



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

GENERALIDADES SOBRE EL ENTRENAMIENTO DE CONDUCTORES Y EL DESARROLLO DE SIMULADORES DE MANEJO

José Antonio Romero Navarrete
Emmanuel Martínez Urquiza
Marcos Valencia Hernández
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No 240
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Generalidades sobre el entrenamiento de
conductores y el desarrollo de simuladores
de manejo**

**Publicación Técnica No. 240
Sanfandila, Qro. 2004**

Presentación

Se presenta un estudio acerca de los diferentes aspectos que intervienen en la capacitación de conductores de camiones, enfocándose a la aplicación de simuladores de manejo para estas tareas.

La temática se asocia a las implicaciones potenciales de los equipamientos, sobre la capacitación de conductores.

Índice

Resumen	IX
Abstract	XI
Resumen ejecutivo	XIII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivos y alcance	2
Capítulo 2. Taxonomía del entrenamiento de conductores	3
2.1 Taxonomía del dominio cognoscitivo del aprendizaje	3
2.2 Taxonomía del dominio psicomotor del aprendizaje	7
2.3 Taxonomía del dominio afectivo del aprendizaje	9
2.4 Sistemas de capacitación de operadores en general	12
Capítulo 3. Generalidades sobre los simuladores de manejo	17
3.1 Sistemas que incluyen los simuladores y tipos	17
3.2 Ejemplo de descripción de necesidades para un simulador	19
3.3 “Mal” del simulador de manejo	22
3.4 Aplicaciones de los simuladores de manejo	25
Capítulo 4. Modelación de vehículos para simulación en tiempo real	27
4.1 Formulación	27
4.2 Programación	39
4.3 Pruebas fuera de línea	41
4.4 Discusión	65
Capítulo 5. Modelación del aspecto visual usando <i>3D_State</i>	67
5.1 Plataformas de visualización	67
5.2 Descripción del programa <i>3D State-Mortif-Terrain builder</i>	70
5.3 Programación de ambientes y escenarios	82
Capítulo 6. Integración y prueba	87

6.1	Acoplamiento de subsistemas en programa único	87
6.2	Desarrollo de pruebas	89
6.3	Análisis de desempeño	90
6.4	Aplicaciones potenciales del simulador propuesto	91
6.5	Discusión	92
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones	93
Referencias		97

Resumen

La capacitación de los conductores de vehículos en general, y de camiones en particular, representa un recurso importante para mejorar la seguridad carretera, dado que un alto porcentaje de accidentes están vinculados con el factor humano. El desarrollo de sistemas efectivos de enseñanza y capacitación, sin embargo, requiere enfocar de manera integral la problemática del aprendizaje, incluyendo aquellas habilidades del operador que involucran diferentes capacidades y situaciones: habilidad mental, habilidad psicomotora, y el aspecto emocional.

Se presenta un análisis acerca del entrenamiento y capacitación de conductores en el marco de la taxonomía de la enseñanza. Este enfoque taxonómico divide el proceso de capacitación en dominios que involucran habilidades mentales, físicas y afectivas del operador.

En este contexto, los simuladores de manejo se consideran herramientas cruciales para un entrenamiento efectivo de los operadores de camiones, dado que complementan los aspectos teóricos, y con ello les permite conocer los límites de seguridad de sus unidades.

Se incluye el desarrollo de dos módulos de un simulador de manejo simple, consistentes en la modelación de la respuesta dinámica de los vehículos a las distintas perturbaciones, y a la modelación del aspecto visual del simulador. La característica fundamental del programa de simulación del vehículo es que “corre” en tiempo real. El simulador desarrollado se opera mediante las teclas de una computadora personal, y permite diferentes variantes de operación.

Abstract

The training and instruction of truck drivers, aimed to enhance road safety and economy, represents a vital element for all road-users. The integral training of truck drivers involves the consideration of mental, physical and affective abilities. In this context, driving simulators represent an effective tool to increase the output of the training, implying less training time and better knowledge.

In this study, the taxonomy of the learning process is discussed, to identify the elements for obtaining an effective truck driver training. In this context, driving simulators are characterized as a function of their capabilities, including the visual and motion sub-systems.

A simplified driving simulator is further proposed, which includes three modules: vehicle dynamics model, visual model and user interface. Vehicle dynamics model includes the real time simulation of the vehicle dynamic response to inputs derived from directional and velocity variations, and from the pavement profile. Visual modeling is based on the 3dstate program.

Resumen ejecutivo

La capacitación integral de los conductores de vehículos se caracteriza por incluir en el proceso aquellos aspectos que afectan al aprendizaje, identificándose tres “dominios” de las actividades educacionales: dominio cognoscitivo o mental; dominio psicomotor; y dominio afectivo. Mientras que las habilidades cognoscitivas tienen que ver con los procesos puramente mentales, el dominio psicomotor establece las relaciones físicas y mentales de una actividad física en particular, tal como conducir. Por su parte, el dominio afectivo tiene que ver con emociones que afectan de manera significativa la eficiencia del aprendizaje y la seguridad de la conducción.

En este contexto el uso de equipamientos de simulación, que reproducen de manera virtual las condiciones de uso de equipos de gran complicación, tales como centrales de potencia o aeronaves, ha representado en las últimas décadas una importante herramienta en la efectividad del entrenamiento y evaluación de los operadores de tales equipos.

Los simuladores de manejo se pueden clasificar de acuerdo con su alcance, en simuladores de escritorio y en simuladores panorámicos. Estos últimos, a su vez suelen contar o no con movimiento para reproducir de manera realista aceleraciones a las que se sujeta el conductor.

Mientras que el entrenamiento y la evaluación son las dos principales aplicaciones de los simuladores de manejo, otros propósitos incluyen el estudio de la fatiga de la conducción; el entrenamiento para mejorar la eficiencia energética de la conducción (*conducción técnica*); y el ensaye de nuevas tecnologías de los vehículos. Asimismo, los simuladores de manejo se emplean para conocer la efectividad de los distintos diseños de señalamientos viales.

En este trabajo se propone un modelo matemático sobre la respuesta de los vehículos a distintas perturbaciones, incluyendo cambios de velocidad, alteraciones direccionales, y entradas desde el perfil del pavimento. La característica fundamental del modelo desarrollado es que se ejecuta en tiempo real, con lo que los procesos de cálculo de los fenómenos se llevan a cabo en menor tiempo que el evento mismo. El efecto de las perturbaciones direccionales sobre la conducción del vehículo, se han considerado en un esquema ideal, correspondiente a la *geometría de Ackerman*.

Se presenta una revisión de los programas de visualización disponibles en el mercado, de los cuales se seleccionó el *3D-State* como plataforma para crear el módulo visual de un simulador de escritorio propuesto en este trabajo. Los componentes del programa permiten la creación y manipulación de entidades

conocidas como “mundos”, que constituyen ambientes de trabajo. Estos diferentes componentes son descritos en el trabajo.

Un sistema simplificado de interfaz con el usuario se plantea en el simulador de escritorio propuesto, que incluye algunas teclas del tablero para emular el volante de la dirección y los pedales del acelerador y el freno. Además se proporcionan dos diferentes niveles de aceleración y frenado. El acoplamiento de los tres sistemas del simulador de escritorio propuesto se realiza mediante asignar variables de estado del modelo de respuesta dinámica del vehículo, a las variables de posicionamiento del objeto visual, que representa al conductor.

1 Introducción

La seguridad vial es una función de un cúmulo de factores que inciden de diferente manera en la ocurrencia de accidentes. Tales factores incluyen la infraestructura, los vehículos y de manera fundamental a los conductores de las unidades automotrices. En la clasificación de las causas de accidentes se tienen los *factores humanos* (Ceci, *et al*, 2001; Alexander, *et al*, 2002), que tienen que ver con el estado emocional y físico del chofer, en un contexto de perturbaciones ambientales diversas. Un accidente por distracción representa un ejemplo común de estos factores. Muchas disciplinas se encargan de estudiarlos, incluyendo la sociología, psicología, biología y la ergonomía.

La capacitación de los operadores se ha identificado como una fuente importante que busca abatir los índices de siniestros. Para las empresas transportistas, la capacitación resulta vital para permanecer con bajos costos por accidentes y primas de seguros.

Conducir es una actividad físico-mental intensa, producto del aprendizaje de distintas habilidades referidas al ambiente físico-mental. En la actualidad existen diversos centros de instrucción en los que se atienden algunas facetas mentales y psicomotoras, dejando al individuo el control de sus emociones al manejar unidades automotoras.

En cuanto a las habilidades mentales y psicomotoras, las instituciones de entrenamiento de conductores incluyen tanto adiestramientos prácticos como sesiones en aula, que tienen como fin proporcionar al operador los elementos necesarios para conseguir una transportación segura y confiable.

Por lo general, en los centros de adiestramiento los aspectos prácticos se atienden mediante simuladores de cajas de velocidades, y sobre todo, con prácticas de campo en tránsitos reales (BTDS, 2004; SBDT, 2004; RMDS, 2004).

En los centros de capacitación actuales no se emplean en general ni simuladores de manejo, ni pistas de entrenamiento, lo cual constituye una mala práctica, ya que se ha reconocido que los simuladores de manejo permiten ahorrar tiempo de instrucción (Lehmuskoksi, 1999; Owens, *et al.*, 2001; Strayer, *et al*, 2003); y por su lado la práctica en pistas de entrenamiento, con tráfico y diseño geométrico controlados, permite corroborar y evaluar la instrucción recibida, aparte de extender los alcances de los simuladores de manejo (McGehee, *et al*, 2000).

1.1 Objetivos y alcance

El objetivo de este trabajo es analizar los recursos metodológicos y taxonómicos aplicables al entrenamiento de conductores de vehículos, enfocando la metodología al desarrollo de un simulador de manejo para escritorio.

En el capítulo 2 se presenta un análisis de los factores de la taxonomía del entrenamiento, incluyendo sus diferentes dominios: cognoscitivo, psicomotor y afectivo. Para cada uno de estos dominios se desglosan sus diferentes elementos y la relación entre ellos.

En tanto que el capítulo 3 analiza las características generales de los simuladores de manejo, considerados como herramientas clave para mejorar la seguridad vial. Los simuladores se clasifican de acuerdo con su alcance, y se presenta un ejemplo de requerimientos de simulación para una empresa, que incluye un aspecto potencialmente nocivo en los simuladores: el “mal del simulador”.

Se presenta en el capítulo 4 el desarrollo de una formulación matemática de la respuesta dinámica de un vehículo a las perturbaciones derivadas de los cambios direccionales y de velocidad, y las provenientes del perfil del pavimento.

En cuanto al capítulo 5, en él se describe el modelo visual de un simulador de escritorio que se propone, incluyendo una revisión del estado de la técnica en cuanto a programas de visualización.

Por su parte, en el capítulo 6 se alude la integración de los sistemas propuestos, incluyendo un módulo de interfaz con el usuario. Se describe asimismo, el simulador de manejo propuesto.

Finalmente, en el capítulo 7 se critica lo propuesto en este trabajo, planteando algunas investigaciones a futuro.

2 Taxonomía del entrenamiento de conductores

La taxonomía se refiere al estudio de los principios generales de la clasificación científica (Webster, 2004). En el contexto educativo, la taxonomía consiste en formular una clasificación de las metas del proceso educativo, identificándose tres “dominios” de las actividades educacionales (Huitt, 2000):

- i) Dominio cognoscitivo
- ii) Dominio psicomotor
- iii) Dominio afectivo

Los tres dominios juegan un papel importante en el aprendizaje en general, y en la enseñanza del manejo en particular.

Mientras que las habilidades cognoscitivas tienen que ver con los procesos puramente mentales, como es aprender un idioma extranjero, el dominio psicomotor establece las relaciones físicas y mentales de una actividad física en particular, por ejemplo, conducir un vehículo. El dominio afectivo del proceso de aprendizaje tiene que ver con las emociones, que pueden ser manejadas de acuerdo con la experiencia.

Qué es conducir

Conducir un vehículo automotor se puede definir como un conjunto de actividades físico-mentales, orientadas a operar los mecanismos y controles para dirigir el curso de un vehículo (Webster, 2004).

Como pocas actividades, conducir un vehículo representa la aplicación y manejo de un cúmulo de habilidades y actitudes, las cuales se aprenden a lo largo de la experiencia y durante la asistencia a cursos especializados de conducción. Las habilidades involucradas en un proceso de aprendizaje tienen que ver con los tres diferentes dominios identificados en el proceso educacional mencionado. A continuación se describen estos tres dominios, en el contexto general y en particular con referencia al aprendizaje de las habilidades de manejo.

2.1 Taxonomía del dominio cognoscitivo del aprendizaje

Este grupo de actividades tiene que ver con el desarrollo de actitudes y destrezas mentales. De esta manera, lo que los instructores desean en un proceso de enseñanza es que los estudiantes aprendan, identificado ello a través de *competencias*, pudiendo clasificarse jerárquicamente de la siguiente manera (Huit, 2000):

Conocimiento

Esta competencia se define como la habilidad de recordar el material previamente aprendido; puede involucrar traer al presente gran cantidad de material, desde hechos específicos hasta historias completas; todo lo que se requiere es retraer a la mente la información apropiada. El conocimiento representa el producto de más bajo nivel del proceso de aprendizaje en el contexto del dominio cognoscitivo.

En el contexto del aprendizaje de manejo, los objetivos del nivel taxonómico son conocer términos comunes, métodos y procedimientos, así como conceptos básicos y principios de operación.

Comprensión

Se define como la capacidad para “pesca” el significado del material. Esto puede demostrarse al traducir material de una forma a otra (palabras a números, por ejemplo); al interpretar el material (explicarlo o resumirlo); y al estimar tendencias (predecir consecuencias o efectos). Estos productos del aprendizaje van un paso más allá de la competencia relativamente simple de recordar el material, y representa al mismo tiempo el mínimo nivel de comprensión.

En el contexto de aprender a conducir un vehículo, ejemplos de este nivel taxonómico son la comprensión de los hechos y los principios; interpretar el material escuchado; interpretar los tableros e indicadores respectivos; traducir el material escuchado a una fórmula matemática; y estimar las consecuencias de los valores indicados en el tablero de instrumentos. Asimismo, justificar los métodos y los procedimientos.

Aplicación

Se refiere a la destreza para aplicar el material aprendido, en situaciones nuevas y concretas; puede incluir cosas tales como reglas, métodos, conceptos, principios, leyes y teorías. Los productos del aprendizaje en esta área requieren un nivel relativamente más elevado de la comprensión, descrita en los párrafos anteriores.

Para el caso de la conducción de un vehículo, algunos ejemplos de objetivos de aprendizaje en este nivel son aplicar el reglamento de tránsito en situaciones donde no están representadas las disposiciones y normas; o pensar en disminuir la velocidad de desplazamiento ante una situación peligrosa, relacionada con las condiciones ambientales o de tráfico; o sea, demostrar el uso correcto de un método o procedimiento.

Análisis

Se refiere a la habilidad para descomponer el material en sus componentes o partes, de tal manera que puedan ser comprendidas cualesquiera estructuras organizacionales presentes; puede incluir la identificación de partes, el análisis de las relaciones entre éstas, así como el reconocimiento de los principios organizacionales involucrados. Los productos del aprendizaje en este caso representan un nivel intelectual más alto que la comprensión y la aplicación, debido a que tales productos requieren comprender tanto el contenido como la forma estructural del material.

Algunos casos ilustrativos serían en este nivel de enseñanza el reconocer suposiciones no declaradas; reconocer errores en los razonamientos; distinguir entre hechos e interferencias; evaluar la relevancia de los datos, y organizar la estructura organizacional de un sistema.

En cuanto al contexto de la enseñanza de cómo conducir, se tomarían como ejemplos reconocer las limitaciones de los sistemas de protección de los vehículos; distinguir entre seguridad pasiva y activa; así como entender la lógica estructurada del funcionamiento de los sistemas vehiculares auxiliares, tales como los indicadores de los tableros y las alarmas de seguridad.

Síntesis

Alude a la capacidad de unir las partes para crear un nuevo todo. Esto puede involucrar la producción de una comunicación única (tema o declaración), un plan de operaciones (propuesta de investigación), o un conjunto de relaciones abstractas (esquema para clasificar la información). Los productos del aprendizaje en esta área hacen énfasis en los comportamientos creativos, y con mayor intensidad en la formulación de nuevos patrones o estructuras.

Como ejemplos de objetivos en el caso del aprendizaje para la conducción de un automotor, está la redacción de un resumen, bien organizado, de un tema relacionado con la operación de un vehículo; o proponer un plan para una nueva prueba de manejo. Esto es, sugerir un nuevo esquema para satisfacer ciertos objetivos.

Evaluación

Se refiere a juzgar el valor de cierto material para alcanzar un objetivo dado; puede ser una declaración o cualquier escrito, tal como un instructivo o reporte técnico. Los juicios se basarán en criterios definidos, los cuales pueden ser internos (dentro de la organización), o externos (de relevancia para el fin perseguido); el estudiante puede determinar los criterios, o ser instruido sobre ellos. Los productos del aprendizaje son los de mayor jerarquía cognoscitiva, debido a que contienen elementos de todas las categorías restantes, además de juicios de valor basados en criterios claramente definidos.

En el marco del contexto de aprender a manejar un vehículo se incluye como ejemplo la consistencia lógica de material escrito, juzgando la pertinencia del soporte brindado por los datos sobre las conclusiones expuestas, empleando para ello tanto criterios internos como externos. Tales escritos pueden ser los manuales de operación de ciertos equipos, e información relevante sobre los aspectos de manejo en general de unidades.

Pirámide en el dominio cognoscitivo

El grupo de actividades recién descritas tiene que ver con el desarrollo de actitudes y destrezas mentales. De esta manera, lo que los instructores desean que los estudiantes aprendan puede clasificarse jerárquicamente (fig 2.1), es decir, a manera de competencias que van desde el conocimiento hasta la evaluación.

En la figura piramidal, la base representa la menor complicación en el aprendizaje mental, como es recordar fechas, definiciones y otro tipo de datos previamente aprendidos. En el extremo superior de la fig 2.1 se tiene la evaluación, en la cual el individuo capacitado maneja elementos en todas las categorías inferiores, así como la habilidad de juzgar el valor de un cierto material para alcanzar un objetivo dado.

De esta manera, en el nivel más elevado las preguntas planteadas al estudiante tienen que ver con el análisis y evaluación de una declaración, o cualquier escrito tal como un instructivo o reporte técnico, siguiendo en el curso de esta evaluación criterios definidos que pueden ser internos (dentro de la organización), o externos (de relevancia para el fin perseguido). Al respecto, el estudiante puede determinar los criterios o ser instruido sobre ellos.

Como etapas intermedias entre estos extremos de complejidad, representados por la base y cima de la pirámide se tiene el análisis, que puede consistir en solicitar al estudiante que aplique los reglamentos de tránsito en situaciones donde no están representadas tales reglas y normas, o pensar en disminuir la velocidad ante una situación peligrosa, relacionada con las condiciones ambientales o de tráfico.



Fig 2.1.
Competencias en el dominio mental del proceso educativo

2.2 Taxonomía del dominio psicomotor del aprendizaje

Las habilidades psicomotoras son esenciales para un manejo seguro y eficiente, como en el caso de algunas otras áreas de responsabilidad (*p.ej.* operadores de computadoras). Para asegurar que un operador de automotores realice un desempeño aceptable, la capacidad no viene por nacimiento, sino que requiere una buena dosis de capacitación y entrenamiento bien orientados, que provean al conductor del dominio psicomotor y cognoscitivo apropiados.

A continuación se describe la taxonomía psicomotora, considerando algunas de las metas en este dominio (fig 2.2).

Imitación

En este caso, el instructor imparte inicialmente el conocimiento necesario a través de explicar la importancia afectiva, y demostrar al alumno una técnica dada.

Posteriormente, brinda al educando la oportunidad de “imitarlo”. En esta etapa, el instructor se asegura que el estudiante tenga un conocimiento fundamental de la habilidad enseñada.

Para la enseñanza relativa a la conducción, el instructor puede mostrarle al personal bajo entrenamiento la manera cómo reaccionar en situaciones peligrosas, tales como quedarse sin frenos en una pendiente pronunciada. Asimismo, mostrar al estudiante cómo realizar un manejo técnico que permita el ahorro de combustible.

Manipulación

Durante esta etapa, el alumno repite la habilidad hasta que ésta puede realizarse con cierta exactitud y confianza; asimismo, deberá adaptarse y ajustarse al proceso de enseñanza hasta que sea lo suficientemente capaz para desempeñar la tarea encomendada. Posteriormente, podrá, como una función de la complejidad de la tarea, manipular el procedimiento a su propia voluntad o bajo la supervisión del instructor.

Para un conductor en entrenamiento, una vez que repite un número de veces cierta maniobra u operación de conducción, puede encontrar algunas variantes, como en el caso de guiar condiciones de pérdida del sistema de frenos; de ahí la conveniencia de ensayar algunas variantes sobre frenado alterno.

Precisión

En esta etapa el educando debe ser capaz de efectuar la tarea con el grado requerido de exactitud. Sin embargo, con objeto de asegurar cierto nivel de confiabilidad, el instructor debe verificar que el alumno brinde resultados precisos en un número mínimo de ensayos considerados como necesarios.

El operador de camiones en entrenamiento repetirá en el marco especificado, el conjunto de operaciones para el cual esté siendo capacitado. Como ejemplos en ese sentido se tendrían maniobras evasivas en las que una respuesta apropiada puede evitar consecuencias graves.

Articulación

En esta etapa el operador continúa practicando sus nuevos conocimientos a fin de llegar a ser experto en la materia, pues si tiene éxito, será capaz de adaptar la destreza aprendida a condiciones y situaciones únicas.

El operador de camiones que esté siendo adiestrado en ciertas tareas y situaciones demostrará que puede aplicar lo aprendido a situaciones diversas, como puede ser el caso de que esté siendo entrenado para evitar volcaduras en

pavimentos horizontales, y ensayar situaciones en las que, por ejemplo, el pavimento esté húmedo y tenga cierto peralte.

Naturalización

Esta etapa es en la que se trata de mostrar que el conductor no sólo ha adquirido una verdadera capacidad, sino que está en posibilidad de hacer cambios a menudo sutiles en dicha habilidad.

Para un conductor de vehículos pesados, una vez que se da el proceso de naturalización la unidad representará una extensión de sus extremidades, siendo capaz de enfrentar con serenidad situaciones de peligro, minimizando el impacto de accidentes.

De esta manera, el proceso psicomotor de la enseñanza si se sigue de manera correcta, conducirá al aprendizaje satisfactorio en muchos campos que requieren capacidad multidimensional.



Fig 2.2.

Competencias en el dominio psicomotor del proceso educativo

2.3 Taxonomía del dominio afectivo del aprendizaje

Las actitudes y estabilidad emocional de un chofer de unidades pesadas son vitales para una conducción segura y eficiente. El manejo de las emociones detrás

del volante constituye entonces, un factor de la incidencia de percances manifestada por agresiones entre conductores y un manejo agresivo. La forma como alguien que guía un automotor pesado reacciona ante un ambiente por lo regular hostil de manejo, define de manera clave la aplicación de las habilidades cognoscitivas y psicomotoras aprendidas.

Las actividades dentro de la taxonomía del dominio afectivo del aprendizaje se presentan a continuación, organizándolas en diferentes niveles de compromiso. La fig 2.3 muestra esquemáticamente dichos niveles.

Recibir

Consiste en estar conciente o poner atención en algo en el ambiente.

En el caso de un chofer en entrenamiento, se da cuando él escucha una lectura o presentación técnica, relacionada con los aspectos humanos en el transporte.

Responder

Estriba en mostrar ciertas conductas novedosas, como resultado de recibir.

Potencialmente, el operador cambiará su actitud después de conocer la ocurrencia de ciertos tipos de accidentes, en los que sus compañeros de oficio en circunstancias cercanas a las de él, sufren percances.

Valuar

En mostrar de manera clara y definida, un involucramiento o compromiso.

Un operador, al enterarse de ciertos tipos de accidentes, muestra interés en cambiar el estado de las cosas, tales como usar mejores tecnologías.

Organización

Significa integrar un nuevo valor en el conjunto de valores de uno mismo, jerarquizado de entre las prioridades propias. En este nivel, una persona empezaría a hacer compromisos a largo plazo con objeto de recomponer su instrucción, y valorar de manera relativa al modelo.

Caracterización por valor

Actuar consistentemente con el nuevo valor. En este máximo nivel, una persona estaría firmemente comprometida a utilizar el modelo para desarrollar, seleccionar, o arreglar la instrucción, pudiendo llegar a ser reconocida por dicho actuar.

Un operador, que llega a enterarse de un grave accidente, se vuelve fanático de la seguridad, ganando incluso premios nacionales o aun internacionales.

El cúmulo de emociones difiere con cada autor. Sin embargo, las que tienen que ver con el dominio afectivo de la educación pueden ser enojo, interés, desdén, disgusto, incomodidad, miedo, alegría, pena y sorpresa.



Fig 2.3.
Competencias en el área afectiva

Se cuenta ahora con un marco general para ubicar el contenido taxonómico de una instrucción para manejo de vehículos en los tres ámbitos que potencialmente afectan la seguridad en el caso de camiones pesados.

De esta manera, se requieren programas de adiestramiento que consideren todos los aspectos relacionados, incluyendo desde el conocimiento teórico de los procesos hasta las habilidades físicas y afectivas requeridas.

Al respecto, la enseñanza para el manejo efectivo de las emociones se considera de gran importancia en el contexto de la seguridad vial.

2.4 Sistemas de capacitación de operadores en general

Existen diferentes sistemas para capacitar operadores de camiones, que combinan en general aspectos teóricos y prácticos.

Los propósitos del entrenamiento para responsables de vehículos ligeros difieren en algunos aspectos de aquellos de los sistemas de entrenamiento de los de unidades pesadas. Más aún, existen diversos programas de entrenamiento, como una función del tipo de mercancía que transporten.

De esta manera, quienes transportan sustancias y residuos peligrosos pueden llegar a recibir capacitaciones especializadas tendientes a instruir a los operadores acerca de las acciones inmediatas a emprender después de algún accidente en el que, por ejemplo, haya habido un derrame peligroso.

Los centros de entrenamiento se conciben entonces como lugares donde el operador puede recibir una capacitación integral, que cubra los campos que permitirán operar con mayor eficiencia y seguridad los vehículos.

Dentro de las características especiales de instrucción a operadores de unidades pesadas, se cuenta la enseñanza de algunos aspectos relativos a los sistemas de vehículos.

Exceptuando el dominio afectivo, en general el entrenamiento incluye los dominios descritos en la sección anterior, como es el caso de clases en las que los diferentes sistemas son descritos, en el contexto de la normatividad vigente, además de aspectos prácticos, en los que el instructor describe cómo ahorrar combustible, frenar a menor distancia y efectuar cambios de carril de manera segura.

De esta manera se atienden los aspectos cognoscitivos y psicomotores de la enseñanza del manejo de camiones, dejando tal vez de lado los de tipo afectivo, o sea, se descuida en general el adiestramiento del conductor para controlar sus emociones, y para incluso cambiarlas durante el proceso.

Por otro lado, los operadores no reciben una instrucción precisa y consistente respecto a cómo debe reaccionar ante situaciones de peligro, lo cual es común en países con condiciones meteorológicas que inducen gran cantidad de accidentes, en donde el conductor debe estar consciente de las mejoras técnicas para evitar en la medida de lo posible, las consecuencias de percances.

Las herramientas tecnológicas de las que se valen los centros de adiestramiento de operadores son diversas, e incluyen ayudas audiovisuales y textos. Al respecto, lo más efectivo es el uso de simuladores de manejo, los cuales proveen un medio

ambiente virtual en el que el operador puede “conducir” sin que existan consecuencias de una mala toma de decisiones.

Sin embargo, aparentemente el costo de tales simuladores ha hecho poco común que empresas dedicadas al entrenamiento empleen estos recursos, inclinándose más a métodos tradicionales, incluyendo videos y prácticas de campo en calles y pistas de pruebas. Una distribución común de tiempos de actividades, es la siguiente (BTDS, 2004):

<i>Instrucción en aula</i>	<i>78 h</i>
<i>Instrucción en laboratorio</i>	<i>48 h</i>
<i>Instrucción calles-carretera</i>	<i>54 h</i>

El periodo de entrenamiento abarca de cuatro a cinco semanas, siendo su costo de al menos 2,200 dólares. Para cursos de mayor alcance, involucrando el transporte de materiales peligrosos, por ejemplo, el monto se eleva por arriba de los 4, 000 dólares (SBDT, 2004).

Los cursos se evalúan mediante exámenes escritos, y prácticas de laboratorio y campo. Algunas compañías reportan el uso de videos y *cassettes* para reforzar la instrucción gradual. Se provee al alumno de una guía de estudio y de examen, además se le capacita para diferentes situaciones de transporte, incluyendo autotankes, autobuses urbanos, escolares, y materiales peligrosos. Se hace hincapié en el aspecto normativo vigente.

De manera particular, se tratan algunos sistemas de los vehículos, por ejemplo, los sistemas de frenos de aire.

A través de la instrucción, se evalúa de alguna manera la percepción del operador por cuanto a distancia entre vehículos, recorrido de reacción, y los factores que afectan el tiempo de frenado, como una función del nivel de carga.

Se cubren aspectos técnicos por cuanto a construcción de frenos y otros sistemas.

Existen escuelas que seccionan el entrenamiento en las siguientes partes (RMDS, 2004):

Conductor de tractorremolques, nivel básico, de 150 h de duración en total, que incluye 44 h de recorrido en campo. El periodo es de 4 a 5 semanas.

“Externado” de conductor de tractorremolques

Incluye 150 h de instrucción en aula, 150 h en laboratorio y un número ilimitado de horas de conducción en campo, durante 10 semanas.

Exhaustivo de conductor de tractorremolques

En las 15 semanas del programa están comprendidos algunos elementos de instrucción relativos al mantenimiento de unidades, y de las correspondientes técnicas para acoplamiento y desacoplamiento.

Avanzado de conductor de tractorremolques

Para conductores con alguna experiencia, este programa ofrece 80 h de instrucción, con 30 h de aplicación en campo en un periodo entre 2 y 3 semanas.

Actualización de conductor de tractorremolques

Para choferes con experiencia provee de ciertos elementos para aprobar determinados requisitos estatales o federales, e incluye 40 h de instrucción, de las cuales 20 son de manejo en campo.

Otros cursos ofrecen diferentes etapas que contemplan sistemas básicos, operación básica, prácticas de operación seguras, y notas sobre recorridos largos en caminos.

Respecto a los sistemas básicos, incluyen una introducción al autotransporte, a los sistemas de control, a la inspección vehicular, al control básico, al cambio de velocidades, a la operación en reversa, a la búsqueda visual, comunicaciones, administración del espacio y velocidad, a las características del manejo nocturno, a condiciones extremas de manejo, a la previsión de riesgos, maniobras de emergencia, al control del patinaje y a los procedimientos derivados de accidentes.

Por su parte, la operación básica se refiere a las técnicas de acoplamiento y desacoplamiento de las quintas ruedas y ejes tándem deslizables, al manejo y documentación de la carga, las horas de servicio, la seguridad y salud personal, al plan de viaje, a las relaciones públicas y a las relaciones patrón-trabajador.

En cuanto a las prácticas de operación seguras, éstas corresponden a los procedimientos de inspección del vehículo, a los sistemas de los mismos, al mantenimiento preventivo y servicio, al reconocimiento y reporte de malfuncionamientos, al acoplamiento y desacoplamiento y a la operación en reversa.

Lo relativo a recorridos largos en carretera se refiere a la capacitación por cuanto a los sistemas de control y cambios, a la búsqueda visual, comunicaciones, administración del espacio y velocidad, a la conducción nocturna, a la previsión de riesgos, a las maniobras de emergencia y al control de patinaje. Al finalizar el curso el alumno es examinado durante 1.5 h en alguna instalación externa.

Uso de simuladores en escuelas de entrenamiento de conductores de vehículos pesados

En el ámbito de las escuelas de capacitación comerciales, el empleo de simuladores de entrenamiento está sumamente limitado, al circunscribirse a aquellos que constan de una caja de transmisión e instrumentos en el tablero, mediante los cuales se capacita al conductor sobre el momento óptimo para efectuar los cambios de velocidades (simulador de cambios).

El empleo de simuladores de manejo, que incluyan reproducciones visuales y auditivas de la realidad se limita a centros de investigación.

El problema del empleo de simuladores de gran alcance es su costo. Sin embargo, se tiene numerosas ventajas, como la de que el operador puede llevar al equipo a sus límites operacionales y de estabilidad, sin sufrir las consecuencias en la realidad (Allen, *et al*, 2003; Godley, *et al*, 2002; Roenker, *et al*, 2003). Se pueden crear situaciones de manera virtual, en que la verdadera capacidad del operador se pone en evaluación (Westra, *et al*, 2001; Yamada, 2002).

Al respecto, se menciona que el uso de simuladores para entrenamiento y actualización permanente de los operadores de camiones, puede llevar a la industria del transporte carretero a niveles de seguridad tan altos como la aérea, en la que de manera continua se entrena y actualiza a los pilotos, mediante simuladores de vuelo (Grace, *et al*, 1998).

Como se describirá en la sección siguiente, los simuladores pueden tener diferentes alcances y configuraciones.

3 Generalidades sobre los simuladores de manejo

Se presenta una perspectiva general de los alcances de las tecnologías para simuladores de manejo, describiendo sus elementos fundamentales, así como la problemática que enfrentan algunos conductores en entrenamiento, consistente en el “mal” del simulador de manejo (sección 3.3).

3.1 Sistemas que incluyen los simuladores y tipos

El uso de equipamientos de simulación, que reproducen de manera virtual el empleo de equipos de gran complicación, tales como centrales de potencia o aeronaves, ha representado en las últimas décadas una importante herramienta para dar efectividad al entrenamiento y evaluación de los operadores de tales equipos.

En este contexto, la aplicación de simuladores de manejo automotriz se ha dado con propósitos que van desde estudios de fatiga de los operadores de transporte pesado, hasta la evaluación de éstos ante situaciones de riesgo. Tales equipos han permitido mejorar la eficiencia de los entrenamientos por cuanto al número de horas necesarias para capacitación, y al mismo tiempo para evitar cualesquiera condiciones peligrosas derivadas de la operación fallida de los vehículos.

De acuerdo con su nivel de complicación, los simuladores pueden contar hasta con seis elementos (Freeman, *et al*, 1995):

- i) Sistema visual para reproducir la escena de manejo
- ii) Sistema de audio para recrear los ruidos y sonidos tanto ambientales como propios del vehículo
- iii) Sistema de movimiento, el cual imprime a la cabina del vehículo los desplazamientos derivados de las maniobras ordenadas por el conductor, como por el paso de los vehículos por imperfecciones del camino (baches y topes)
- iv) Sistema de modelación de la respuesta dinámica de los vehículos, el cual modela en tiempo real la respuesta de los vehículos a las distintas perturbaciones aplicadas por el operador, y por la interacción de la unidad con el pavimento

- v) Sistema de interfaz con el usuario, que se encarga del accionamiento y reproducción sensible de todos los controles, volante y perillas accionadas por el conductor en el interior de la cabina, y que debe reproducir fielmente la sensación de los equipos reales
- vi) Sistema de comunicación entre computadoras, para la secuencia de las tareas, y simulación en tiempo real

En este contexto, se han desarrollado simuladores de manejo con distintos niveles de complicación, desde artefactos operables desde una computadora de escritorio, hasta costosos sistemas que contienen de manera integral a las unidades automotrices, y que incluyen sistemas de movimiento para reproducir las aceleraciones y movimientos de las unidades durante su manejo real. De esta forma, los simuladores de manejo se pueden clasificar, en cuanto al alcance que tienen, de la siguiente manera:

Simuladores de escritorio, los cuales emplean una computadora personal a la que se incorpora un volante y pedales de aceleración y frenado. Son los más económicos y sus aplicaciones se limitan a evaluar a los conductores en condiciones simples de manejo (Allen, *et al*, 2003).

Simuladores panorámicos sin movimiento de cabina; poseen grandes pantallas que cubren una extensión del campo visual del operador, pero carecen de una cabina con movimiento. El término “panorámico” se refiere a que el simulador con pantallas reproduce virtualmente el ambiente visual alrededor del conductor, incluyendo diferentes escenarios de manejo que cubren total o parcialmente el campo visual correspondiente. Emplean monitores de cristal líquido o pantallas de tela sobre las cuales se proyecta la escena. Sin embargo, la veracidad está sumamente limitada al existir un desacoplamiento total entre las maniobras efectuadas por el operador, y la vibración y oscilaciones del vehículo en la realidad. De esto se desprende un potencial riesgo de empleo de simuladores para tareas de entrenamiento (Radwan, *et al*, 1999).

Simuladores panorámicos con movimiento de la cabina; este sistema es el que más realismo representa para el entrenamiento y evaluación de los operadores. (Delahaye, *et al*, 1999; Bertolini, *et al*, 1994); Green, *et al*, 1989).

La fig 3.1 ilustra estos tres diferentes tipos de simuladores.

El éxito de la aplicación de simuladores radica en la fidelidad de los efectos y fenómenos que ocurren en la realidad. Por tanto, los equipos de mayor realismo son específicamente para el manejo de unidades militares especializadas (Mourant, *et al*, 2001).

En México, el desarrollo de simuladores de entrenamiento ha sido marginal, con notables ejemplos en el campo del entrenamiento de operadores de centrales nucleares y de plantas de proceso, tales como los ingenios azucareros (Lozano y Romero, 1985).

Por otro lado, un simulador de manejo permite evaluar a los conductores de manera exhaustiva, incluyendo sus actitudes para tomar riesgos, su manejo a la defensiva, y su reacción ante situaciones de emergencia (Lee, *et al*, 2002). Además de sus respuestas temperamentales ante agresiones durante el manejo, las cuales pueden conducir a accidentes.

De manera importante, el simulador permitirá al conductor conocer los límites de operación de los vehículos, sin sufrir las consecuencias de un siniestro.

3.2 Ejemplo de descripción de necesidades para un simulador

El diseño conceptual de un simulador de manejo deberá establecerse a partir de definir las necesidades de la empresa para la que se desarrollará el equipo. Este análisis se basará en el índice de accidentes de la empresa y de las potenciales limitaciones económicas.

En el ejemplo estudiado se identificó un porcentaje importante de accidentes asociados a factores humanos en el transporte. El conjunto de maniobras pre-accidente incluyó salidas de la carretera, implicando importantes perturbaciones de vibración al vehículo.

De esta manera, a partir de un análisis de percances de la firma interesada, el simulador a desarrollar debería ser de gran alcance, considerando las aceleraciones y movimientos de la unidad. Esto es, el simulador para estas labores consiste en uno panorámico con cabina móvil.

A continuación se describirán las características de carácter general que deberán poseer los sistemas más importantes que integrarían al simulador de manejo, mismos a los que deberán adicionarse algunos otros componentes e infraestructuras para su operación, como son el edificio que albergue a este equipo, y los respectivos sistemas de servicios.

El sistema de audio del simulador de manejo deberá reproducir de manera fiel los ruidos y sonidos asociados tanto a la unidad misma como a otras de la infraestructura. Asimismo, considerar los cambios en la intensidad y frecuencia de los ruidos, atendiendo el tránsito en vías cerradas (túneles) y abiertas, así como el efecto sobre la frecuencia del sonido por cuanto a fuentes sonoras móviles (efecto *Doppler*).



(a)



(b)

Fig 3.1.

Tipos de simuladores de manejo: a) panorámico sin movimiento de la cabina; b) panorámico con movimiento de la cabina

Por su parte, el sistema de movimiento deberá producir sobre el operador las aceleraciones derivadas tanto de maniobras normales como de operación, que conduzcan a una volcadura o impacto. El sistema requiere seis grados de libertad, y ser accionado mediante un sistema hidráulico o mecánico, el cual deberá validarse con estudios de campo.

En cuanto al sistema visual, éste deberá refrescarse a una frecuencia mínima de 20 cuadros por segundo, y reproducir diferentes escenarios de uso de las infraestructuras, sin hacer de lado las diferentes vías de comunicación, niveles de tráfico y condiciones meteorológicas.



(c)

Fig 3.1.
(cont). Tipos de simuladores de manejo: c) simulador de escritorio

El propósito del sistema de interfaz con el usuario es el de hacer sentir al conductor que opera el vehículo virtual, las características de rigidez y movilidad de accionamientos tales como el embrague, el pedal del freno, el volante de la dirección y los interruptores de control del motor. Asimismo, el tablero de instrumentos reproducirá las variables de manejo necesarias.

El sistema de modelado de la respuesta dinámica del vehículo deberá ejecutarse en tiempo real, incluyendo los programas visual y de audio, además las comunicaciones entre los distintos sistemas, tomando incluso en cuenta la interacción carga líquida – vehículo. El programa resultante de este sistema habrá de programarse, de manera preferencial en la misma plataforma que se programen los otros modelos (C++ o C).

Debido a las múltiples disciplinas que intervienen, el desarrollo de un simulador de manejo como el requerido representa un cúmulo de conocimientos. Por otro lado, todos los cálculos y animaciones que se efectúen durante las simulaciones, tendrán que realizarse en una fracción de tiempo real en razón de poder llevar a cabo las funciones implícitas de comunicación entre las computadoras y los sistemas de accionamiento.

Las ventajas de un desarrollo nacional de estos equipamientos radica en la posibilidad de contar con una herramienta a la medida de las necesidades, con un costo potencialmente mucho menor que los importados. Asimismo, facilitaría las labores de mantenimiento y de mejora continua de los equipos involucrados.

Simuladores en el mundo

Como referencia de simuladores, la tabla 3.1 lista los de mayor importancia y alcance. Tales equipos se desarrollaron para el manejo de camiones pesados, incluyendo algunos de ellos la modelación del oleaje potencial de las cargas líquidas transportadas, que es un fenómeno común en vehículos del tipo autotanque que presenten niveles parciales de llenado.

El desarrollo de simuladores como herramienta de capacitación y evaluación de los conductores, ha llegado a constituir un aspecto que requiere de su normalización y calificación objetivas. Así, se han llegado a establecer principios para la calificación de estos equipamientos, como los listados en la tabla 3.2. (Pierowic, *et al*, 2002; Pierowic, *et al*, 2001).

Los aspectos de calidad en esta tabla abarcan desde el alcance del simulador hasta otros aspectos relacionados con la instrucción misma, representados por la capacidad de registro del simulador del desempeño del conductor que esté siendo entrenado o evaluado.

Es importante destacar que los requerimientos descritos conforman una versión muy general de los que deberá satisfacer el simulador de la empresa considerada. De esta manera, se requiere profundizar en cada uno de los aspectos generales.

No obstante, se insiste en la peculiaridad de que el simulador de manejo debe incluir sistemas de modelación de la respuesta dinámica del vehículo y el módulo de movimiento de la cabina, los cuales integren la interacción entre la carga líquida y el vehículo. La carencia de este fenómeno en el simulador podría conducir a la instrucción defectuosa del operador

3.3 “Mal” del simulador de manejo

Algunos conductores entrenados mediante simuladores, presentan síntomas de mareo, sin importar si los simuladores son fijos o de movimiento. Este fenómeno representa una magnificación de lo que normalmente ocurre a algunas personas al experimentar movimientos en todo el cuerpo.

El “mal del simulador” se refiere a efectos colaterales como náusea y mareo. Adicionalmente, los malestares pueden consistir en molestias visuales, por ejemplo, ya sea cansancio ocular y/o dificultad para enfocar (Drosdol, 1985). El

extremo de tales malestares se representa por vómito. Efectos a mediano plazo incluyen la pérdida temporal del equilibrio.

Tabla 3.1.
Lista de simuladores de manejo de camiones

Simulador	Fabricante	Ubicación
AUTOSIM	AUTOSIM	Noruega
AUTOSIM AS	AUTOSIM	Noruega
Commercial Truck Driver	Lockheed Martin Information Systems	Orlando, FL
CyberTRUCK	Kobitec	Sudáfrica
CyberTRUCK	DNS Business Group	Australia
Daimler Benz Driving Simulator	Daimler Benz	Alemania
Doron L-300 HGV	Doron Precision Systems Inc	Binghamton, NY
Doron L-300 VMT	Doron Precision Systems Inc	Binghamton, NY
Doron L-301	Doron Precision Systems Inc	Binghamton, NY
Driver Training System (DTS)	FAAC Incorporated	Ann Arbor, MI
DuPont TDS	DuPont Safety Services	Wilmington, DE
Iowa Driving Simulator	University of Iowa	Iowa City, IA
LVTS	Atlas	Dinamarca
National Advanced Driving Simulator	University of Iowa	Iowa City, IA
Protectum	Unirisk	Suecia
SafeDrive 1000	Digitran Simulation Systems	North Stonington, CT
STISIM	Systems Technology, Inc.	Hawthorne, CA
TT150	Perceptronics	Ann Arbor, MI
Truck Driver Screening Simulator	NBS Computer Assisted Testing	Fort Wayne, IN
TRUCKSIM	I*SIM	Salt Lake City, UT
Trust 800	Thales Training and Simulation	Tulsa, OK/ Francia
VTI	Swedish Road and Traffic Research Institute	Linkoping, Suecia
100-Roadmaster	Microseism	Sterling, VA
TRL	Dornier GMBH	Crowthorne, Inglaterra
Pennsylvania State University	Systems Technology/Moog/Mack/Renault	EUA

Consecuentemente, el “mal del simulador” puede poner en riesgo el entrenamiento de los conductores mediante estas herramientas.

Aunque los problemas potenciales con el “mal del simulador” no rebasan las múltiples ventajas que poseen estos equipamientos, se considera necesario profundizar las investigaciones tendientes a identificar las causas del problema y sus respectivas medidas correctivas, reconociendo de manera importante que los problemas pueden ser inmediatos o mediatos. Aparentemente, sin embargo, el

uso regular de estas facilidades disminuye los efectos sobre los operadores en entrenamiento.

**Tabla 3.2.
Características a evaluar de los simuladores.**

Objeto a evaluar	Factor de evaluación
Ambiente de la cabina	Réplica de controles de la cabina Existencia del claxon Radio operable Destelladotes, presentes y funcionales Cinturones de seguridad, presentes
Escena visual	Réplica de elementos de la escena Carretera reproducida apropiadamente Señalamientos en replica (eg, velocidad, alto)
Espejos, transmisión	Configuración del espejo Transmisión en replica Prácticas comunes de cambios de velocidades
Maniobras en espacios cerrados	Maniobras en serpentín Vueltas cerradas, con banquetas Conos de control del tráfico
Desarrollo de habilidades	Maniobras en espacios limitados Entrada a rampas de carga Estacionamiento paralelo
Percepción de los espacios	Tráfico cruzado y en rebasamiento Cambio de carriles
Control de la velocidad	Colinas Curvas Vueltas Rebases
Maniobras de emergencia	Intersección ciega Superficies resbaladizas Ponchadura Dirección dañada

Herramientas de enseñanza	Vista aérea Reproducción/grabación Almacenamiento de datos Salidas impresas
---------------------------	--

La tabla 3.3 muestra un ejemplo estadístico de la incidencia del “mal del simulador” en tres simuladores evaluados. Se puede observar que el porcentaje no es muy elevado, mientras que el fenómeno se presenta sin importar si el simulador está dotado de movimiento o no (Pierowic, *et al*, 2002).

Tabla 3.3.
Observaciones del “mal del simulador” (*Simulator sickness*).

Simulador	Movimiento en el simulador	% de incidencia del “mal del simulador”
Doron 300 VMT	NO	Menos de 1%
I*SIM Corporation	SI	Menos de 5%
Digitran	SI	Menos de 10%

3.4 Aplicaciones de los simuladores de manejo

En general, las aplicaciones pueden identificarse en relación con los simuladores de manejo. A continuación se listan algunas:

Estudios de equipamientos innovadores en vehículos

Los equipamientos que representen una potencial mejora a las condiciones o prácticas de manejo de los conductores, pudieran evaluarse con antelación en simuladores de manejo a fin de cuantificar y caracterizar el efecto potencial de tales mejoras sobre el desempeño del conductor (Drosdol y Panik, 1985; Hollnagel y Källhammer, 2003; Lee, *et al*, 2002; Marcotte, *et al*, 2003; Richter, 1974; McGehee, *et al*, 2000).

De esta manera, se podrían identificar efectos potenciales nocivos de los equipamientos sobre la eficiencia y seguridad de la conducción, y efectuar las mejoras correspondientes.

Adiestramiento para el ahorro de energía, o conducción técnica

Los simuladores de cajas de cambio permiten al conductor entrenarse en los cambios de velocidad en los puntos óptimos de revoluciones del motor. Sin embargo, muchas otras condiciones afectan la eficiencia energética del manejo de los camiones, que se derivan de la interacción con el tráfico de las carreteras y el diseño geométrico de las vías.

Un simulador de manejo representa entonces, una mejor manera de evaluar y entrenar de manera integral a los que guían vehículos pesados por cuanto a consumo energético, al representar tales facilidades una aproximación realista a las condiciones de manejo diario.

Estudios de la fatiga de la conducción

El estudio de la fatiga de la conducción representa grandes inversiones en tiempo y dinero para su desarrollo, aparte de los riesgos asociados de llevar al operador a sus límites de resistencia.

Un simulador de manejo permite estudios de fatiga sin implicar riesgos potenciales al conductor bajo estudio y a otros usuarios de las infraestructuras (Rimini-Doering, *et al*, 2001; Ranney, *et al*, 1999; Gillberg, *et al*, 1996).

El uso de simuladores de manejo para estos fines representa, de esta manera, un ahorro en tiempo y recursos.

Estudio de la señalización de infraestructuras

Una aplicación común de los simuladores de manejo consiste en evaluar la efectividad de los señalamientos horizontales y verticales de las infraestructuras, como una función de diseño y configuración. Algunas características estudiadas corresponden a los colores, tamaños de los caracteres, e incluso el texto mismo de tales letreros (Lee, *et al*, 2003).

4 Modelación de vehículos para simulación en tiempo real

Se describe el desarrollo del programa de cómputo asociado a la simulación de la respuesta dinámica del vehículo, tanto a las maniobras de cambio de velocidad como a las perturbaciones desde el pavimento.

4.1 Formulación

Se presenta el proceso de derivación de las ecuaciones de movimiento de un vehículo no articulado de dos ejes, para el cual se simulará su respuesta dinámica al perfil del pavimento y a perturbaciones de cambio de dirección y de velocidad.

La fig 4.1 muestra la unidad considerada, como un sólo cuerpo vehicular, esto es, no articulado y equipado con dos ejes. El delantero es direccional y el trasero de tracción.

Es un modelo de vehículo ampliamente usado en las carretas nacionales para el transporte de materiales diversos, incluyendo cargas sólidas y líquidas.

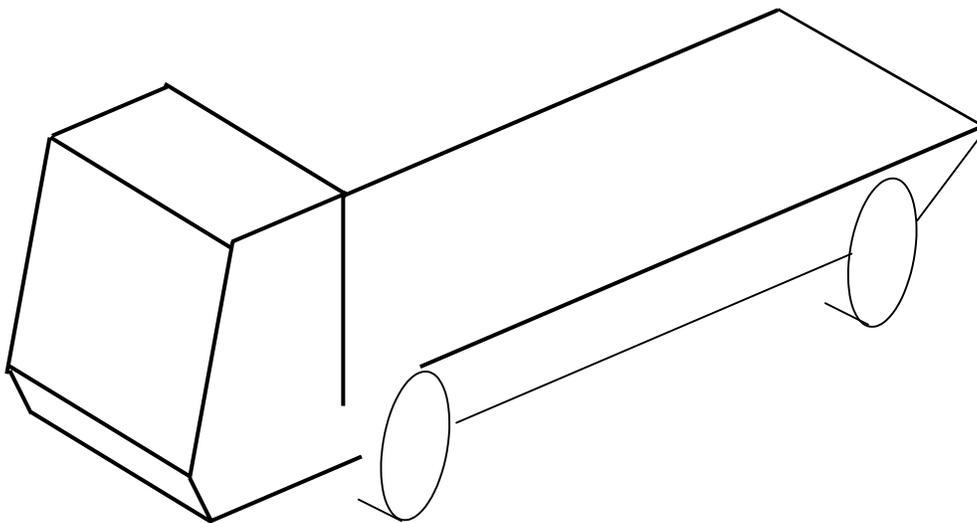


Fig 4.1.
Vehículo tipo camión de dos ejes (C2)

Ecuaciones de movimiento

La fig 4.2 ilustra la disposición de los componentes del vehículo simulado, que incluyen una masa suspendida m_s y las masas de los ejes delantero y trasero (m_T y m_D , respectivamente). Los diferentes grados de libertad corresponden al siguiente:

- z_s posición de la masa suspendida
- θ oscilación longitudinal de la masa suspendida (“cabeceo”)
- ϕ oscilación lateral de la masa suspendida (“balanceo”)
- z_T vibración vertical del eje trasero
- ψ oscilación lateral del eje trasero
- z_D vibración vertical del eje delantero
- γ oscilación lateral del eje delantero

En este modelo cada suspensión fue equipada con un resorte y un amortiguador, mientras que las llantas se representan por un resorte. Las fuerzas F en cada uno de los componentes, de acuerdo con la fig 4.2 b, se describen mediante los subíndices:

- s suspensión
- p pavimento
- di delantero izquierdo
- ti trasero izquierdo
- dd delantero derecho
- td trasero derecho

De esta manera, por ejemplo F_{sti} es la fuerza de la suspensión trasera izquierda.

Cada una de las fuerzas se define en función de las propiedades de rigidez y de amortiguamiento de la suspensión y de las llantas, así como de las posiciones de movimiento de las diferentes masas del vehículo. En forma general, se tiene la siguiente notación para los caracteres y subíndices en estas ecuaciones:

Caracteres:

k constante del resorte de las llantas, o de las suspensiones [N/m]

c constante de amortiguamiento de los amortiguadores de la suspensión
[Ns/m]

Subíndices:

s suspensión

p pavimento

d delantero

t trasero

Las fuerzas de la unidad se componen de las fuerzas descritas y de las de inercia asociadas a los cambios de dirección y velocidad:

$$F_{sti} = k_{st} [(z_s - \theta b_T - \phi \ell) - (z_T - \psi L)] + c_{st} \left[(\dot{z}_s - \dot{\theta} b_T - \dot{\phi} \ell) - (\dot{z}_T - \dot{\psi} L) \right]$$

$$F_{std} = k_{st} [(z_s - \theta b_T + \phi \ell) - (z_T + \psi L)] + c_{st} \left[(\dot{z}_s - \dot{\theta} b_T + \dot{\phi} \ell) - (\dot{z}_T + \dot{\psi} L) \right]$$

$$F_{sdi} = k_{sd} [(z_s + \theta b_D - \phi \ell) - (z_D - \gamma L)] + c_{sd} \left[(\dot{z}_s + \dot{\theta} b_D - \dot{\phi} \ell) - (\dot{z}_D - \dot{\gamma} L) \right]$$

$$F_{sdd} = k_{sd} [(z_s + \theta b_D + \phi \ell) - (z_D + \gamma L)] + c_{sd} \left[(\dot{z}_s + \dot{\theta} b_D + \dot{\phi} \ell) - (\dot{z}_D + \dot{\gamma} L) \right]$$

$$F_{pti} = k_{LT} [(z_T - \psi L) - Y_{pti}] + c_{LT} \left[(\dot{z}_T - \dot{\psi} L) \right]$$

$$F_{ptd} = k_{LT} [(z_T + \psi L) - Y_{ptd}] + c_{LT} \left[(\dot{z}_T + \dot{\psi} L) \right]$$

$$F_{pdi} = k_{LD} [(z_D - \gamma L) - Y_{pdi}] + c_{LD} \left[(\dot{z}_D - \dot{\gamma} L) \right]$$

$$F_{pdd} = k_{LD} [(z_D + \gamma L) - Y_{pdd}] + c_{LD} \left[(\dot{z}_D + \dot{\gamma} L) \right]$$

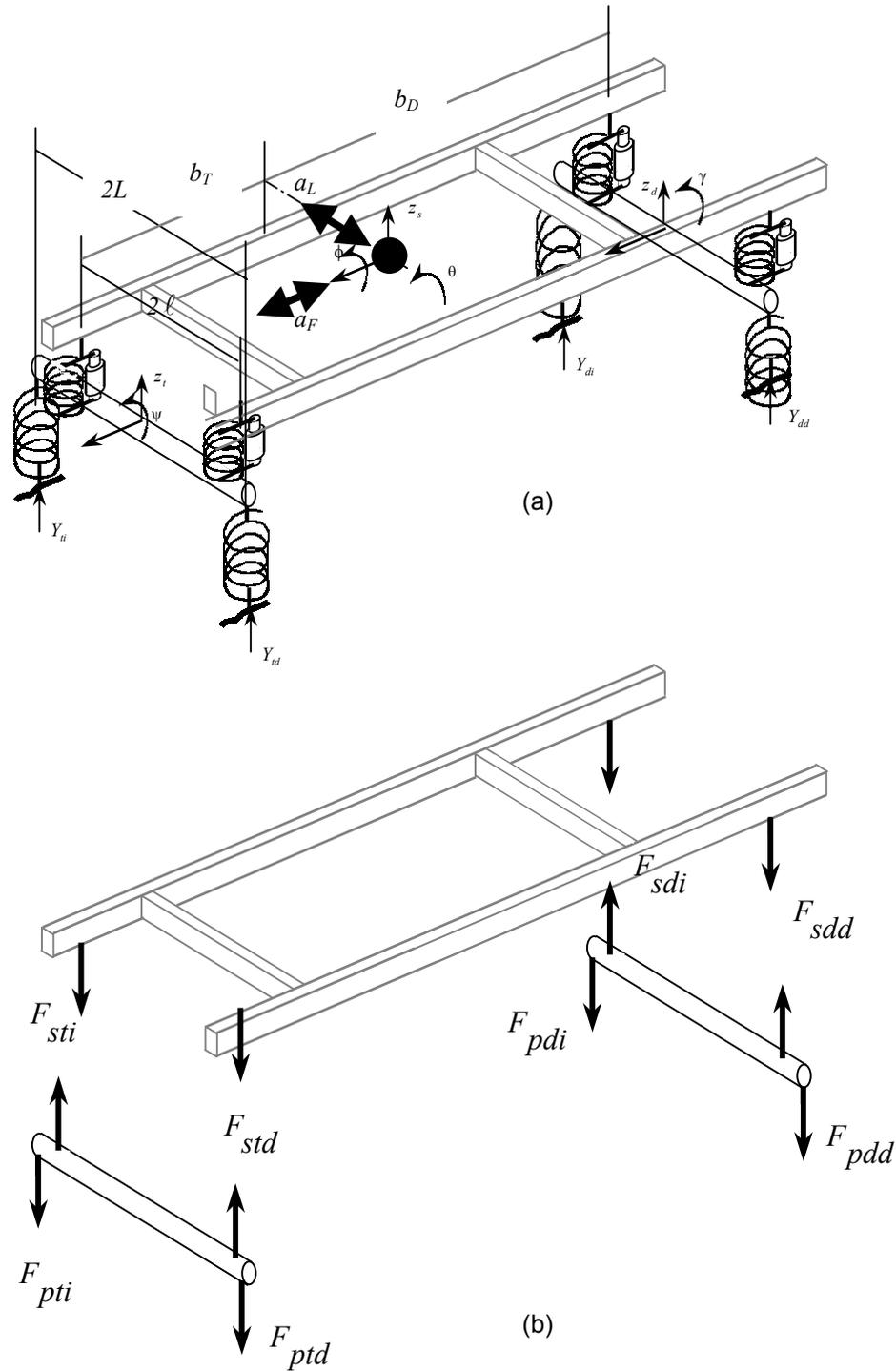


Fig 4.2.
Diagrama de los componentes del vehículo C2, y sus respectivos grados de libertad: a) grados de libertad; b) diagrama de fuerzas
Aplicando la segunda ley de Newton, de acuerdo con los diferentes grados de libertad del vehículo, se tiene:

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{z}_s &= -F_{sti} - F_{std} - F_{sdi} - F_{sdd} \\
 I_{xs} \ddot{\phi} &= F_{sti} \ell + F_{sdi} \ell - F_{std} \ell - F_{sdd} \ell \\
 I_{ys} \ddot{\theta} &= -F_{sdi} b_D - F_{sdd} b_D + F_{sti} b_T + F_{std} b_T \\
 m_T \ddot{z}_T &= -F_{pti} - F_{pTd} + F_{sti} + F_{std} \\
 I_{xt} \ddot{\psi} &= -F_{pTd} L - F_{sti} \ell + F_{std} \ell + F_{pti} L \\
 m_T \ddot{z}_D &= -F_{pdi} - F_{pdd} + F_{sdi} + F_{sdd} \\
 I_{xd} \ddot{\gamma} &= -F_{pdd} L - F_{sdi} \ell + F_{sdd} \ell + F_{pdi} L
 \end{aligned}$$

Sustituyendo las ecuaciones para las fuerzas, en las de la segunda ley de Newton, resulta:

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{z}_s &= z_s (-2k_{st} - 2k_{sd}) + \theta (-2k_{st} b_T - 2k_{sd} b_D) + z_T (2k_{st}) + z_D (2k_{sd}) + \\
 &\quad \dot{z}_s (-2c_{st} - 2c_{sd}) + \dot{\theta} (-2c_{st} b_T - 2c_{sd} b_D) + \dot{z}_T (2c_{st}) + \dot{z}_D (2c_{sd}) \\
 I_{ys} \ddot{\theta}_s &= \phi (-2k_{sd} b_D + 2k_{st} b_T) + \theta (-2k_{sd} b_D^2 - 2k_{st} b_T^2) + z_D (2k_{sd} b_D) + z_T (-2k_{st} b_T) + h_{rc} a_F m_s + \\
 &\quad \dot{\phi} (-2c_{sd} b_D + 2c_{st} b_T) + \dot{\theta} (-2c_{sd} b_D^2 - 2c_{st} b_T^2) + \dot{z}_D (2c_{sd} b_D) + \dot{z}_T (-2c_{st} b_T) \\
 I_{xs} \ddot{\phi}_s &= \phi (-2k_{st} \ell^2 - 2k_{sd} \ell^2) + \psi (2k_{st} \ell L) + \gamma (2k_{sd} \ell L) + R_c a_L m_s + \\
 &\quad \dot{\phi} (-2c_{st} \ell^2 - 2c_{sd} \ell^2) + \dot{\psi} (2c_{st} \ell L) + \dot{\gamma} (2c_{sd} \ell L)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$m_T \ddot{z}_T = z_s(2k_{st}) + \theta(-2k_{st}b_T) + z_T(-2k_{lt} - 2k_{st}) + \dot{z}_s(2c_{st}) + \dot{\theta}(-2c_{st}b_T) + \dot{z}_T(-2c_{lt} - 2c_{st}) \\ + k_{lt}Y_{pti} + k_{lt}Y_{ptd}$$

$$I_{xt} \ddot{\psi} = \phi(2k_{st}\ell^2) + \psi(-2k_{st}\ell L - 2k_{lt}L^2) - k_{lt}LY_{pti} + k_{lt}LY_{ptd}$$

$$m_T \ddot{z}_D = z_s(2k_{sd}) + \theta(2k_{sd}b_D) + z_D(-2k_{ld} - 2k_{sd}) + \dot{z}_s(2c_{st}) + \dot{\theta}(2c_{sd}b_D) + \dot{z}_D(-2c_{ld} - 2c_{sd}) + \\ + k_{ld}Y_{pdi} + k_{ld}Y_{pdd}$$

$$I_{xt} \ddot{\gamma} = \phi(2k_{sd}\ell^2) + \gamma(-2k_{sd}\ell L - 2k_{ld}L^2) + \dot{\phi}(2c_{sd}\ell^2) + \dot{\gamma}(-2c_{sd}\ell L - 2c_{ld}L^2) + \\ k_{ld}LY_{pdd} - k_{ld}LY_{pdi}$$

La expresión matricial de estas ecuaciones de movimiento se da de la siguiente manera:

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

donde, introduciendo las siguientes identidades:

$$\dot{z}_s = \dot{z}_s; \quad \dot{\theta} = \dot{\theta}; \quad \dot{\phi} = \dot{\phi}; \quad \dot{z}_T = \dot{z}_T; \quad \dot{\psi} = \dot{\psi}; \quad \dot{z}_D = \dot{z}_D; \quad \dot{\gamma} = \dot{\gamma}$$

Las expresiones quedan:

$$\{y(t)\} = \begin{Bmatrix} z_z(t) \\ \dot{z}_z(t) \\ z_z(t) \\ \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ z_T(t) \\ \dot{z}_T(t) \\ \Psi(t) \\ \dot{\Psi}(t) \\ z_D(t) \\ \dot{z}_D(t) \\ \gamma(t) \\ \dot{\gamma}(t) \end{Bmatrix}$$

Mientras que los términos diferentes de cero de las matrices $[A]$ y $[B]$, son:

Para la matriz $[A]$:

$$a_{1,2} = 1$$

$$a_{2,1} = (-2k_{st} - 2k_{sd}) / m_s$$

$$a_{2,2} = (-2c_{st} - 2c_{sd}) / m_s$$

$$a_{2,3} = -2k_{st}b_T - 2k_{sd}b_D / m_s$$

$$a_{2,4} = -2c_{st}b_T - 2c_{sd}b_D / m_s$$

$$a_{2,7} = (2k_{st}) / m_s$$

$$a_{2,8} = (2c_{st}) / m_s$$

$$a_{2,11} = (2k_{sd}) / m_s$$

$$a_{2,12} = (2c_{sd}) / m_s$$

$$a_{3,4} = 1$$

$$a_{4,3} = (-2k_{sd}b_D^2 - 2k_{st}b_T^2) / I_{ys}$$

$$a_{4,4} = (-2c_{sd}b_D^2 - 2c_{st}b_T^2) / I_{ys}$$

$$a_{4,5} = (-2k_{sd}b_D + 2k_{st}b_T) / I_{ys}$$

$$a_{4,6} = (-2c_{sd}b_D + 2c_{st}b_T) / I_{ys}$$

$$a_{4,7} = (-2k_{st}b_T) / I_{ys}$$

$$a_{4,8} = (-2c_{st}b_T) / I_{ys}$$

$$a_{4,11} = (2k_{sd}b_D) / I_{ys}$$

$$a_{4,12} = (2c_{sd}b_D) / I_{ys}$$

$$a_{5,6} = 1$$

$$a_{6,5} = (-2k_{st}\ell^2 - 2k_{sd}\ell^2) / I_{xs}$$

$$a_{6,6} = (-2c_{st}\ell^2 - 2c_{sd}\ell^2) / I_{xs}$$

$$a_{6,9} = (2k_{st}\ell L) / I_{xs}$$

$$a_{6,10} = (2c_{st}\ell L) / I_{xs}$$

$$a_{6,13} = (2k_{sd}\ell L) / I_{xs}$$

$$a_{6,14} = (2c_{sd}\ell L) / I_{xs}$$

$$a_{7,8} = 1$$

$$a_{8,1} = 2k_{st} / m_T$$

$$a_{8,2} = 2c_{st} / m_T$$

$$a_{8,3} = (-2k_{st}b_T) / m_T$$

$$a_{8,4} = (-2c_{st}b_T) / m_T$$

$$a_{8,7} = (-2k_{lt} - 2k_{st}) / m_T$$

$$a_{8,8} = (-2c_{lt} - 2c_{st}) / m_T$$

$$a_{9,10} = 1$$

$$\begin{aligned}
a_{10,5} &= (2k_{st}\ell^2)/I_{xt} \\
a_{10,6} &= (2c_{st}\ell^2)/I_{xt} \\
a_{10,9} &= (-2k_{st}\ell L - 2k_{lt}L^2)/I_{xt} \\
a_{10,10} &= (-2c_{st}\ell L - 2c_{lt}L^2)/I_{xt} \\
a_{11,12} &= 1 \\
a_{12,1} &= (2k_{sd})/m_D \\
a_{12,2} &= (2c_{st})/m_D \\
a_{12,3} &= (2k_{sd}b_D)/m_D \\
a_{12,4} &= (2c_{sd}b_D)/m_D \\
a_{12,11} &= (-2k_{ld} - 2k_{sd})/m_D \\
a_{12,12} &= (-2c_{ld} - 2c_{sd})/m_D \\
a_{13,14} &= 1 \\
a_{14,5} &= (2k_{sd}\ell^2)/I_{xt} \\
a_{14,6} &= (2c_{sd}\ell^2)/I_{xt} \\
a_{14,13} &= (-2k_{sd}\ell L - 2k_{ld}L^2)/I_{xt} \\
a_{14,14} &= (-2c_{sd}\ell L - 2c_{ld}L^2)/I_{xt}
\end{aligned}$$

Para la matriz $[B]$:

$$\begin{aligned}
b_{4,4} &= 1/I_{ys} \\
b_{6,6} &= 1/I_{xs} \\
b_{8,8} &= k_{lt}/m_T \\
b_{8,10} &= k_{lt}/m_T \\
b_{10,8} &= -k_{lt}L/I_{xt} \\
b_{10,10} &= k_{lt}L/I_{xt}
\end{aligned}$$

$$b_{12,12} = k_{ld} / m_D$$

$$b_{12,14} = k_{ld} / m_D$$

$$b_{14,12} = -k_{ld} L / I_{xd}$$

$$b_{14,14} = k_{ld} L / I_{xd}$$

Siendo el vector de perturbación:

$$\{Y(t)\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_{rc} a_F m_s \\ 0 \\ R_c a_L m_s \\ 0 \\ Y_{pti} \\ 0 \\ Y_{ptd} \\ 0 \\ Y_{pdi} \\ 0 \\ Y_{pdd} \end{array} \right\}$$

Donde la desaceleración o aceleración a_F en el vector de perturbación, asociada a maniobras de frenado o acelerado, está dada por:

$$a_F = F_{LL} / (m_s + m_T + m_D)$$

Siendo F_{LL} una fuerza en la interfaz llanta-pavimento, asociada a la aplicación de los pedales del freno o acelerador del vehículo del simulador. Se considera una relación lineal entre la posición del pedal del acelerador y la fuerza de tracción,

mientras que la señal del freno se toma como una señal lógica para establecer la fuerza de frenado.

La fuerza total en la interfaz llanta-pavimento está dada por ecuación:

$$F_{LL} = F_L k_p + w_a k_a$$

Donde F_L es la señal lógica (0 o 1), que indica la opresión del pedal del freno; k_p la fuerza constante por el sistema de frenos del vehículo; w_a la posición radial del acelerador (°); k_a la variación de la carga aplicada como una función de la posición del acelerador (N/°).

Modelado de la aceleración lateral a_L

La aceleración lateral ejercida sobre el vehículo, asociada al cambio de dirección del mismo, está dada como una función del centro de curvatura de la maniobra y de la velocidad de la unidad. La fig 4.3 muestra un diagrama en el que se ha aplicado el principio de Ackerman (Wong, 1978) para establecer el centro de curvatura de un modelo de dos ruedas. Esta consideración, de un vehículo de dos ruedas para establecer la aceleración lateral del de cuatro ruedas, como el simulado en este trabajo, se deriva de la simplificación de cálculos, asociada a la operación de un simulador en tiempo real.

En dicha figura, la posición angular δ_R de la rueda direccional define las aceleraciones laterales y trayectorias del vehículo. La distancia L representa la distancia base entre ejes, y guarda la siguiente relación con el radio de curvatura ρ_D de la maniobra ejecutada por la unidad:

$$\rho_D = \frac{L}{\delta_R}$$

Las variaciones en el ángulo de las ruedas direccionales $\Delta\delta_R$, guardan una relación constante r con las variaciones en el ángulo de posición del volante de la dirección $\Delta\delta_V$, de la siguiente manera:

$$r = \frac{\Delta\delta_V}{\Delta\delta_R}$$

Esta relación r se conoce como relación del mecanismo de la dirección.

La velocidad de avance del vehículo, c , se descompone en direcciones longitudinal y lateral de desplazamiento, de la siguiente manera:

$$c_x = c \cos \delta_R$$

$$c_y = c \sen \delta_R$$

Finalmente, la aceleración radial ejercida por el vehículo, se considera aproximadamente igual a:

$$a_L = \frac{c^2}{\rho_D}$$

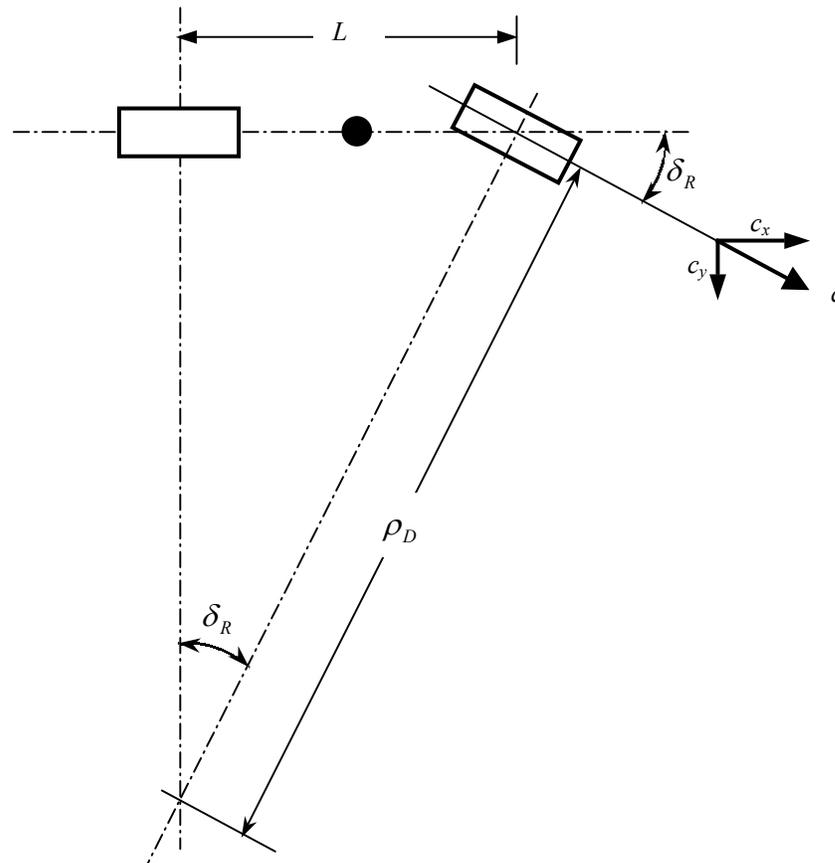


Fig 4.3

. Relaciones cinemáticas durante una maniobra direccional de un vehículo simple de dos ruedas; principio de Ackerman (Wong, 1978)

Método de solución de las ecuaciones de movimiento

Se emplea el método de las matrices de transición para resolver el sistema de ecuaciones lineales expresado en la fórmula 1. Este método se basa en la solución de un sistema de primer orden, expresado en forma matricial y de manera discreta, de la siguiente manera (Meirovitch, 1986):

$$\{y(t + dt)\} = [\Phi]\{y(t)\} + [\Gamma]\{Y(t)\} \quad (2)$$

donde:

$$[\Phi] = e^{[A]t} = [I] + [A]dt + \frac{[A]^2 dt^2}{2!} + \frac{[A]^3 dt^3}{3!} + \dots + \frac{[A]^n dt^n}{n!} \quad (3)$$

y

$$[\Gamma] = \int_0^{\Delta t} e^{[A]t} [B] dt = [A]^{-1} ([\Phi] - [I])[B] = [PR] \quad (4)$$

siendo $[\Phi]$ la matriz de transición, y $[\Gamma]$ la matriz de respuesta particular. dt en la ecuación representa el paso de tiempo para las simulaciones, el cual es tan pequeño como sea necesario para conseguir la convergencia de la expansión en serie de Taylor de la expresión 3.

4.2 Programación

Un programa de cómputo se desarrolla a partir de una infraestructura existente; se divide en dos partes: la primera comprende la obtención de las matrices de transición (respuesta libre) y de respuesta particular (forzada), en tanto que la segunda consiste en la respuesta dinámica del vehículo, de acuerdo con la ec 2. La fig 4-4 muestra la secuencia de cálculos en el programa.

Como entradas al modelo se cuentan las siguientes:

- Perfiles del pavimento en la posición de cada rueda
- Posición del pedal del freno
- Posición del pedal del acelerador
- Posición del volante de la dirección

De las posiciones de los controles del operador del simulador, se obtienen las aceleraciones longitudinales y laterales, como perturbación al vehículo.

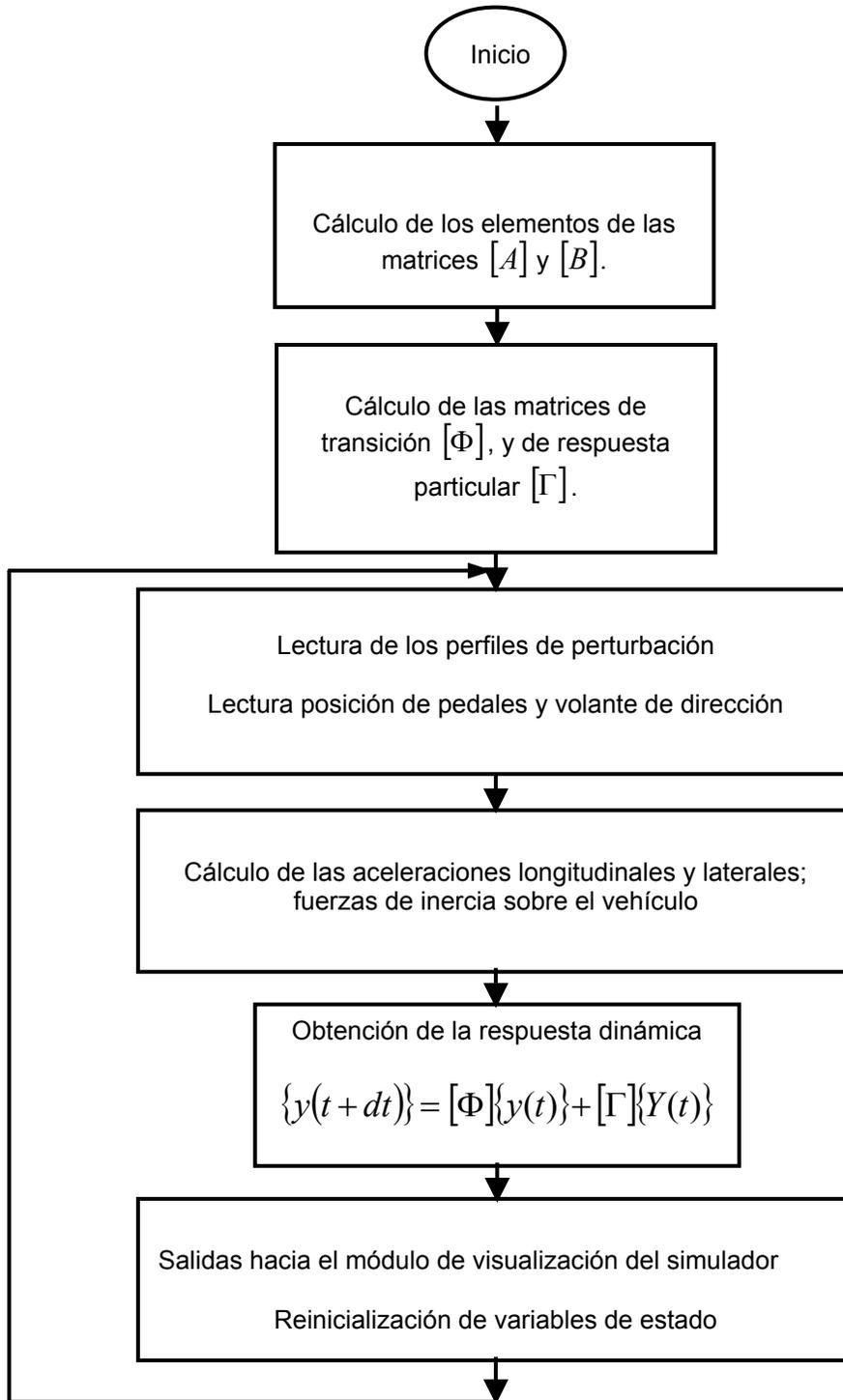


Fig 4.4.
Diagrama de tareas en el programa de cómputo para obtener la respuesta del vehículo del simulador.

4.3 Pruebas fuera de línea

Se presenta un conjunto de pruebas que describen el alcance de las formulaciones y efecto de las perturbaciones consideradas, evaluando de manera independiente y global el impacto de éstas en el comportamiento dinámico del vehículo simulado.

Perfiles de pavimento

Se han considerado tres pares de perfiles de pavimento para la respuesta dinámica del vehículo a tales perturbaciones. La fig 4-5 muestra los tres grupos de perfiles de pavimento considerados. Para cada nivel de rugosidad, se tiene un perfil para la pista o costado izquierdo, y otro para la pista o costado derecho del carril del camino.

La tabla 4-1 lista los valores del Índice Internacional de Rugosidad (IIR) para los diferentes perfiles de pavimento. Este índice se asocia a la simulación de la vibración de un vehículo normalizado al circular sobre el pavimento evaluado, y tiene que ver con la condición general del pavimento (Sayers, 1986). En términos generales, el estado de los pavimentos considerados se define como excelente, bueno, y regular.

Propiedades del vehículo simulado

Las propiedades de los componentes del vehículo integran la tabla 4-2, e incluye magnitudes de las masas, dimensiones y constantes de rigidez y amortiguamiento.

Respuestas al perfil del pavimento a velocidad y dirección constantes

Se presenta un grupo de resultados obtenidos de aplicar exclusivamente la perturbación de parte del pavimento, considerando los tres diferentes niveles de rugosidad.

La fig 4-6 contiene las respuestas dinámicas del vehículo, como una función del estado del pavimento para condiciones de velocidad y dirección constantes. La velocidad de circulación se ha tomado como 90 km/h.

Las partes a) a c) de la figura reportan las vibraciones verticales de las masas del vehículo, mientras que las partes d) a f) las oscilaciones angulares de la unidad.

Tabla 4.1.
Índices Internacionales de Rugosidad (IIR) de los perfiles usados

Estado del pavimento	IIR (mm/m)	
	Pista derecha	Pista izquierda
Excelente	0.57	0.67
Bueno	3.05	2.05
Regular	4.23	2.95

Tabla 2.
Propiedades del vehículo simulado

Característica	Valor
m_s	10000 kg
m_T	1500 kg
m_D	600 kg
k_{ld}	650000 N/m
k_{lt}	1300000 N/m
k_{sd}	600000 N/m
k_{st}	1200000 N/m
c_{sd}	5000 Ns/m
c_{st}	20000 Ns/m
ℓ	0,48 m
L	0,75 m
b_D	1,2 m
b_T	1,4 m
I_{xd}	2000 kg m ²
I_{xt}	2000 kg m ²
I_{xs}	15000 kgm ²
I_{ys}	160000 kgm ²

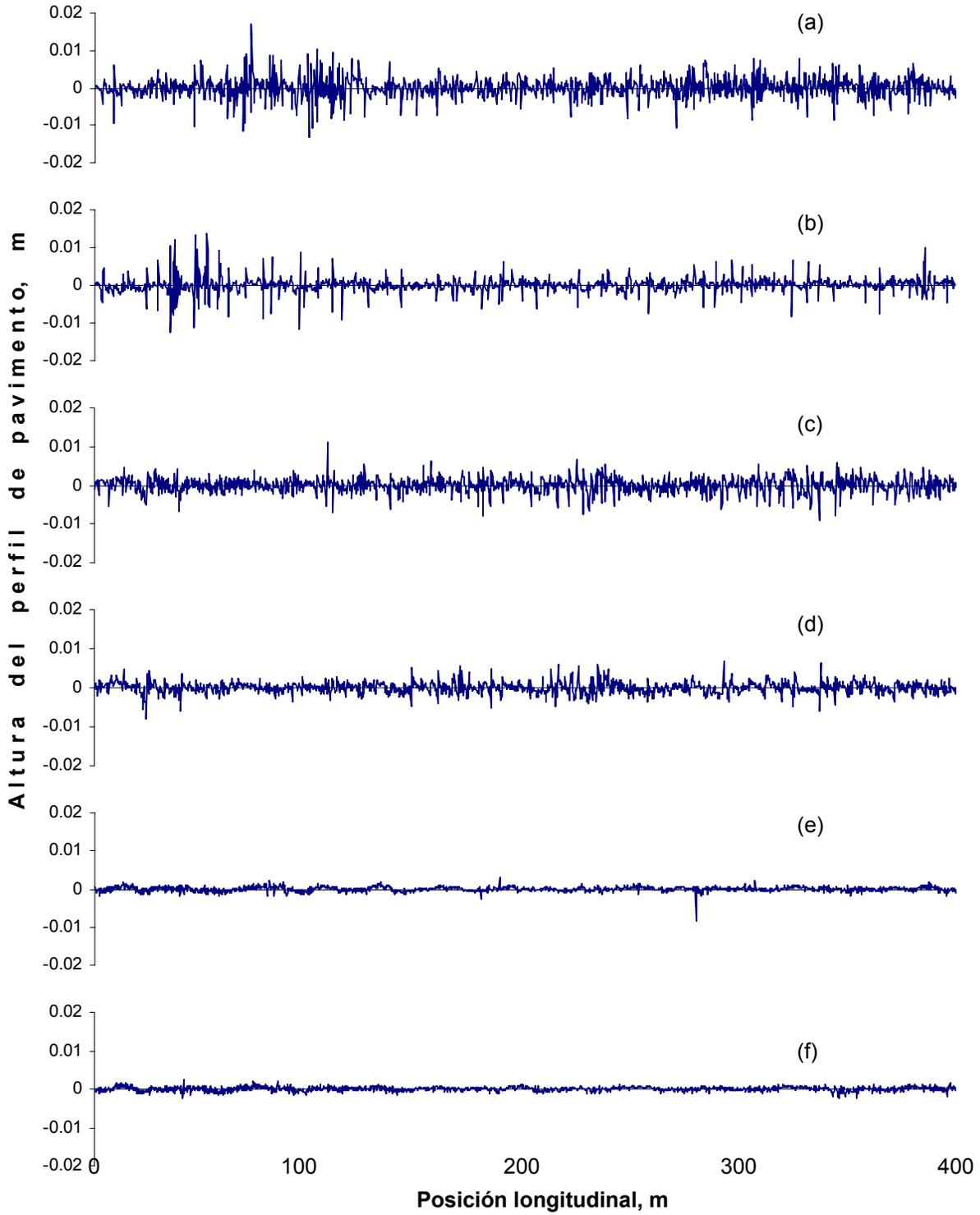


Figura 4.5.
Perfiles de pavimento para las simulaciones: a) regular estado, lzq; b) regular estado, Der; c) buen estado, lzq; d) buen estado, Der; e) mejor estado, lzq; f) mejor estado, der

El impacto del nivel de rugosidad del pavimento es notable sobre los estados de vibración del vehículo. Las alteraciones de la masa suspendida son de menor frecuencia que las de las masas de los ejes, identificándose rangos semejantes de vibración de las distintas masas para un perfil dado de pavimento. Las máximas se identifican como de 2 mm en el caso del pavimento en buen estado, y de 4 y 4,5 mm para los de pavimento en buen y regular estados.

Las máximas oscilaciones se observan como una función del perfil del pavimento. Mientras que para el calificado como en excelente estado, la oscilación más importante es el balanceo, en el caso de uno en regular estado la mayor oscilación se da en el cabeceo u oscilación longitudinal. Los valores de las máximas oscilaciones angulares son una función del estado del pavimento. No obstante, los pavimentos en excelente y regular estados presentan valores máximos del orden de 0.15° , mientras que el considerado en buen estado exhibe como valor máximo de oscilación 0.05° . Esta situación se explica por la perturbación de baja frecuencia, asociada a un pavimento en excelente estado, provocando la excitación del modo de oscilación en cabeceo del vehículo.

Maniobras direccionales sin perturbación del pavimento

La fig 4.7 muestra los resultados del recorrido del vehículo a velocidad constante sobre un pavimento ideal, carente de rugosidad, durante el cual se lleva a cabo un cambio armónico de la posición del volante de la dirección. La parte a) de la figura ilustra el cambio en la posición del volante, mientras que las partes b) y c) corresponden a la respuesta dinámica de las masas del vehículo. Asimismo, la sección d) hace referencia a las fuerzas que las ruedas traseras ejercen sobre el pavimento.

Estos resultados muestran la oscilación de las masas del vehículo, como la superposición de las frecuencias de oscilación asociada con las diferentes masas.

En particular, la vibración de las masas de la unidad representa diferentes fases, de tal suerte que la vibración z_s de la masa suspendida, está en fase con la vibración z_D del eje delantero, y en fase opuesta con la vibración z_T del eje trasero.

La oscilación longitudinal θ de la masa suspendida se encuentra en fase opuesta con respecto a las otras oscilaciones del vehículo: oscilación lateral ϕ de la masa suspendida (“balanceo”); oscilación lateral ψ del eje trasero; y oscilación lateral γ del eje delantero. El acoplamiento dinámico origina la presencia de nodos de oscilación simultáneos. Esta diferencia de fase se observa asimismo en las fuerzas sobre el pavimento, mientras que la oscilación del centro de gravedad de la masa suspendida revela la amplificación por inercia de la oscilación.

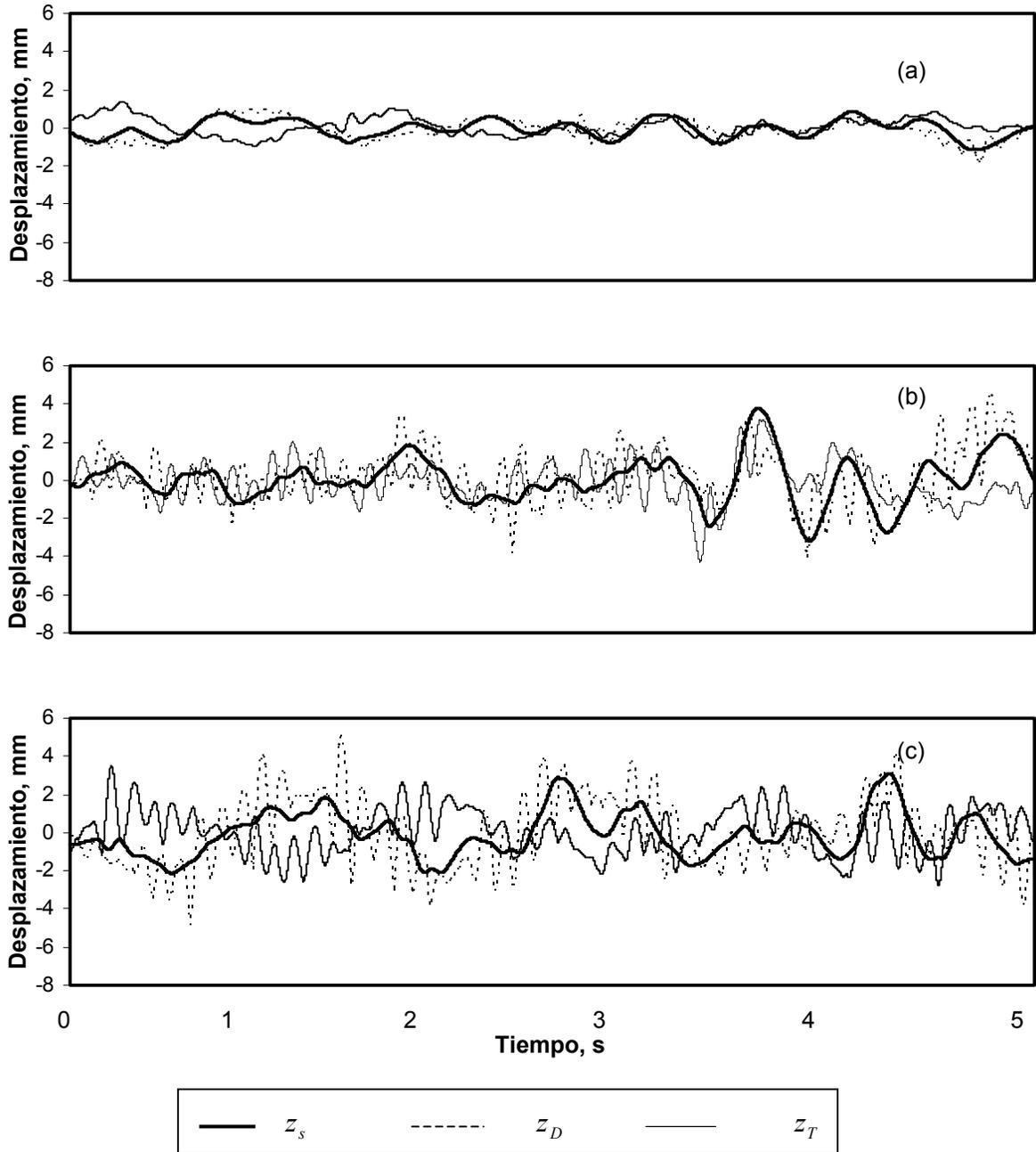


Fig 4.6.
Respuestas al perfil de pavimentos: a) pavimento en excelente estado; b) pavimento en buen estado; y c) pavimento en regular estado

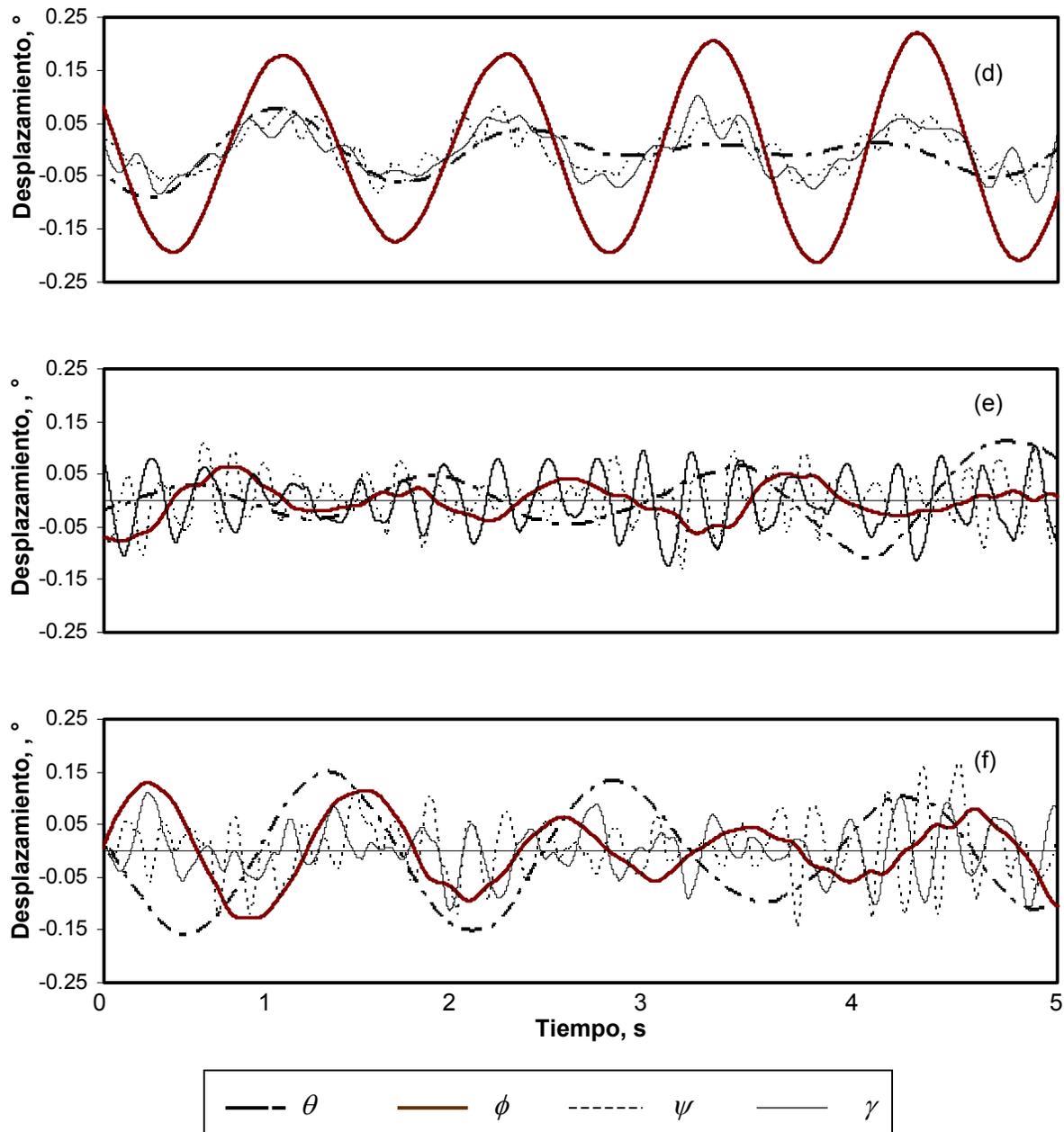


Fig 4.6.
Respuestas al perfil de pavimentos (cont): d) pavimento en excelente estado; e) pavimento en buen estado; y f) pavimento en regular estado

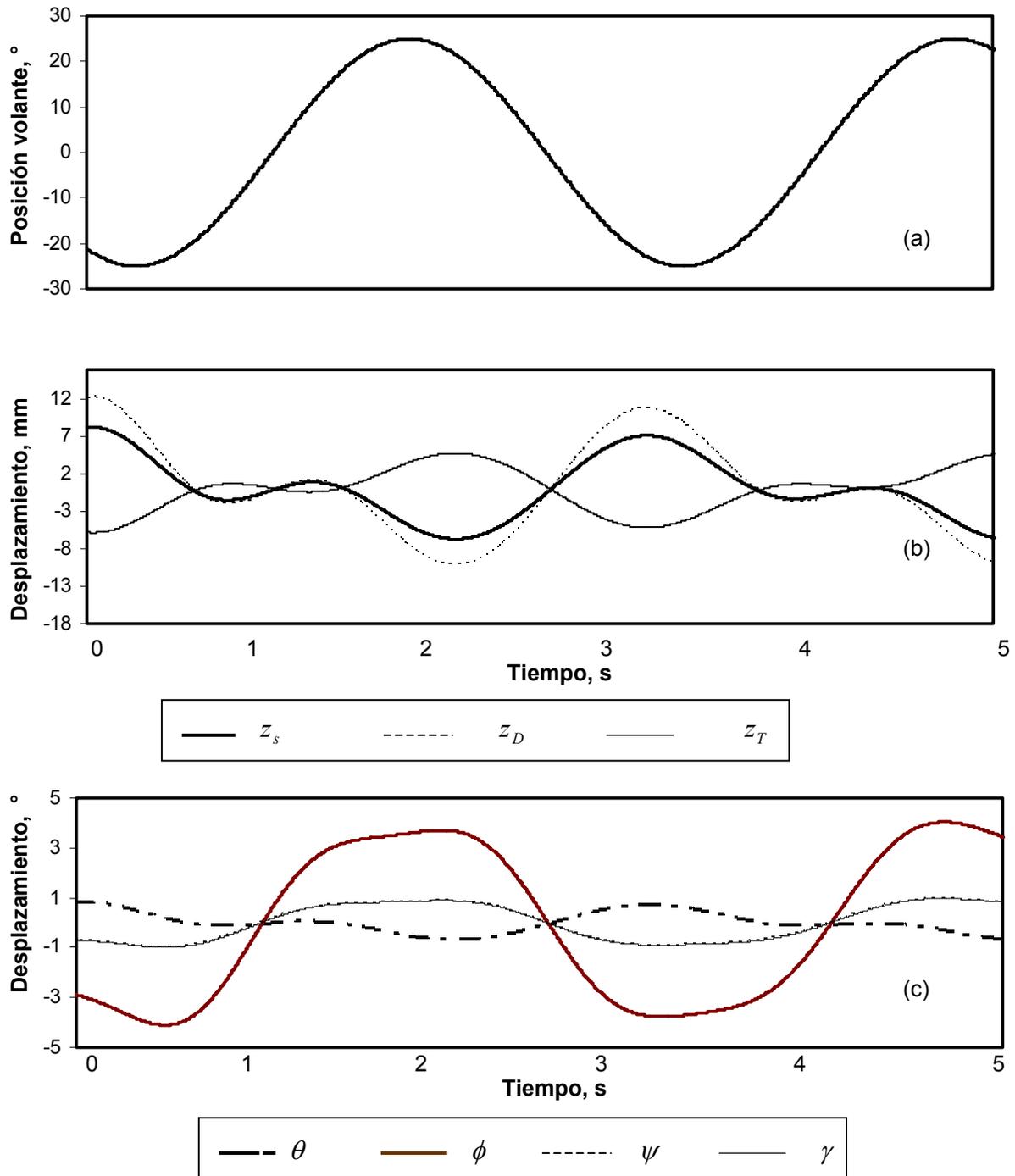


Fig 4.7.
Respuestas a una perturbación direccional armónica en pavimento ideal: a) movimiento del volante; b) movimientos verticales; c) oscilaciones angulares

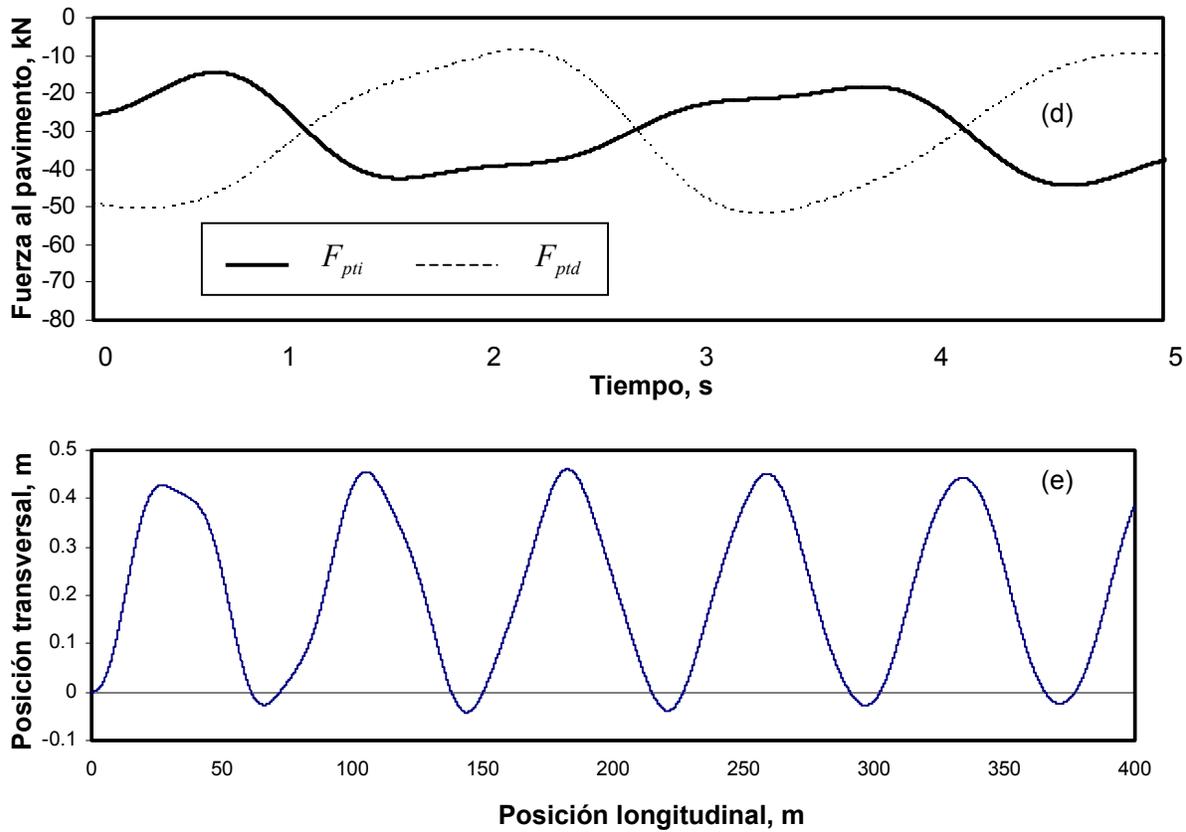


Fig 4.7.
Respuestas a una perturbación direccional armónica en pavimento ideal (cont): d) fuerzas de las ruedas traseras sobre el pavimento, y e) trayectoria del centro de gravedad de la masa suspendida

Maniobras direccionales con perturbación del pavimento

La fig 4.8 corresponde al efecto del perfil del pavimento sobre la respuesta dinámica del vehículo, al ser sometido a una perturbación direccional armónica. Las respuestas incluyen los grados de libertad lineales como angulares, las fuerzas al pavimento de las ruedas del eje trasero de la unidad, así como la posición lateral del centro de gravedad de la masa suspendida del vehículo.

Dichos resultados revelan un comportamiento en general semejante a un caso en el cual no existía rugosidad en el pavimento, teniendo como diferencia la superposición de las vibraciones derivadas de las perturbaciones del pavimento. De esta manera, los rangos de magnitud son semejantes, y el efecto del pavimento es mayormente observado en las vibraciones lineales de las masas del vehículo. Las oscilaciones angulares son sólo marginalmente afectadas.

El efecto de los cambios direccionales sobre las fuerzas al pavimento en las ruedas del eje trasero del vehículo, revelan variaciones alrededor de las fuerzas asociadas a un pavimento de cero rugosidad. Las fuerzas se definen entonces por las de inercia y de oscilaciones asociadas al cambio armónico de la dirección, mientras que éstas varían como consecuencia del perfil del pavimento.

Las variaciones en la posición del centro de gravedad acusan una relación cercana a las características de las perturbaciones de cambio de dirección, y no resultan mayormente afectadas por las variaciones en la rugosidad del pavimento; sólo marginalmente.

La mayor sensibilidad encontrada acerca de los grados de libertad al perfil del pavimento, se atribuye a que la variación del perfil se realiza directamente en la dirección de vibración potencial de las masas del vehículo; mientras que la menor sensibilidad de las oscilaciones angulares al perfil del pavimento se imputa a que la perturbación de estos modos de vibración se asocian con las variaciones relativas del perfil en ambos costados de los ejes, las cuales son en general de pequeña magnitud.

Las variaciones insignificantes de la trayectoria de la masa suspendida, como resultado de la rugosidad del pavimento se atribuyen al efecto de filtrado que representan las suspensiones y llantas de las perturbaciones desde el pavimento.

Maniobras de cambio de velocidad sin pavimento y sin perturbación direccional

En la fig 4.9 se muestra la respuesta de la unidad a perturbaciones de cambio de velocidad, incluyendo un periodo inicial de aceleración y un frenado total sin considerar la perturbación desde el pavimento (parte a)). La oscilación lateral ϕ no presenta variación, y sólo se tiene la oscilación longitudinal ψ , de cabeceo, del vehículo (parte (b)).

Las variaciones del movimiento vertical de las masas y del cabeceo, se correlacionan con las fuerzas de tracción, que provocan una aceleración creciente, y con las de frenado, que se asumen constantes y originan una desaceleración constante del vehículo.

De esta forma, el automotor inicialmente oscila longitudinalmente hacia atrás, para después oscilar hacia delante como consecuencia de la maniobra de frenado, indicando además la superposición de esta oscilación con la oscilación natural de la masa suspendida en esa dirección. Estas mismas vibraciones se observan para los grados de libertad lineales, y para las fuerzas de las llantas traseras del vehículo sobre el pavimento.

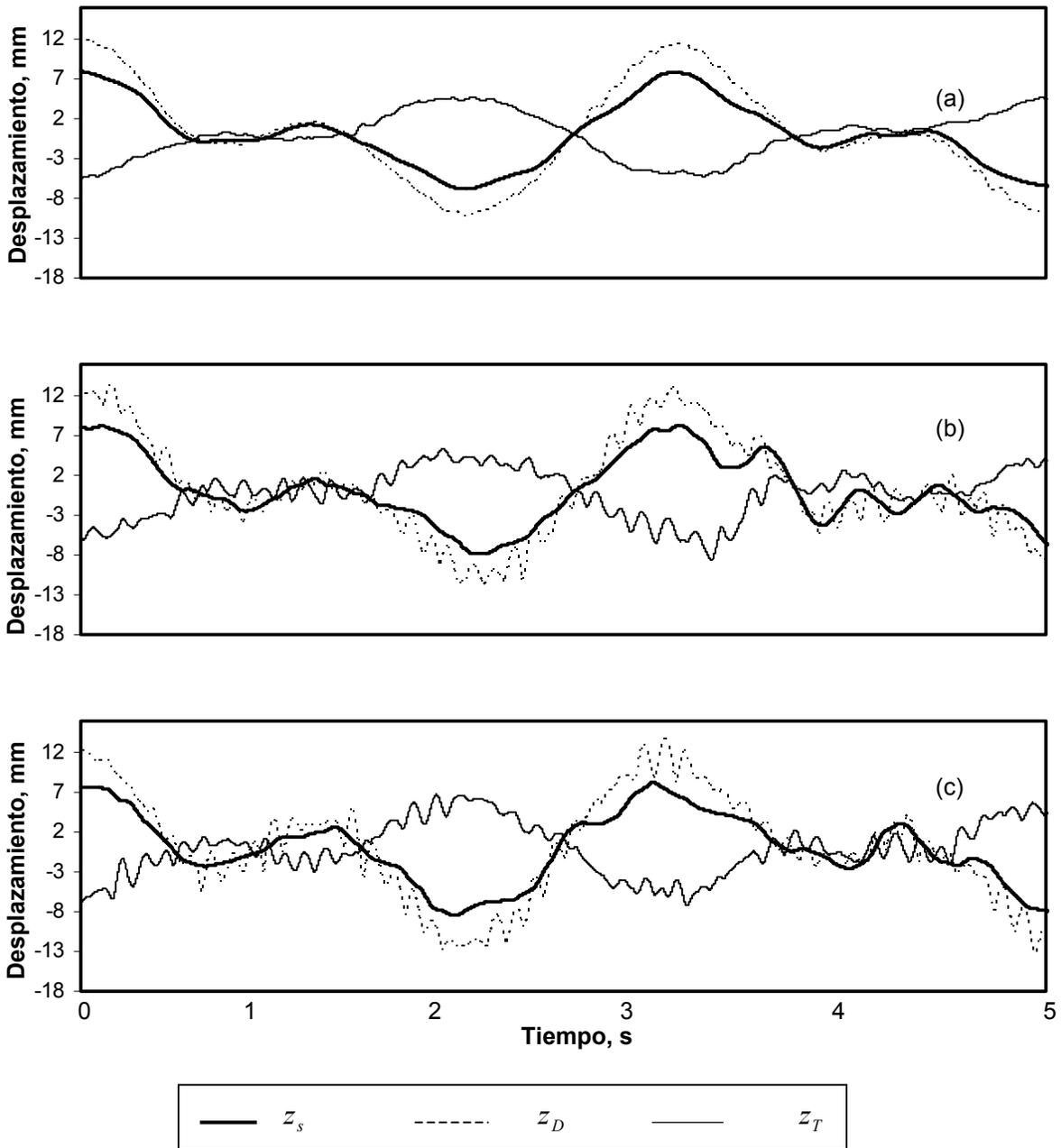


Fig 4.8.
Respuestas a una perturbación direccional armónica en función del estado del pavimento: a) pavimento en excelente estado; b) pavimento en buen estado; y c) pavimento en regular estado

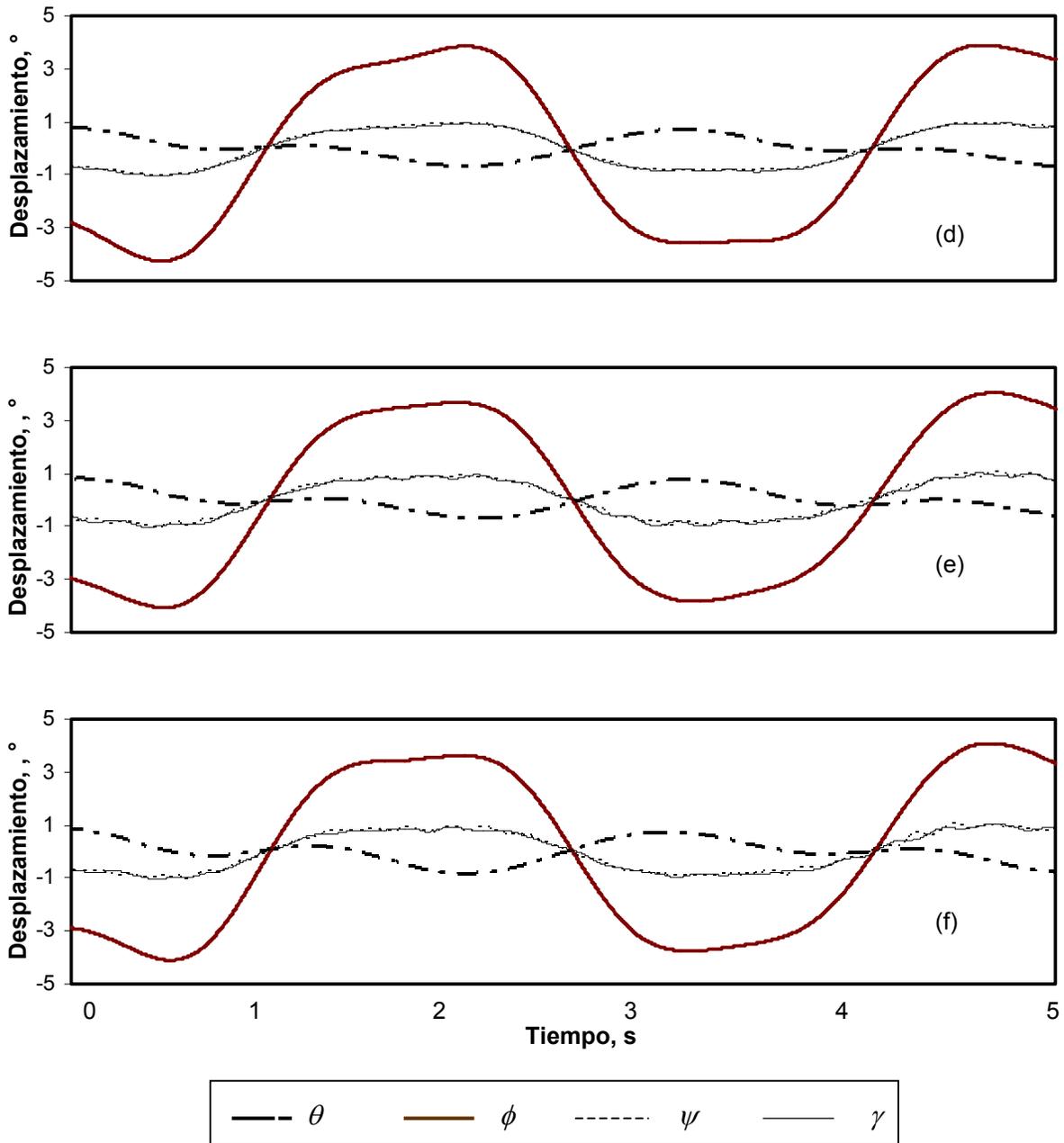


Fig 4.8.
Respuestas a una perturbación direccional armónica en función del estado del pavimento (cont): d) pavimento en excelente estado; e) pavimento en buen estado; y f) pavimento en regular estado

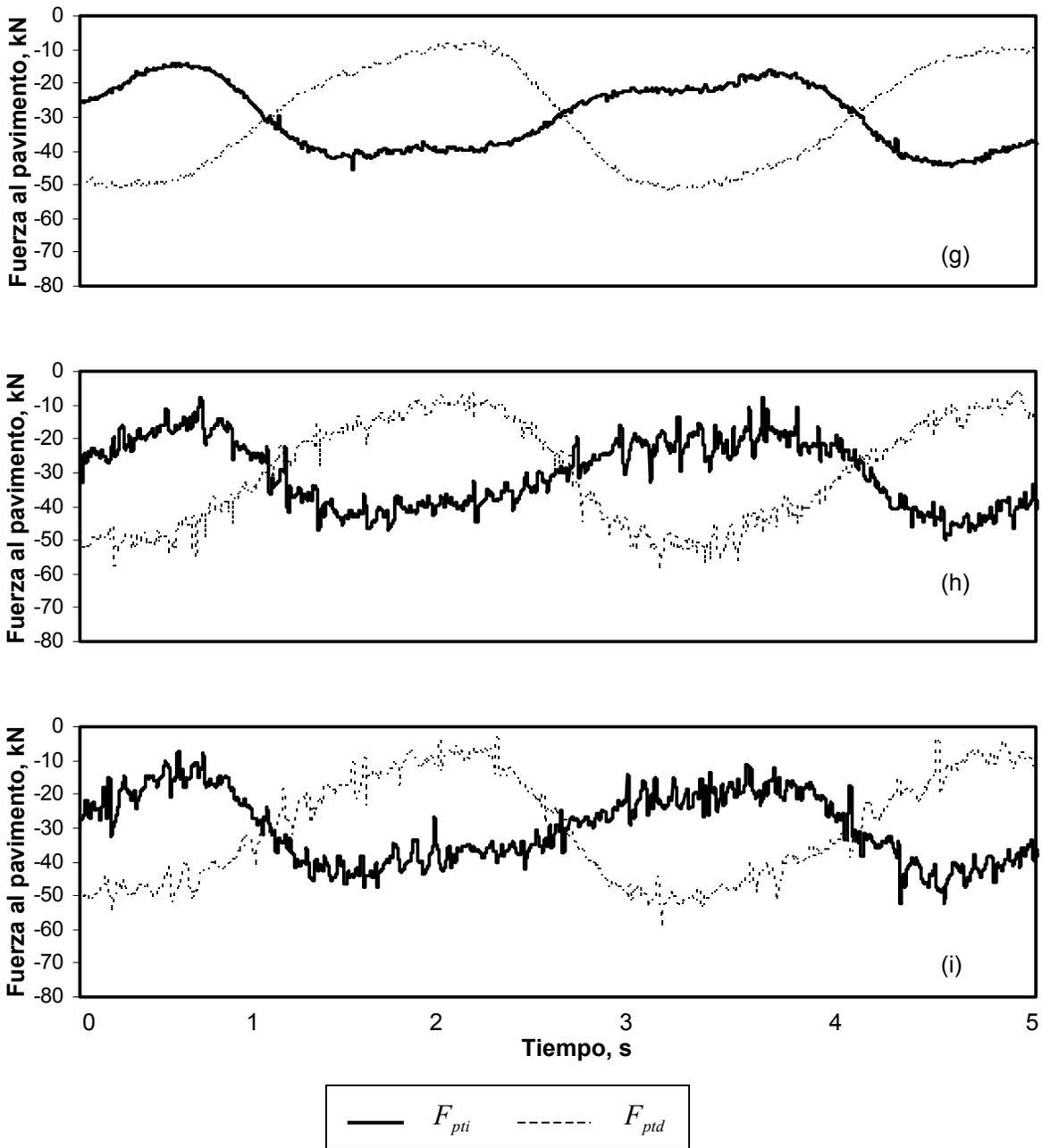


Fig 4.8

. Respuestas a una perturbación direccional armónica en función del estado del pavimento (cont): g) pavimento en excelente estado; h) pavimento en buen estado; y i) pavimento en regular estado

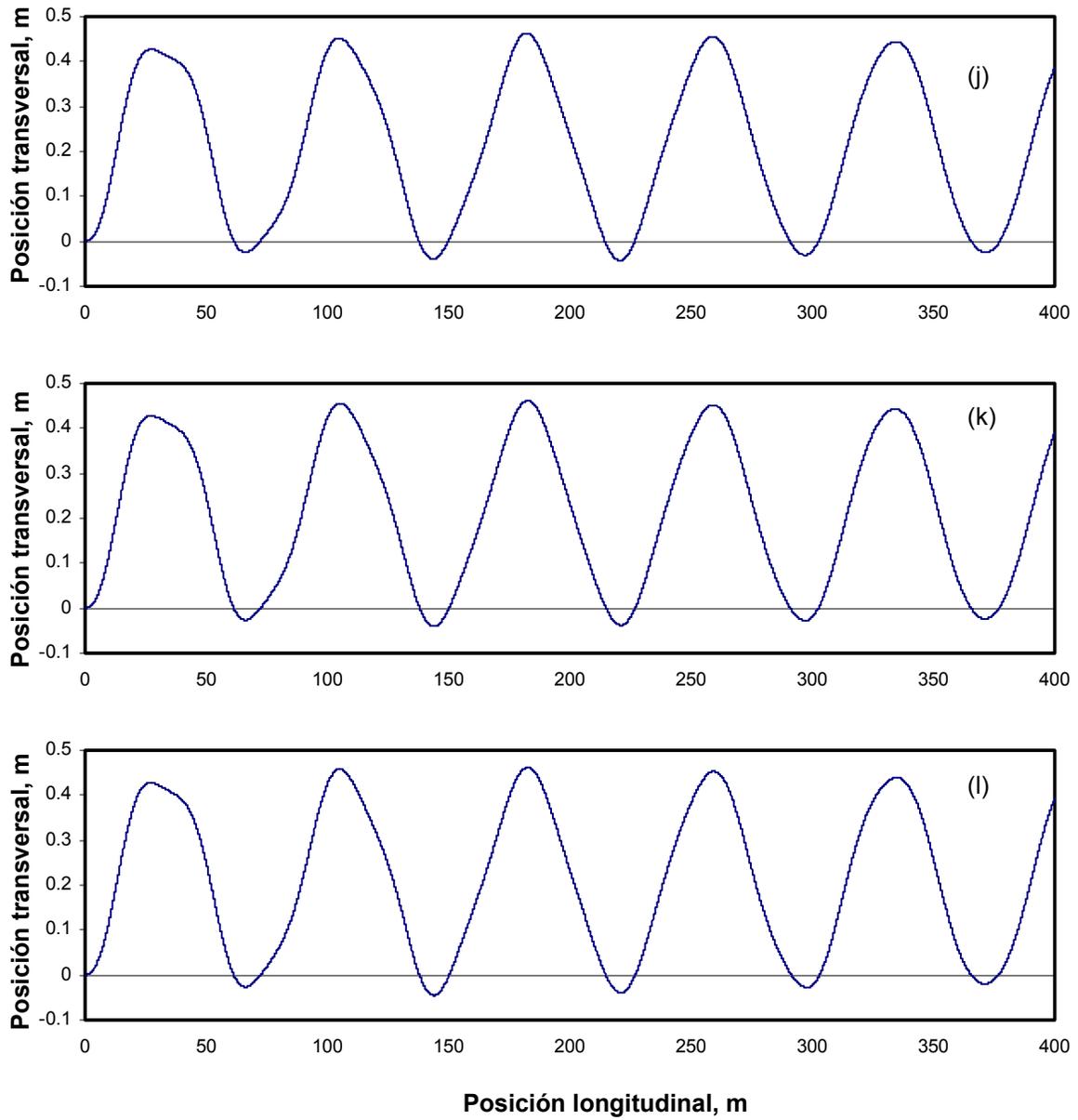


Fig 4.8.
Respuestas a una perturbación direccional armónica en función del estado del pavimento (cont): j) pavimento en excelente estado; k) pavimento en buen estado; y l) pavimento en regular estado

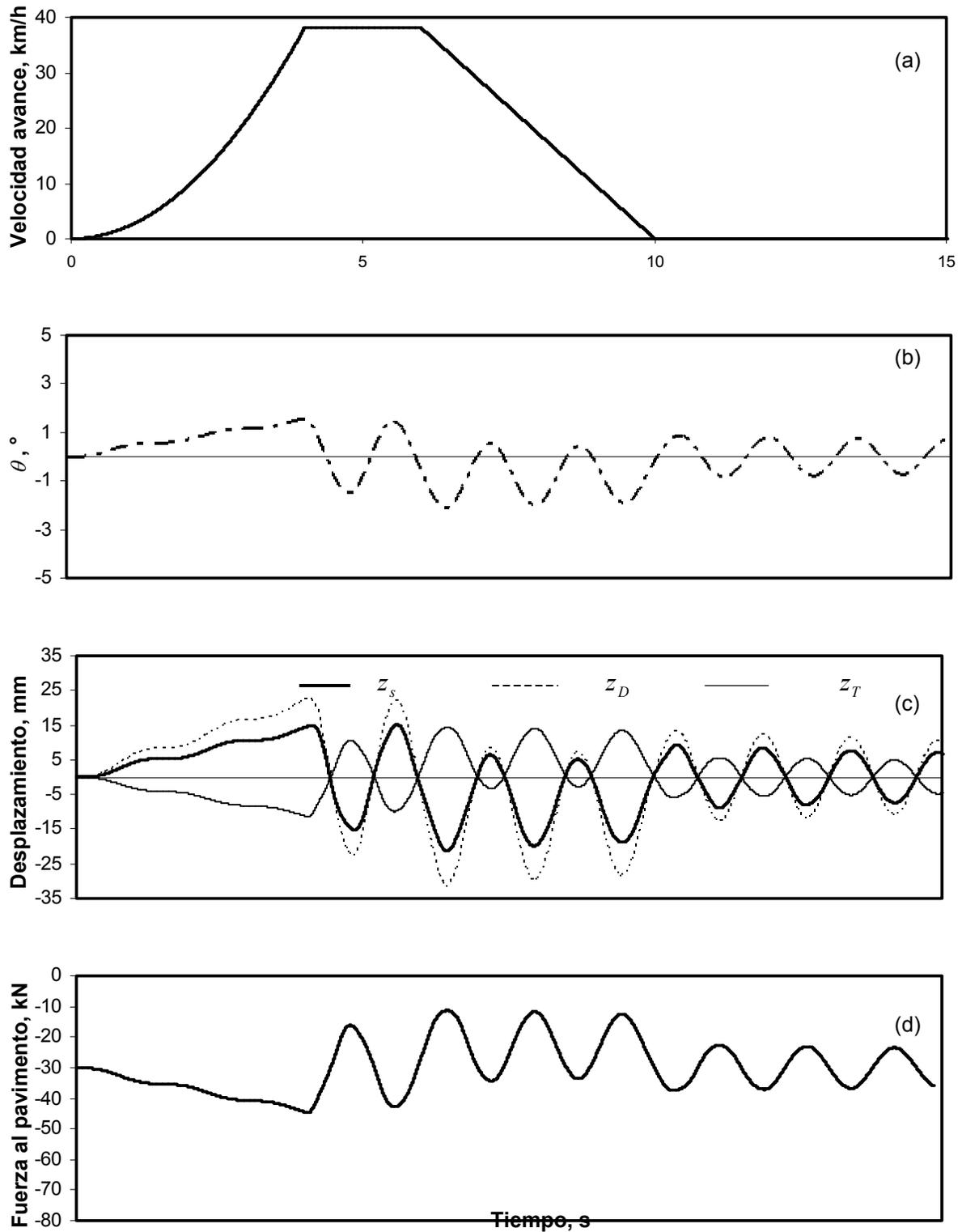


Figura 4-9: Respuestas a una aceleración, y frenado sin pavimento: a) velocidad; b) θ ; c) vibración; y d) fuerza al pavimento en cada rueda del eje trasero

Maniobras de cambio de velocidad con pavimento, y sin perturbación direccional

Se revisa ahora el efecto del perfil del pavimento cuando se efectúan los cambios de velocidad representados en la fig 4.9 (a).

Por su parte, las figs 4.10 a 4.12 muestran tales respuestas, incluyendo las vibraciones lineales y angulares de las masas del vehículo, así como aquellas sobre el pavimento por las ruedas traseras, respectivamente para condiciones de pavimento excelentes, buenas y regulares.

Estos resultados indican que al igual que en el caso de las maniobras direccionales mostradas, el perfil del pavimento provoca una gama de variaciones monitoreadas alrededor de un caso de cero rugosidad, dispersión que depende de la rugosidad del pavimento. De esta manera, el pavimento calificado como en excelente estado implica variaciones marginales de las fuerzas sobre el pavimento, haciéndose notables en el caso del pavimento en regular estado, representando variaciones aproximadas del 10% respecto a los valores de cero rugosidad, o promedio.

Al igual que en las perturbaciones direccionales, las oscilaciones en baja frecuencia derivadas de la oscilación de la masa suspendida, representan el mayor efecto sobre la variación de la respuesta del vehículo, sin importar si se trata de las oscilaciones o de las fuerzas sobre el pavimento.

La vibración del vehículo, como resultado de las perturbaciones desde el pavimento, representa la alteración de mayor frecuencia sobre el automotor, provocando las oscilaciones de la respuesta de baja frecuencia de la unidad. Tal dispersión es función del estado del pavimento.

Maniobras de cambio de velocidad con pavimento, y con perturbación direccional

Se hace alusión a la respuesta del vehículo a la perturbación combinada, que incluye cambios en la dirección y velocidad, así como desde el pavimento.

Las figs 4.13 a 4.16 muestran la respuesta en sus movimientos lineales y angulares, así como las fuerzas sobre el pavimento por las llantas del eje trasero y la posición del centro de gravedad de la masa suspendida. Las perturbaciones de velocidad y direccionales corresponden a las literales a) y b) de la figura.

Los resultados revelan una compleja respuesta del vehículo, producto de la superposición de respuestas y la introducción simultánea de dos perturbaciones de baja frecuencia y una de relativamente alta frecuencia (pavimento). En general, esta maniobra representa una mayor peligrosidad para la estabilidad de la unidad.

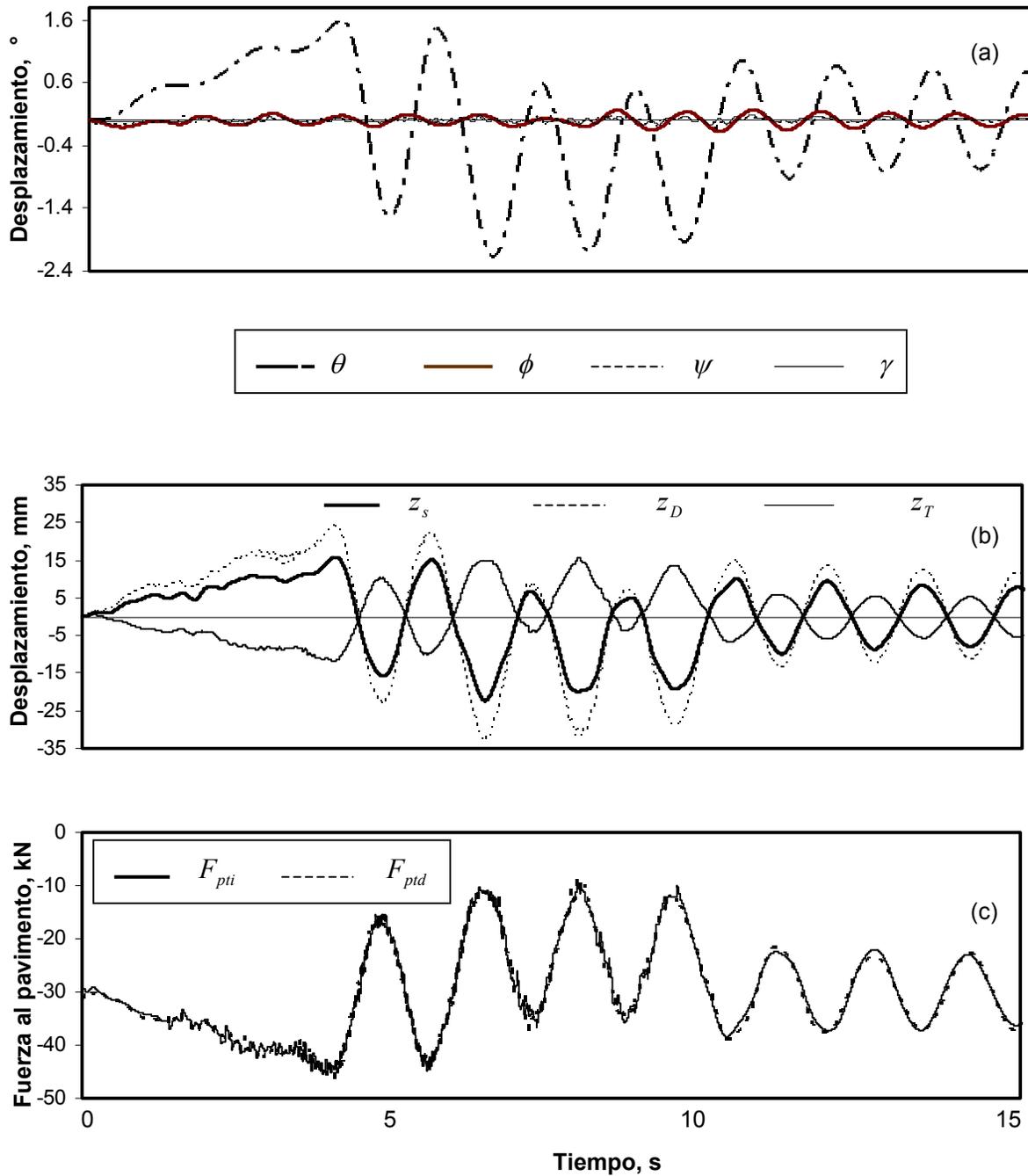


Fig 4.10.

Respuestas a una aceleración y frenado; pavimento en excelente estado:
a) oscilaciones angulares; b) vibración vertical; y c) fuerza al pavimento en cada rueda del eje trasero

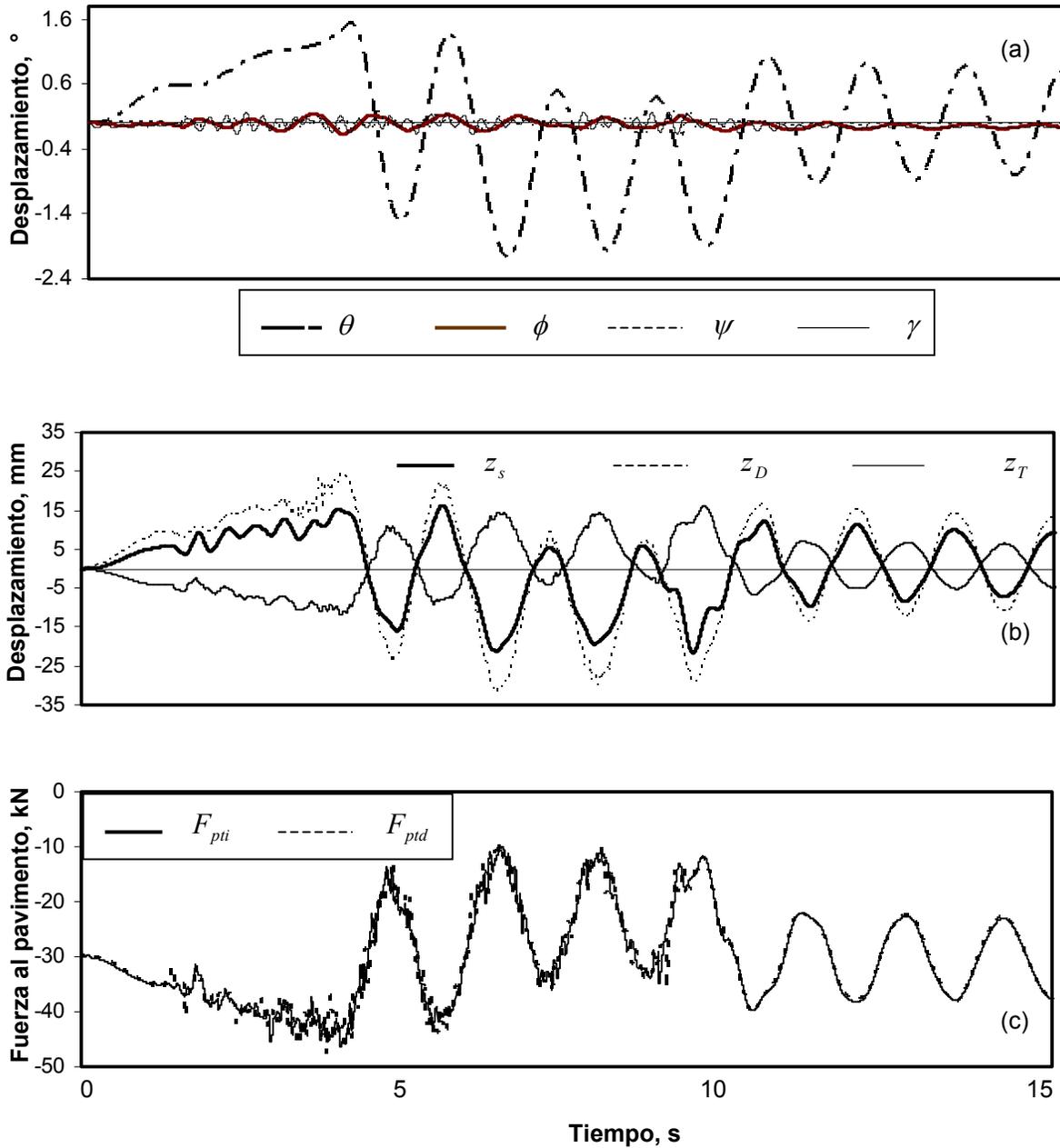


Fig 4.11.
Respuestas a una aceleración y frenado; pavimento en buen estado: a) oscilaciones angulares; b) vibración vertical; y c) fuerza al pavimento en cada rueda del eje trasero

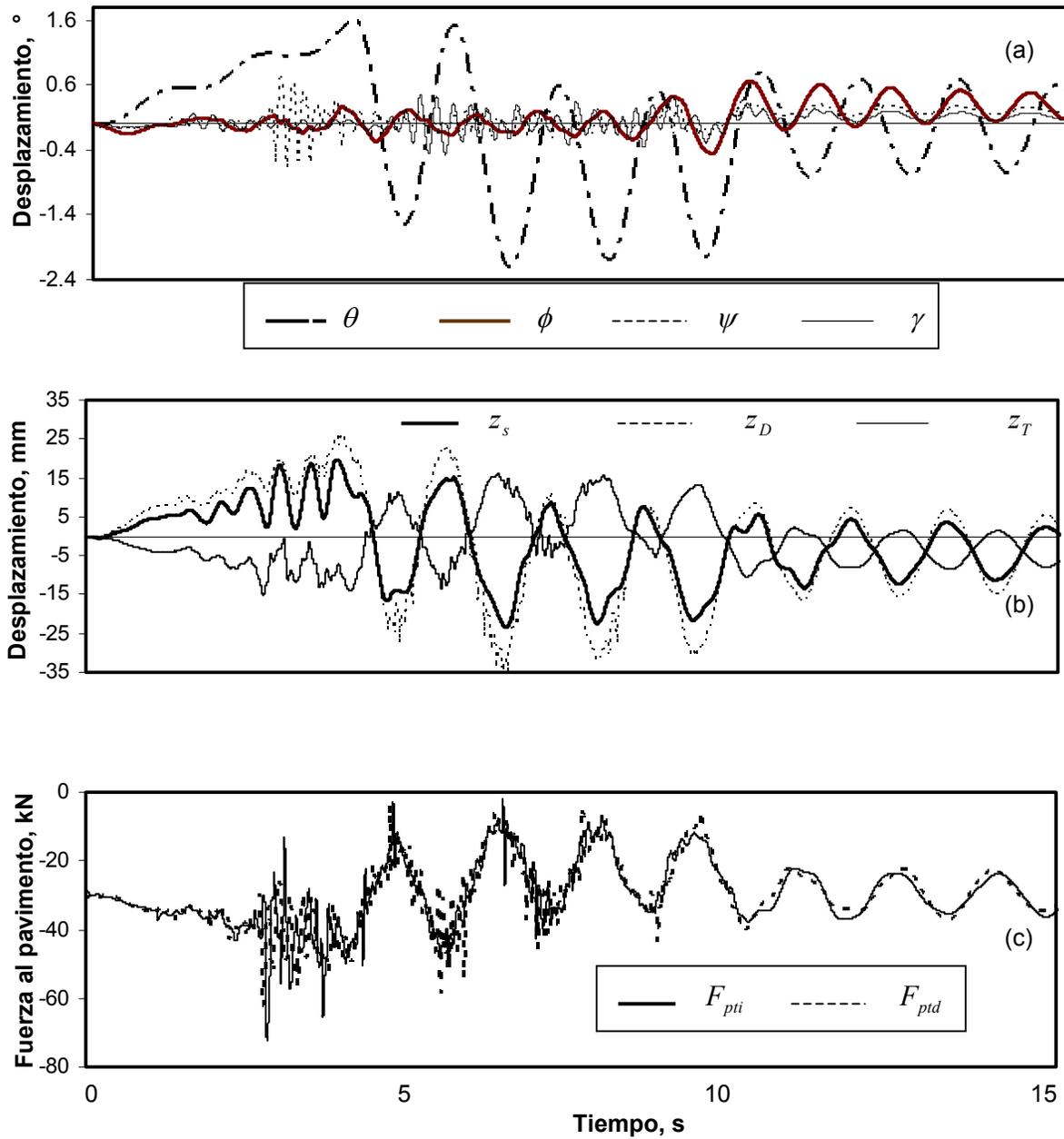


Fig 4.12.
Respuestas a una aceleración y frenado; pavimento en regular estado: a) oscilaciones angulares; b) vibración vertical; y c) fuerza al pavimento en cada rueda del eje trasero

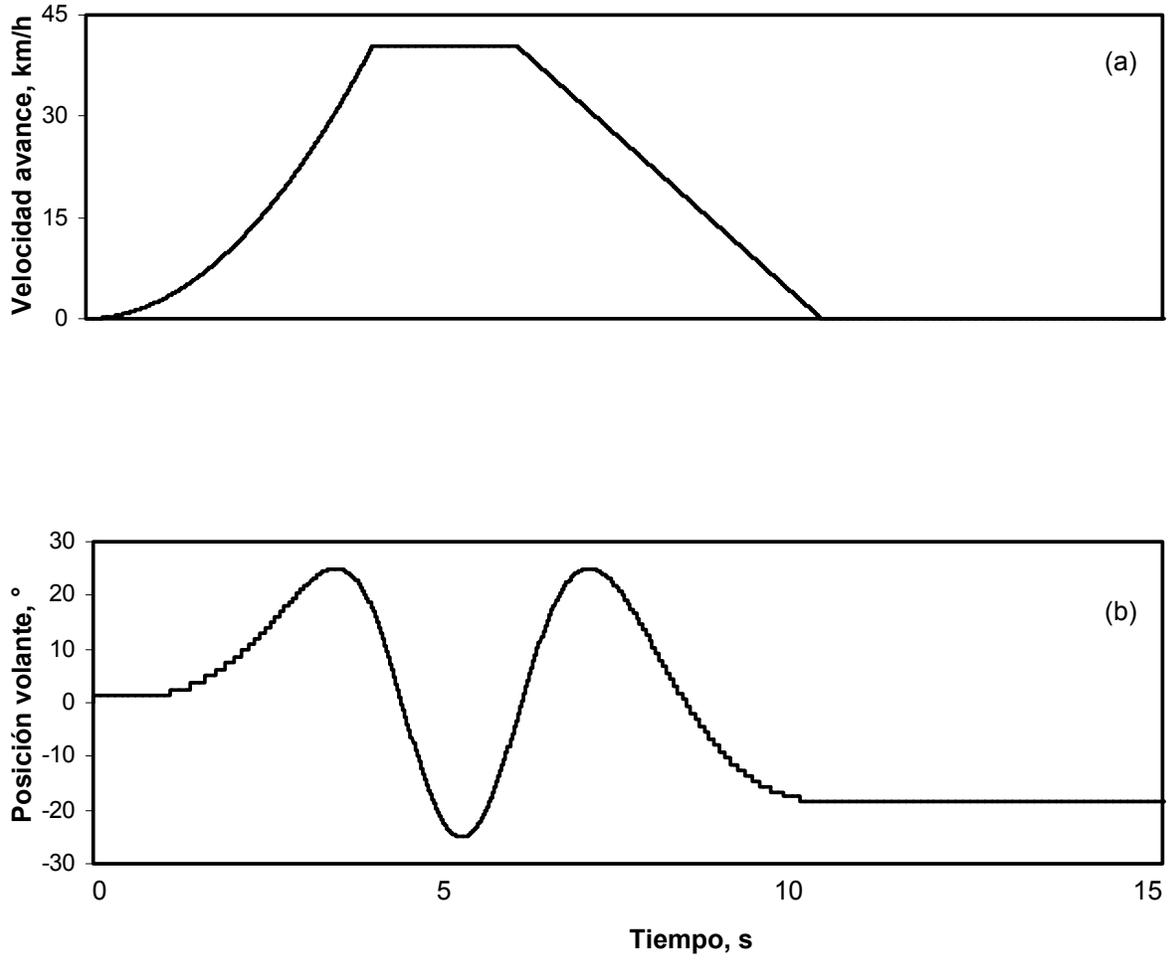


Fig 4.13.
Perturbaciones de velocidad y direccionales: a) velocidad; b) posición del volante

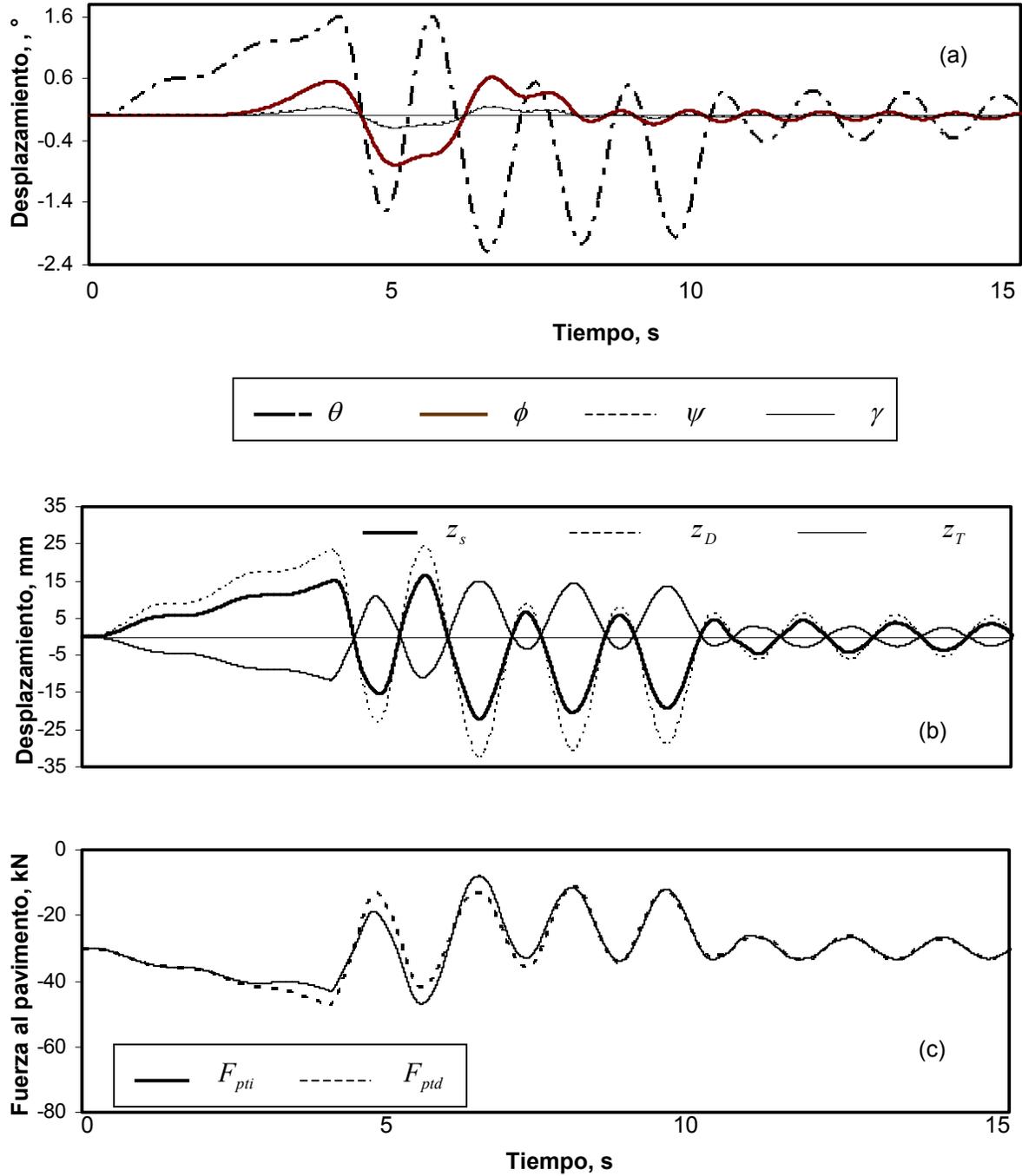


Fig 4.14.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección, sin pavimento: a) oscilaciones angulares; b) desplazamientos verticales; c) fuerzas al pavimento

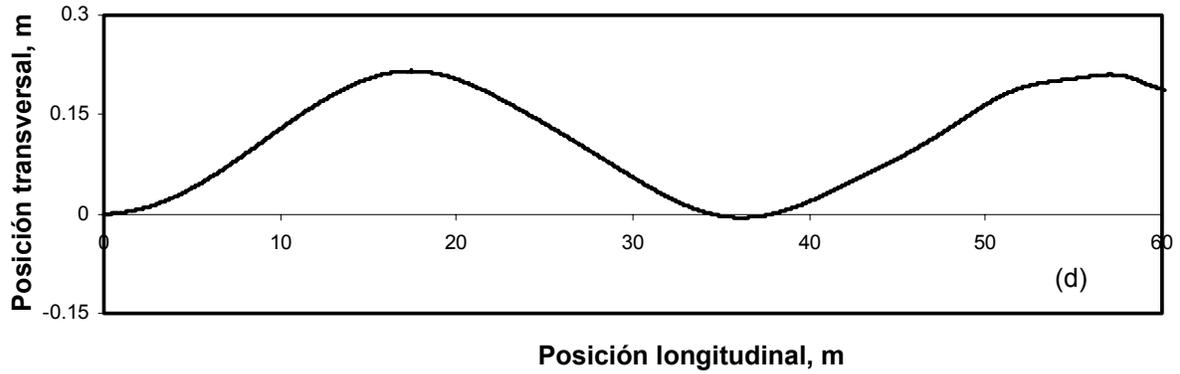


Fig 4.14.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; sin pavimento (cont): d) trayectoria del centro de gravedad de la masa suspendida

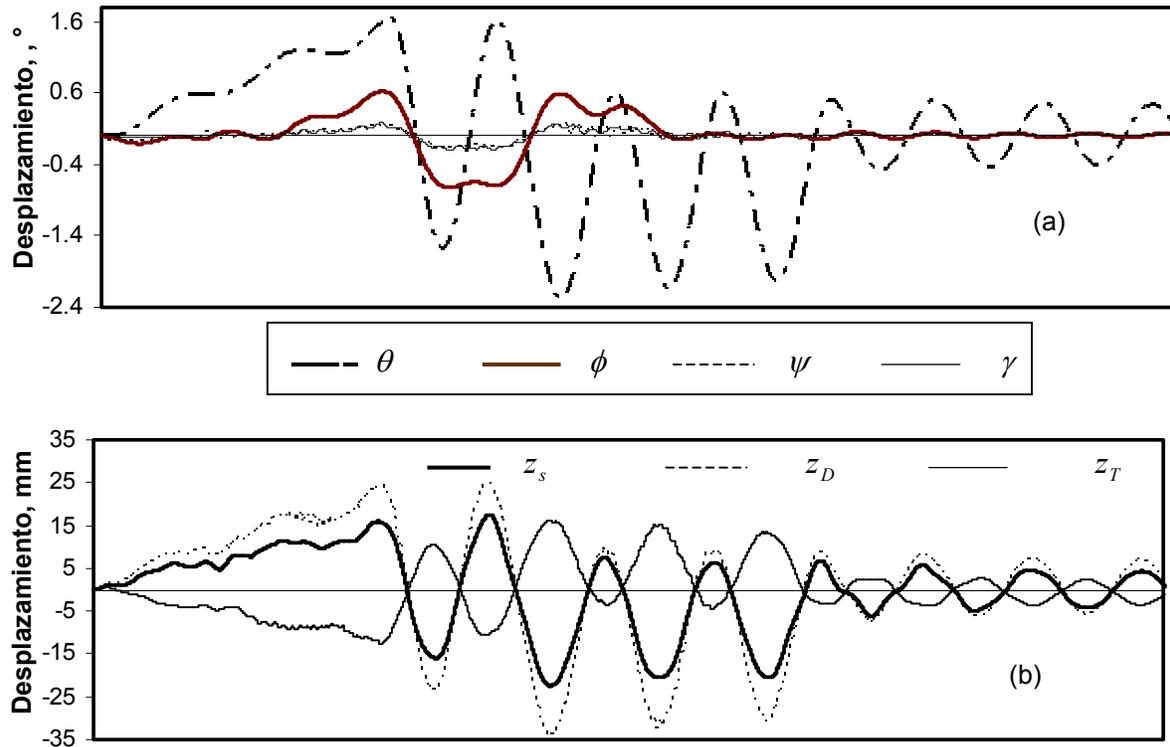


Fig 4.15
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en excelente estado: a) oscilaciones angulares; b) desplazamientos verticales

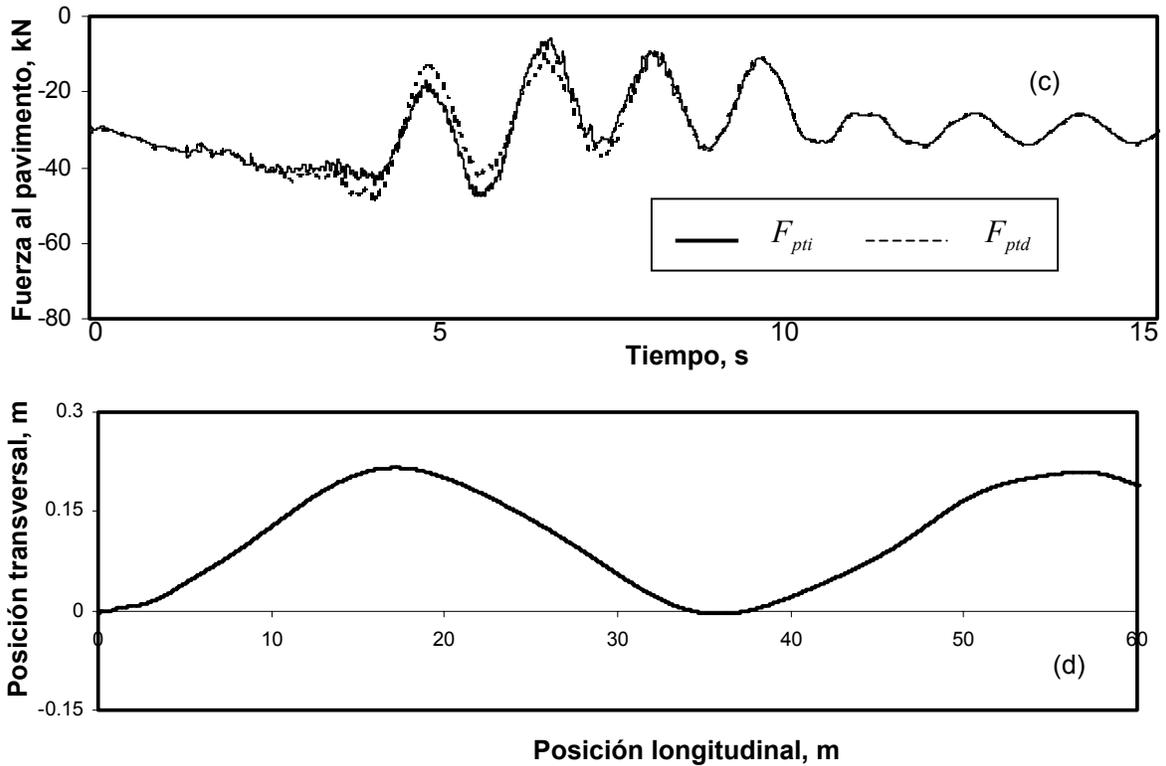


Fig 4.15.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en excelente estado (cont): c) fuerzas al pavimento; y d) trayectoria del centro de gravedad de la masa suspendida

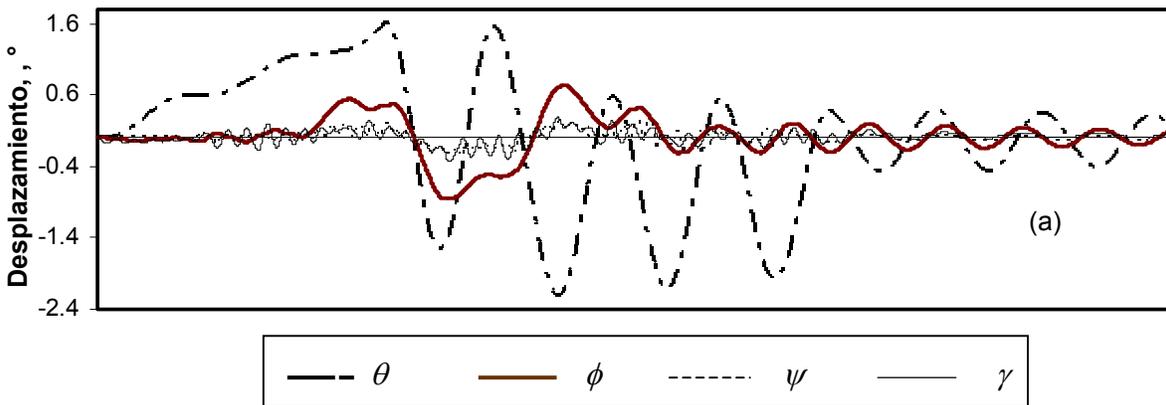


Fig 4.16.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en buen estado: a) oscilaciones angulares

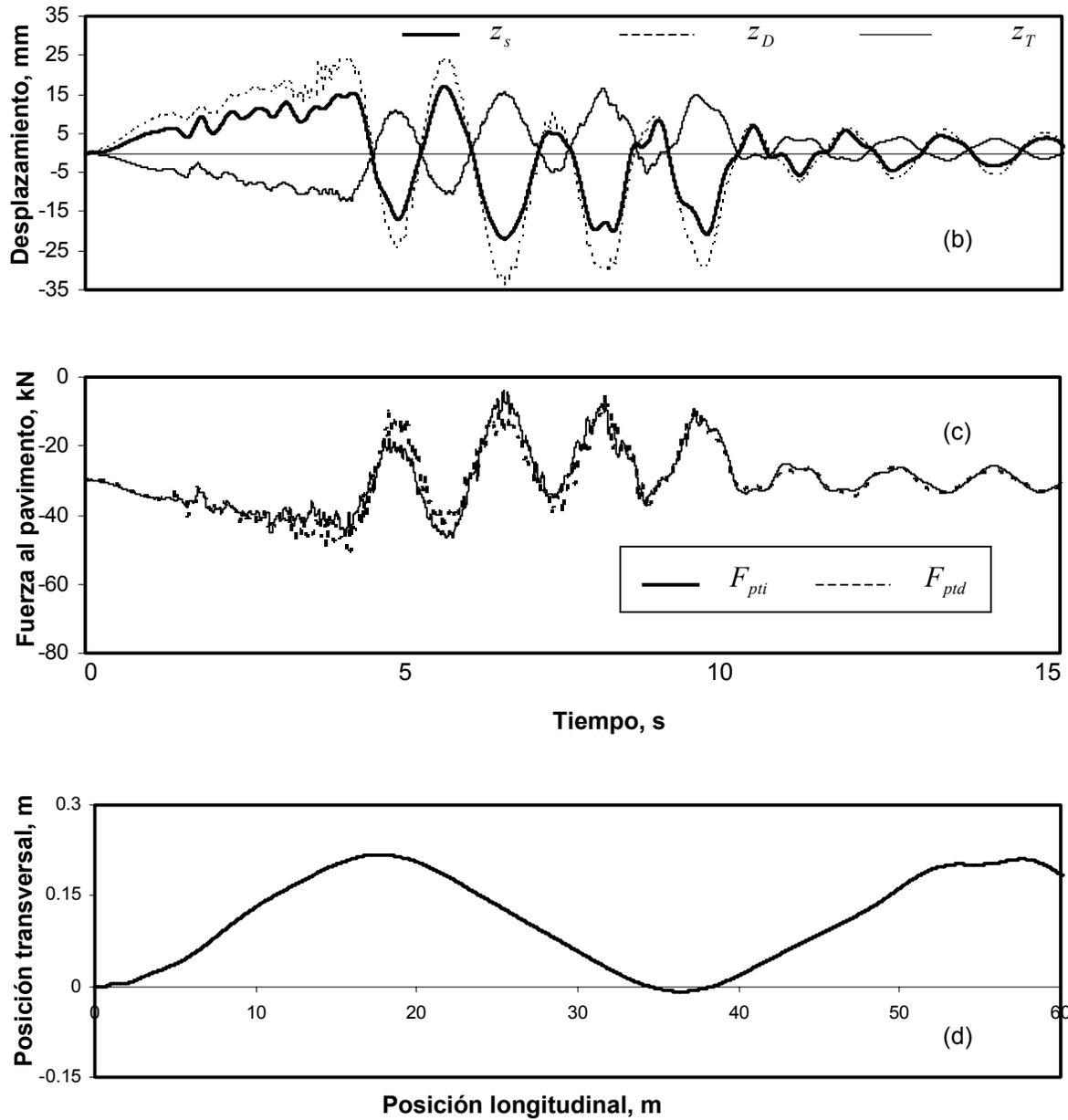


Fig 4.16.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en buen estado (cont): b) desplazamientos verticales; c) fuerzas al pavimento; y d) trayectoria del centro de gravedad de la masa suspendida

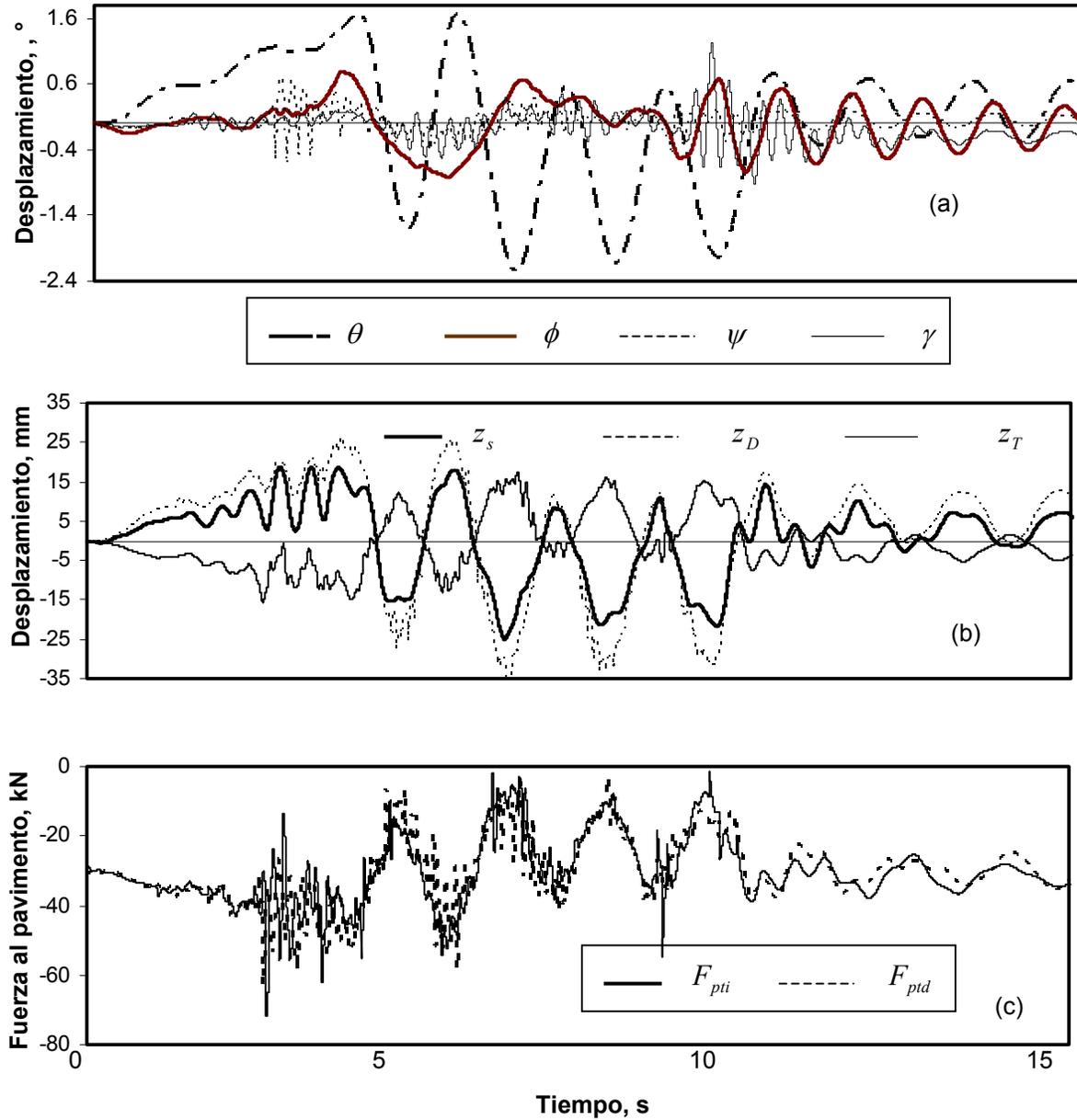


Fig 4.17.
Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en regular estado: a) oscilaciones angulares; b) desplazamientos verticales; c) fuerzas al pavimento

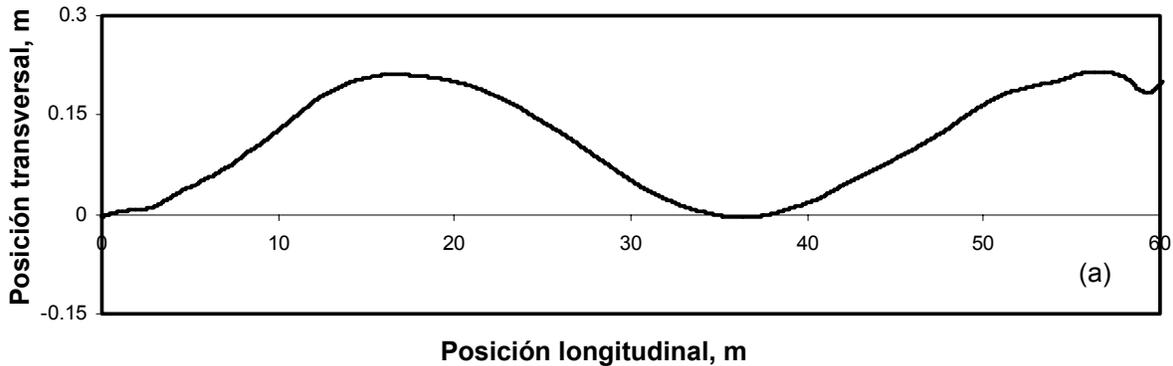


Fig 4.17.

Respuestas a cambios de velocidad y dirección; pavimento en regular estado (cont): d) trayectoria del centro de gravedad de la masa suspendida

4.4 Discusión

Se han expuesto los detalles de la respuesta dinámica de un vehículo de dos ejes a las perturbaciones direccionales, de cambio de velocidad y a las derivadas de la rugosidad del pavimento. Estas alteraciones son las comúnmente encontradas en la operación normal de los automotores.

Además, se ha presentado un análisis del tipo paramétrico, en el que se han evaluado de manera independiente las diferentes perturbaciones, lo que ha permitido evaluar puntualmente su efecto sobre el comportamiento general del vehículo. Las variables de respuesta consideradas se han centrado en la vibración del automotor, sin atender algunas medidas del desempeño que pudieran predecir la tendencia a la volcadura, o a la estabilidad direccional. Se asume que tales medidas, tal como la transferencia lateral de carga, pudieran evaluarse posteriormente, reconociendo que las variables en el tiempo aquí presentadas, reflejan el comportamiento esencial del vehículo.

Se reconocen las simplificaciones hechas en los modelos propuestos, mismas que se circunscriben a modelos lineales para las relaciones de las fuerzas en las suspensiones y llantas, y los respectivos desplazamientos.

Estas simplificaciones, sin embargo, fueron necesarias en la perspectiva de la aplicación correspondiente, relacionada con el desarrollo de un simulador de manejo, en el que la ejecución en tiempo real de los programas resulta un requisito esencial a satisfacer.

5 Modelación del aspecto visual usando 3D_State

Se presenta una discusión sobre los programas de cómputo para el desarrollo del ambiente visual de los simuladores de manejo. La plataforma de modelación gráfica seleccionada, programa *3D_State*, se describe con cierto detalle, a manera de exponer los fundamentos del programa correspondiente descrito en el capítulo 6 de este trabajo, acerca de la integración de modelos en un simulador de manejo para escritorio.

5.1 Plataformas de visualización

La visualización de los ambientes y de unidades en el contexto de simuladores de manejo, tiene que ver con la representación gráfica de datos como son la visualización científica; la visualización de juegos; la animación comercial; y las presentaciones multimedia.

La visualización científica, se diferencia de cualquier otra representación gráfica en que ella se refiere esencialmente a la comunicación de información, de una manera más amigable para quien recibe la información. Esta disciplina es referida también como análisis visual de datos, y su desarrollo ha mejorado de manera significativa la comprensión de los fenómenos, que anteriormente eran extremadamente difíciles de interpretar (Levine, *et al*, 1995; Widlroither, *et al*, 2002).

La visualización en lo general, es una rama de las ciencias computacionales asociada a la representación gráfica mediante computadoras, así como al procesado de imágenes y a la computación de alto desempeño, entre otras áreas afines.

Por su parte, la visualización para simuladores de manejo vendría a estar ubicada entre la visualización científica y la visualización para juegos. Esta posición intermedia se deriva de la necesidad de efectuar los cálculos y representaciones gráficas en una fracción del tiempo real, lo que limita tanto la calidad de las imágenes generadas en tan cortos intervalos de tiempo, como por la cantidad de cálculos para obtener un movimiento realista de los vehículos.

Sin embargo, los avances en las velocidades y capacidad de las computadores actuales, y la eficiencia ganada en los algoritmos de cálculo de la respuesta dinámica de los vehículos, ha dado como resultado la posibilidad de contar con herramientas de visualización cada vez más realistas, aún para aplicaciones en tiempo real. (Lee, *et al*, 1994)

Programas de visualización

Existen diversas familias de programas de visualización, con diferentes alcances y opciones de desarrollo. En la tabla 5-1 se listan los de visualización científica. Sin embargo, existen otros más orientados hacia la animación de objetos, tales como el *OpenGL*, *Hoops* y *3-D State*, que resultan de interés en el contexto del desarrollo de simuladores.

Con la evolución de múltiples aplicaciones orientadas a la animación de objetos tales como vehículos o personas, se han desarrollado en forma reciente y especializada programas de cómputo, los cuales cuentan con las herramientas necesarias para crear ambientes físicos, incluyendo edificios, muebles urbanos y carreteras. Estos programas son los que hacen posible visitas “virtuales” a museos y otras facilidades. De una búsqueda en la literatura especializada, se ubicaron dos programas en esta familia particular de programas: el programa *Blender* y el *3-D State*.

Respecto a ambos programas se puede decir que el *Blender* provee en general imágenes de mejor calidad. Por su parte, el *3-D State* contiene un conjunto de programas, específicamente desarrollados para facilitar la creación de los ambientes (“mundos”), que lo hacen sumamente atractivo para aplicaciones de simulación en tiempo real. Además, la plataforma de programación de *3-D State* se basa en C++, lo que permite flexibilidad por cuanto a su incorporación de programas. El *Blender* se basa en el lenguaje *Python*, por lo que no resulta compatible con el grueso de programas de cómputo desarrollados en plataformas *Fortran*, *C* o *C++*.

Los programas *OpenGL* y *Hoops* tampoco proveen tales recursos para crear de manera amigable los ambientes.

Otros inconvenientes sobre el uso de *Blender* es que no resulta fácilmente desarrollable una interfaz con los otros módulos del programa, incluyendo a la respuesta dinámica de los vehículos y el módulo de sonido.

De esta manera, se ha elegido el programa *3-D State* para el desarrollo de la parte visual del simulador de manejo propuesto en este trabajo. En las siguientes secciones se describen sus características y alcances.

Tabla 5-1.
Listado de programas de visualización científica

No	Nombre	Descripción/Aplicaciones
1	<i>Amira</i>	Visualización en 3-D para reacciones químicas Generación de volúmenes; reconstrucción y simplificación de superficies, animación.
2	<i>Blender</i>	Visualización en 3D, orientado a aplicaciones fuera de línea; animaciones realistas para aplicaciones comerciales.
3	<i>Chime</i>	Para modelar e intercambiar información química en 3-D para estaciones SGI.
4	<i>Contours</i>	Genera gráficos de contorno a partir de datos generados por otros programas; desarrollado por el <i>National Center for Supercomputing Applications</i> (NCSA).
5	<i>Dicer</i>	Genera isosuperficies y particiones de datos en 3-D.
6	<i>Ensignt</i>	Para estaciones de trabajo IBM
7	<i>Fast</i>	Para dinámica de fluidos; se trata de un software de pos-proceso para estaciones de trabajo de la NASA; genera mallas sombreadas, <i>iso superficies</i> , corrientes, campos vectoriales, trazas de partículas y contornos.
8	<i>Gnuplot</i>	Es una función interactiva de "ploteo", operada en la línea de comandos. Posee una librería de funciones y operadores en C.
9	<i>Grace</i>	Para trazos en dos dimensiones.
10	<i>IBM Explorer</i>	Maneja imágenes TIFF; puede generar contornos y superficies en dos o tres dimensiones, de acuerdo con valores de datos, junto con sus colores. Genera espacios vectoriales, y trazas. Tiene extensiones para aplicaciones químicas.
11	<i>IDL</i>	<i>Interactive Data Language</i> modela contornos y superficies En 2 y 3-D, posee capacidades de procesamiento de imágenes.
12	<i>Icol</i>	<i>Interpolated Color Map Editor</i> constituye una herramienta interactiva para editar y modificar mapas de colores de 256 niveles. Éstas permiten indicar niveles de esfuerzos, temperaturas y densidades.
13	<i>Igor</i>	Integra datos y gráficas, generando ondas, tablas y arreglos de páginas
14	<i>Karma</i>	Para aplicaciones de visualización de información de radiotelescopios.
15	<i>Khoros</i>	Para procesamiento de imágenes en 2-D y 3-D.
16	<i>NCAR</i>	Generación de superficies; aplicaciones cartográficas.
17	<i>Raz/Xraz</i>	Imágenes en colores con habilidades de acercamientos, y animación con contornos dinámicos.
18	<i>Tecplot</i>	Traza de gráficas en 2 y 3 dimensiones, superficies, vectores Fuentes de luz; superficies sombreadas.
19	<i>Transform</i>	Traza de gráficos en superficies.
20	<i>Velocity</i>	Procesamiento de imágenes con un sistema de reconstrucción en 3-D. Aplicaciones en análisis de tomografías.

5.2 Descripción del programa *3D State-Morfit-Terrain Builder*

Consta de varias herramientas: *3DWebmaker*, *Morfit Terrain Builder* y *Morfit World Builder* (3D-State, 2004) En general, estos componentes permiten la creación y manipulación de entidades conocidas como “mundos”, que constituyen ambientes de trabajo.

El programa *3DWebmaker* permite integrar en el ambiente de trabajo objetos estáticos y dinámicos desde una galería de imágenes prediseñadas. Asimismo, crear cámaras para visualizar cierta trayectoria, o simplemente seguir a un objeto dinámico, por ejemplo, en el caso de objetos estáticos: árboles, casas, edificios; y en el tipo dinámico: automóviles, aviones, y personas en movimiento, entre otros. Adicionalmente, permite rotar, girar, y mover cualquier tipo de objeto. Cuenta además, con una opción para visualizar el mundo creado, llamado *Viewer Launch*.

Morfit Terrain Builder permite crear y convertir imágenes creadas, con extensión *jpg* por ejemplo, y emplearse como plataformas o superficies a un mundo interactivo en 3D. Sus principales funciones son modificar la escala del ambiente de trabajo, así como crear terrenos con superficies no uniformes, así como explorar el mundo creado a través de una cámara con *3D Webmaker*. Cuenta también con un icono de visualización llamado *Viewer Mode*, y un cuadro con opción de seleccionar las cámaras creadas para explorar el mundo creado.

Morfit World Builder consiste en una plataforma de programación donde a través de diferentes comandos, se especifican las características del mundo creado. Este sub-programa complementa a los otros dos programas, para especificar las características del mundo creado. Con él es factible modificar la escala de los objetos, así como sus características físicas para el caso de objetos dinámicos en cuanto a velocidad, fricción, y elasticidad, entre otros. El ambiente está diseñado de tal manera que en los “mundos” creados, los objetos se ingresan a través de módulos o bloques de programación. En la biblioteca de objetos se tienen árboles, casas, automóviles, superficies carreteras y de campo. Un objeto se conforma con polígonos, para los cuales es necesario especificar su ubicación exacta en el “mundo” a través de las coordenadas x , y y z .

Los archivos de los mundos creados se almacenan con extensión *.wld*; y como característica especial, en los directorios donde se coloquen los mundos deben incluirse los archivos *.bmp* que describen las imágenes en el mundo.

De manera general, el ambiente *3DSTATE* permite visualizar el mundo creado de dos maneras: directamente desde *Morfit Terrain Builder*, o mediante una función de Visual C++ (*STATE_engine_load_world*).

En el contexto de un simulador de manejo, el medio ambiente se carga en un programa C++, asociándose la posición y vibración de los vehículos simulados, que resultan del cálculo de la respuesta dinámica de las unidades a las perturbaciones direccionales, de cambio de velocidad, y desde el pavimento.

A continuación se presentan características específicas de los distintos programas que componen al 3DSTATE.

5.2.1 World Builder

Se describe cómo crear un mundo, añadir objetos, y visualizarlo a través del movimiento de una cámara.

Creación de un mundo

World Builder ayuda a crear un archivo-mundo nuevo a partir de un menú de mundos (fig 5-1). Estos mundos prediseñados constituyen las estructuras básicas en las que se incorporarán diferentes objetos, de acuerdo con el tipo de mundo básico seleccionado.

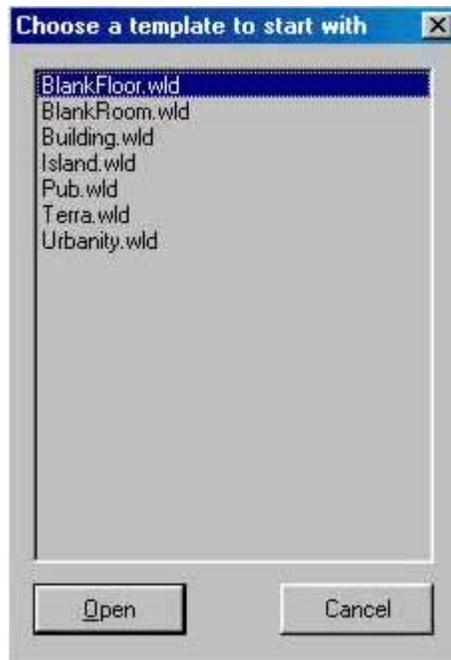


Fig 5.1.
Cuadro de diálogo de plantillas, en *World builder*

Una vez seleccionada una plantilla del menú, *World Builder* proporciona tres vistas del mundo recién creado: superior (principal), lateral, e inferior; momento desde el cual se puede emplear una cámara, y recorrer el mundo por medio de algunas teclas de la computadora, o con la barra de herramientas dentro del programa.

Incorporación de objetos en el mundo

Para añadir algunos objetos en el mundo se selecciona el icono de galería; al hacer *clic*, desplegará una serie de carpetas como se muestra en la fig 5-2.

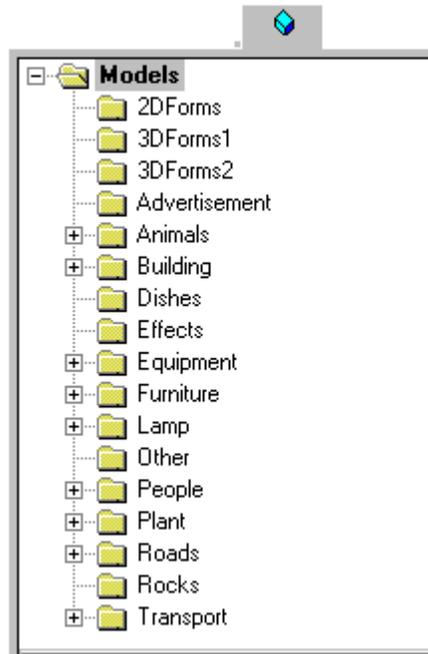


Fig 5.2.
Icono, galería de objetos en *World Builder*

De esta galería de objetos prediseñados es posible seleccionar los que son necesarios para una aplicación dada. Es importante señalar que éstos se pueden también crear externamente, o bien los existentes ser modificados.

Efectos en el “mundo” y cámaras

Hay varias opciones para mejorar la vista del mundo, que incluyen el manejo de la luz y de las cámaras.

Los efectos de luz se refieren a incorporar fuentes de luz que generen algunas sombras en el mundo, pero sin cambiar la estructura de éste.

Existen diferentes cámaras que pueden emplearse para observar el ambiente creado, contándose con una función para el seguimiento de una trayectoria de recorrido (función *track*). Otro efecto que puede incorporarse consiste en hacer que la cámara siga un punto determinado, o siga la posición del *mouse*. El posicionamiento de la cámara en el mundo se puede efectuar a través de algunas teclas predefinidas (las cuatro flechas y el espaciador). Se dispone, asimismo, de cámaras para el mundo creado.

En la aplicación propuesta en este trabajo, la dinámica del vehículo se incorpora a las coordenadas de la cámara, a manera de que represente dicha cámara las características del observador en movimiento (conductor del vehículo).

5.2.2 *Mortif's Terrain Builder*

La utilidad fundamental de este programa es la creación de terrenos a partir de archivos de mapas de bits (*bmp*). Para ello se toma una ventana regular de *bitmap* (en formato de 256 colores, o 24 bits por píxel), dibujado en escala de grises, y convertido en un modelo de 3D conforme los colores del *bitmap*. Las partes blancas del *bitmap* serán las partes más altas del "mundo", y viceversa.

El modelo se integra de acuerdo el *bitmap* que se modifique. El *bitmap* debe ser en formato 24 bits *RGB* (*Red – Green – Blue*) o 8 bits por píxel (256 colores). Los colores del *bitmap* son en escala de grises, conforme a una función de brillo que se calcula con base en la suma vectorial $\sqrt{((rojo)^2 + (verde)^2 + (azul)^2)}$. El programa permite cambiar y visualizar la fuente del *bitmap* (por otro archivo con extensión "*bmp*" o "*jpg*").

Para cubrir o ilustrar los objetos creados se emplean diferentes métodos, incluyendo una cubierta de imagen *bmp*; un arreglo de colores para iluminar al objeto; o por *default*, usando los colores disponibles por omisión.

Mortif's Terrain Builder facilita crear un terreno mediante el comando *Create Terrain*, en el menú principal, con lo que se accederá a una ventana que permite cambiar propiedades de terreno creado (*Change create terrain properties window*). Se pueden cambiar algunas propiedades del terreno creado, o guardar sin hacer ningún cambio. Si la creación del terreno (*Create Terrain*) se realizó con éxito, el mensaje *new terrain* aparecerá a un lado del símbolo de cuadro (*picture*). En cualquier momento es factible eliminar el terreno creado, seleccionando del menú principal, el comando *Delete terrain*.

Morfit's Terrain Builder proporciona diversos medios para mejorar al mundo creado, incluyendo diversas funciones a través de los diferentes menús: i) *Load* (cargar): cargar un mundo de un archivo existente; ii) *Delete* (borrar): borrar un mundo del directorio; iii) *Save* (guardar): guardar el mundo; iv) *Viewer window*

(ventana de visualización): vista de la pantalla completa; v) *Help* (ayuda): ayuda acerca del *Morfit's Terrain Builder*; y vi) *Exit* (salir): salir de *Morfit's Terrain Builder*.

La fig 5-3 muestra la pantalla principal del programa *Morfit's Terrain Builder*. Las características para un recorrido en el mundo se conocen como parámetros, y pueden tomar las siguientes variantes: **i**: Un mundo para cargar el nombre de un archivo (incluyendo su trayectoria o ruta); **m**: Un mundo para cargar trayectorias de modelos; **b**: Un mundo para cargar trayectorias de *bitmaps*; **s**: Una caja para el tamaño de un mundo cargado (entre 0.2 y 2); y **t**: Un número de trayectoria para el mundo cargado (entre 0 y 5); **c**: Un nombre de cámara para usar cuando carga el mundo; **w**: que puede ser 1 para mostrar el mundo en pantalla completa, y 2 para demostrar el mundo sobre una ventana *default*.

Para cubrir los objetos del mundo mediante un mapa de bits, se escoge la opción *Bitmap to wrap*. El mapa de bits es una imagen que puede consistir de diferentes propiedades, incluyendo texturas y colores. La imagen seleccionada es fácil de incorporar el número de veces que sea necesario, vertical u horizontalmente.



Fig 5.3.
Ventana principal del *Mortif's Terrain Builder*

Para cubrir los objetos, también se puede seleccionar la opción *legend*, misma que representa un dibujo en colores RGB (*red-green-blue*). Básicamente, permite integrar letreros en el mundo. Los colores se editan o cambian, incluyendo la remoción de los colores en *legend* mediante la opción *remove*.

Funciones del programa

El “terreno” posee propiedades por omisión, mismas que son factibles de alterar según se requiera.

La función *Level of optimization* (nivel de optimización), controla el número de polígonos en el terreno, variando entre 0 y 3000. El *optimization grade* (grado de optimización), guarda una relación inversa con el nivel de optimización. 0 significa que no hay optimización, por lo que en la salida del archivo se tendrá el número máximo de polígonos. Los valores para esta función se recomiendan de 0, 1, 10, 100, 200 o 400. En general, se debe usar un valor pequeño si el terreno debe ser muy detallado.

Maximum polygons corresponde al número máximo de polígonos en el terreno, que variará de acuerdo con los objetos en el terreno y de los niveles de refinación.

Dimensions corresponde a las dimensiones globales del terreno. El modelo creado se construye en el origen, de coordenadas 0,0,0; y sus dimensiones, por cuanto a ancho, largo y altura, responden a los valores de los respectivos campos. El programa proporciona, asimismo, valores por omisión (opción *default*),

Efectos de luz

Esta función proporciona el brillo para cada polígono de un cierto grupo de acuerdo con la intensidad luminosa de la fuente.

Ambient light (luz ambiente) establece la luminosidad o intensidad luminosa, en un rango entre 0 y 400. Estos valores pueden darse de manera automática o manual.

Background color se relaciona con el cuadro de diálogo, seleccionando la opción *atmospheric effect*, o cambiando manualmente la combinación de colores rojo, verde y azul. La función *atmospheric effect* permite cambiar el color de la atmósfera.

Carga del mundo

La función *load World* permite cargar un mundo creado, que puede tener los siguientes formatos: con extensión *RAW*; formato de *Morfit* con extensión *WLD* o *MFT*; y formato Directo con extensión *X*.

5.2.3 *Mortif-world editor*

Este editor permite incorporar efectos que facilitan un control más preciso sobre cualquier objeto del mundo. Consiste en un código de caracteres universales, compatibles con editores de textos tales como *Notepad*. Este programa permite asignar coordenadas a los objetos, y en general facilitar el trabajo para modificar la posición de los objetos en el mundo. De manera particular, es importante mencionar que se requiere un número mínimo de decimales (aproximadamente 12), para asignar de manera exacta la posición de los objetos en el mundo. En caso contrario, se corre el riesgo de interferencias entre los diferentes objetos. La extensión de los archivos es *.wld*.

Al abrir un documento nuevo se comenzará automáticamente con la función *begin design*, y se concluirá con *end design*. Este editor permite un menú para incorporar diferentes módulos, cámaras, animaciones, polígonos y objetos (dinámicos o estáticos).

Mediante la versión visual del *world editor*, los objetos pueden incorporarse al mundo mediante su arrastre con el *mouse* desde un menú de objetos prediseñados. El mundo que se esté creando se visualiza con la función *auto-behavior mode*. En el momento de cargar los diferentes objetos, es factible ocurran algunos errores, mismos que se listan en un archivo de errores, apareciendo el mensaje *load failed error*. El archivo de errores tiene la extensión *.log*. Un error común es la falta de la imagen *bitmap* para un cierto objeto que se esté cargando.

Para el modo interactivo de este editor, se parte de un *template*, llamada *blank floor*.

Comandos del *Mortif-world editor*

Los comandos de insertar en el menú *insert menú*, se listan a continuación:

- Module*: acepta polígonos y objetos
- Camera*
- Atmosphere*
- Animation*
- Track*

Background;
Polygon;
Object
Dynamic object

En particular, *camera* incluye otras características, como las siguientes:

Camera name: asignar cualquier nombre, teniéndose inicialmente la *default*

Location: localización de la cámara en coordenadas negritas

Direction: orientación de la cámara

View field: el ángulo que se desea la cámara monitoree. El valor puede ser de 1° a 179°. 1° significa un acercamiento (*zoom*) muy grande, mientras que 179° significa un alejamiento enorme

Culling depth: representa el alcance de la visión, variando desde 0 hasta infinito (-1 corresponde a la inactividad de esta función). Un valor de 1000 para esta función significará que la cámara no verá más lejos de 1000 unidades virtuales

Eye distance: representa la distancia de alejamiento de la cámara al comenzar a enfocar. Los valores típicos son de 1,4, 10 y 20, cuando las dimensiones en el mundo están dadas en cm

Track: es la trayectoria que la cámara seguirá. Puede asignarse esta trayectoria a aquella dada a un vehículo u otro objeto (*chase_track, chase_track_airplane*)

Estructura de programación del *world editor*

El *world* se almacena en una serie de varios bloques, siendo el bloque principal de diseño el que contiene al mundo entero. Como se mencionó, el mundo se encuentra delimitado por los siguientes comandos:

```
BEGÍN_DESIGN:
...
END_DESIGN:
```

Posteriormente, se definen las propiedades globales de los objetos del mundo y que constituirán al mundo como un todo. Por ejemplo, para definir el color de la atmósfera y el color de fondo, se tiene la siguiente línea de comandos:

```
ATMOSPHERE: 160 160 170 FOG: 0.0100 LIGHT: 0
DEFAULT_COLOR: 160 160 170
```

Al agregar una atmósfera, los campos incluyen los colores, la posibilidad de niebla (*fog*), la luz (0 a 400),

Todas las propiedades globales vienen de un módulo *main*, que debe estar en todo mundo; contiene todos aquellos objetos y polígonos que forman parte directa del mundo. Por ejemplo:

```
BEGIN_MODULE: main
  OBJECT:
    MODULE_NAME: PYRAMID_2_2
    MATRIX:
      1      0      0      0
      0      1      0      0
      0      0      1      0
      349.6577272727143  -15.7009090909099  99.05802724908517
    END_OBJECT:
  END_MODULE: main
```

En este caso se ha insertado un objeto *pyramid*, indicando en forma matricial las distintas características del objeto y su localización. Cada objeto integrado deberá incluir los comandos OBJECT y END_OBJECT.

Primero se especifica *MODULE_NAME directive*, con lo cual se da un nombre al objeto, y se describe dónde está contenido el diseño del objeto. Después se tiene la matriz del objeto, lo que modificará la rotación, escala y posición del objeto dentro del mundo.

Después del módulo principal, se puede definir cualquier otro módulo que se llegue a necesitar. Para el ejemplo anterior, se debe definir el módulo PYRAMID_2_2, el cual quedó referido en el módulo *main*.

El módulo PYRAMID_2_2 se estructura de la misma manera:

```
BEGIN_MODULE: PYRAMID_2_2
  POLYGON: pNewFilledArea_40
  POLYGON: front
  POLYGON: pNewFilledArea_60
  POLYGON: pNewFilledArea_60
  POLYGON: BOTTOM
END_MODULE:PYRAMID_2_2
```

Este módulo define los diversos polígonos que integran el objeto de PYRAMIN_2_2. Cada uno tiene una definición, como la siguiente:

```
POLYGON: BOTTOM
  ORIENTATION: BOTTOM
  COLOR: 128 150 128
  BITMAP: NO_BITMAP
  TRANSPARENT: -1 DISABLE_BLENDING
  ROTATED: NO
```

```

LIGHT_DIMINUTION: 40
NUM_OF_POINTS: 4
127.7873960812561 127.7873960812338 -97.03302724908008
0.9999990000000001 9.99999996743541E-007 100
-127.7873960812481 127.7873960812557 -97.03302724908008
0.999989999999737 9.99998993432865E-007 100
-127.7873960812561 -127.7873960812557 -97.03302724908008
0.999989999999637 0.999989999998997 100
127.787396081252 -127.7873960812507 -97.03302724907826
0.99998999999989 0.999989999998997 100

```

En el listado anterior se observa que el polígono tiene un nombre y una orientación opcional: "TOP, BOTTOM, FRONT, o BACK", además de un color *RGB* y un *bitmap*. Su transparencia, rotación y disminución de luminosidad quedan así definidas. Finalmente, este listado contiene una relación de los puntos que integran sus vértices, que incluyen un buen número de cifras significativas.

Los polígonos, objetos normales y objetos dinámicos, tiene que insertarse en un módulo, ya sea dentro del módulo principal o de cualquier otro.

Por otra parte, la estructura de programación de *world editor* fuerza a que los módulos, cámaras, animaciones, trayectorias y *background*, sean insertados en las directivas BEGIN_DESIGN: y END_DESIGN.

Con objeto de enriquecer la visualización mediante objetos animados dentro del ambiente creado, *world editor* permite introducir animaciones mediante el comando *insert animation*.

Principales comandos

API significa *Application Program Interface*, y representa un conjunto de rutinas, protocolos y herramientas que sirven para construir aplicaciones diversas. Esta *API* crea un ambiente mediante bloques que facilita manipular objetos especializados y hacer una interfaz con otros programas. Uno de éstos puede ser el compilador Visual C ++, como es el caso del simulador propuesto en este trabajo.

Como característica de la interfaz *API* se tiene que todos sus comandos comienzan con STATE_. A continuación se describen algunos ejemplos:

```
STATE_engine_load_world("my_world.wld")
```

Este comando carga el mundo en una cierta aplicación; my_world.wld es el mundo creado.

```
STATE_camera_move(camera_to_take_the_picture);
```

Comando que permite emplear una cámara para visualizar las imágenes y objetos dentro de un mundo en 3D. Lo que está dentro del paréntesis es una variable tipo *character*, que representa el nombre de la cámara.

En cuanto a las cámaras, otros comandos establecen su localización y orientación, o sirven para modificar las atmósferas:

```
STATE_camera_set_location(x,y,x);  
STATE_engine_increase_atmospheric_effect();
```

Para el desarrollo de aplicaciones en diferentes plataformas se debe incorporar en el programa fuente, la referencia a la librería 3DSTATE mediante las siguientes reglas:

- a) 3DSTATE2.lib para crear proyectos propios
- b) #include "Include\\3DSTATE.h" (en Visual C++)
- c) Copiar el 3DSTATE2.dll al directorio propio de aplicación de trabajo

Esta secuencia permite la compilación de los comandos de 3DState en el programa. Es importante mencionar que estas librerías y archivos dll se pueden obtener de la 3DSTATE (www.3dstate.com).

Hardware de aceleración

Una vez realizada la compilación y catalogación de los programas, es posible acelerar por *software* la visualización. Para acceder a este modo se debe presionar simultáneamente las teclas *Ctrl + Alt + V*, durante la ejecución del programa. Por otro lado, la pantalla visualización se puede observar a pantalla completa mediante el accionamiento simultáneo de *Ctrl + Alt + F*. La información del número de cuadros por segundo (*frames per second*), puede accederse en pantalla mediante *Ctrl + Alt + R*.

Indicador de errores en la ejecución del programa

3D-State proporciona ayuda para el diagnóstico y solución de problemas durante la compilación y ejecución del programa. El archivo *3dstate.log*, compatible con cualquier editor de textos, incluye una lista de los errores y posibles soluciones. Contiene información acerca de errores, tales como la omisión de copiar los archivos *bitmaps* en el directorio correspondiente, además de estadísticas del desempeño, o *performance*. Ciertos tipos errores, fundamentalmente sintácticos, se corrigen por el programa mismo. Cada vez que hay un error, se reporta lo acontecido en el archivo *3dstate.log*, y el programa emite un sonido peculiar, el que puede ser deshabilitado mediante la llamada a la función *STATE_engine_set_speaker_mode(OFF)*.

Modos EDITOR y VIEWER

Estas opciones representan la posibilidad de desarrollar los programas con mayor o menor dificultad. Se debe emplear el modo editor (EDITOR MODE) si se está escribiendo un diseño en 3D, o una aplicación similar. Para juegos, simuladores y similares aplicaciones conviene usar el modo visor (VIEWER MODE), especificándolo como "USER_DEFINED_BEHAVIOR". Dicho modo representa ventajas para la aplicación considerada en este trabajo en cuanto a la velocidad de ejecución y movilidad por omisión de los objetos dinámicos en el mundo.

La carga del modo se da en el programa fuente, en el momento de cargar el mundo especificando la bandera, como se muestra en el siguiente ejemplo:

```
STATE_engine_load_world("my_world.wld", "", "", USER_DEFINED_BEHAVIOR);
```

Sistemas de coordenadas

El sistema de coordenadas del *3DSTATE.wld*, son:

Positivo X = movimiento hacia afuera de la pantalla
Negativo X = movimiento hacia dentro de la pantalla
Positivo Y = movimientos a la derecha del mundo
Negativo Y = movimientos a la izquierda del mundo
Positivo Z = movimientos hacia arriba del mundo (altura)
Negativo Z = movimientos hacia abajo del mundo (altura)

Ejemplo: Para un objeto colocado en el origen (0,0,0), es mejor colocar la cámara en la localización positiva (ej, 500,0,0), y dar a la cámara una dirección *x* negativa (ej, -1,0,0).

Aspectos referentes a la ejecución del programa

Algunas recomendaciones para mejorar el desempeño del programa:

- La mayoría de los *bitmaps* entran en grupos de 1024x1024, o 256x256
- Revisar regularmente el archivo *3DSTATE.log*, el cual se crea automáticamente en el directorio de los ejecutables (*.exe)

En este archivo, las dos figuras más importantes son el tiempo promedio de *3DSTATE_engine_render()*, y el tiempo ciclo del programa. Es importante que al menos el 85% del tiempo del programa se emplee por *3DSTATE_engine_render()*. El tiempo ciclo del programa emplea el tiempo de definición en pantalla, más el que gasta el programa 3D

- La función `STATE_engine_get_computer_speed_factor()`, es recomendable para conservar la misma velocidad todo el tiempo (marcos por segundo)

5.3 Programación de ambientes y escenarios

Los bloques básicos de construcción de un archivo del mundo `3DSTATE`, empleados en la aplicación propuesta en este trabajo, son:

- **Module** (módulo): Se asemeja a un modelo. Un módulo define una forma
- **Polygon**: (polígono): Es simplemente empleado para construir un polígono
- **Object** (objeto regular): Un objeto es una forma predefinida (modelo). Por ejemplo, si se tiene un módulo llamado árbol, como el que se emplea en el desarrollo del simulador de PC propuesto en este trabajo, se pueden tener 100 objetos colocando este árbol en 100 diferentes localizaciones. Se pueden cambiar las proporciones del objeto, rotarlo, y cambiar su localización, pero la forma básica no cambia
- **Dynamic Object** (objeto dinámico): Un objeto dinámico puede ser movido ya sea para colocarlo en una trayectoria en el mundo, o mediante un programa de movimiento (con las funciones `3DSTATE` en el código). En el simulador desarrollado en este trabajo, los movimientos de los objetos dinámicos se dan mediante calcular sus posiciones en el programa C++ desarrollado, como se presenta en el capítulo 4
- **Camera** (cámara): Representa la vista del mundo (conductor del vehículo)
- **Background** (fondo): Un background es un *bitmap* que se extiende encima del fondo del mundo
- **Atmosphere** (atmósfera): Ésta posiciona los efectos de la atmósfera en el mundo, incluyendo luz y sombra

La fig 5.4 muestra una pantalla del programa *3D Webmaker*, que representa el ambiente del simulador de escritorio propuesto en este trabajo. Se pueden observar las tres vistas del mundo creado, que incluye una carretera y los señalamientos viales correspondientes. El mundo se hizo con el *Mortif World Text Editor*.

El mundo creado contiene una variedad de objetos. En el caso del simulador de escritorio presentado en este trabajo, el mundo comprende un número de vehículos, cada uno de los cuales tiene los siguientes aspectos:

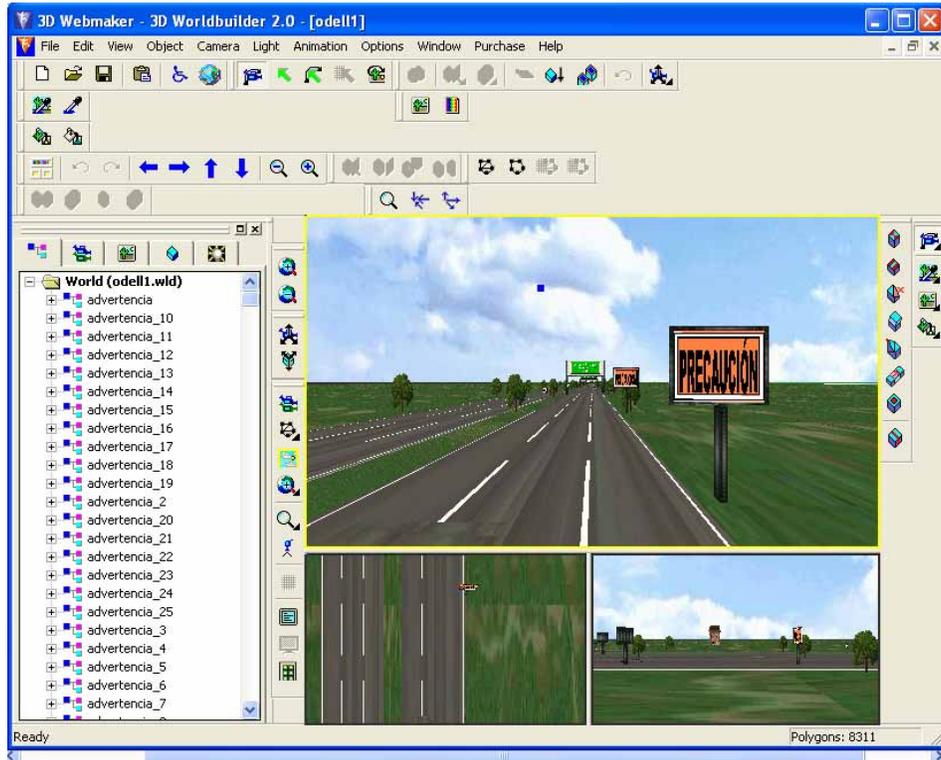


Fig 5.4
Ventana del 3d Webmaker

- i) Declaración de cada vehículo, como un objeto dinámico dentro del `MODULE_main`:
`DYNAMIC: my_car40`
- ii) Módulo donde se describen las características geométricas detalladas del vehículo:
`MODULE_NAME: carro40`
- iii) Localización del vehículo (*LOCATION*), y la escala aplicada al objeto, en las tres dimensiones (*SCALE*)

El módulo asociado al objeto se describe fuera del *MODULE*: main. En la descripción del módulo particular para este carro40, se describen los objetos que a su vez forman al objeto carro40. Cada uno de estos objetos tendrá a su vez sus

respectivos módulos anidados. En el caso de los vehículos, los módulos que integran a los objetos consisten por lo general de polígonos, los cuales tienen a su vez algunas propiedades que comprenden un *bitmap*.

Creación de la carretera

Para la generación de la vía sobre la cual circularán los vehículos se procede a crear los dibujos en algún paquete de dibujo, con objeto de encontrar las coordenadas exactas de los vértices de los triángulos o rectángulos que compondrán a la pista.

La fig 5.5 muestra el ambiente resultante para el simulador propuesto en este trabajo, que se compone de una atmósfera, diferentes áreas verdes, algunos árboles y un conjunto de figuras geométricas que componen a la carretera. Este mundo en cuestión, también contiene un objeto dinámico denominado “calavera5”, el cual se introdujo con el propósito de orientar a la cámara durante el recorrido sobre la pista. Los nombres en inglés pueden ser traducidos al español sin ningún problema.

La pista de dicha figura se generó a partir de 60 elementos individuales, con objeto de darle la geometría deseada. La fig 5.6 contiene un ejemplo de los datos de una de estas curvas, que comprende un conjunto de polígonos ubicados en el mundo. Las distintas coordenadas de los vértices de los polígonos, se generaron a partir de los dibujos realizados en *AUTOCAD*.

Generación del movimiento del vehículo

Para la generación del movimiento del vehículo, se procedió a ligar las posiciones del mismo con las variables de respuesta del programa desarrollado en el capítulo 4.

Como ya fue mencionado, el objeto al que se le imprimió el movimiento fue del tipo cámara.

En el capítulo 6 se describe el proceso de acoplamiento del módulo visual con el de respuesta dinámica del vehículo.

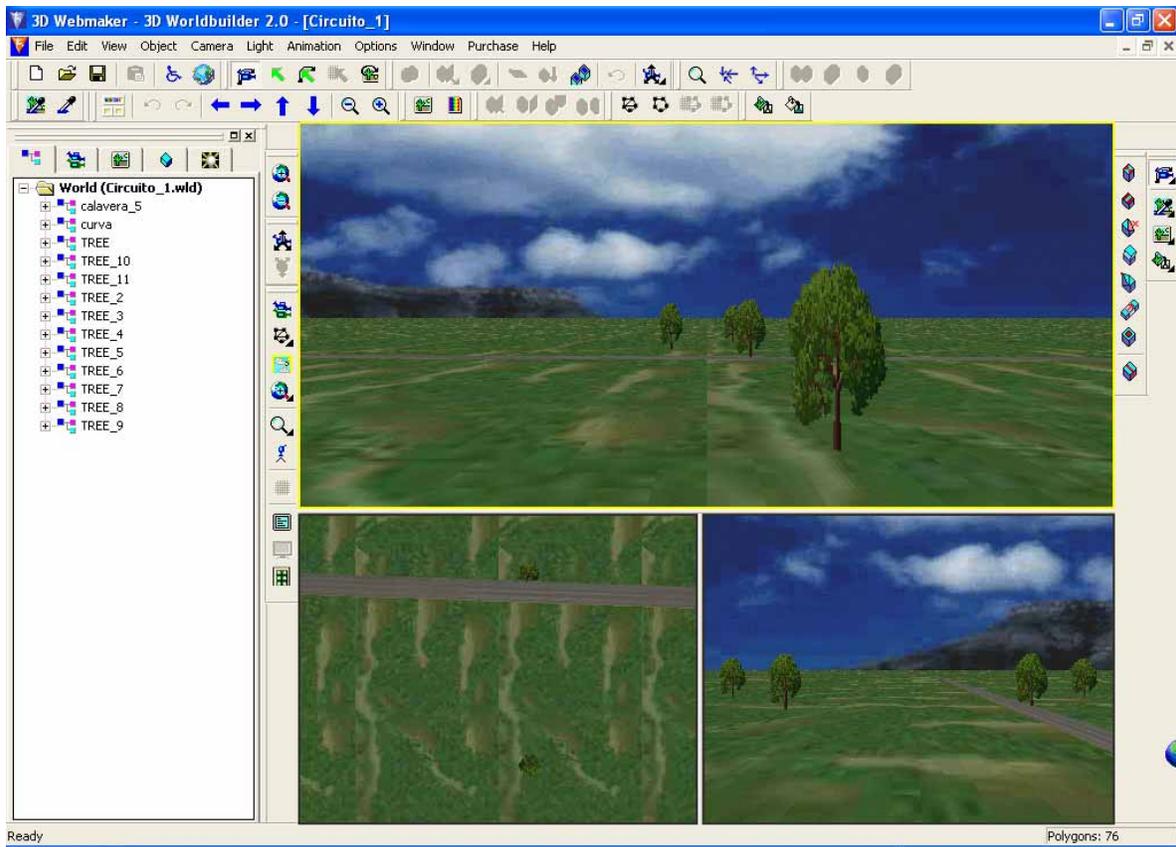


Fig 5.5.
Ventana del 3d Webmaker para el simulador de manejo

```
Morfit World Text Editor - [Circuito_1]
File Edit View Insert Run Window Help
END_MODULE: main

BEGIN_MODULE: curva

POLYGON: pcurva1
COLOR: 93 90 82
BITMAP: ROAD_SLI
TRANSPARENT: -1 DISABLE_BLENDING
ROTATED: NO
LIGHT_DIMINATION: 7
NUM_OF_POINTS: 4
-1442.55 2175.5 0 0 2 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1367.6 2172.9 0 1.000000000000001 2 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1506.95 -1818 0 1.000000000000001 1 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1581.9 -1818.35 0 0.001372653052783861 0.9992617126206963 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127

POLYGON: pcurva0
COLOR: 93 90 82
BITMAP: ROAD_SLI
TRANSPARENT: -1 DISABLE_BLENDING
ROTATED: NO
LIGHT_DIMINATION: 20
NUM_OF_POINTS: 4
-1434.05 2231.95 0 0 1.999999999999999 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1361.65 2212.4 0 0.999999999999999 1.999999999999999 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1367.6 2172.9 0 0.999999999999999 1 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1442.55 2175.5 0 4.284097848638296E-005 0.570907279522254 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127

POLYGON: pcurva60
COLOR: 93 90 82
BITMAP: ROAD_SLI
TRANSPARENT: -1 DISABLE_BLENDING
ROTATED: NO
LIGHT_DIMINATION: 7
NUM_OF_POINTS: 4
-1581.9 -1818.35 0 1 2.000000000000002 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
-1506.95 -1818 0 2.000000000000002 2.000000000000002 100 RGB: 255 12 12 N: 0 0 127
```

Fig 5.6.
Ejemplo de introducción de coordenadas para la creación de la pista

6 Integración y prueba

Se describe el conjunto de operaciones para acoplar los diferentes módulos que componen el simulador de manejo propuesto en este programa.

6.1 Acoplamiento de subsistemas en programa único

Los módulos que componen el desarrollo del simulador son los siguientes:

- Módulo de respuesta dinámica del vehículo
- Módulo visual
- Módulo de interfaz con el usuario

Los módulos de respuesta dinámica del vehículo y de visualización se han descrito en los capítulos 4 y 5, respectivamente. El módulo de interfaz con el usuario se describe a continuación.

Módulo de interfaz con el usuario

Las funciones de interfaz con el usuario consisten en las acciones que el operador del vehículo efectuará mediante los pedales y el volante. Las operaciones incorporadas en el simulador resultan ser:

Accionamiento del pedal del freno
Accionamiento del pedal del acelerador
Accionamiento del volante

En la versión aquí presentada no se logró concluir la versión en la que un equipo comercial de manejo pudiera haberse incorporado al simulador. Lo que se decidió entonces, fue realizar la operación del vehículo mediante algunas teclas del tablero de la computadora. En particular, las siguientes:

p	-	frenado de pánico
f	-	frenado moderado
a	-	aceleración moderada
r	-	aceleración elevada
r	-	giro de volante a la derecha
q	-	giro del volante a la izquierda

Estas diferentes funciones representaron, en el modelo del vehículo, distintos valores para las fuerzas longitudinales, y para los ángulos de las ruedas delanteras. En especial, las fuerzas longitudinales tomaron diferentes niveles (en Newtons) y sentidos, como se muestra a continuación

Frenado moderado:

FUERZA_FRENADO = -35000.;

Frenado de pánico:

FUERZA _ FRENADO = -40000.;

Aceleración moderada:

FUERZA _ FRENADO = 15000.;

Aceleración elevada:

FUERZA_FRENADO = 40000.;

Ángulo direccional de las ruedas delanteras:

A la derecha:

DELTA_R = DELTA_R + 0.005;

A la izquierda:

DELTA_R = DELTA_R - 0.006;

Acoplamiento dinámica del vehículo – visual

El acoplamiento entre ambos módulos se da a través de la asignación de variables de respuesta dinámica del vehículo, y a las variables de posición de la cámara, de la siguiente manera:

```
STATE_camera_set_location(camera(DIST_RECORRIDA_Y)-910.,-  
DIST_RECORRIDA_X-1200.,25.+Z[1])
```

```
STATE_camera_set_direction(camera, r[i]-rc, s[i]-sc, 0)
```

```
STATE_camera_rotate_y(camera,Z[3]*10.,CAMERA_SPACE)
```

```
STATE_camera_rotate_x(camera,-Z[5]*10.,CAMERA_SPACE)
```

donde las distancias recorridas en x y y están dadas como una función de la velocidad del vehículo y del tiempo de evaluación:

$$\text{DIST_RECORRIDA_T_X} = \text{DIST_RECORRIDA_T_X} + \text{VEH_TRAS_X} * T ;$$

$$\text{DIST_RECORRIDA_T_Y} = \text{DIST_RECORRIDA_T_Y} + \text{VEH_TRAS_Y} * T ;$$

Z[3] y Z[5] corresponden a las posiciones angulares en balanceo y cabeceo del vehículo, mientras que Z[1] es la posición vertical del vehículo.

6.2 Desarrollo de pruebas

El modelo acoplado fue ensayado para recorrer la carretera, como una función de la operatoria ordenada por el operador a través del teclado de la computadora.

La fig 6.1 muestra la posición de inicio durante el recorrido de la pista de pruebas virtual. A esta publicación se anexa una versión del simulador desarrollado.



Fig 6.1.
Imagen del inicio del recorrido por la pista de pruebas

Verificación de tiempo real

Un proceso vital en el desarrollo de un simulador de manejo consiste en sincronizar la velocidad aparente del vehículo en la carretera con la velocidad calculada.

Esta característica proporciona al simulador la característica esencial de tiempo real.

En forma rigurosa, el proceso de sincronización del tiempo del simulador con el tiempo que transcurre en tiempo real, habría de realizarse siguiendo una secuencia en la que se parte del reloj de la máquina.

Una simulación aceptable, que evite el parpadeo de la pantalla consiste en tener cierta cantidad de cuadros por segundo, siendo de al menos 20, aunque es deseable un mayor número.

Una característica especial del simulador presentado consiste en que solamente se tiene un programa ejecutable, corriendo en un sólo procesador. Esto es, no existe necesidad de secuenciar un conjunto de tareas en diferentes procesadores, que ejecutasen cada uno por separado alguna de las funciones del simulador (movimiento de la mesa, sonido).

De esta manera, la primera etapa de la simulación en tiempo real consiste en comprobar que efectivamente la simulación se desarrolla en tiempo real.

La manera más rápida que se encontró para establecer esta condición de simulación en tiempo real, fue la de observar la oscilación libre del vehículo, durante una maniobra de frenado, asegurándose que la vibración natural de la unidad se presentase a la frecuencia natural del vehículo, aproximadamente 2 Hz. Esta condición, sin embargo, se alcanzó únicamente bajo ciertas condiciones de trabajo de la máquina donde se ejecuta el modelo.

6.3 Análisis del desempeño

Las características de desempeño que se evaluaron en el simulador de manejo propuesto, consistieron en:

- Simulación en tiempo real
- Número de marcos por segundo
- Realismo de la escena

Mientras que la característica de simulación en tiempo real se estableció a partir de las pruebas descritas en la sección anterior, los archivos de desempeño fueron empleados para evaluar el número de marcos por segundo.

Por cuanto al realismo de la escena, los parámetros a evaluar consistieron en la consistencia y nitidez de las imágenes. Los colores también fueron un factor en esta evaluación. Las diferentes características evaluadas resultaron en la siguiente tabla de evaluación, con 0 como deficiente y 10 como sobresaliente:

<i>Propiedad</i>	<i>Evaluación</i>
Consistencia imágenes	8
Nitidez de las imágenes	7
Colores	8

Las posibilidades de mejora del simulador son consecuentemente cuantiosas. La relativamente baja calificación otorgada a la generación de imágenes, se atribuye a la versión NO PROFESIONAL del programa empleado.

6.4 Potenciales aplicaciones del simulador propuesto

Las aplicaciones del desarrollo presentado no se limitan al entrenamiento de conductores, Otras aplicaciones se listan a continuación:

Recorridos virtuales por autopistas

El diseño de infraestructuras carreteras incluye necesariamente, aspectos de seguridad, paisaje y otros relacionados con los costos de operación tanto de los usuarios como de los administradores de la red carretera.

Un simulador como el propuesto puede emplearse en “recorrer” la carretera de manera virtual; puede tener como finalidad evaluar la infraestructura en cuanto a velocidades de operación segura, incluyendo las críticas para la volcadura y los márgenes de frenado.

Otros aspectos del diseño de la carretera son factibles de ser incorporados en el simulador de manejo, por ejemplo, el paisaje en los derechos de vía, y el diseño geométrico. El paisaje de la carretera tiene un impacto sobre la atención y disposición del operador de los vehículos, mientras que el geométrico afecta el esfuerzo mecánico y nivel de atención de quienes manejan.

Evaluaciones de vehículos

Los recorridos virtuales del apartado anterior pueden hacerse con distintos vehículos, para lo cual se cuenta con la facilidad de cambiar las características físicomecánicas de las unidades simuladas.

De esta manera, se recurre a aparentar automotores cargados a diferentes niveles, inclusive se puede tomar en cuenta el efecto del corrimiento de la carga sobre la eficiencia de frenado y estabilidad lateral y direccional del vehículo.

6.5 Discusión

Las mejoras potenciales del simulador propuesto radican en los diferentes subsistemas y módulos del programa, incluyendo la incorporación del sonido y el empleo de dispositivos comerciales para la operación del "vehículo" (volante y sistema freno-acelerador).

A pesar de estas limitaciones, se considera que se han planteado en este trabajo, las bases conceptuales y matemáticas para desarrollar un simulador más realista, identificándose las limitaciones y requerimientos de apoyo lógico necesarios para mejorar su aspecto visual, al tiempo de incorporar los recursos sonoros y de interfaz con el usuario.

7 Conclusiones y recomendaciones

La capacitación de conductores representa una herramienta vital para las compañías transportistas para mejorar los niveles de seguridad y eficiencia económica de la operación.

Representa una especialidad, ubicada en un contexto más amplio que se refiere a la motivación y psicología del aprendizaje. Mientras que la taxonomía busca el desglose de los diferentes aspectos y principios que afectan el proceso de aprendizaje, la *ergodinámica* se refiere al estudio de la interacción entre los operadores y los distintos equipamientos.

De acuerdo con la taxonomía, se identifican tres “dominios” de las actividades educacionales: dominio cognoscitivo o mental; dominio psicomotor; y dominio afectivo. Si bien las habilidades cognoscitivas tienen que ver con los procesos puramente mentales, el dominio psicomotor establece las relaciones físicas y mentales de una actividad física en particular, tal como conducir. El dominio afectivo del proceso de aprendizaje tiene que ver con las emociones, que afectan de manera significativa la eficiencia del aprendizaje y la seguridad de la conducción.

Conducir un automotor representa la aplicación y manejo de un cúmulo de habilidades y actitudes, las cuales son aprendidas a lo largo de la experiencia y durante la asistencia a cursos especializados de manejo.

El uso de equipamientos de simulación, que reproducen de manera virtual las condiciones de empleo de equipos de gran complicación, tales como centrales de potencia o aeronaves, ha representado en los últimos años una importante herramienta para dar efectividad al entrenamiento y evaluación de los operadores de tales equipos.

En este contexto, la aplicación de simuladores se ha dado con propósitos que van desde estudios de fatiga de los operadores de equipos de transporte pesados, hasta su evaluación de respuesta ante situaciones de riesgo. Tales simuladores han permitido mejorar la eficiencia de los entrenamientos, en cuanto al número de horas para capacitación, al tiempo de evitar cualesquiera condiciones peligrosas derivadas de la operación fallida de los vehículos durante el entrenamiento.

Los simuladores pueden incluir los siguientes seis sistemas:

- i) sistema visual para reproducir la escena de manejo;
- ii) sistema de audio para recrear los ruidos y sonidos;

- iii) sistema de movimiento, para dar al habitáculo del chofer los movimientos derivados tanto de las maniobras ordenadas por él como por la interacción del vehículo con el pavimento;
- iv) sistema de modelación de la respuesta dinámica de los vehículos a las perturbaciones desde el pavimento, y por maniobras direccionales y de frenado/aceleración;
- v) sistema de interfaz con el usuario, para el accionamiento y reproducción sensible de todos los controles, volante y perillas accionadas por el conductor en el interior de la cabina; y
- vi) sistema de comunicación entre computadoras, para la secuencia de las tareas en uno o varios procesadores, trabajando sincronizadamente en paralelo.

Los simuladores se pueden clasificar por el alcance que tienen, de la siguiente manera:

- a) simuladores de escritorio;
- b) simuladores panorámicos sin movimiento de la cabina; y
- c) simuladores panorámicos con movimiento de la cabina.

La selección de cualquiera de ellos variará de acuerdo con la capacidad económica del usuario, y de las necesidades de capacitación y/o evaluación que desean satisfacer.

Un análisis presentado en este trabajo revela que un simulador del tipo c), panorámico con movimiento de la cabina, es necesario para una empresa mediana, representada por una flotilla de 1200 vehículos, y con un nivel de accidentes moderado en lo que se refiere a la contribución de factores humanos en los percances.

También se ha hecho alusión al fenómeno conocido como “mal del simulador”, el cual se caracteriza porque el operador bajo entrenamiento en un simulador de manejo, exhibe mareos y faltas de equilibrio, aun después de haberse concluido la sesión de entrenamiento. Este fenómeno, sin embargo, es controlable en la mayoría de quienes se encuentran en entrenamiento (del orden del 90%). No obstante, se reconoce que los afectados por este mal, ven disminuido drásticamente su aprovechamiento.

Otras aplicaciones en general de simuladores han sido descritas, incluyendo el estudio de la fatiga de la conducción, el entrenamiento para mejorar la eficiencia energética de la conducción (*conducción técnica*), y el ensaye de nuevas

tecnologías de automotrices. Asimismo, se emplean para estudiar la efectividad de los distintos diseños de señalamientos viales.

Un aspecto primordial presentado es el desarrollo de un modelo matemático de respuesta de los vehículos a distintas perturbaciones, como son cambios de velocidad, alteraciones direccionales, y entradas desde el perfil del pavimento. La característica fundamental del modelo es que se ejecuta en tiempo real, con lo que los procesos de cálculo de los fenómenos, se llevan a cabo en menor tiempo que el fenómeno mismo. Esto se ha logrado mediante aproximaciones matemáticas, en las que las variables de estado resultan de operaciones con matrices y vectores.

El efecto de las perturbaciones direccionales sobre la conducción del vehículo se ha considerado en un esquema ideal, correspondiente a la *geometría de Ackerman*.

En cuanto al modelo matemático desarrollado para la respuesta dinámica de la unidad se probó *fuera de línea*, esto es, sin acoplarse a otros módulos, bajo distintos esquemas combinados de perturbación de pavimento-dirección-frenado-aceleración. Este enfoque de evaluación gradual, especializado, ha permitido identificar errores potenciales en la formulación. El modelo ya integrado responde a todas las combinaciones de posibles perturbaciones.

Se presentó una revisión de los programas de visualización disponibles en el mercado, de entre los cuales se seleccionó el *3D-State*, como plataforma para crear el módulo visual de un simulador de escritorio, propuesto en este trabajo.

El programa *3D-State* consta de varias herramientas: *3DWebmaker*, *Morfit Terrain Builder* y *Morfit World Builder*. En general, estos componentes del programa permiten la creación y manipulación de entidades conocidas como “mundos”, que constituyen ambientes de trabajo, los cuales se describen en el presente trabajo a través de ejemplos.

La selección del *3D-State* se basó en las múltiples facilidades que da este programa, representadas por un cúmulo de objetos en una librería especializada; además es compatible con el lenguaje C++, mismo que se empleó en la respuesta dinámica del vehículo.

Un sistema simplificado de interfaz con el usuario se planteó en el simulador de escritorio propuesto, con la adición de algunas teclas del tablero para emular el volante, los pedales del acelerador y el freno. Además se proporcionan dos diferentes niveles de aceleración y frenado.

El acoplamiento de los tres sistemas del simulador de escritorio, se realizó mediante asignar variables de estado del modelo de respuesta dinámica del

vehículo, a las variables de posicionamiento del objeto visual que representa a la unidad, y a la activación de las teclas de conducción.

La pista del simulador consiste en un circuito cerrado, que incluye diferentes tramos tangentes y curvos en ambas direcciones. Una aplicación de interés, en el contexto de seguridad vial y diseño de carreteras es la posibilidad de realizar recorridos virtuales por la autopista diseñada, a manera de optimizar el diseño de ésta. Los vehículos simulados pueden tener distintas propiedades con respecto al nivel de carga y a las características de los componentes.

Por último, se planteó la necesidad de incorporar las facilidades para que el equipo propuesto pueda emplearse en cualquier tipo de aditamento volante-pedales. Para ello, sin embargo, se debe contar con los conocimientos acerca del Bus USB (*Universal Serial Bus*).

Referencias

- 3D-State (2004) 3D Programming Using the Morfit 3D Engine, www.3dstate.com, fecha de consulta: ene 2004.
- Alexander, J Barham, P, y Black, I. "Factors Influencing the Probability of an Accident at a Junction: Results from an Interactive Driving Simulator", Accident Analysis and Prevention, Vol 34, No 6 (2002).
- Allen, R W, Park, G, Cook, M, y Rosenthal, TJ. "Novice Driver Training Results and Experience with a PC Based Simulator", Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, pp 165-170(2003).
- Bertolini, G P, et al. "The General Motors Driving Simulator", SAE Paper 940176(1994).
- BTDS Bus & Truck Driving School, <http://www.autouser.co.uk/jspdriv/hgv/>, fecha de consulta: ago 2004.
- Ceci, R, Hogman, L, y Patten, C. "Measures of Driver Behavior and Cognitive Workload in a Driving Simulator and in Real Traffic Environment – Experiences from two Experimental Studies in Sweden", Driving Assessment 2001: The First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design(2001).
- Delahaye, N, y Kemeny, A. "Technical Report: PSU Truck Driving Simulator", Journal: Heavy Vehicle Systems. Intl Journal of Vehicle Design Vol: 6 No: 1(1999).
- Drosdol, J, Panik, F. "The Daimler-Benz Driving Simulator A Tool for Vehicle Development", SAE Paper 850334(1985).
- Freeman, J S, et al. "The Iowa Driving Simulator: An Implementation and Application Overview", SAE Paper 950174(1995).
- Gillberg, M, Kecklund, G, y Aakerstedt, T. Sleepiness and Performance of Professional Drivers in a Truck Simulator -- Comparisons between Day and Night Driving. Karolinska Institutet, Stockholm (Sweden) 4 p. Journal of Sleep Research, Vol 5, No 1, p. 12-15. Sponsor: Swedish Work Environment Fund; Trygg-Hansa Insurance Company (Sweden) UMTRI-90100(mar 1996).
- Godley, ST, Triggs, TJ, y Fildes, B.N. "Driving Simulator Validation for Speed Research", Accident Analysis and Prevention Vol: 34, No: 5(2002).
- Grace, R, Guzman, A, Staszewski, J, Dinges, D F, Mallis, M, y Peters, B A. The Carnegie Mellon Truck Simulator, a Tool to improve Driving Safety. Carnegie-Mellon Research Institute, Pittsburgh, Pa./ Pennsylvania University, Philadelphia/ Westminster University (England) 6 p. Truck and Bus Safety Issues (SP-1400). Warrendale, SAE, 1998, p 65-70. Report No SAE 982845. UMTRI-91821 A08(1998).
- Green, P, y Olson, A. "The Development and Use of the UMTRI Driving Simulator", The University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI-89-25(1989).
- Hollnagel, E, Y Källhammer, JE. "Effects of a Night Vision Enhancement System (NVES) on Driving: Results from a Simulator Study", Second International

- Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, p 152-157(2003).
- Huitt, W. "Bloom et al Taxonomy of the Cognitive Domain" (2003)
- Lee, HC, Lee, AH, Cameron, D, y Li-Tsang, C. "Using a Driving Simulator to Identify older Drivers at Inflated Risk of Motor Vehicle Crashes", Journal of Safety Research, Vol 34, No 4(2003).
- Lee, JD, McGehee, DV, Brown, TL, y Reyes, ML. "Driver Distraction, warning Algorithms Parameters, and Driver Response to Imminent Rear-end Collision in a High-fidelity Driving Simulator" DOT-HS-809-448, University of Iowa(2002).
- Lee, WS y Kim, SS. "Real-time Vehicle Dynamic Simulation", Proc of AVEC '94, Japan, pp105-109(1994).
- Lee, J D, McGehee, D V, Brown, T L, y Reyes, M L. "Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-end Collisions in a High-fidelity Driving Simulator", Human Factors. Vol 44, No 2(2002).
- Lehmuskoksi, V. " Swedish Driving Simulator offers Possibilities even for Finnish Researchers", TIE JA LIIKENNE(1999).
- Levine, O y Mourant, R R, "A Driving Simulator based on Virtual Environments Technology", Paper No 950269, 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board, (ene 1995).
- Lozano, A, y Romero, JA, "Modelling of Large Turbines Mechanical Effects for Real Time Simulation", 5th International Modal Analysis Conference, London, pp 442-447(1987).
- McGehee, DV, Mazzae, EN, Baldwin, GHS, Grant, P, Simmons, CJ, Hankey, J, y Forkenbrock, G. "NHTSA Light Vehicle Antilock Brake Systems Research Program Task 5, Part 1: Examination of Driver's Collision Avoidance Behavior using Conventional and Antilock Brake Systems on the Iowa Driving Simulator", HS-809 132, Technical Report, University of Iowa, Iowa City(2000).
- McGehee, D V, Mazzae, E N, y Baldwin, G H. "Driver Reaction Time in Crash Avoidance Research: Validation of a Driving Simulator Study on a Test Track", International Ergonomics Association. Congress (14th : 2000 : San Diego, Calif.). Ergonomics for the New Millennium Vol 3(2000).
- Marcotte, TD , Roberts, E , Rosenthal, TJ, y Heaton, RK. "Test-retest Reliability of Standard Deviation of Lane Position as Assessed on a PC-based Driving Simulator", Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, p 199-200(2003).
- Meirovitch, L Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill Inc(1986).
- Mourant, RR, y Schultheis, MT. "A HMD based Virtual Reality Driving Simulator" Driving Assessment 2001: The First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design(2001).
- Owens, JM, y Lehman, R. "The Effects of Age and Distraction on Reaction Time in a Driving Simulator", Driving Assessment 2001: The First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design(2001).
- Pierowicz, JA, Robin, J, et al, . "Re-assessment of Driving Simulators for the Training, Testing and Licensing of Commercial Vehicle Drivers", 2001 International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Aspen, CO (aug 17-21, 2001).

- Pierowicz, JA, Robin, J, et al., "FMCSA Truck Simulator Validation Study: Research Design Overview and Simulator Re-assessment", Motor Carrier Safety Research and Technology 2nd Annual Workshop, Washington, DC (jan 17, 2002).
- Ranney, TA, Simmons, LA, y Masalonis, AJ. "Prolonged Exposure to Glare and Driving Time: Effects on Performance in a Driving Simulator", Accident Analysis and Prevention Vol: 31, No: 6(1999).
- Radwan, E, Al-Deek, H, Bauer, C, y Klee, H. Driving Simulator Technologies, WPI 0510764, Final Report, State Job 99700-3338-010, University of Central Florida(1999).
- Rimini-Doering, M, Manstetten, D, Altmueller, T, Ladstaetter, U, y Mahler, M. "Monitoring Driver Drowsiness and Stress in a Driving Simulator", Driving Assessment 2001: The First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design(2001).
- Richter, B. "Driving Simulator Studies: The Influence of Vehicle Parameters on Safety in Critical Situations", SAE Paper 741105(1974).
- RMDS (2004) RoadMaster Driving School, <http://www.roadmasterdrivingschool.com>, fecha de consulta: ago 2004.
- Roemaker, DL, Cissell, GM, Ball, KK, Wadley, VG, y Edwards, JD. "Speed-of-processing and Driving Simulator Training Result in Improved Driving Performance", Human Factors, Vol 45, No 2(2003).
- Sayers, MW, Gillespie, TD, y Queiroz, CAV. "The International Road Roughness Experiment", World Bank Technical Paper No 45, 454 pp(1986).
- SBDT , School Bus Driver Training. <http://www.ptec.pinellas.k12.fl.us/School%20Bus%20Driving.htm>, fecha de consulta: ago 2004.
- Strayer, D L y Drews, FA. "Simulator Training Improves Driver Efficiency: Transfer from the Simulator to the Real World", Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, pp 190-193(2003).
- Webster Diccionario Webster en línea, www.m-w.com. Fecha de consulta: ago 2004.
- Westra, D, Noblot, N, Bonhomme, F, Largent, E, y Espie, S. Skid Pad Simulation in a Truck Driving Simulator; [Simulation d'une piste de glisse pour un simulateur d'entraînement à la conduite poids lourd].Carnegie Mellon Driver Training and Safety Institute, Lemont Furnace, Pa/ Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (France). 11 p, UMTRI-96250 A28 (2001).
- Widroither, H, Dangelmaier, M, y Bekiaris, E. "Virtual Prototyping and Testing: Interactive Systems and the Driving Simulator", 9th World Congress on Intelligent Transport Systems(2002).
- Wong, JY. Theory of Ground Vehicles, John Wiley and Sons, 330 pp(1978).
- Yamada, K. "Evaluation of Forward Obstacles Collision Avoidance Support System using Driving Simulator", 9th World Congress on Intelligent Transport Systems(2002).



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx