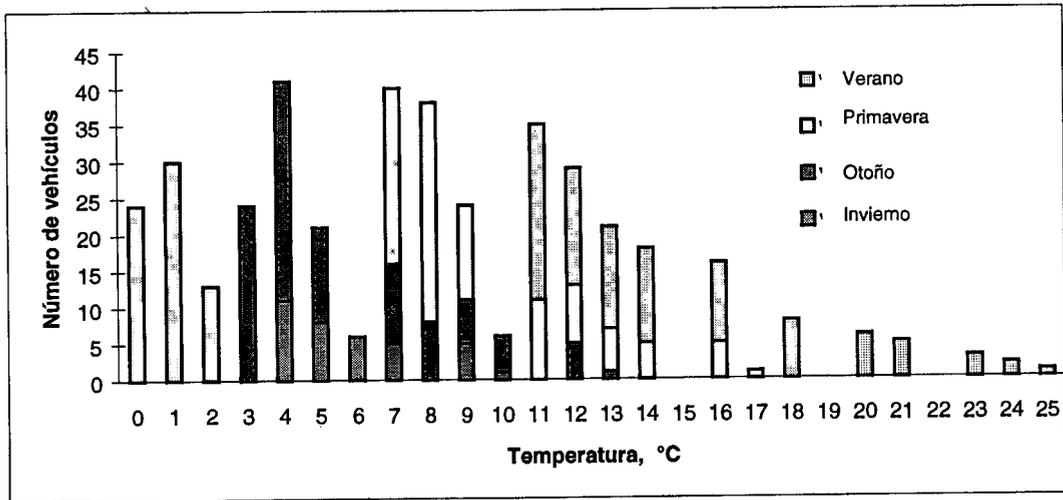


Figura 4.10 Distribución del número de vehículos – temperatura ambiente, para el vehículo tipo T3S3, para distintas estaciones del año y un tránsito con pico a las 3 am.

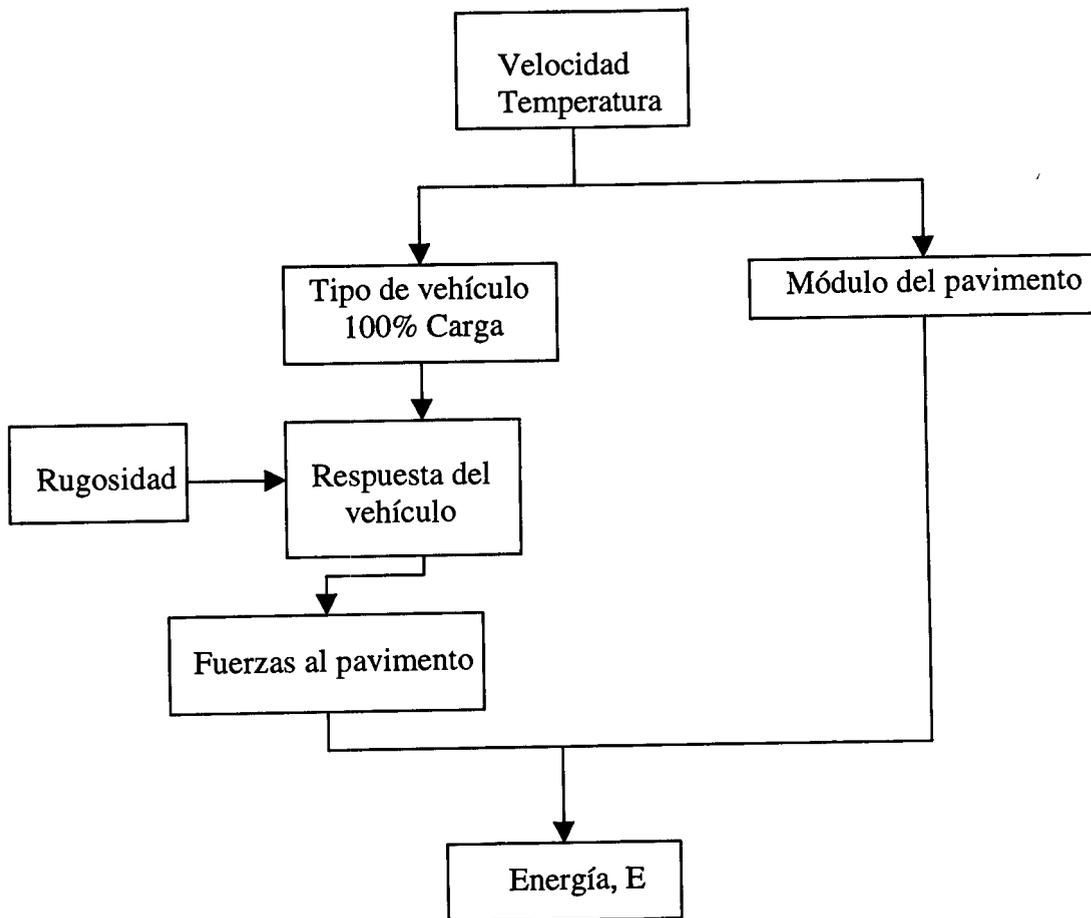
4.5 Resultados

Para cada tipo de vehículo y estación del año, en esta sección se presentan los efectos que las distintas distribuciones horarias de tránsito, tienen sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento considerado, tres diferentes velocidades de los vehículos. Los resultados se muestran tanto en Factores de Carga Equivalente (FCE) [33], como en valores relativos de los máximos obtenidos para cada velocidad. El FCE para cada variante de tránsito simulada, ha sido establecido en referencia a la cantidad de energía asociada al paso de un eje sencillo de 8,100 N sobre el pavimento, que en este caso resultó ser de 1000 Joules. Para cada grupo de resultados, se establece, a partir de los valores relativos respecto al máximo, un porcentaje de ahorro en la energía almacenada. Este valor resulta de restar de la unidad, el valor relativo correspondiente.

Diagrama de la metodología

Para calcular la cantidad de energía almacenada por el pavimento, debido al efecto de la temperatura ambiente y al tránsito de los diferentes tipos de vehículos, a continuación, se muestra el diagrama de flujo del cálculo de la energía almacenada en el pavimento.

Se puede observar que la entrada común a los cálculos del módulo del pavimento y de la respuesta dinámica del vehículo son la velocidad y la temperatura. Una vez que las fuerzas aplicadas al pavimento son determinadas, la energía almacenada en el mismo es calculada, de esta forma la temperatura afecta de tal manera común tanto a la respuesta del vehículo como la rigidez del pavimento.



4.5.1 Vehículo C2

Invierno

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados para las distintas distribuciones de tránsito. Se puede observar que los valores máximos corresponden, en todos los casos, a la distribución medida.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	33.147 / 1.000	31.237 / 0.942	29.113 / 0.878
70	31.057 / 1.000	29.348 / 0.945	27.450 / 0.884
100	29.723 / 1.000	28.141 / 0.947	26.384 / 0.888

Tabla 4.2 Resultados para el vehículo C2 en invierno, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.2 se han graficado en la Figura 4.11, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

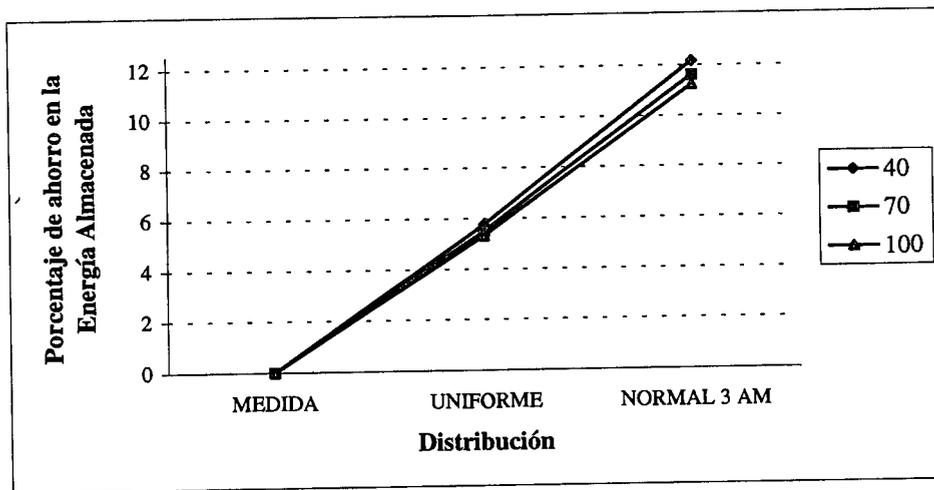


Figura 4.11 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad. vehículo tipo C2 en invierno (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

De esta forma, de la Figura 4.11 se observa un comportamiento semejante para las distintas velocidades consideradas, con variaciones del orden del uno por ciento entre 40 y 100 km/h. El ahorro potencial máximo se observa en el caso de que la velocidad de circulación de los vehículos sea baja, esto es, de 40 km/h, para la cual el porcentaje de ahorro es del 12 por ciento, mientras que a 100 km/h, el porcentaje disminuye al 11 por ciento.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados para las distintas distribuciones de tránsito, empleando como unidad de medición tanto los ejes equivalentes como los valores relativos al máximo para cada velocidad considerada. Se puede observar que estos valores máximos no corresponden, en todos los casos, a la distribución medida. Esto es, para este caso, la distribución uniforme provoca una mayor acumulación de energía en el pavimento.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	39.397 / 1.000	39.460 / 1.022	33.643 / 0.854
70	36.660 / 1.000	36.716 / 1.022	33.562 / 0.915
100	34.922 / 1.000	34.976 / 1.022	32.047 / 0.918

Tabla 4.3 Resultados para el vehículo C2 en primavera, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.3 se han graficado en la Figura 4.12, expresando los ahorros asociados y atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

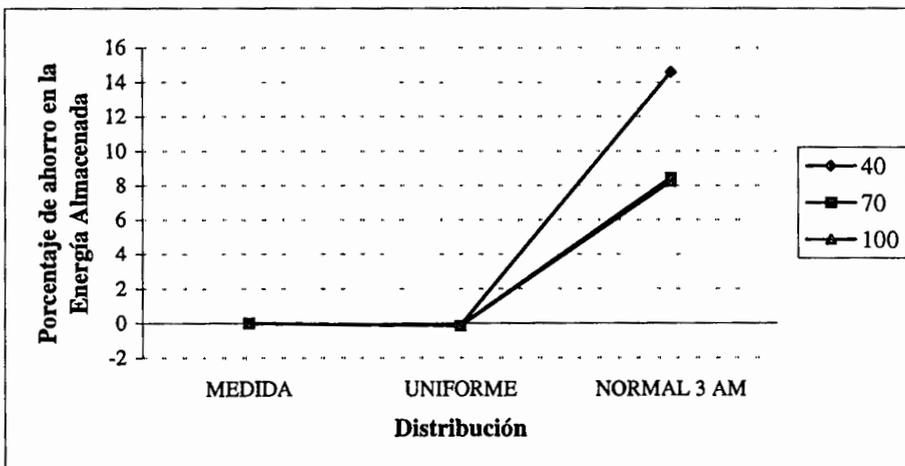


Figura 4.12 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad vehículo tipo C2 en primavera (40, 70, 100 km/h).

De esta forma, de la Figura 4.12 se observa un comportamiento sensible a las velocidades consideradas, con variaciones importantes para el caso de la mínima velocidad. De observar los FCE de la tabla 4.3, se deduce que la dispersión observada en la Figura 4.12 se debe no a diferencias notables en los resultados para la distribución a las 3 AM, sino a la alta sensibilidad de la energía a la velocidad en el caso de la distribución medida, ya que lo que se grafica son los valores respecto a la distribución uniforme la que se obtuvo la mayor cantidad de energía. Así, el ahorro potencial máximo correspondiente se observa del 14 por ciento, mientras que a 100 km/h y 70 km/h, el porcentaje disminuye a poco más del 8 por ciento.

Verano

La Tabla 4.4 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C2 en verano.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	53.538 / 1.000	47.556 / 0.888	40.300 / 0.753
70	49.341 / 1.000	43.976 / 0.891	34.541 / 0.700
100	46.706 / 1.000	41.722 / 0.893	38.530 / 0.825

Tabla 4.4 Resultados para el vehículo C2 en verano, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h, FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.4 se han graficado en la Figura 4.13, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

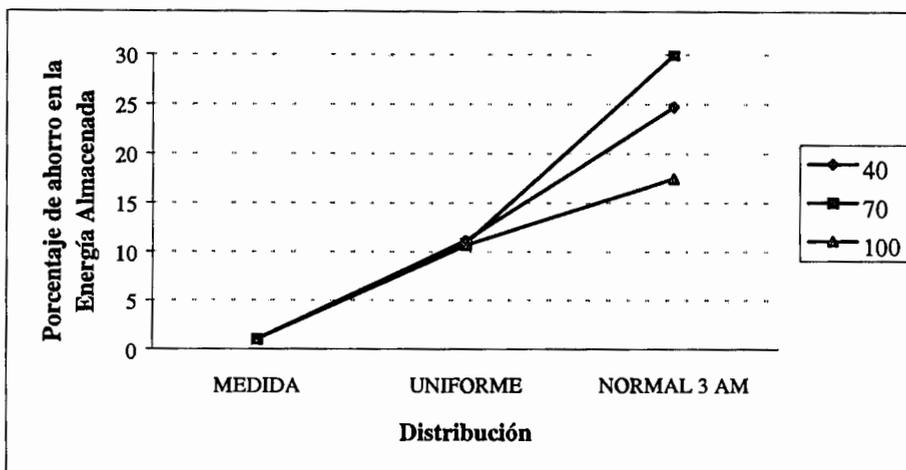


Figura 4.13 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo C2 en verano (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.13 se observa que para una distribución uniforme los valores obtenidos son consistentes en las tendencias en cuanto al ahorro en la energía almacenada, esto es el ahorro es de un diez por ciento aproximadamente. El mayor ahorro en la energía corresponde a la distribución normal con pico a las 3 am, que significa una diferencia de aproximadamente catorce por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, a 100 km/h.

Otoño

La Tabla 4.5 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C2 en otoño.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	36.660 / 1.000	34.260 / 0.935	31.648 / 0.863
70	34.166 / 1.000	32.053 / 0.938	29.709 / 0.870
100	32.608 / 1.000	30.648 / 0.940	28.475 / 0.873

Tabla 4.5 Resultados para el vehículo C2 en otoño, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.5 se han graficado en la Figura 4.14, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

De la Figura 4.14 se observa una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias respecto al ahorro de energía almacenada en el pavimento, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad con valores que van hasta del catorce por ciento aproximadamente, que significa una diferencia de aproximadamente el uno por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

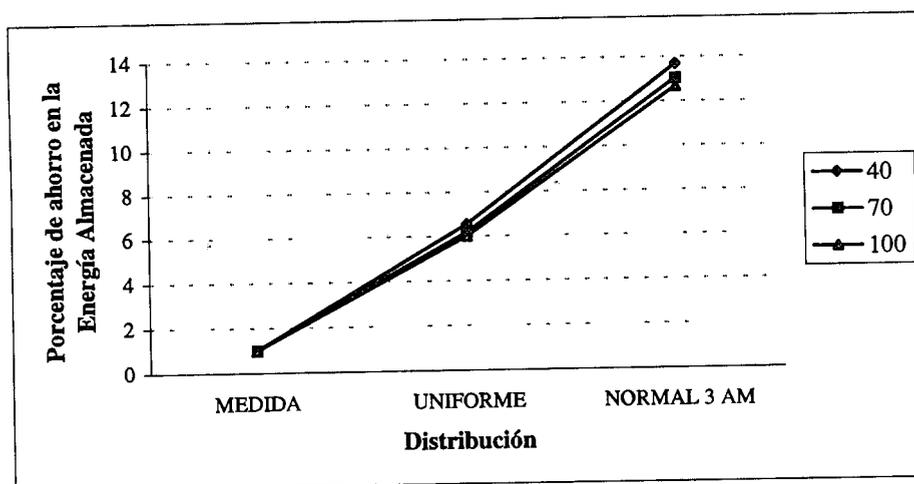


Figura 4.14 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad vehículo tipo C2 en otoño (40, 70, 100 km/h).

4.5.2 Vehículo C3

Invierno

La Tabla 4.6 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C3 en invierno.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	12.930 / 1.000	12.457 / 0.963	11.585 / 0.896
70	12.146 / 1.000	11.721 / 0.965	10.940 / 0.910
100	11.724 / 1.000	11.328 / 0.966	10.599 / 0.904

Tabla 4.6 Resultados para el vehículo C3 en invierno, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.6 se han graficado en la Figura 4.15, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

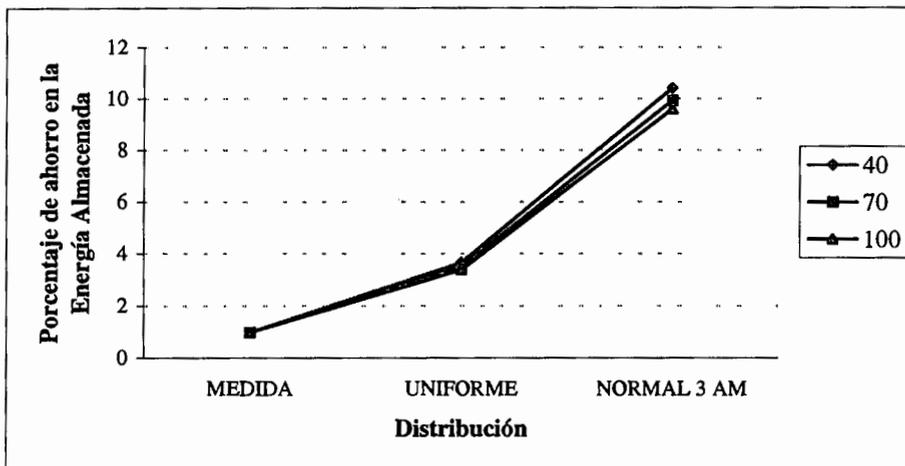


Figura 4.15 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad vehículo tipo C3 en invierno (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.15 se observa que para una distribución uniforme, los valores correspondientes para las diferentes velocidades de prueba presentan variaciones poco

considerables correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am. El mayor ahorro presenta un valor del 11 por ciento aproximadamente que corresponde a la menor velocidad, es decir a 40 km/h, que significa una diferencia de aproximadamente el uno por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

Primavera

La Tabla 4.7 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C3 en primavera.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	16.528 / 1.000	15.740 / 0.952	14.297 / 0.865
70	15.375 / 1.000	14.667 / 0.954	13.370 / 0.870
100	14.748 / 1.000	14.084 / 0.955	12.869 / 0.873

Tabla 4.7 Resultados para el vehículo C3 en Primavera, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.7 se han graficado en la Figura 4.16, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

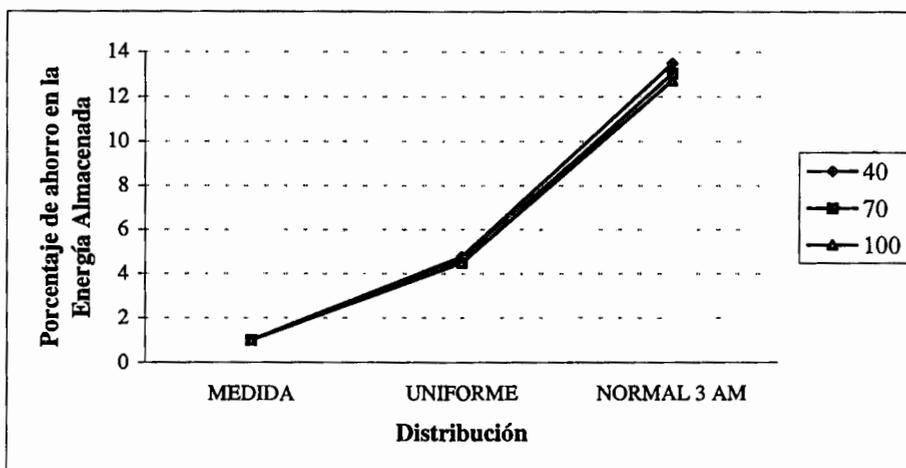


Figura 4.16 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo C3 en primavera (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.16 se observa una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias en cuanto al ahorro de la energía, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 AM. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad, es decir a 40 km/h, que significa una diferencia de aproximadamente el dos por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

Verano

La Tabla 4.8 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C3 en verano.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	22.603 / 1.000	20.872 / 0.923	17.32 / 0.766
70	20.831 / 1.000	19.275 / 0.925	16.086 / 0.772
100	19.861 / 1.000	18.404 / 0.927	15.421 / 0.776

Tabla 4.8 Resultados para el vehículo C3 en verano, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.8 se han graficado en la Figura 4.17, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

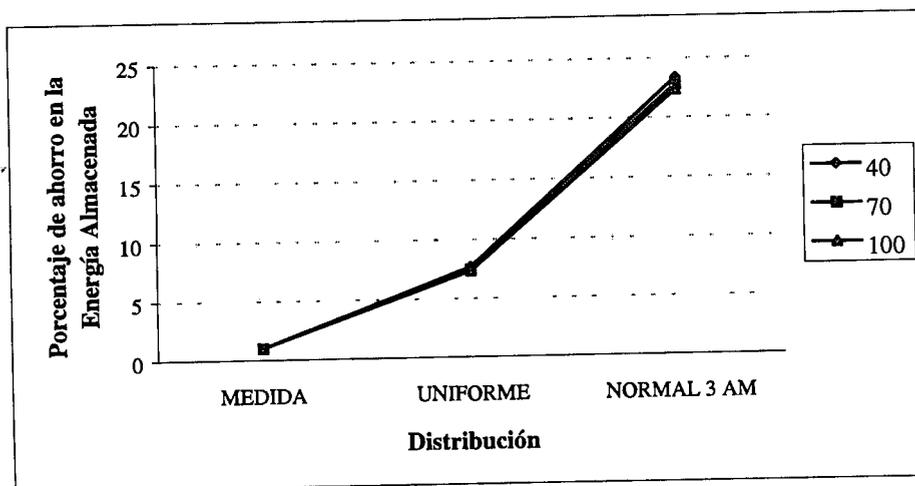


Figura 4.17 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo C3 en verano (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.17 se observa una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3am. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el dos por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

Otoño

La Tabla 4.9 muestra los resultados correspondientes para el vehículo C3 en otoño.

Los resultados mostrados en la Tabla 4.9 se han graficado en la Figura 4.18, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

De la Figura 4.18 se observa una consistencia en los valores obtenidos, tanto para la distribución medida como para la uniforme, y en las tendencias en lo que corresponde al ahorro de la energía, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a

las 3 am. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el dos por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

<i>VEL</i>	<i>MEDIDA</i>	<i>UNIFORME</i>	<i>NORMAL 3 am</i>
<i>40</i>	<i>12.248 / 1.000</i>	<i>13.664 / 0.959</i>	<i>12.590 / 1.028</i>
<i>70</i>	<i>13.327 / 1.000</i>	<i>12.803 / 0.961</i>	<i>11.839 / 0.888</i>
<i>100</i>	<i>12.830 / 1.000</i>	<i>12.339 / 0.962</i>	<i>11.437 / 0.891</i>

Tabla 4.9 Resultados para el vehículo C3 en otoño, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

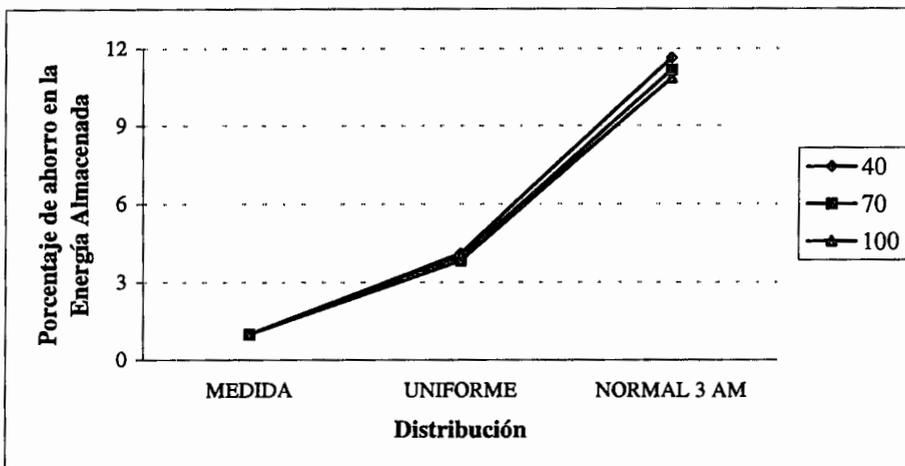


Figura 4.18 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo C3 en otoño (40, 70, 100 km/h).

4.5.3 Vehículo T3S2

Invierno

La Tabla 4.10 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S2 en Invierno.

<i>VEL</i>	<i>MEDIDA</i>	<i>UNIFORME</i>	<i>NORMAL 3 am</i>
<i>40</i>	<i>16.885 / 1.000</i>	<i>16.043 / 0.950</i>	<i>14.1038 / 0.885</i>
<i>70</i>	<i>15.593 / 1.000</i>	<i>14.1050 / 0.952</i>	<i>13.902 / 0.892</i>
<i>100</i>	<i>15.126 / 1.000</i>	<i>14.429 / 0.954</i>	<i>13.541 / 0.895</i>

Tabla 4.10 Resultados para el vehículo T3S2 en Invierno, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.10 se han graficado en la Figura 4.19, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

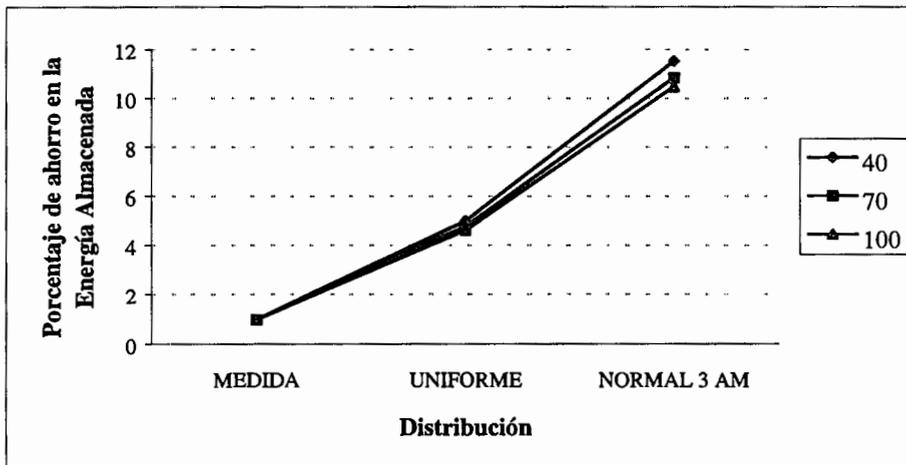


Figura 4.19 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S2 en invierno (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.19 se observa primeramente una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am, con un ahorro potencial del 11 por ciento. Este corresponde a la menor velocidad, es decir a 40 km/h, que significa una diferencia de aproximadamente el uno punto cinco por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

Primavera

La Tabla 4.11 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S2 en primavera.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	21.671 / 1.000	20.203 / 0.932	18.484 / 0.853
70	19.826 / 1.000	18.579 / 0.937	17.003 / 0.858
100	19.103 / 1.000	17.930 / 0.939	16.449 / 0.861

Tabla 4.11 Resultados para el vehículo T3S2 en primavera, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.11 se han graficado en la Figura 4.20, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

De la Figura 4.20 se observa una ligera tendencia mayor en la distribución uniforme de tránsito para una velocidad de circulación de 40 km/h, además de una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am. Al mayor ahorro corresponde un valor del quince por ciento en la energía almacenada, a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el uno por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

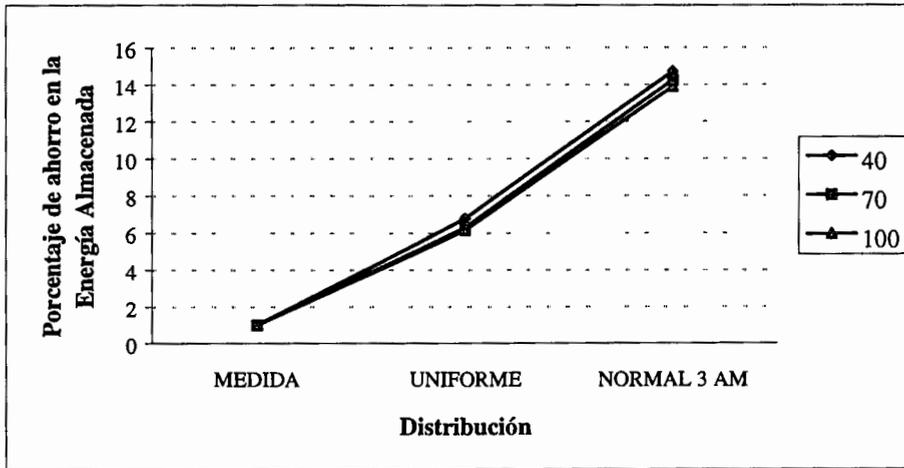


Figura 4.20 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S2 en primavera (40, 70, 100 km/h).

Verano

La Tabla 4.12 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S2 en verano.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	30.165 / 1.000	30.165 / 0.890	22.475 / 0.745
70	27.339 / 1.000	24.413 / 0.893	20.535 / 0.751
100	26.171 / 1.000	23.420 / 0.895	19.770 / 0.755

Tabla 4.12 Resultados para el vehículo T3S2 en verano, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.12 se han graficado en la Figura 4.21, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

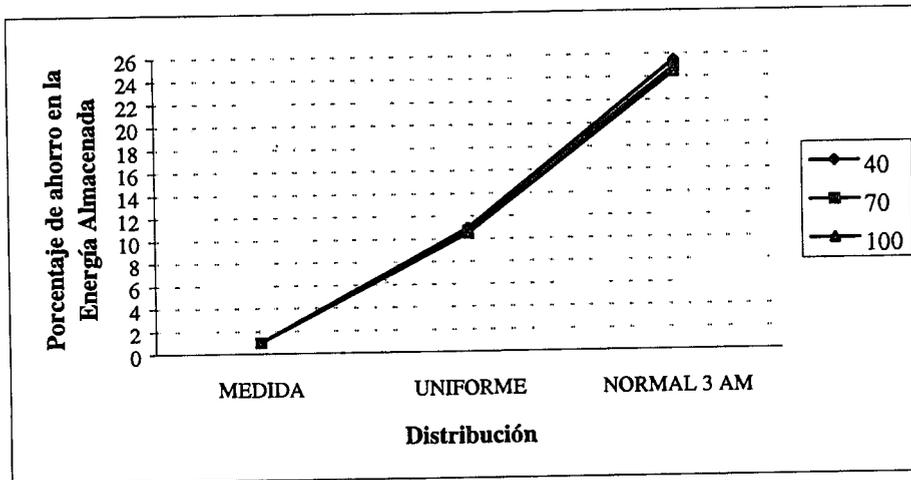


Figura 4.21 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S2 en verano (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.21 se observa un comportamiento sensible al tipo de distribución del tránsito, es decir entre una distribución uniforme y una distribución normal con máximo a las 3 am, con variaciones que van hasta del veinticinco por ciento aproximadamente, para la velocidad menor, es decir a 40 km/h. Los ahorros asociados a las distintas velocidades para la distribución uniforme, prácticamente son constantes para las tres velocidades consideradas, sin embargo se presenta una diferencia del uno por ciento respecto de la mayor velocidad, 100 km/h.

Otoño

La Tabla 4.13 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S2 en otoño.

Los resultados mostrados en la Tabla 4.13 se han graficado en la Figura 4.22, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

<i>VEL</i>	<i>MEDIDA</i>	<i>UNIFORME</i>	<i>NORMAL 3 am</i>
40	18.636 / 1.000	17.595 / 0.944	16.270 / 0.873
70	17.139 / 1.000	16.219 / 0.946	15.048 / 0.878
100	16.578 / 1.000	15.713 / 0.948	14.615 / 0.882

Tabla 4.13 Resultados para el vehículo T3S2 en otoño, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

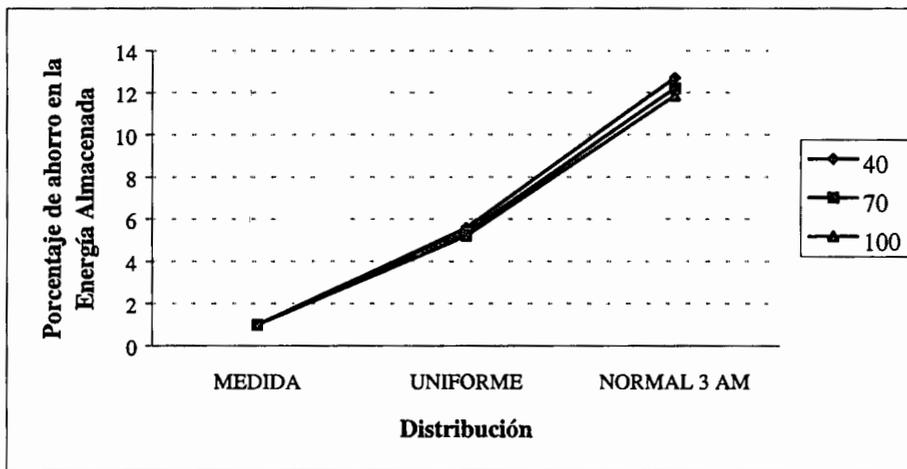


Figura 4.22 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S2 en otoño (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.22 se observa una consistencia en los valores obtenidos tanto para una distribución medida como para una distribución uniforme de tráfico, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con máximo a las 3 am. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el uno punto cinco por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

4.5.4 Vehículo T3S3

Invierno

En la Tabla 4.14 se muestran los resultados para las distintas distribuciones de tránsito, empleando como unidad de medición tanto los ejes equivalentes como los valores relativos al máximo para cada velocidad considerada. Se puede observar que estos valores máximos corresponden, en todos los casos, a la distribución medida.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	19.742 / 1.000	18.860 / 0.955	17.810 / 0.902
70	18.642 / 1.000	17.847 / 0.957	16.901 / 0.907
100	18.148 / 1.000	17.400 / 0.959	16.508 / 0.910

Tabla 4.14 Resultados para el vehículo T3S3 en invierno, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.14 se han gráficoado en la Figura 4.23, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

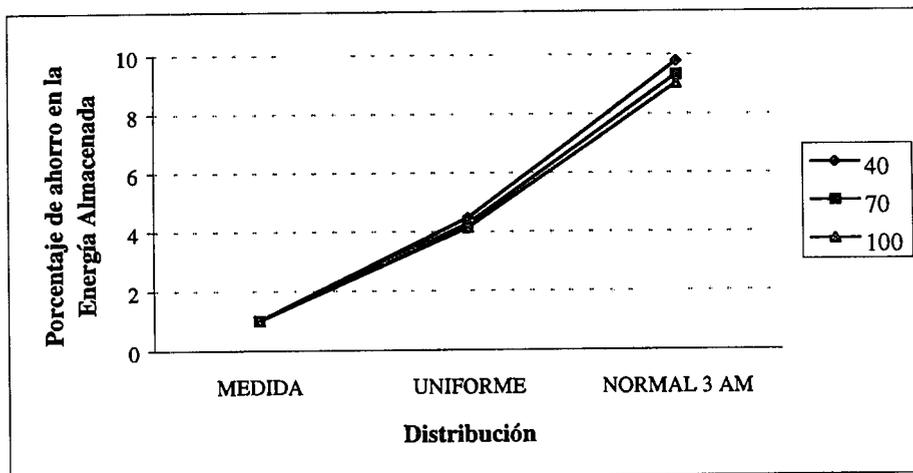


Figura 4.23 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S3 en invierno (40, 70, 100 km/h).

De esta forma, de la Figura 4.23 se observa un comportamiento semejante para las distintas velocidades consideradas en una distribución uniforme de tráfico, con variaciones del orden del uno por ciento entre 40 y 100 km/h. El ahorro potencial máximo se observa en el caso de que la velocidad de circulación de los vehículos sea baja, esto es, de 40 km/h, para la cual el porcentaje de ahorro es del diez por ciento, mientras que 100 km/h, el porcentaje disminuye al ocho punto cinco por ciento aproximadamente.

Primavera

La Tabla 4.15 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S3 en primavera.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	25.309 / 1.000	23.827 / 0.941	22.086 / 0.873
70	23.666 / 1.000	22.328 / 0.943	20.754 / 0.877
100	22.894 / 1.000	21.628 / 0.988	20.139 / 0.880

Tabla 4.15 Resultados para el vehículo T3S3 en primavera, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h , FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.15 se han graficado en la Figura 4.24, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.)

De la Figura 4.24 se observa una ligera tendencia mayor en el porcentaje de ahorro en la cantidad de energía almacenada para la distribución uniforme de tránsito a una velocidad de circulación de 40 km/h, además de una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am. Al mayor ahorro corresponde un valor del quince por ciento en la energía almacenada, a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el uno por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

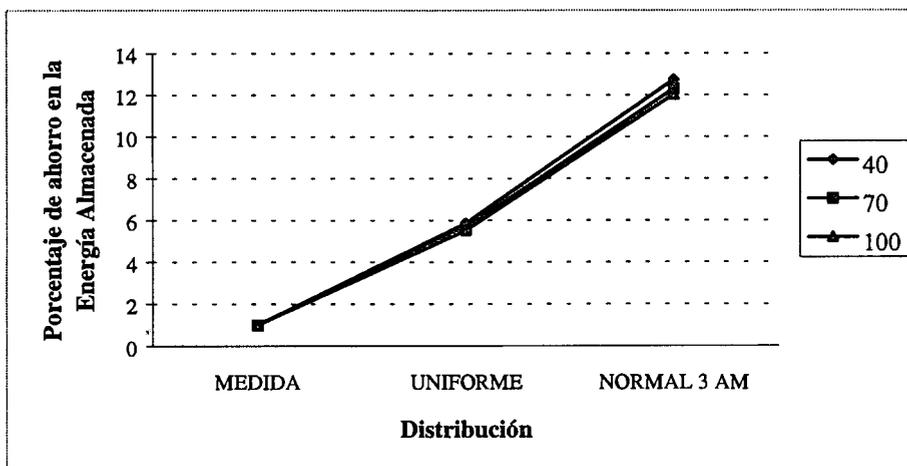


Figura 4.24 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S3 en primavera (40, 70, 100 km/h).

Verano

La Tabla 4.16 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S3 en verano.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	34.981 / 1.000	31.610 / 0.904	25.067 / 0.717
70	32.396 / 1.000	29.351 / 0.906	23.448 / 0.724
100	31.151 / 1.000	28.274 / 0.908	22.687 / 0.728

Tabla 4.16 Resultados para el vehículo T3S3 en verano, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.16 se han graficado en la Figura 4.25, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

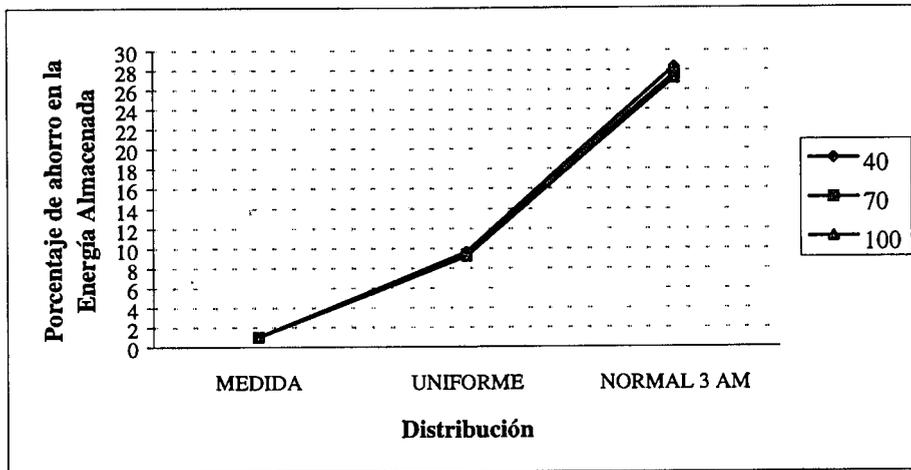


Figura 4.25 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S3 en verano (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.25 se observa un comportamiento sensible al tipo de distribución del tránsito, con variaciones que van hasta del 30 por ciento aproximadamente, para la velocidad menor, al comparar los resultados de la distribución real de aquella distribución normal con máximo a las 3 am. Los ahorros asociados a las distintas velocidades para la distribución uniforme, prácticamente son constantes para las tres velocidades consideradas.

Otoño

La Tabla 4.17 muestra los resultados correspondientes para el vehículo T3S3 en otoño.

VEL	MEDIDA	UNIFORME	NORMAL 3 am
40	21.779 / 1.000	20.685 / 0.950	19.390 / 0.890
70	20.478 / 1.000	19.491 / 0.952	18.322 / 0.895
100	19.880 / 1.000	18.947 / 0.953	17.843 / 0.898

Tabla 4.17 Resultados para el vehículo T3S3 en otoño, para distintas distribuciones del tránsito y velocidades de circulación (40, 70, 100 km/h), (FCE / valor relativo).

Los resultados mostrados en la Tabla 4.17 se han graficado en la Figura 4.26, atendiendo exclusivamente los valores relativos respecto al valor máximo obtenido para cada velocidad.

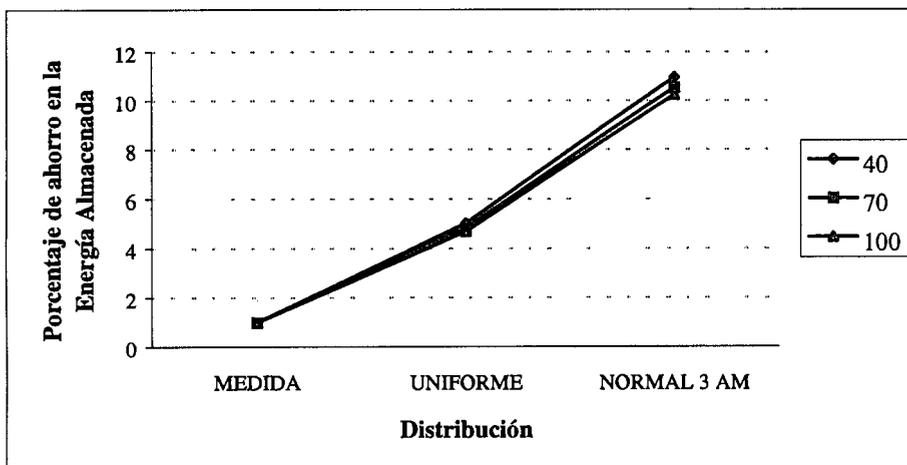


Figura 4.26 Resultados de los valores relativos al máximo obtenido para cada velocidad, vehículo tipo T3S3 en otoño (40, 70, 100 km/h).

De la Figura 4.26 se observa una consistencia en los valores obtenidos y en las tendencias, correspondiendo el mayor ahorro a la distribución normal con pico a las 3 am. El mayor ahorro corresponde a la menor velocidad, que significa una diferencia de aproximadamente el dos por ciento respecto a la mayor velocidad, esto es, 100 km/h.

4.6 Conclusiones

La distribución horaria del tránsito tiene un efecto dramático sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento, al comparar tres tipos de distribución, una medida, otra optimizada y una más, resultante de dar una repartición horaria uniforme del tránsito. De esta manera, la distribución optimizada representó disminuciones en la energía almacenada hasta del 30 por ciento respecto a una distribución actual medida, siendo este efecto una función de la estación del año y de la velocidad promedio de tránsito de los vehículos. De acuerdo a los resultados, esta velocidad de tránsito tiene un efecto relativo en los montos de energía almacenada, con variaciones máximas del orden del 15 por ciento. De esta manera, el potencial de ahorro en la cantidad de energía almacenada, producto de una redistribución de tránsito horario, es significativo y de gran importancia desde el punto de vista del deterioro de los pavimentos.

Capítulo 5

Conclusiones generales

5.1 Sumario de conclusiones

La interacción vehículo pesado - pavimento incide de manera importante en la economía de los países, repercutiendo en las erogaciones que los gobiernos tienen que hacer para mantener en condiciones aceptables de operación a las infraestructuras, y en los costos que los usuarios de estas infraestructuras tiene que cubrir por efecto del deterioro de los componentes involucrados en la respuesta dinámica de los vehículos a los perfiles de pavimento.

En esta tesis se ha presentado un esquema original para estudiar el efecto que la temperatura a la que se da la circulación de los vehículos en las carreteras, tiene sobre el potencial deterioro de los pavimentos. Este enfoque permite establecer cuantitativamente el impacto de la temperatura ambiente sobre el deterioro de los pavimentos, atendiendo de manera integral, tanto el efecto de la temperatura sobre los vehículos como sobre las propiedades de los pavimentos flexibles.

La suposición fundamental, aplicada en el desarrollo de esta tesis, consiste en que la energía de deformación del pavimento está relacionada con el deterioro del mismo. El establecimiento de esta energía tiene diferentes etapas de cálculo, que implican la obtención de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento; la aplicación de las fuerzas resultantes a los pavimentos, y el cálculo de la energía de deformación, afectando la temperatura ambiente tanto las propiedades de los vehículos como las propiedades del pavimento.

La aproximación basada en la Ley General de los Gases para evaluar el efecto de la temperatura sobre la presión de inflado, sobrestima este efecto, al comparar los resultados con valores empíricos. Este incremento en la presión afecta de manera sensible las características de rigidez y de amortiguamiento de los neumáticos. La sensibilidad a la temperatura, mostrada por los amortiguadores en comparación con la observada en el caso de los neumáticos, es mayor, lo cual se deriva de la relación directa entre la viscosidad del fluido del amortiguador y la temperatura.

Una distribución optimizada del tránsito representó disminuciones en la energía almacenada hasta del 30 por ciento respecto a una distribución actual medida, siendo este efecto una función de la estación del año y de la velocidad promedio de tránsito de los vehículos. Esta velocidad de tránsito representó un efecto moderado en los montos de energía almacenada, con variaciones máximas del orden del 15 por ciento.

5.2 Observaciones finales

Aunque una distribución del tránsito, la cual minimice la cantidad de energía almacenada en el pavimento, es altamente deseable, su implementación resulta difícil de lograr si se toman en cuenta las diferentes circunstancias que definen una distribución dada del tránsito, misma que obedece a necesidades particulares de las actividades económicas asociadas al tránsito, esto es, los esquemas de producción y de comercialización de los bienes y productos. Sin embargo, una política de uso de la infraestructura, la cual promueva

el uso de la misma en los horarios en las que es menos susceptible a sufrir daño - a través de una administración de los peajes – resultaría de gran importancia para disminuir el deterioro de los pavimentos y los abultados presupuestos asignados para la conservación, mantenimiento y rehabilitación de las infraestructuras. De esta forma, se identifica una posible relación entre los recursos empleados para estas actividades y las energías asociadas al paso de los vehículos sobre el pavimento.

Por cuanto a los aspectos académicos y de formación profesional, como resultado de la investigación desarrollada y documentada, se tuvo la oportunidad de aplicar y complementar los conocimientos adquiridos a lo largo de los estudios profesionales, aplicándolos a un problema ingenieril de gran trascendencia nacional. De esta manera, el desarrollo de una tesis constituyó un vehículo *ideal* para alcanzar un grado académico.

5.3 Recomendaciones

Se recomienda, de las características de los modelos presentados, definir un índice que asocie los recursos económicos empleados en las actividades de conservación de las carreteras y la cantidad de energía asociada al paso de los vehículos.

Reconociendo las limitaciones que la implantación de un esquema tal de uso de las infraestructuras que minimice la cantidad de energía almacenada en las mismas, se recomienda, a manera de plan piloto, establecer un esquema diferencial para el uso de las infraestructuras, en el que las menores cuotas se establezcan para los vehículos que circulen en horarios en los que su paso implique la menor cantidad de energía almacenada en los caminos. De los resultados de este plan, se podrá observar la flexibilidad real de los usuarios a este esquema de “uso amigable” de la infraestructura, con lo que podrá evaluarse de manera realista los ahorros en los presupuestos nacionales asignados a la conservación de las carreteras.

Referencias

1. Collins, H.J. y Hart, C.A., 1936, "Principles of road engineering". The roadmaker's library. Spielmann P.E.
2. León López, E.G., "La ingeniería en México". Limusa. 1989
3. Sternberg, E.R., 1976, "Heavy-duty truck suspensions". SAE paper 760369.
4. Cebon, D., 1993, "Interaction between heavy vehicles and roads" SAE paper SP-951. 85pp.
5. OECD Divine Programme. 1997. "Dynamic interaction of heavy vehicles with roads and bridges". Final Report. Capítulo 1. Introduction. Pp 1-8.
6. Romero, J.A. y Lozano, A., 1995, "La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el índice internacional de rugosidad". Publicación técnica No. 47. Instituto Mexicano del Transporte.
7. Romero, J.A., 1998. "Consideración de la energía de deformación en la interacción vehículo pesado – pavimento". Tesis de investigación doctoral. Universidad Autónoma de México. (en proceso)
8. Ullidtz, P. y Larsen, B.K., 1983, "Mathematical model for predicting pavement performance," Transportation Research Record 949. Pp 45-55.
9. Sousa, J., Weissman, S. L., Sackman, J. L., Monismith, Carl L. "Nonlinear elastic viscous with damage model to predict permanent deformation of asphalt concrete mixes". Transportation research board. NAP. 1993.
10. Rakheja. Subhash and Woodroffe, John. (1996) "Role of Suspension Damping in Enhancement of Road Friendliness of Heavy Vehicles", Heavy Vehicle Systems, Special Series, Int. J. Of Vehicle Design.
11. Potter, TEC, Collop, ACC, Cole, DJ and Cebon, D., 1994. "A34 Mat tests: results and analysis". Cambridge University. Engineering Department, Technical Report CUED/C-MECH/TR 61, May 1994.
12. OECD, 1992, "Dynamic loading of pavements". OECD Road Transport Reserach. 184 pp.
13. Gillespie, T., et al., 1993, "Effects of heavy-vehicle characteristics on pavement response and performance". NCHRP. Reporte 353. TRB. NRC. Washington. 125 pp.

14. Mahbub, V., 1986, "Sistema de administración del mantenimiento de la infraestructura carretera. Academia Mexicana de Ingeniería.
15. Spratz, P. , Bro, C., 1990, "PEMM, Sistema de evaluación de pavimentos y gestión de la Conservación". Asociación Técnica de Carreteras y Colègio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
16. Burns, E. N., 1990, "Managing urban freeway maintenance". Transportation Research Record. TRB. NRC. Washington.
17. SCT. IMT, 1997. *Manual estadístico del sector transporte. 1995. Series completas.* Versión para computadora personal.
18. Meirovitch. L. 1986, *Vibration Analysis*". Mc Graw-Hill Int.
19. Romero, J.A., Lozano, A., 1996. "Modelado matemático de la interacción de los vehículos pesados con el pavimento". Reporte Interno. Coordinación de Equipamiento. Instituto Mexicano del Transporte.
20. SCT. IMT.1996. "Estudio de pesos y dimensiones". Disco de octubre de 1996.
21. Sayers, M, Gillespie, T., y Paterson, W.D.O., 1986, "Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements". The World Bank. *Documento Técnico 45.*
22. Wong, J. Y. 1978. "Theory of ground vehicles". John Wiley and sons. N. Y.
23. Gillespie, T. D. 1985. "Heavy truck ride". SAE paper 85001.
24. *De Laval Engineering Handbook.* Third edition. McGraw – Hill Book Company.
25. Shames, I. H., 1970. "La mecánica de los fluidos". Reimpresión México. Mc Graw-Hill
26. Francher, P. S., Ervin, R. D., Winkler, C. B., and Gillespie, T. D., 1986. "A factbook of the mechanical properties of the components for single unit and articulated heavy vehicles", Universidad de Michigan. Instituto de Investigaciones del Transporte, Ann Arbor, Michigan. Reporte final UMTRI – 86 – 12.
27. Collop, A. Ch. 1994. "Effects of traffic and temperature on flexible pavement wear. Universidad de Cambridge.
28. Vierck, R. K. 1979. "Vibration analysis". Second edition. Harper and Row, publishers. N. Y.

29. Referencia Internet : http://www.dunloptire.com/TCM_Temperature.html.
“Temperature Effects”.
30. Referencia Internet : <http://www.tiretrack.com/tires/tiretech/pressure.html>. “Tire Care and Maintenance”
31. Stephen, S. W. 1995. “Probabilidad y estadística”. Publicaciones Cultural S. A. México.
32. Rico, A. y Del Castillo, H. 1989. “La ingeniería de suelos en las vías terrestres”.
Limusa