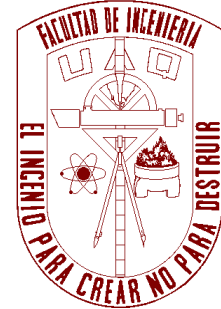
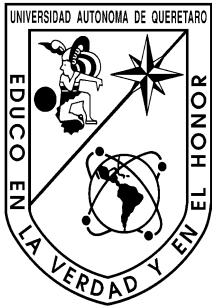


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE  
QUERÉTARO**



**Facultad de Ingeniería  
Campus San Juan del Río  
Área de Electromecánica**

**T E S I S**

**MODELADO Y VISUALIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN  
VEHÍCULO – PAVIMENTO**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**Presenta:**

***GERARDO HURTADO HURTADO***

**DIRECTOR: DR. JOSÉ ANTONIO ROMERO NAVARRETE**



# Presentación

---

La presente tesis forma parte de las actividades que buscan desarrollar aplicaciones computacionales para el estudio de los vehículos y de los sistemas de transporte. En particular, en lo que se refiere a la creación de herramientas de análisis de la interacción de los vehículos con el pavimento. Este trabajo surgió como parte de un Proyecto FOVIN de la Universidad Autónoma de Querétaro, clave 205011480812.

Para este trabajo se aplicaron los conceptos y herramientas adquiridas a lo largo de la carrera, en especial, de la materia de Robótica y de Dinámica Avanzada. Asimismo, este trabajo constituyó el tema del curso de Proyecto, coordinado por el Dr. Juan Primo Benítez Rangel.

# Dedicatoria

---

Para mis padres  
que me han brindado su apoyo incondicional  
en todo momento

# Agradecimientos

---

A mi familia, por todo su apoyo y confianza a lo largo de mi formación académica, que con este trabajo destaca una etapa muy importante de mi vida.

Al Dr. José Antonio Romero Navarrete, por todo su apoyo brindado para la realización de esta trabajo.

A todos mis compañeros y amigos de la universidad con quienes comparto muy buenos recuerdos.

# Resumen

---

En las últimas décadas se han creado *softwares* especializados para la simulación de maniobras vehiculares, aprovechando en ello las ventajas que estas herramientas de análisis tienen sobre la realización de costosas pruebas físicas. De particular interés resulta la simulación de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, dado que como resultado de tal interacción, tanto los vehículos como las infraestructuras sufren algún tipo de deterioro. Así, tanto los usuarios de las infraestructuras como los administradores de las mismas, estarían interesados en cualesquiera herramientas computacionales que les permitiera la realización de estudios objetivos sobre esta interacción. Sin embargo, los esquemas y programas de cómputo disponibles no cuentan con las formulaciones necesarias para modelar los efectos de esta interacción sobre los vehículos o sobre los pavimentos. En esta tesis se propone la integración de diversas formulaciones, para simular la interacción de los vehículos con el pavimento, atendiendo los efectos que sobre éstos tienen los vehículos. Al respecto, se sabe que los costos por mantener las carreteras son del orden de decenas de miles de millones de pesos cada año, por lo que este programa de cómputo podría proveer a los interesados, de herramientas para identificar los parámetros que mayormente influyen en el deterioro de los pavimentos causado por los vehículos. Por otro lado, para fines didácticos y de análisis, se integra a este soporte físico, la visualización de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, lo que contribuirá a una sensibilización mayor al efecto que un pavimento deteriorado tiene sobre los niveles de vibración de los vehículos. La plataforma para este desarrollo es el programa VRLM Matlab®, con librerías gráficas Simulink® y 3D Animation™. Las salidas del programa la visualización de la vibración del vehículo simulado en sus diferentes grados de libertad, así como una gráfica del pavimento que describe a través de colores el efecto potencial del vehículo simulado. Los vehículos considerados incluyen aquellos articulados y no articulados, que mayormente circulan por las carreteras nacionales.

# Contenido

---

	<i>Página</i>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1 Antecedentes	10
1.2 Objetivo	15
1.3 Justificación	16
1.4 Alcance	17
<b>Capítulo 2. Generalidades</b>	<b>19</b>
2.1 Dinámica Vehicular	19
2.2 Modelado del sistema	24
2.2.1 Solución por el método de matrices de transición	27
2.3 Interfaz de usuario	29
2.3.1 Software interactivo	32
2.4 Daño al pavimento	32
2.5 Herramientas de programación y simulación	35
2.5.1 Matlab	35
2.5.2 Simulink 3D	35
2.5.3 GUIDE	36
<b>Capítulo 3. Desarrollo de las Formulaciones de la Respuesta del Vehículo al Pavimento y su modelo</b>	<b>37</b>
3.1 Diagramas de cuerpo libre	37
3.2 Ecuaciones de movimiento	46
3.3 Modelo de pavimento	49
<b>Capítulo 4. Desarrollo de los Algoritmos para la Visualización</b>	<b>51</b>

4.1	Algoritmo del programa	51
4.2	El programa: Perspectiva de usuario	51
4.3	El programa: Perspectiva de programación	59
	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>78</b>
	<b>Referencias</b>	<b>79</b>
	<b>Apéndice: Manual de Usuario</b>	<b>81</b>

# Índice de Figuras

---

Figura 1.1	Efecto potencial de la temperatura del pavimento sobre su propio daño. ....	13
Figura 1.2	Modelo mecánico analógico para un material viscoelástico como el pavimento asfáltico. ....	14
Figura 2.1	Modelo multi-cuerpos para una combinación vehicular tractor-semirremolque. ....	20
Figura 2.2	Representación esquemática del chasis de un camión mediante elementos finitos. ....	20
Figura 2.3	Modelo multi-cuerpos de un autotank durante una maniobra de cambio de dirección. ....	22
Figura 2.4	Modelo simplificado de vehículo, llamado cuarto de carro. ....	25
Figura 2.5	Relaciones lineales entre los desplazamientos y velocidades. ....	26
Figura 2.6	Tipos de deterioro de pavimentos por efecto del paso de los vehículos pesados. ....	34
Figura 3.1	Diagramas de cuerpo libre del vehículo C2. ....	38
Figura 3.2	Diagramas de cuerpo libre del vehículo C3. ....	39
Figura 3.3	Representación esquemática del vehículo TS1. ....	40
Figura 3.4	Diagramas de fuerzas para el vehículo T2S1. ....	41
Figura 3.5	Representación esquemática y esquema para el vehículo T3S2. ....	42
Figura 3.6	Diagrama de fuerzas desarrolladas en el vehículo T3S2. ....	43
Figura 3.7	Representación esquemática y esquema para el vehículo T3S2. ....	44
Figura 3.8	Diagrama de fuerzas desarrolladas en el vehículo T3S3. ....	45
Figura 3.9	Modelo de pavimento discreto con propiedades viscoelásticas (rigidez dinámica). ....	50
Figura 4.1	Diagrama de estructura del programa de visualización. ....	52
Figura 4.2	Pantalla principal del programa. ....	52
Figura 4.3	Pantalla de selección del tipo de vehículo por simular. ....	53
Figura 4.4	Pantalla de configuración del vehículo por cuanto a las propiedades dimensionales. ....	54
Figura 4.5	Pantalla de captura de datos de las constantes de rigidez y de inercia. ....	55
Figura 4.6	Pantalla de captura del perfil del pavimento. ....	55
Figura 4.7	Pantalla de visualización del perfil del pavimento como perturbación. ....	56
Figura 4.8	Pantalla de simulación. ....	56
Figura 4.9	Pantalla de simulación y visualización. ....	57
Figura 4.10	Despliegue gráfico de resultados. ....	57
Figura 4.11	Pantalla del daño potencial causado al pavimento por el paso del vehículo simulado. ....	58
Figura 4.12	Diagrama de estructura del programa. ....	59
Figura 4.13	Pantalla de ayuda del programa. ....	60
Figura 4.14	Pantalla de error en la captura de datos. ....	60
Figura 4.15	Pantalla de despliegue de resultados. ....	61



# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Peajes a pagar en la Caseta de Chapa de Corzo (IAVE, 2014) .....	12
---	----

# Capítulo 1 Introducción

---

Se describen aspectos generales alrededor del tema de la presente tesis, incluyendo de manera preponderante los antecedentes, el objetivo y alcance de este trabajo.

## 1.1 Antecedentes

Las infraestructuras carreteras de un país representan un activo fundamental para su economía, en el que se invierten para su conservación del orden de varios miles de millones de pesos anualmente. En el año de 2013, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes programó una inversión de 13.8 mil millones (SCT, 2013). Esta inversión para mantener los caminos en un estado económico de uso es vital para evitar que el servicio a los usuarios origine que éstos tengan gastos de operación elevados. Al respecto, se ha reportado que circular por un camino deteriorado origina costos adicionales del orden de hasta el 15% en la operación de los vehículos, en función del nivel de deterioro de la infraestructura (NCRP, 2012). Si bien existen otros factores que influyen para el deterioro de los pavimentos, como son el clima y el diseño mismo de los pavimentos, el principal motor del deterioro de los pavimentos está representado por los vehículos pesados, que ejercen sobre los pavimentos fuerzas que representan la suma de una componente estática más una dinámica. Mientras que la componente estática depende de la magnitud del peso bruto vehicular de las unidades (peso propio y de la carga), y de la distribución de la masa a lo largo del chasis, la componente dinámica depende de cómo vibre el vehículo como resultado de las perturbaciones derivadas tanto de las irregularidades del pavimento como de las maniobras de cambio de velocidad y de dirección (Chatti y lee, 2000). Los factores ambientales que determinan el efecto de las cargas sobre los pavimentos están asociados a la temperatura de éstos y a la humedad (Bai et al., 2009). Sin embargo, se han establecido otros factores importantes que ponderan el efecto de las cargas sobre los pavimentos, como es la velocidad de circulación de los vehículos. Sobre esto último, se ha reconocido que un vehículo

que circule lento sobre un pavimento asfáltico, provoca un daño considerablemente mayor que si circula a una velocidad elevada, dadas las características visco-elásticas de los materiales asfálticos involucrados (Romero eta l., 2013).

En el caso de las carreteras de cuota, y para recuperar los costos de inversión en la conservación de las carreteras, los operadores de estas infraestructuras establecen cuotas que los usuarios deben pagar. En teoría, tales cuotas deben de establecerse con base al deterioro que causan los diferentes tipos de vehículos a las infraestructuras. Sin embargo, tales cuotas no corresponden aparentemente de manera adecuada a este fin, si se toma en cuenta los daños que los diferentes vehículos ejercen sobre la infraestructura. Esto es, el daño que provocan los vehículos a las infraestructuras estaría en función de las fuerzas que se ejercen y de las condiciones en las que se usan las infraestructuras, de tal suerte que un vehículo con más ejes igualmente cargados, estaría causando mayor daño a los pavimentos en función de lo que cargan dichos ejes adicionales. Sin embargo, en carreteras de cuota nacionales, la estructuración del monto del cobro del peaje se realiza de manera plana, esto es, sin tomar en cuenta las condiciones de operación bajo las cuales es utilizada la infraestructura, las cuales fueron descritas antes. Pero además, no se toman en cuenta a veces los ejes adicionales, como se muestra en la Tabla 1.1 que lista las tarifas de cuotas en una caseta en el Estado de México. De acuerdo con esta tabla, cada eje adicional después de 7, no provoca cambio en la cuota a pagar. Esta situación induce a pensar que en este caso, por razones desconocidas, no se ha realizado un análisis racional que tome en cuenta tan siquiera que un mayor número de ejes, potencialmente cargados al mismo nivel, deberá ocasionar un daño mayor al pavimento, y que por lo tanto ese usuario de las infraestructuras no paga por el daño que realmente está causando a éstas.

Las razones para la falta de racionalidad en el cobro de peajes, puede atribuirse a un cúmulo de factores, siendo uno de ellos el que la autoridad responsable, carece de las herramientas metodológicas que le permitan

establecer un esquema racional y equitativo para el cobro de los peajes, lo cual ha sido planteado antes (Romero et al., 2006).

Tabla 1. Peajes a pagar en la Caseta de Chapa de Corzo (IAVE, 2014).

<b>Vehículo</b>	<b>Número de ejes</b>	<b>Peaje (Pesos)</b>
Autobús	2 ejes	84
Autobús	3 ejes	84
Autobús	4 ejes	84
Camión	2 ejes	75
Camión	3 ejes	75
Camión	4 ejes	75
Camión	5 ejes	115
Camión	6 ejes	115
Camión	7 ejes	161
Camión	8 ejes	161
Camión	9 ejes	161

Por cuanto a las condiciones ambientales que afectan el efecto potencial de los vehículos sobre los pavimentos, se tiene de manera preponderante a la temperatura. De acuerdo con simulaciones efectuadas por Romero et al. (2013), la el deterioro causado a un pavimento asfáltico, puede incrementarse notablemente si se incrementa esta condición, del orden de 11 veces al cambiar la temperatura del pavimento de 10 ° C a 40° C, como se muestra en la Figura 1. De esta forma, al tomar en cuenta este parámetro de temperatura del pavimento, la ecuación del efecto de los vehículos sobre los pavimentos se complica ligeramente, de tal suerte que el daño causado a la infraestructura al transitar por ella en un día soleado a las 3 de la tarde sobre la carretera 57 México-Querétaro, puede representar varias veces el daño causado a la infraestructura si se circula por esa misma carretera, en las primeras horas del día, cuando el pavimento está frío. Y este efecto se puede multiplicar aún más si se circula por esa misma carretera, en las primeras horas del día, pero a la altura del km 104, por ejemplo, en donde el clima es relativamente frío.

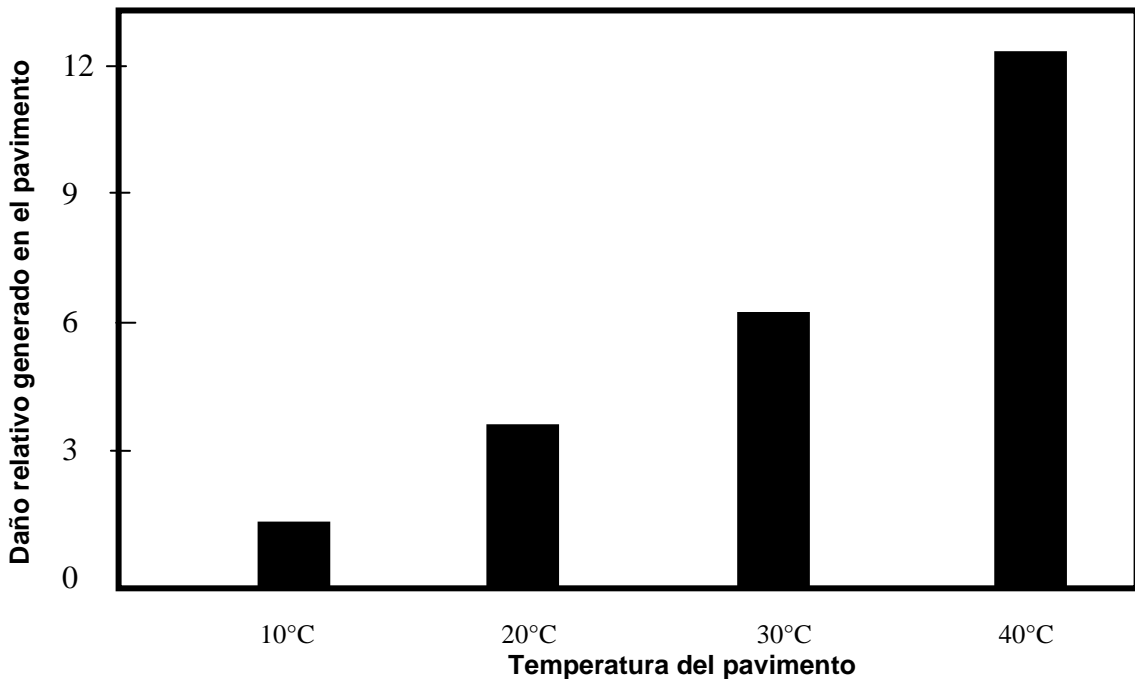


Figura 1.1 Efecto potencial de la temperatura del pavimento sobre su propio daño. Elaboración propia con datos de Romero et al., (2013).

Otro efecto a tomar en cuenta para ponderar el efecto del tráfico de los camiones sobre la infraestructura, corresponde a la velocidad a la que se desplazan estos equipos. De manera particular para el caso de pavimentos asfálticos, éstos tienen propiedades viscoelásticas, por lo que la velocidad, al igual que la temperatura, afecta su comportamiento al estar sometido a fuerzas. La Figura 2 ilustra una representación mecánica de un material viscoelástico, tal cual el pavimento asfáltico, en donde  $k$  es la constante de resorte y  $c$  es la constante de amortiguamiento, el cual se deforma en mayor medida en tanto mayor tiempo permanece cargado, y viceversa, por lo que un vehículo que circule a baja velocidad dañará más que el mismo vehículo circulando a velocidad normal. Al respecto, como situación extrema se podría reconocer al observar un vehículo que sobrecargado, circula a “vuelta de rueda” por una pendiente, en los periodos de

mayor vulnerabilidad del pavimento. Su efecto sobre el pavimento podría considerarse “grave”.

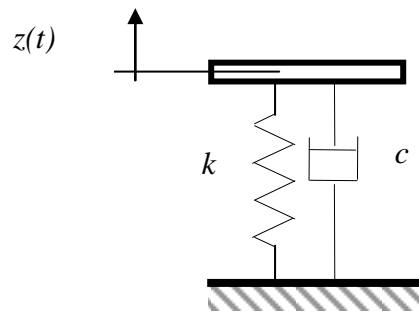


Figura 1.2 Modelo mecánico analógico para un material viscoelástico como el pavimento asfáltico.

Como se verá en el Capítulo 2 de Generalidades, afortunadamente existe una aproximación validada para explorar y parametrizar el efecto que estos diferentes factores, tienen sobre la llamada agresividad de los vehículos con respecto al pavimento. Dicha aproximación se describirá como la energía que se almacena en el pavimento durante el paso de los vehículos, la cual depende del nivel de carga y velocidad del vehículo, así como de la temperatura del pavimento.

En este contexto, plantear una herramienta de análisis la cual, basada en estos principios validados de operación, permita simular el efecto de los diferentes vehículos sobre los pavimentos, se vislumbra como algo notable hacia la racionalización de la cuantificación del daño causado al pavimento por los distintos vehículos, bajo los diferentes escenarios de uso de las infraestructuras.

## 1.2 Objetivo

De lo expuesto en los antecedentes por cuanto a las necesidades que se tienen de contar con una herramienta computacional propia para el análisis de la interacción vehículo pesado - pavimento, la cual permitiese a los administradores de los caminos efectuar estudios objetivos y fundamentados de la interacción de los vehículos con el pavimento, en la perspectiva de cuantificar el impacto de los vehículos sobre los pavimento, es el objetivo más general de esta tesis contar con una herramienta computacional para la realización de tales estudios, la cual permita considerar los vehículos más empleados en México. Al mismo tiempo, se considera vital para este objetivo que el programa a desarrollar incluya la visualización de la respuesta dinámica de los diferentes vehículos al perfil del pavimento, tomando en cuenta las condiciones ambientales y operacionales en las que se realiza el uso de la infraestructura. Esto es, esta herramienta debe permitir la posibilidad de seleccionar las propiedades de los componentes del vehículo, que afectan su efecto potencial sobre el pavimento, al tiempo de tomar en cuenta las condiciones ambientales bajo las cuales se efectúa esta interacción. En particular, el programa y formulaciones deberán tomar en cuenta la cantidad de masa transportada y las condiciones de temperatura del pavimento asfáltico.

Esta herramienta computacional podrá ser de utilidad para que los administradores de las infraestructuras carreteras, cuenten con una herramienta de análisis del efecto que sobre el estado de deterioro del pavimento, tiene el paso de los diferentes vehículos.

Lo anterior, a través de un esquema computacional que sistematice las formulaciones existentes, presentando la visualización tanto de la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento, como del efecto del paso de cada vehículo sobre el estado de deterioro del pavimento. Para ello, se deberá emplear la formulación adecuada para predecir una estimación del deterioro del pavimento, en función de las condiciones de operación del vehículo y de las propiedades de sus componentes, así como de las condiciones ambientales. La visualización del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento deberá ser generado a través

de una salida gráfica que por medio de colores, despliegue el nivel de deterioro que se estaría ocasionando al pavimento.

Para alcanzar este objetivo de mayor nivel, se seleccionarán los métodos de solución de las ecuaciones de movimiento resultantes, definiendo la plataforma computacional que resulte más conveniente.

### **1.3 Justificación**

La justificación para el desarrollo de este trabajo se centra en dos aspectos, acordes con los objetivos que se han descrito. Por un lado, una de las razones por las que no se aplica un criterio racional para la cuantificación del efecto de los diferentes vehículos sobre los pavimentos, es que no se cuenta con una herramienta que sistematice el estudio de la interacción de los vehículos con el pavimento, la cual facilitase la asignación de factores de impacto de los vehículos sobre el pavimento, en función no solamente de las características de los vehículos, sino de las condiciones en las que son operados. Por otro lado, el segundo elemento justificante de este trabajo consiste en las limitaciones que se han tenido para implementar una metodología existente, cuyo pobre desempeño sobre los potenciales usuarios, es atribuible a que tales formulaciones existentes no han sido sistematizadas de tal manera que resulten de fácil de usar por parte de las autoridades y funcionarios competentes. Las limitaciones de las formulaciones en un estado anterior a esta tesis, incluyen la imposibilidad de visualizar tanto la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento, como el efecto potencial del paso de los diferentes vehículos, sobre el nivel de deterioro de las infraestructuras.

La aplicación de esta metodología podría conducir entonces a un esquema racional del uso de las infraestructuras, en donde incluso se podría plantear la implementación de un sistema inteligente de peajes, en función de las condiciones en las que son empleadas las infraestructuras.



Al respecto, es necesario hacer notar que las aplicaciones del esquema computacional generado, no se limitan a los objetivos planeados en este trabajo, y otras aplicaciones podrían identificarse en un futuro. Por ejemplo, los esquemas de conservación de carreteras podrían ser mejoradas mediante el uso de este sistema, dado que será posible identificar los puntos en los que se requiera la aplicación de mayores trabajos de mantenimiento. Esto como un resultado de que se contará con la simulación de la respuesta dinámica de los diferentes vehículos a lo largo del perfil del pavimento.

Finalmente, y como se describirá en la parte de generalidades de esta tesis, no existe en el “mercado” de programas de cómputo, uno que cuantifique el daño a los pavimentos, en función de los factores de diseño y operacionales descritos en la parte de “Objetivo” de esta tesis. La idea detrás de este programa es que llegue a constituir una herramienta de análisis, cuyo alcance pueda ser ampliado en la medida de las necesidades.

#### **1.4 Alcance**

Este trabajo parte de formulaciones existentes por cuanto a dos fenómenos: la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento, y el efecto potencial de los vehículos sobre pavimentos asfálticos. Estas formulaciones son programadas en una plataforma compatible para realizar la visualización tanto de la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento como del efecto de los vehículos sobre éste. Este efecto se estimará a partir de otra formulación existente, la cual está relacionada con la energía que es almacenada de manera transitoria en el pavimento durante el paso de los vehículos. Esta medida de desempeño también se programa en la plataforma de visualización elegida. Al respecto, se seleccionará asimismo el método de solución de las ecuaciones de movimiento de las diferentes configuraciones vehiculares, mismas que representarán a los vehículos más empleados en el contexto nacional. En general, no se modificarán las limitaciones de estos modelos de comportamiento de los vehículos al perfil del pavimento. Por ejemplo, seguirán siendo modelos planos, que toman en cuenta

tanto la vibración vertical de las masas de los vehículos como su oscilación, o cabeceo.

La visualización de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento será diseñada a partir de un proceso de selección de la plataforma computacional adecuada, con base a requerimientos fundamentales tales como simulación en tiempo real, de tal suerte que los tiempos de ejecución de los programas sea menor al tiempo que le llevaría en la realidad la ocurrencia de estos fenómenos. En esta etapa de visualización se trabajará para generar los objetos físicos en una plataforma computacional que permita la manera en que las diferentes masas que integran al vehículo, mantienen las relaciones físicas y funcionales entre tales cuerpos. Aunado al proceso de visualización, el esquema tecnológico proveerá las facilidades para generar archivos de salida acordes a las necesidades, tales como las historias en el tiempo de la vibración de las diferentes masas, así como las fuerzas ejercidas sobre los pavimentos. Por otro lado, el esquema incluye una interfaz con el usuario, que le permitirá a éste configurar al equipo. Esta interfaz con el usuario toma en cuenta algunos aspectos ergonómicos para facilitar la alimentación de datos, que incluye la selección de un menú las propiedades tanto de las suspensiones como de las llantas. Por otro lado, el usuario podrá seleccionar el perfil del pavimento, así como las condiciones ambientales por cuanto a temperatura.

# Capítulo 2 Generalidades

---

Para auxiliar en la comprensión de los tópicos involucrados en la presente tesis, en este capítulo se describen conceptos que son fundamentales para desarrollo de este trabajo, que incluyen desde aspectos de la dinámica vehicular hasta las características de los daños que los vehículos pesados causan a las infraestructuras carreteras.

## 2.1 Dinámica Vehicular

La dinámica de los vehículos es la ciencia que estudia la respuesta dinámica de un sistema mecánico como lo son los vehículos, a diversas perturbaciones, pudiendo ser las perturbaciones de diferente naturaleza. Como sistemas mecánicos, los vehículos pueden ser modelados de diferentes maneras. Por un lado, se tiene el concepto de la “dinámica de multi-cuerpos”, a través de la cual los vehículos son considerados como un conjunto de masas indeformables, acopladas por elementos flexibles cuya masa es despreciable. La Figura 2.1 ilustra este tipo de aproximación a la dinámica de los vehículos, para el caso de la respuesta de un vehículo de dos ejes a las perturbaciones desde el pavimento.

Otra manera de modelar los vehículos consiste en considerarlos como masas deformables, acopladas por elementos también deformables, pero en un mayor grado. Este modelo se presenta en la Figura 2.2, en donde un conjunto de elementos finitos son acoplados para caracterizar la respuesta del cuerpo bastidor del vehículo. Mientras que el modelo de elementos finitos representa con mayor realismo la estructura del cuerpo vehicular, los modos de vibración y frecuencias respectivas, no representan lo que mayormente afecta a la interacción de los vehículos con el pavimento. Al respecto y sin embargo, se reconoce que una aproximación por elementos finitos es crucial cuando se trata del estudio de

choques u otras situaciones transitorias en las que toman relevancia modos de vibración a mayor frecuencia.

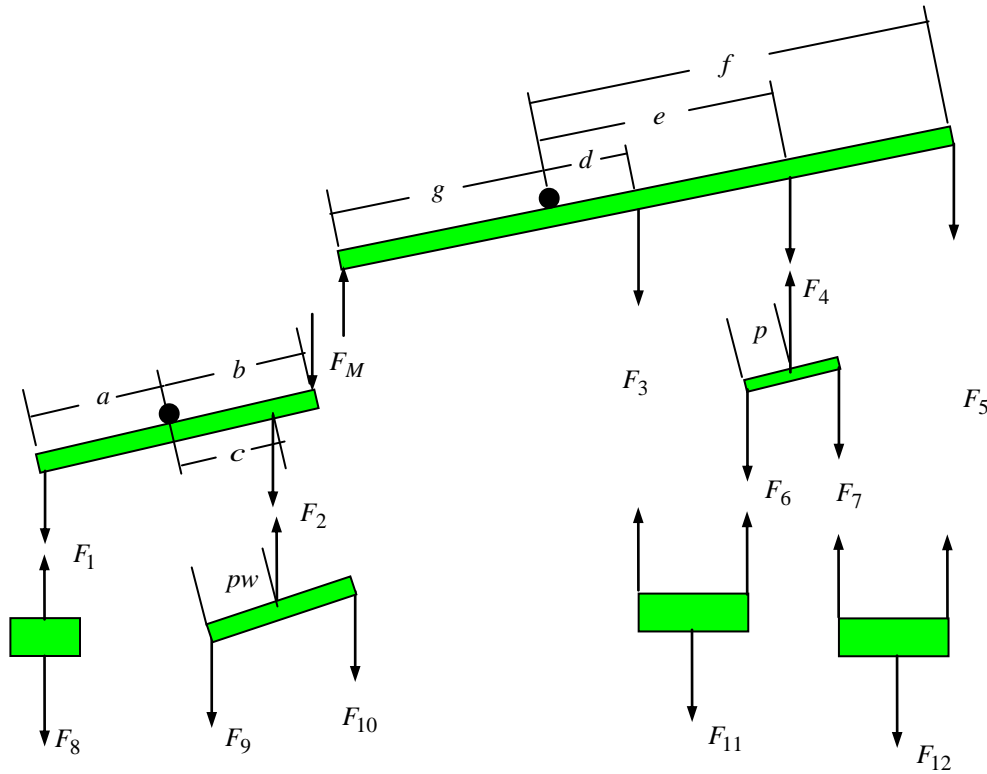


Figura 2.1 Diagrama de un modelo de multi-cuerpos para una combinación vehicular tractor-semirremolque.

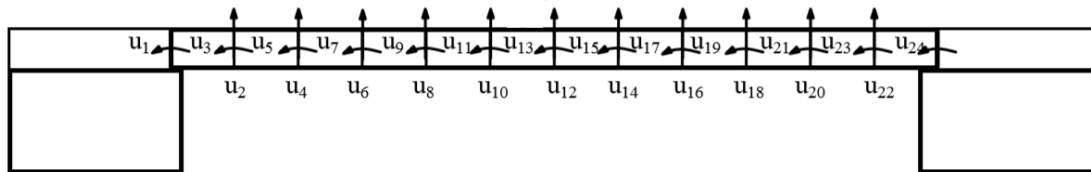


Figura 2.2 Representación esquemática del chasis de un camión mediante elementos finitos.

La dinámica vehicular trata entonces del estudio de cómo reaccionan las masas de los vehículos a las diferentes perturbaciones que surgen durante su operación, caracterizando tales perturbaciones la complejidad de los elementos de análisis que es necesario emplear para dichos estudios. De esta manera, las perturbaciones, fuera de las derivadas de impactos con otros cuerpos, pueden ser de diferente naturaleza, como se lista a continuación:

- Perpendiculares al perfil del pavimento;
- Longitudinales, que resultan de cambios en la velocidad de desplazamiento de los vehículos;
- Direccionales, producto de cambios en la orientación de las llantas;
- Internas sobre el vehículos, que pueden ser de las siguientes naturalezas:
  - o Producto de la carga transportada, especialmente en el caso de carga en estado líquido;
  - o Producto de fuerzas dinámicas en los componentes del vehículo, tal cual el caso de los motores y otros componentes del tren motriz como son las llantas desbalanceadas.

Así, los diferentes modelos desarrollados para el estudio del comportamiento de los vehículos, atienden en diferente medida las diferentes perturbaciones describas arriba, implicando en ello diferentes niveles de complejidad en las formulaciones necesarias. Sobre ello, se puede considerar entonces que el modelo multi-cuerpos de mayor complejidad es aquél que considera todo tipo de perturbaciones sobre el vehículo para simular su comportamiento/respuesta, por ejemplo, de un vehículo que circule con carga líquida sobre un pavimento lleno de baches y realice una maniobra combinada de cambio de dirección y de velocidad, simultáneos. La Figura 2.3 ilustra el caso de un sistema mecánico vehicular en el que la carga líquida ejerce fuerzas de inercia sobre las masas de un vehículo, al dar vuelta. Sobre este modelo de respuesta lateral, es posible visualizar el que el

pavimento no esté uniforme a ambos extremos del eje del vehículo, lo que provocará perturbaciones sobre el mismo, las cuales se suman a las fuerzas inerciales laterales por efecto de la curva negociada en sí, y de la oscilación de la carga transportada. En particular, en este modelo se observan las fuerzas inerciales del líquido, tanto su peso como la fuerza centrífuga,  $W$  y  $F_c$ , respectivamente.

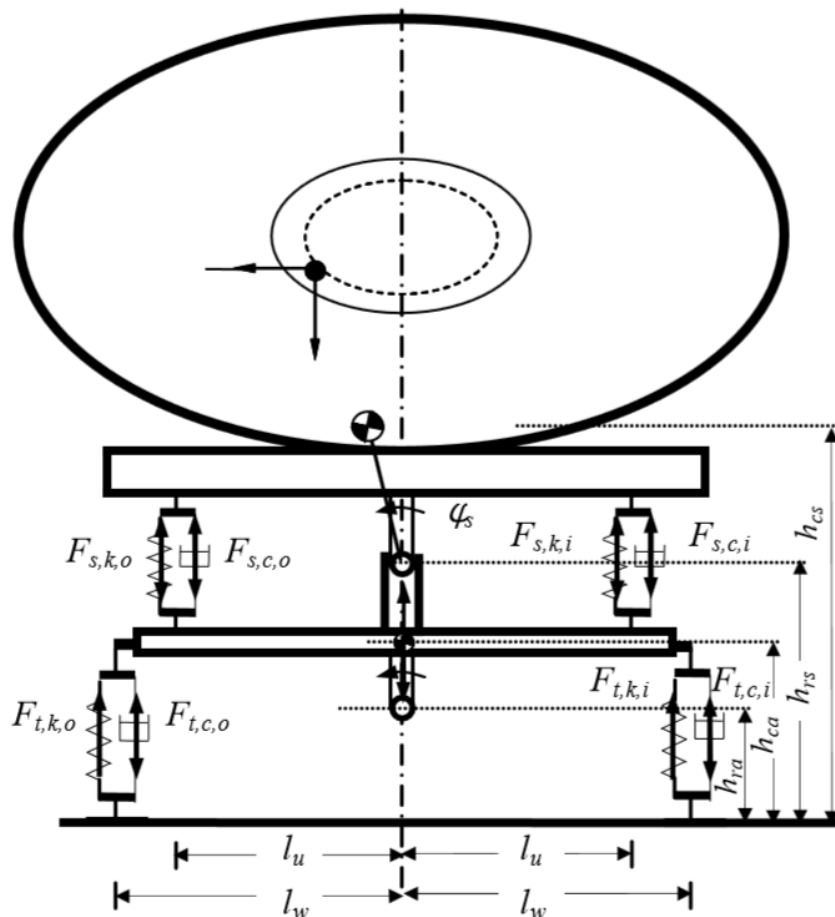


Figura 2.3 Modelo multi-cuerpos de un autotank durante una maniobra de cambio de dirección.

Es preciso hacer hincapié en que el estudio de la dinámica vehicular tiene gran importancia desde diferentes puntos de vista, y que se han desarrollado modelos

específicos para tratar los diferentes aspectos relevantes. Por ejemplo, si lo que preocupa es la estabilidad lateral de los vehículos tipo autotank, un modelo como el mostrado en la Figura 2.3 podría ser suficiente para el estudio de, por ejemplo, el efecto del nivel de llenado del tonel sobre la estabilidad lateral de este tipo de vehículos, mientras que un modelo plano, de vibración y cabeceo, como el mostrado en la Figura 1, podría ser suficiente para el estudio del efecto de los vehículos sobre los niveles de vibración de las masas del vehículo, en un contexto en el que se estudiase, por ejemplo, el efecto del perfil del pavimento, velocidad y propiedades de los componentes del vehículo (rigidez y amortiguamiento), sobre el nivel de vibración del chasis. Este modelo de vibración podría ser de utilidad para seleccionar los componentes que menor daño causen, por ejemplo, a la carga o al conductor. Al respecto de este modelo plano, es preciso destacar que una aplicación importante se asocia a las fuerzas dinámicas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos, como una función tanto de las condiciones de operación como de las propiedades de los componentes.

El tema de las fuerzas sobre los pavimentos se trabajará en esta tesis, al desarrollar un modelo para visualizar los efectos que las características geométricas del perfil del pavimento tienen sobre los valores de las fuerzas dinámicas desarrolladas en la interfaz llanta-pavimento, las cuales influyen el estado de deterioro de este tipo de infraestructuras.

Como se puede observar, las fuerzas que los vehículos ejercen sobre el pavimento, tienen un componente estático y otro dinámico. Mientras que las fuerzas estáticas dependen de los valores de la carga transportada y de su distribución a lo largo de los bastidores de los vehículos, las cargas dinámicas son el resultado de la vibración de los vehículos, que resultan de los diferentes tipos de perturbaciones, que pueden incluir tanto el pavimento como a las maniobras direccionales y de cambio de velocidad. Esta tesis se centra en los aspectos de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, cuando se circula por caminos rectos a velocidad constante. Esto es, no se incluyen las transferencias

de carga sobre las llantas, producto de cambios de velocidad o de dirección. Como se ha señalado en la parte introductoria de este trabajo, las cargas dinámicas son la causa de gran parte del deterioro de los pavimentos, lo que ocasiona enormes inversiones de recursos económicos.

## 2.2 Modelado del sistema

Como se ha señalado en la sección anterior, existen diferentes aproximaciones para modelar a los vehículos, siendo la adoptada en este trabajo la concepción de los vehículos como un conglomerado de masas rígidas acopladas por elementos carentes de masa. Tomando en cuenta también lo tratado en la sección anterior, la dinámica vehicular puede visualizarse como el estudio de la respuesta de las masas de estos vehículos a las diferentes perturbaciones, en donde tales perturbaciones representan fuerzas que se desarrollan en el vehículo producto, por ejemplo, de la circulación de pavimentos irregulares, de entre todos los tipos de perturbación señalados en esa sección.

De acuerdo a los conceptos básicos de la Segunda Ley de Newton, se tiene que las fuerzas ejercidas sobre los cuerpos provocarán en éste una aceleración, la cual es inversamente proporcional a la magnitud de la masa del cuerpo. De esta manera, la solución de la ecuación resultante de segundo orden, permitirá obtener la respuesta dinámica del cuerpo al que se le aplica de la fuerza, de la siguiente manera:

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1)$$

Para obtener cualquier respuesta de los vehículos a las perturbaciones diversas, es necesario entonces establecer, para el modelado de sistemas mecánicos sometidos a cargas dinámicas, la solución de las ecuaciones de movimiento de los cuerpos modelados.



En este contexto de fuerzas que son ejercidas sobre los cuerpos en espera de cómo éstos responden a tales sollicitaciones, la característica más importante de estos sistemas está representado por su número de grados de libertad, que de alguna manera define la complejidad y tamaño del sistema de solución. En un enfoque en extremo simplificado un vehículo puede ser, por ejemplo, simulado como dos masas acopladas mediante resortes y amortiguadores carentes de masa, como se ilustra en la Figura 2.4. En este caso, el resorte inferior representa la flexibilidad de las llantas, mientras que el resorte superior representa la suspensión del vehículo, mientras que la masa inferior es la masa del eje del vehículo y la masa superior es la masa de todo el vehículo, incluyendo el chasis, carrocería y carga. Este modelo tiene entonces dos grados de libertad:  $z_s$  y  $z_{us}$ , referentes a la vibración de las dos masas del sistema vehicular simplificado.

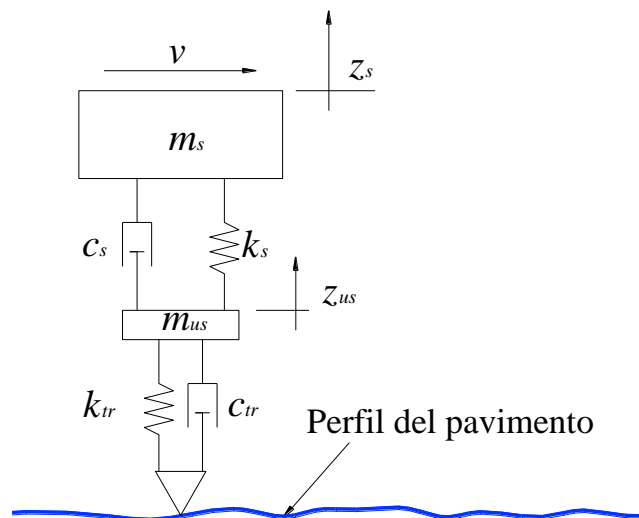


Figura 2.4 Modelo simplificado de vehículo, llamado cuarto de carro.

Asimismo, otra característica de los modelos a desarrollar es la atención que dan a las propiedades fundamentales de los componentes, esto es, tales componentes pueden ser lineales o no lineales. Los componentes lineales exhiben un comportamiento proporcional entre los desplazamientos y las fuerzas, o entre las velocidades de desplazamiento (vibración), como se muestra en la Figura 2.5. Las relaciones constantes descritas en esta figura producen dos conceptos

fundamentales en el estudio de las vibraciones, Por un lado, se tiene a la constante de rigidez ( $k$ ), y por el otro a la constante de amortiguamiento ( $c$ ), cuyas expresiones quedan de la siguiente manera:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} \qquad c = \frac{\Delta F}{(\Delta x / \Delta t)} \qquad (2.2)$$

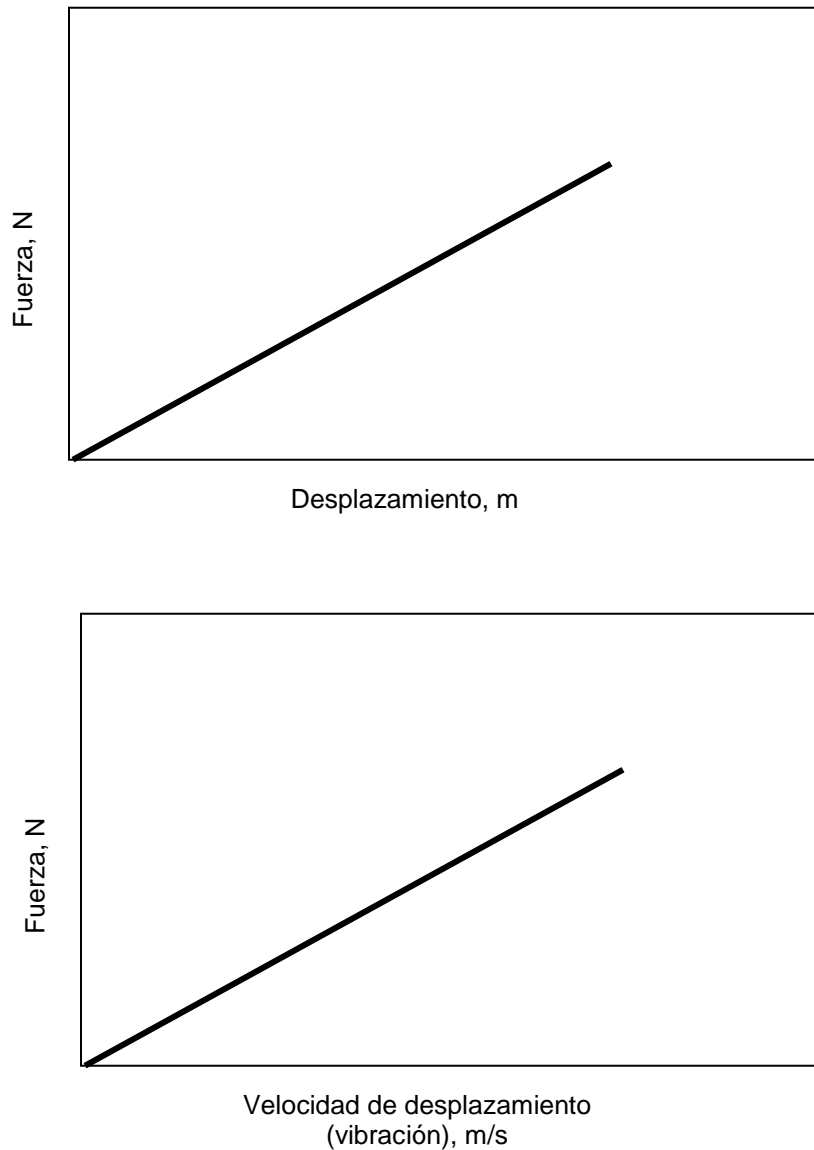


Figura 2.5 Relaciones lineales entre los desplazamientos y velocidades.

En esta tesis se considera el comportamiento lineal de los componentes de los vehículos, lo cual se justifica por las siguientes dos razones:

- el nivel de deformación es pequeño por considerarse pavimentos carreteros, esto es, no se trata de vehículos fuera de carretera;
- Los estudios por realizar harán énfasis en la evaluación comparativa de los resultados.

### 2.2.1 Solución por el método de matrices de transición

La solución de las ecuaciones de movimiento como la descrita en (2.1) se resuelven en este trabajo mediante el Método de las Matrices de Transición de estado, el cual se basa en la solución de un sistema de segundo orden como un sistema de primer orden, al expresar al primero de forma matricial en términos de variables de estado.

La obtención de la respuesta dinámica por medio de la matriz de transición es válida para un sistema lineal, y este enfoque se denomina Método de las Matrices de Transición (MMT) para la solución de las ecuaciones de movimiento de sus masas. El MMT para sistemas discretos fue empleado por Sayer y Gillespie para definir el Índice Internacional de Rugosidad (Sayers, 1990). En esta sección se dará una breve explicación acerca de este método.

La ecuación de movimiento para un sistema de  $n$  grados de libertad puede escribirse de la siguiente forma (Meirovitch, 1986):

$$[m]\{\ddot{q}(t)\} + [c]\{\dot{q}(t)\} + [k]\{q(t)\} = \{Q(t)\} \quad (2.3)$$

donde se ha introducido un vector de estado de dimensión  $2n$  al igual que un vector de excitación:

$$\{y(t)\} = \begin{Bmatrix} \{q(t)\} \\ \{\dot{q}(t)\} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

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

Entonces, la ecuación de movimiento de un sistema de  $n$  grados de libertad puede escribirse de la siguiente forma:

$$\{\dot{y}(t)\} = [A]\{y(t)\} + [B]\{Y(t)\} \quad (2.5)$$

La solución del vector de estado  $\{y(t)\}$  queda:

$$\{y(t + \Delta t)\} = [\Phi]\{y(t)\} + [\Gamma]\{Y(t)\} \quad (2.6)$$

donde:

$$[\Phi] = e^{[A]t} = [I] + [A]t + \frac{[A]^2 dt^2}{2!} + \frac{[A]^3 dt^3}{3!} + \dots + \frac{[A]^n dt^n}{n!} \quad (2.7)$$

$$[\Gamma] = \int_0^{\Delta t} e^{[A](t-t')} [B] dt' = [A]^{-1} ([\Phi] - [I])[B] = [PR] \quad (2.8)$$

La matriz  $[\Phi]$  es conocida como la matriz de transición y  $[\Gamma]$  es la matriz de respuesta particular. La forma de llegar a la solución de  $[\Phi]$  es por medio de la expansión en series de potencia (ecuación 2.7).

### **2.3 Interfaz de usuario**

Una interfaz con el usuario es una combinación de elementos de hardware y software que permite al usuario operar los programas mediante el intercambio de datos, cuyo diseño requiere del manejo de algunos conceptos ergonómicos por cuanto a los formatos y gráficos involucrados. De esta manera, una interfaz de usuario establece una relación entre el usuario y la computadora, con objeto de transmitir información entre ambos sujetos, dando pie a una interacción entre el usuario y la computadora que convierte a ambos sujetos alternativamente en emisor y receptor de mensajes. Esta comunicación requiere de un lenguaje común, con objeto de que ésta se dé de manera ágil y eficiente (Pascual, 1993). Por cuanto a su función, estas interfaces de usuario sirven como canales de información entre hombre-máquina para que el usuario pueda obtener y proporcionar adecuadamente la información que precisa proveer y obtener.

A través de las interfaces de usuarios se busca interactuar con los programas de cómputo, usando todos los sentidos y capacidades de comunicación humana. El desarrollador de estos esquemas cuenta para su diseño de diferentes recursos, que incluye programas de audio, video, gráficos y animaciones, los cuales permiten eventualmente tener un total entendimiento y comunicación entre los seres humanos y los equipos de cómputo (Timpleby 1990). De esta forma, el usuario debe conocer la estructura interna del sistema que está utilizando, lo cual le permitirá aprovecharlo de manera integral y eficiente. Desafortunadamente, se dice que la mayoría de los usuarios no son capaces de conocer y entender la estructura interna de un programa, por lo que se desaprovechan algunos potenciales de los equipos y programas. Para superar estas dificultades, los humanos y las computadoras deben usar un “lenguaje” en común, llamado modelos mentales (Timpleby 1990). Consiguientemente, se dice que en las interfaces que están mal diseñadas, los modelos mentales pueden resultar incompatibles, lo que dificulta establecer una comunicación hombre-computadora efectiva.

Por otro lado, las buenas interfaces sumergen al usuario en el uso y disfrute del programa. Un ejemplo de esto es cuando un niño está jugando un videojuego y, si el juego lo elimina, lanzará un grito de frustración que a un padre le puede resultar extraño. Lo que ha pasado es que el modelo formal que el niño ha utilizado para el videojuego le ha hecho creer que aquél héroe de la pantalla era él mismo (Timpleby 1990).

El objetivo de una interfaz eficiente combina el programa en sí con los elementos desarrollados para tener el acceso y control de éste, lo que puede llevar a pensar que la computadora funciona como un elemento ya conocido y familiar, en un contexto en el que viajamos con él, y los usuarios pueden llegar a sentirse los protagonistas de las historias que nos propone. Para lograr esta inmersión, no obstante, se requiere recurrir a los esquemas de modelos mentales que el usuario emplea para facilitar su relación con el medio informático. El usuario, al ir trabajando con el programa e ir dominándolo, va construyendo sus propios modelos mentales. Por ejemplo, “el disco duro de la computadora es un armario con cajones”. De esta manera, el usuario puede razonar de forma más efectiva sobre ciertos aspectos del uso del programa (Timpleby 1990):

*“El usuario utiliza modelos prácticamente sin darse cuenta. Así un modo de utilizarlo es a través de la proyección. Él pretende y asume que la computadora hará algo por el simple motivo de que él mismo quiere hacerlo. Del mismo modo que utiliza una bicicleta porque quiere desplazarse.”*

Una forma de diseñar los interfaces de usuario es relacionar su diseño con herramientas que el usuario ya haya utilizado. Por ejemplo, a quien comienza a utilizar un procesador de textos, se le dice que funciona igual que una máquina de escribir; aunque la semejanza sólo se da en el teclado, el usuario se siente más tranquilo utilizando el programa, porque es algo que le es familiar.

De la misma manera que en otros escenarios ergonómicos, para los usuarios que ya son más expertos en el uso de programas de computadora, las interfaces de los programas nuevos se pueden diseñar con comandos, íconos y botones, los cuales asemejen aquellos que se usan en programas conocidos. De esta forma se asegura que el usuario aprenderá a utilizar rápidamente el programa.

### *Elementos de una interfaz de usuario*

Según Marcus (1993), algunos elementos de un interfaz de usuario son:

- **Metáforas:** imágenes o conceptos que son fácilmente reconocidos, comprendidos y recordados por el usuario.
- **Modelos mentales:** organización y representación de la información, de las funciones, de las actividades a realizar y de las reglas de comportamiento del usuario en el sistema.
- **Modelo de navegación:** estructura de la información, de las actividades, y de las reglas inherentes al sistema, los cuales permiten un fácil acceso y una fácil comprensión por parte del usuario del sistema en su totalidad.
- **Apariencia:** aspecto formal y estético de los elementos que el usuario encuentra en el uso del programa.
- **Experiencia:** técnicas de interacción entre el usuario y la computadora, que se han demostrado eficaces y que su uso reiterado permite una adecuada utilización del sistema.

De acuerdo con lo anterior el diseñador, al usar varios o todos estos elementos, ayuda al usuario a navegar fácilmente en un programa complejo.

Se pueden mencionar los siguientes estilos interactivos de interfaz de usuario (Schneiderman, 1992):

- Selección por menú: los usuarios leen una lista de elementos de entre los cuales eligen el más apropiado para la tarea que tienen que realizar, para lo cual aplican la sintaxis para indicar su selección, la confirman, se inicia la acción y observan los efectos.
- Espacios en blanco: el usuario ve una serie de campos de modo que moviendo el cursor entre ellos puede introducir los datos deseados. En este estilo. Los usuarios deben comprender las etiquetas y conocer los valores permitidos, el método de introducción de datos, y los posibles errores que se produzcan. Al respecto, el desarrollador deberá emplear los recursos a su alcance para validar la información que sea alimentada al programa.
- Lenguajes de comandos: los lenguajes de comandos proporcionan al experto de este lenguaje un sentimiento de control e iniciativa, con lo cual le hace creerse el "dominador" del sistema. De manera rápida, los usuarios aprenden la sintaxis y expresan complejas posibilidades, sin tener que leer mensajes que distraigan su atención.
- Lenguaje natural: las interfaces de lenguaje natural proporcionan una forma cómoda de interacción entre el hombre y la máquina, para lo cual se basan en el uso de la semántica de frases. Al respecto, se afirma que el problema que surge con este tipo de interfaces es que, al no estar libres del contexto, son necesarios o imprescindibles los diálogos de clarificación o explicación de las acciones realizadas o por realizar.

### **2.3.1 Software interactivo**

Este tipo de soporte lógico es aquél que permite una comunicación continua entre operador-máquina, o usuario-computadora. Para lograr esta comunicación se necesita un lenguaje común. Este lenguaje común lo proporciona la interfaz de usuario.



Entre el usuario y la máquina existe un intérprete o interfaz de usuario que entiende ambos lenguajes. Del lado del usuario, la interfaz le dice al operador todos los procesos y operaciones que la máquina está haciendo. La interfaz, para lograr comunicar los procesos de la máquina, usa gráficas, botones, imágenes, tablas, datos numéricos, entre otras señales que el hombre entiende. Del lado de la máquina, la interfaz usa señales eléctricas o electromagnéticas, para instruirle a la máquina lo que el usuario quiere que ejecute.

## **2.4 Daño al pavimento**

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 1991), los dos tipos principales de daños que los vehículos ocasionan a los pavimentos consisten de las llamadas roderas o canalizaciones, y la fatiga. Mientras que las primeras se caracterizan por deformaciones plásticas longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas de los vehículos, en las áreas próximas al costado de los carriles, las segundas se ven caracterizadas por agrietamientos y fracturas, cuya cantidad y densidad por unidad de superficie, se va incrementando en la medida que se realizan las repeticiones de las cargas de los vehículos, lo que provoca la eventual fatiga o fractura de los pavimentos, y los desagradables baches. La Figura 2.12 ilustra estos dos tipos de deterioros.

En términos generales, el deterioro de los pavimentos no guarda una relación lineal con respecto al nivel de la fuerza ejercida sobre los pavimentos, por ello es que de la mayor relevancia cuantificar las fuerzas ejercidas por los vehículos sobre los pavimentos.



Figura 2.6 Tipos de deterioro de pavimentos por efecto del paso de los vehículos pesados: (a) Deformación plástica o roderas; (b) Fatiga o “calabreo”.

Al tratarse de superficies pequeñas a través de las cuales las llantas descansan sobre los pavimento, la relación que guarda el deterioro causado depende de un exponente, tal cual se tiene en otras situaciones tales como los esfuerzos entre los balines de los rodamientos y sus pistas. Por ejemplo, si se trata de un exponente de 3.3, un incremento de la carga en tan sólo un 10%, provocaría un deterioro del 36%, dado que el cociente 1.1 debe elevarse a la potencia de 3.3. Para describir esta situación matemáticamente se puede recurrir a una ecuación general del siguiente tipo (Sadeghi et al., 2009):

$$L = a_1 a_2 a_3 \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (2.9)$$

donde el exponente  $p$  puede tener un valor entre 3 y 4, y las constantes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  dependen de las condiciones de operación. En esta ecuación,  $C$  es la capacidad nominal y  $P$  es la carga no nominal aplicada, que resulta en una esperanza de vida  $L$ .

Sobre estos fenómenos, es preciso mencionar que los pavimentos deteriorados implican un alto costo en las economías de las naciones, del orden de miles de millones de pesos anualmente (SCT, 2013), dado que un pavimento deteriorado,

conteniendo una variedad de defectos como los mostrados en la figura 2.12, origina fueras dinámicas sobre los componentes del vehículo, deteriorando incluso a la carga transportada y afectando la comodidad del operador del vehículo.

## **2.5 Herramientas de programación y simulación**

Se describen ahora, de manera sucinta, las diferentes plataformas computacionales que serán empleadas para el desarrollo de la aplicación expuesta en esta tesis.

### **2.5.1 Matlab**

MATLAB® es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación (Mathworks, 2014). Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución más rápida que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java™. Por lo tanto, esta plataforma se puede utilizar para una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional. Al respecto, se afirma que existen más de un millón de ingenieros y científicos de la industria y la educación que utilizan MATLAB, el cual emplea lo que se denomina “lenguaje del cálculo técnico.”

### **2.5.2 Simulink 3D**

Simulink® es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos (Simulink, 2014). Este ambiente permite el diseño y la simulación a nivel de sistema, pudiendo efectuar la

generación automática de código, así como la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos. Este programa ofrece un editor gráfico, así como bibliotecas de bloques personalizables y *solvers*, que permiten modelar y simular sistemas dinámicos de manera relativamente fácil. Su integración natural con MATLAB permite incorporar algoritmos avanzados de este programa en los modelos, así como la exportación de los resultados de la simulación a MATLAB para su procesamiento analítico adicional. Por otro lado, Simulink 3D Animation™ proporciona aplicaciones para entrelazar modelos de Simulink con MATLAB, en gráficos 3D. El lenguaje empleado es el VRML (*Virtual Reality Modeling Language*), mediante el cual los objetos pueden ser rotados, escalados y en general manipulados mediante coordenadas asignadas por el usuario, o provenientes de alguna aplicación. Este programa también incluye observadores diversos, lo cual permite desplegar e interactuar con escenas virtuales. Mediante el editor de este programa pueden generarse escenas desarrolladas con base a las plataformas de *Computer Aided Design* (CAD).

### 2.5.3 *GUIDE*

Mediante *GUIDE* (entorno de desarrollo de interfaces gráficas de usuario), es posible crear, diseñar y editar interfaces gráficas de usuario (Mathworks-3D, 2014). Se pueden incluir controles habituales como cuadros de lista, menús desplegables y botones, además de gráficos de MATLAB. También es posible crear interfaces gráficas de usuario mediante programación, utilizando para ello las funciones embebidas de MATLAB.

# Capítulo 3 Desarrollo de las formulaciones de respuesta del vehículo al pavimento y su modelado

---

Para obtener las ecuaciones de movimiento del sistema dinámico multi-cuerpos, es necesario partir de diagramas de cuerpo libre coherentes, que permitan aplicar la Segunda Ley de Newton en sus diferentes modalidades de movimientos lineales o angulares. Para ello se debe partir de estados de movimiento factibles para cada conjunto de masas vehiculares, a los cuales se aplique la ecuación (2.1).

## 3.1 Diagramas de cuerpo libre de los vehículos

La Figura 3.1 ilustra el caso de un vehículo tipo C2, denominado en la jerga transportista “rabón”, en donde se parte desde la representación esquemática del sistema de masas que configura al vehículo. Las fuerzas en este diagrama se expresan en términos de las dimensiones y propiedades de rigidez ( $k$ ) y amortiguamiento ( $c$ ) de los componentes, de la siguiente manera:

$$F_1 = k_0(z_T - z_0 - a\phi) + c_0(\dot{z}_T - \dot{z}_0 - a\dot{\phi}) \quad (3.1)$$

$$F_2 = k_1(z_T - z_1 + c\phi) + c_1(\dot{z}_T - \dot{z}_1 + c\dot{\phi}) \quad (3.2)$$

$$F_3 = k_{L0}(z_0 - Y_0) + c_{L0}(\dot{z}_0 - \dot{Y}_0) \quad (3.3)$$

$$F_4 = k_{L1}(z_1 - Y_1) + c_{L1}(\dot{z}_1 - \dot{Y}_1) \quad (3.4)$$

en donde los subíndices en las variables denotan los componentes asociados ( $0$  para la suspensión delantera;  $1$  para la suspensión trasera;  $L0$  para llantas delanteras y  $L1$  para las llantas traseras). En la siguiente sección se describe cómo estas expresiones se aplicarán en el contexto de la Segunda Ley de Newton. Como se puede observar, este vehículo posee cuatro grados de libertad. Es importante señalar que las alturas del pavimento se han señalado a través de la variable  $Y$ .

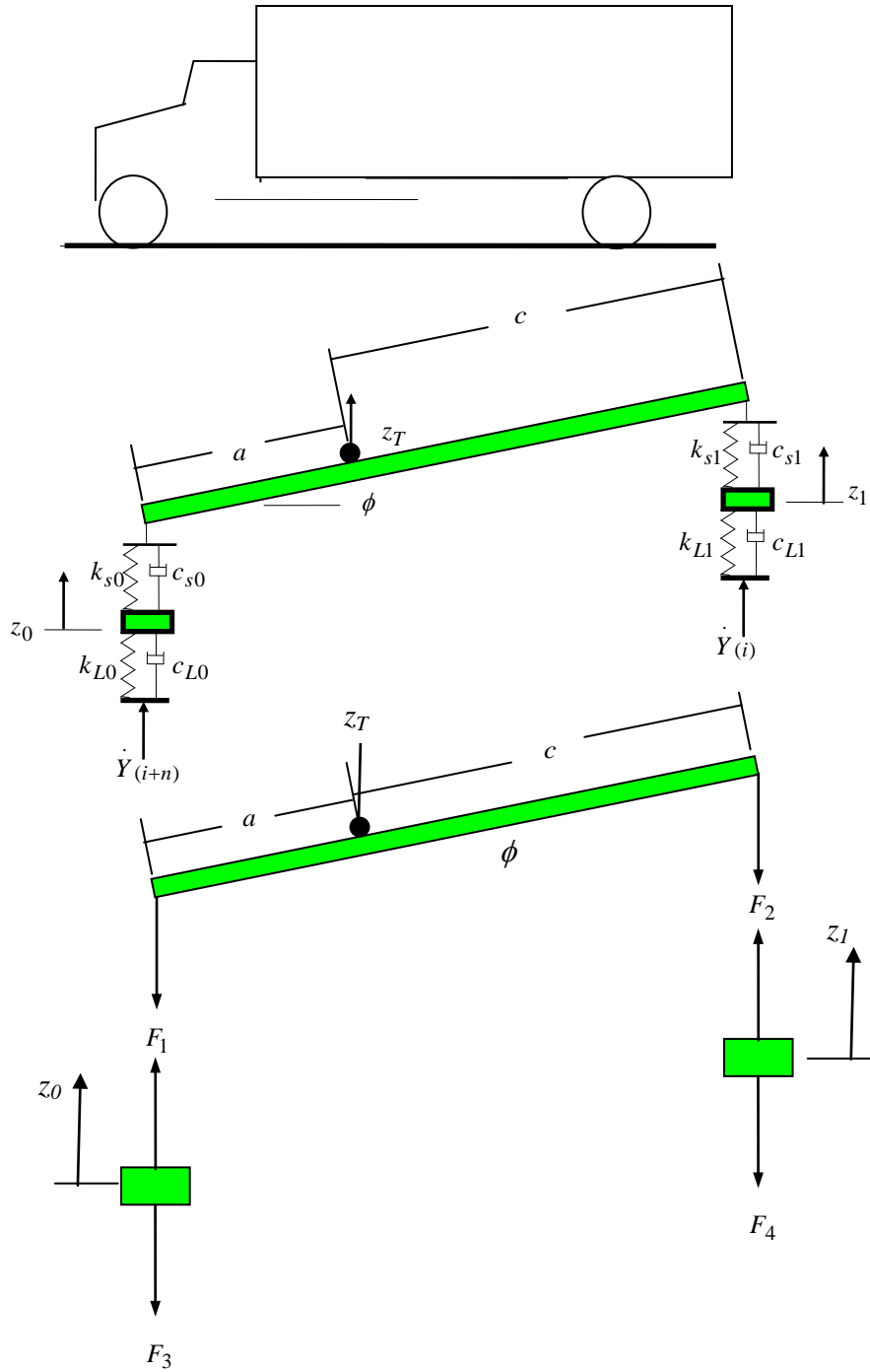


Figura 3.1 Diagramas de cuerpo libre del vehículo C2.

La Figura 3.2 ilustra el caso del vehículo C3, llamado tórton, el cual difiere del C2 o rabón, en que cuenta con un eje adicional. Este vehículo posee 6 grados de libertad, en donde el balancín del tándem representa uno de estos grados de libertad.

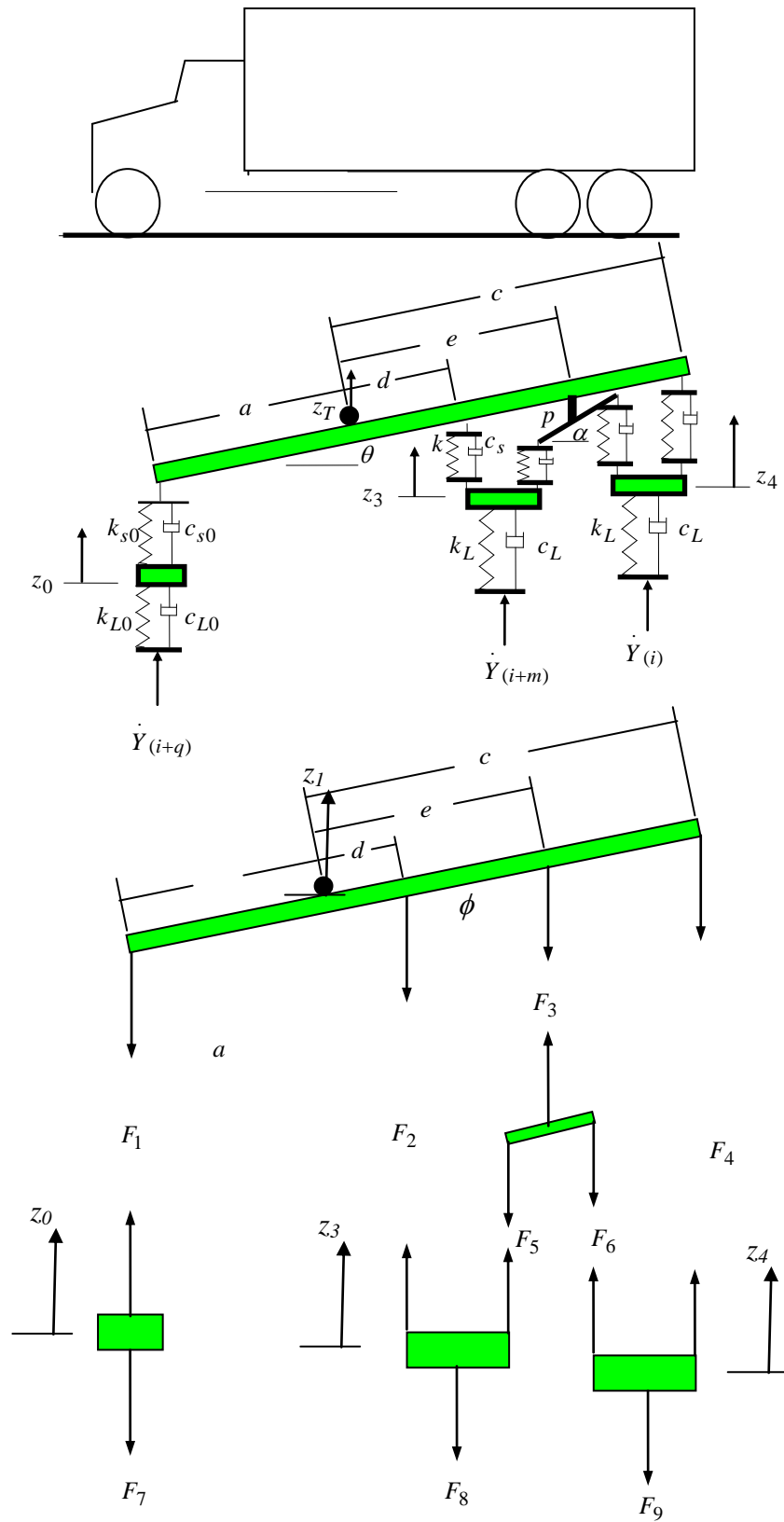


Figura 3.2 Diagramas de cuerpo libre del vehículo C3.

Para la Figura 3.2, las ecuaciones para las fuerzas quedan de la siguiente manera:

$$F_1 = k_0(z_T - z_0 - a\theta) + c_0(\dot{z}_T - \dot{z}_0 - a\dot{\theta}) \quad (3.5)$$

$$F_2 = k(z_T - z_3 + d\theta) + c_s(\dot{z}_T - \dot{z}_3 + d\dot{\theta}) \quad (3.6)$$

$$F_3 = k(z_T + e\theta - z_3 - p\alpha) + k(z_T + e\theta - z_4 + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + e\dot{\theta} - \dot{z}_3 - p\dot{\alpha}) + c_s(\dot{z}_T + e\dot{\theta} - \dot{z}_4 + p\dot{\alpha}) \quad (3.7)$$

$$F_4 = k_1(z_T - z_4 + c\theta) + c_s(\dot{z}_T - \dot{z}_4 + c\dot{\theta}) \quad (3.8)$$

$$F_5 = k(z_T - z_3 + e\theta - p\alpha) + c_s(\dot{z}_T - \dot{z}_3 + e\dot{\theta} - p\dot{\alpha}) \quad (3.9)$$

$$F_6 = k(z_T - z_4 + e\theta + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T - \dot{z}_4 + e\dot{\theta} + p\dot{\alpha}) \quad (3.10)$$

$$F_7 = k_{L0}(z_0 - Y_0) + c_{L0}(\dot{z}_0 - \dot{Y}_0) \quad (3.11)$$

$$F_8 = k_L(z_3 - Y_3) + c_L(\dot{z}_3 - \dot{Y}_3) \quad (3.12)$$

$$F_9 = k_L(z_4 - Y_4) + c_L(\dot{z}_4 - \dot{Y}_4) \quad (3.13)$$

en donde los subíndices en las variables denotan los componentes asociados ( $0$  para la suspensión delantera;  $3$  para la suspensión delantera del tándem;  $L0$  para llantas delanteras y  $L$  para las llantas traseras). La Figura 3.3 ilustra una representación esquemática de un vehículo articulado del tipo T2S1, esto es, un tráiler en el cual el tractor posee dos ejes y el remolque posee un eje. La Figura 3.4 muestra la representación en multi-cuerpos, así como las fuerzas que se desarrollan en los diferentes componentes (suspensiones y llantas). En este caso, se tienen 6 grados de libertad, en donde tres corresponden al tracto articulado con el tráiler, y otros tres para sendos ejes.

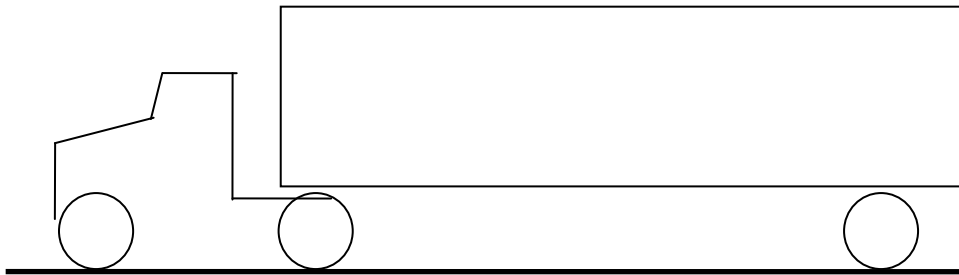


Figura 3.3 Representación esquemática del vehículo TS1.



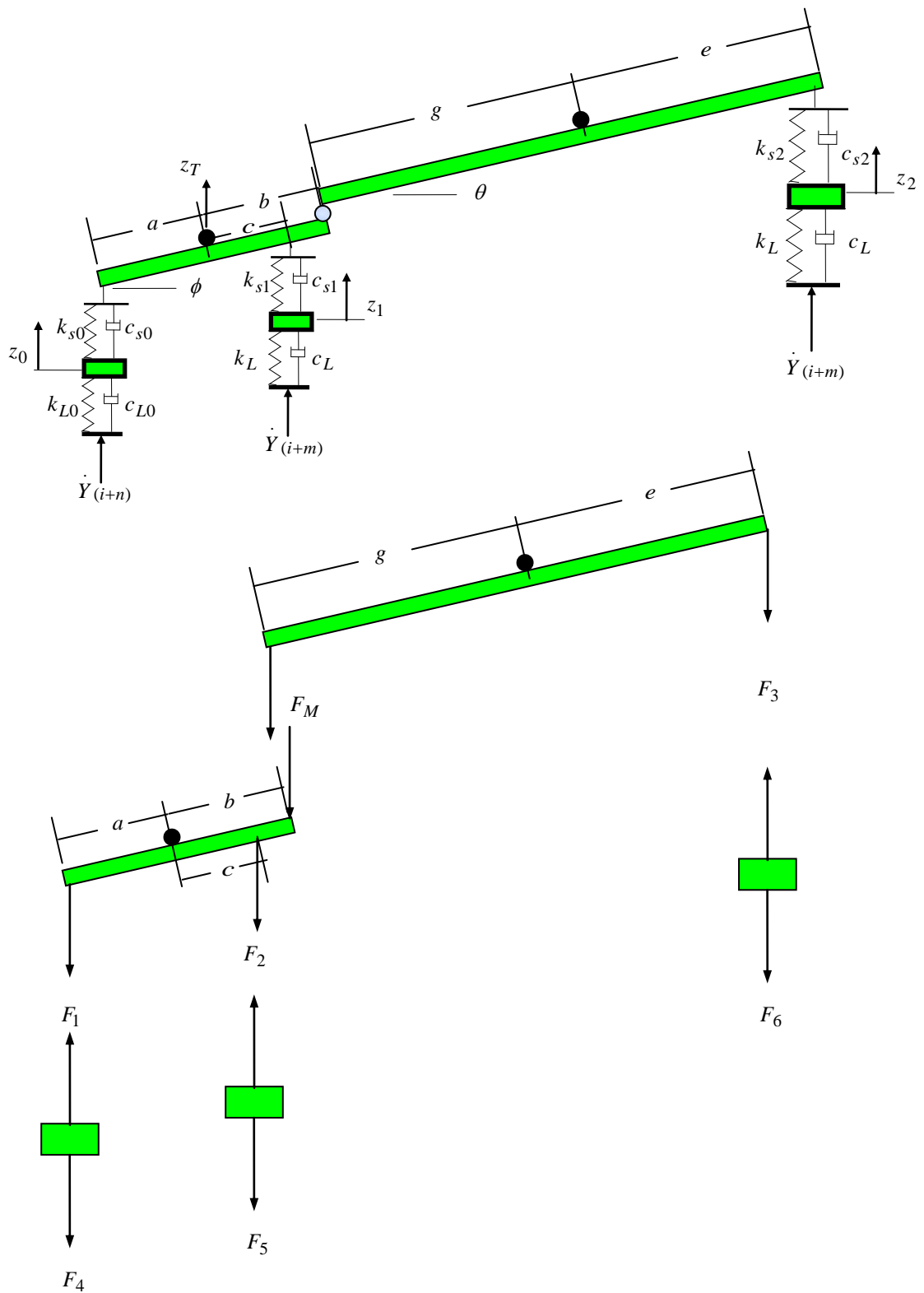


Figura 3.4 Diagramas de fuerzas para el vehículo T2S1.

Las ecuaciones para las fuerzas quedan de la siguiente manera:

$$F_1 = k_0(z_T - z_0 - a\phi) + c_0(\dot{z}_T - \dot{z}_0 - a\dot{\phi}) \quad (3.14)$$

$$F_2 = k_1(z_T - z_1 + c\phi) + c_1(\dot{z}_T - \dot{z}_1 + c\dot{\phi}) \quad (3.15)$$

$$F_3 = k_2(z_T + b\phi + g\theta - z_2 + e\theta) + c_2(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} - \dot{z}_2 + e\dot{\theta}) \quad (3.16)$$

$$F_4 = k_{L0}(z_0 - Y_0) + c_{L0}(\dot{z}_0 - \dot{Y}_0) \quad (3.17)$$

$$F_5 = k_L(z_1 - Y_1) + c_L(\dot{z}_1 - \dot{Y}_1) \quad (3.18)$$

$$F_6 = k_L(z_2 - Y_2) + c_L(\dot{z}_2 - \dot{Y}_2) \quad (3.19)$$

en donde, al igual que en los casos anteriores, los subíndices hacen referencia a los diferentes componentes del vehículo. La Figura 3.5 ilustra lo correspondiente para el vehículo T3S2, esto es, un vehículo articulado con 6 ejes.

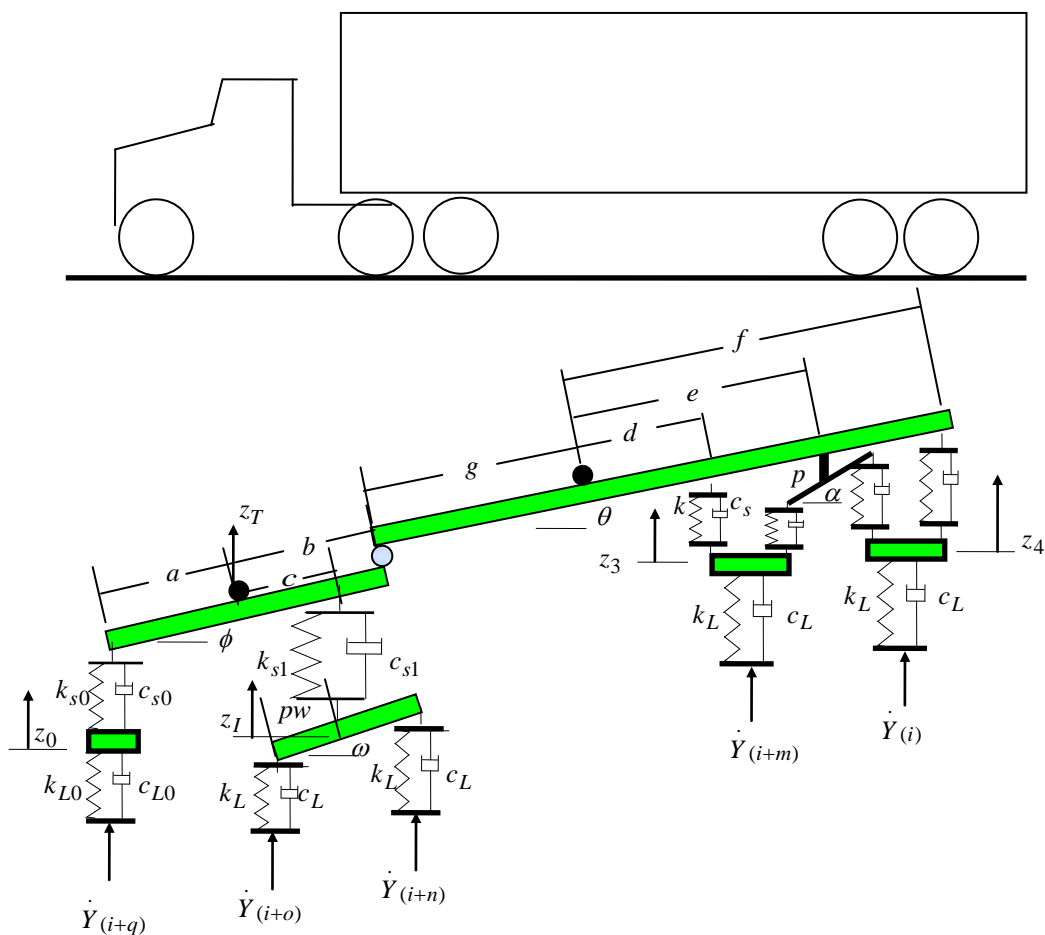


Figura 3.5 Representación esquemática y esquema para el vehículo T3S2.

La Figura 3.6, por otro lado, muestra las fuerzas que se desarrollan en los componentes del vehículo. Como se puede observar, esta combinación vehicular posee 9 grados de libertad.

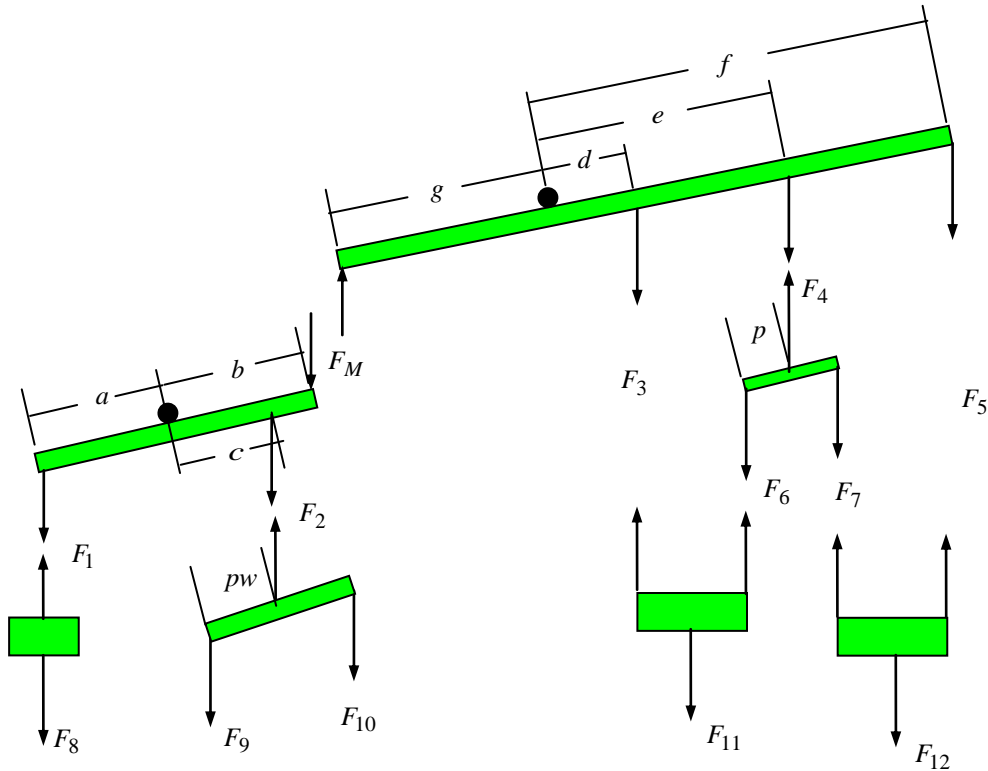


Figura 3.6 Diagrama de fuerzas desarrolladas en el vehículo T3S2.

De acuerdo al diagrama de la Figura 3.6, las fuerzas desarrolladas quedan expresadas de la siguiente manera:

$$F_1 = k_0(z_T - z_0 - a\phi) + c_0(\dot{z}_T - \dot{z}_0 - a\dot{\phi}) \quad (3.20)$$

$$F_2 = k_1(z_T - (z_1 + z_2)/2 + c\phi) + c_1(\dot{z}_T - (\dot{z}_1 + \dot{z}_2)/2 + c\dot{\phi}) \quad (3.21)$$

$$F_3 = k(z_T + b\phi + g\theta + d\theta - z_3) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + d\dot{\theta} - \dot{z}_3) \quad (3.22)$$

$$F_4 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_3 - p\alpha) + k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_4 + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_3 - p\dot{\alpha}) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_4 + p\dot{\alpha}) \quad (3.23)$$

$$F_5 = k(z_T + b\phi + g\theta + f\theta - z_4) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + f\dot{\theta} - \dot{z}_4) \quad (3.24)$$

$$F_6 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_3 - p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_3 - p\dot{\alpha}) \quad (3.25)$$

$$F_7 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_4 + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_4 + p\dot{\alpha}) \quad (3.26)$$

$$F_8 = k_{L0}(z_0 - Y_0) + c_{L0}(\dot{z}_0 - \dot{Y}_0) \quad (3.27)$$

$$F_9 = k_L(z_T + c\phi - p_w\omega - Y_1) + c_L(\dot{z}_T + c\dot{\phi} - p_w\dot{\omega} - \dot{Y}_1) \quad (3.28)$$

$$F_{10} = k_L(z_T + c\phi + p_w\omega - Y_2) + c_L(\dot{z}_T + c\dot{\phi} + p_w\dot{\omega} - \dot{Y}_2) \quad (3.29)$$

$$F_{11} = k_L(z_3 - Y_3) + c_L(\dot{z}_3 - \dot{Y}_3) \quad (3.30)$$

$$F_{12} = k_L(z_4 - Y_4) + c_L(\dot{z}_4 - \dot{Y}_4) \quad (3.31)$$

El último vehículo considerado para el desarrollo de este programa es el T3S3, esto es, un vehículo con tres ejes en el tractor, y tres ejes en el semirremolque. Este vehículo se muestra de manera esquemática en la Figura 3.7, mientras que en la Figura 3.8 se ilustran las fuerzas desarrolladas en sus componentes. Como se verá en los diagramas de fuerza, este vehículo posee 11 grados de libertad, correspondiendo tres al conjunto tractor – semirremolque, dos a los balancines de los ejes traseros, dos a la suspensión tándem del tractor, y uno al eje delantero de esta combinación vehicular

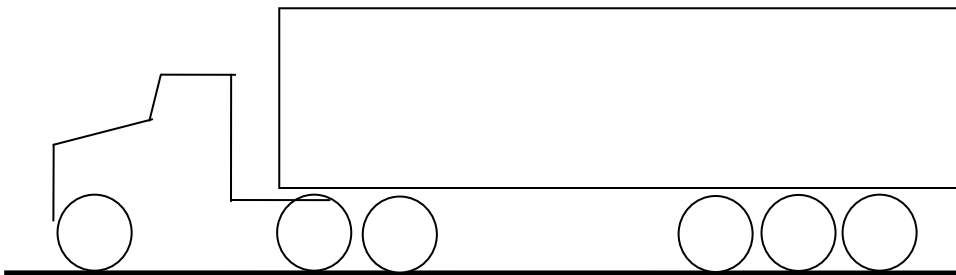


Figura 3.7 Representación esquemática y esquema para el vehículo T3S2.

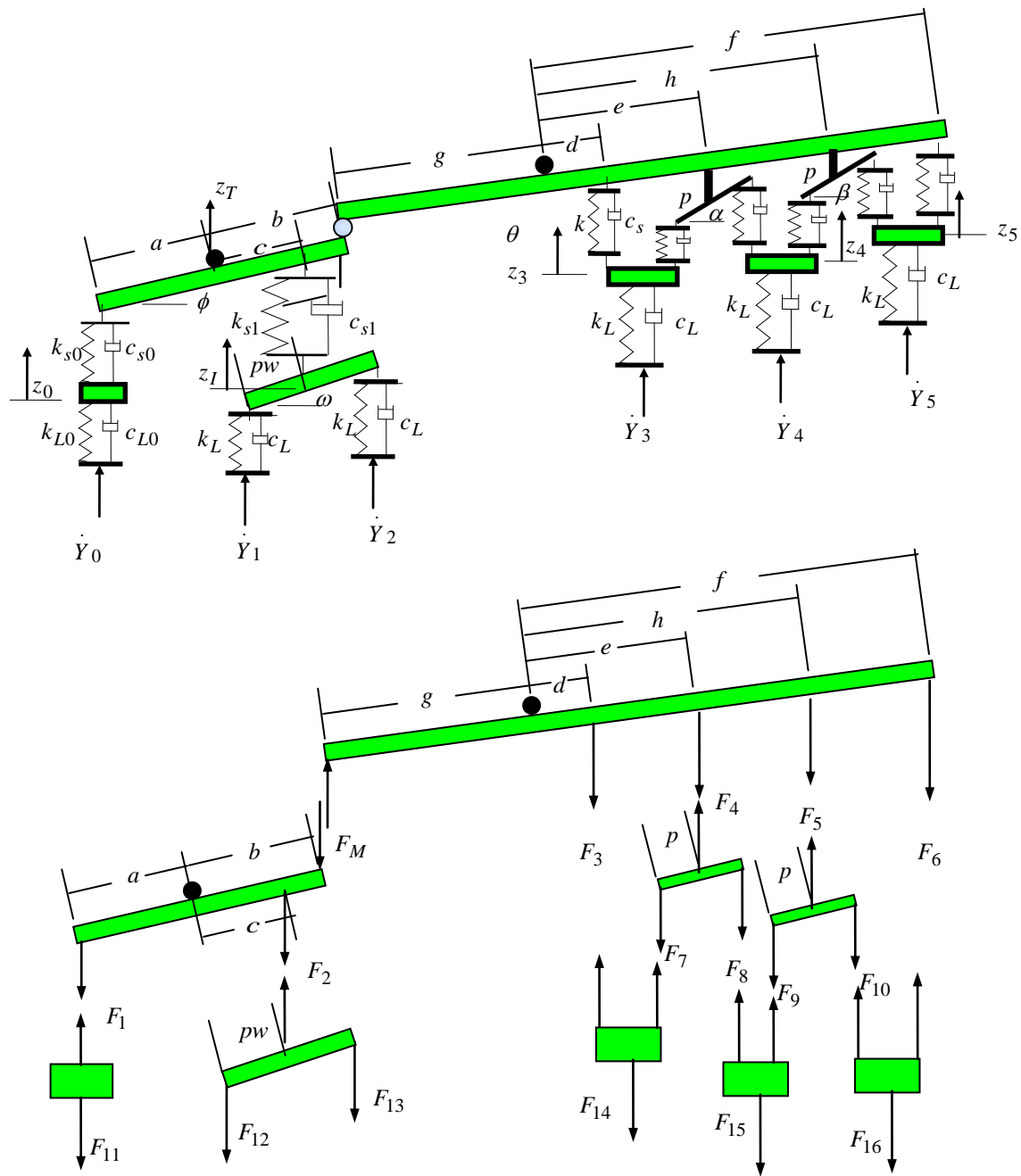


Figura 3.8 Diagrama de fuerzas desarrolladas en el vehículo T3S3.

las ecuaciones correspondientes para este vehículo, se listan a continuación:

$$F_1 = k_0(z_T - z_0 - a\phi) + c_0(\dot{z}_T - \dot{z}_0 - a\dot{\phi}); \quad (3.32)$$

$$F_2 = k_1(z_T - (z_1 + z_2)/2 + c\phi) + c_1(\dot{z}_T - (\dot{z}_1 + \dot{z}_2)/2 + c\dot{\phi}) \quad (3.33)$$

$$F_3 = k(z_T + b\phi + g\theta + d\theta - z_3) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + d\dot{\theta} - \dot{z}_3); \quad (3.34)$$

$$F_4 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_3 - p\alpha) + k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_4 + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_3 - p\dot{\alpha}) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_4 + p\dot{\alpha}) \quad (3.35)$$

$$F_5 = k(z_T + b\phi + g\theta + h\theta - z_4 - p\beta) + k(z_T + b\phi + g\theta + h\theta - z_5 + p\beta) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + h\dot{\theta} - \dot{z}_4 - p\dot{\beta}) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + h\dot{\theta} - \dot{z}_5 + p\dot{\beta}) \quad (3.36)$$

$$F_6 = k(z_T + b\phi + g\theta + f\theta - z_5) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + f\dot{\theta} - \dot{z}_5); \quad (3.37)$$

$$F_7 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_3 - p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_3 - p\dot{\alpha}); \quad (3.38)$$

$$F_8 = k(z_T + b\phi + g\theta + e\theta - z_4 + p\alpha) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + e\dot{\theta} - \dot{z}_4 + p\dot{\alpha}); \quad (3.39)$$

$$F_9 = k(z_T + b\phi + g\theta + h\theta - z_4 - p\beta) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + h\dot{\theta} - \dot{z}_4 - p\dot{\beta}); \quad (3.40)$$

$$F_{10} = k(z_T + b\phi + g\theta + h\theta - z_5 + p\beta) + c_s(\dot{z}_T + b\dot{\phi} + g\dot{\theta} + h\dot{\theta} - \dot{z}_5 + p\dot{\beta}); \quad (3.41)$$

$$F_{11} = k_{L0}(z_0 - Y_0) + c_{L0}(\dot{z}_0 - \dot{Y}_0); F_{12} = k_L(z_T + c\phi - p_w\omega - Y_1) + c_L(\dot{z}_T + c\dot{\phi} - p_w\dot{\omega} - \dot{Y}_1) \quad (3.42)$$

$$F_{13} = k_L(z_T + c\phi + p_w\omega - Y_2) + c_L(\dot{z}_T + c\dot{\phi} + p_w\dot{\omega} - \dot{Y}_2); F_{14} = k_L(z_3 - Y_3) + c_L(\dot{z}_3 - \dot{Y}_3) \quad (3.43)$$

$$F_{15} = k_L(z_4 - Y_4) + c_L(\dot{z}_4 - \dot{Y}_4); F_{16} = k_L(z_5 - Y_5) + c_L(\dot{z}_5 - \dot{Y}_5) \quad (3.44)$$

en donde es posible asociar los diferentes componentes en las ecuaciones.

### 3.2 Ecuaciones de movimiento

La aplicación de la Segunda Ley de Newton deriva en las ecuaciones de movimiento, una vez que se realizan algunas operaciones algebraicas para despejar las segundas derivadas de los grados de libertad, como se indica a continuación:

Las ecuaciones de movimiento para el vehículo rabón, o C2, quedan de la siguiente manera:

$$\ddot{z}_0 = \pi_1 z_0 + \pi_2 z_T + \pi_3 \phi + \pi_{1A} \dot{z}_0 + \pi_{2A} \dot{z}_T + \pi_{3A} \dot{\phi} + \pi_A \dot{Y}_0 \quad (3.45)$$

$$\ddot{z}_1 = (\pi_4 - \pi_5) z_1 + \pi_5 z_T + \pi_6 \phi + (\pi_{4A} - \pi_{5A}) \dot{z}_1 + \pi_{5A} \dot{z}_T + \pi_{6A} \dot{\phi} + \pi_B \dot{Y}_0 \quad (3.46)$$

$$\ddot{z}_T = \pi_7 z_T + \pi_9 z_0 + \pi_8 \phi + \pi_{10} z_1 + \pi_{7A} \dot{z}_T + \pi_{9A} \dot{z}_0 + \pi_{8A} \dot{\phi} + \pi_{10A} \dot{z}_1 \quad (3.47)$$

$$\ddot{\phi} = \pi_{11} z_T + \pi_{14} z_0 + \pi_{13} \phi + \pi_{12} z_1 + \pi_{11A} \dot{z}_T + \pi_{14A} \dot{z}_0 + \pi_{13A} \dot{\phi} + \pi_{12A} \dot{z}_1 \quad (3.48)$$

donde las diferentes constantes quedan en función de las propiedades inerciales, de rigidez y de amortiguamiento de los componentes, así como de las dimensiones del vehículo.

Las ecuaciones resultantes para el vehículo tipo C3, son:

$$\ddot{z}_T = \pi_7 z_T + \pi_2 \theta + \pi_3 z_3 + \pi_3 z_4 + \pi_4 z_0 + \pi_{7A} \dot{z}_T + \pi_{2A} \dot{\theta} + \pi_{3A} \dot{z}_3 + \pi_{3A} \dot{z}_4 + \pi_{4A} \dot{z}_0 \quad (3.49)$$

$$\ddot{\theta} = \pi_5 z_T + \pi_6 \theta + \pi_7 z_3 + \pi_3 z_4 + \pi_4 z_0 + \pi_{5A} \dot{z}_T + \pi_{6A} \dot{\theta} + \pi_{7A} \dot{z}_3 + \pi_{3A} \dot{z}_4 + \pi_{4A} \dot{z}_0 \quad (3.50)$$

$$\ddot{z}_0 = \pi_{10} z_0 + \pi_{11} z_T + \pi_{12} \theta - \pi_{11} z_0 + \pi_{10} Y_0 + \pi_{10A} \dot{z}_0 + \pi_{11A} \dot{z}_T + \pi_{12A} \dot{\theta} - \pi_{11A} \dot{z}_0 + \pi_{10A} \dot{Y}_0 \quad (3.51)$$

$$\ddot{z}_3 = \pi_{13} z_3 + \pi_{14} z_T + \pi_{15} \theta + \pi_{16} \alpha - \pi_{23} Y_3 + \pi_{13A} \dot{z}_3 + \pi_{14A} \dot{z}_T + \pi_{15A} \dot{\theta} + \pi_{16A} \dot{\alpha} - \pi_{23A} \dot{Y}_3 \quad (3.52)$$

$$\ddot{z}_4 = \pi_{17} z_4 + \pi_{18} z_T + \pi_{19} \theta + \pi_{20} \alpha - \pi_{24} Y_4 + \pi_{17A} \dot{z}_4 + \pi_{18A} \dot{z}_T + \pi_{19A} \dot{\theta} + \pi_{20A} \dot{\alpha} - \pi_{24A} \dot{Y}_4 \quad (3.53)$$

$$\ddot{\alpha} = \pi_{21} z_3 - \pi_{21} z_4 + \pi_{22} \alpha + \pi_{21A} \dot{z}_3 - \pi_{21A} \dot{z}_4 + \pi_{22A} \dot{\alpha} \quad (3.54)$$

Las ecuaciones para el vehículo tipo T2S1, quedan de la siguiente manera

$$\ddot{z}_0 = -\pi_{42} z_0 - \pi_{43} z_T + \pi_{44} \phi + \pi_Y Y_0 - \pi_{42A} \dot{z}_0 - \pi_{43A} \dot{z}_T + \pi_{44A} \dot{\phi} + \pi_{YA} \dot{Y}_0 \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_T = & \pi_{27} z_0 - \pi_{24} z_T + \pi_{28} z_1 + \pi_{25} \phi + \pi_{29} z_2 - \pi_{26} \theta + \pi_{27A} \dot{z}_0 - \pi_{24A} \dot{z}_T + \pi_{28A} \dot{z}_1 + \pi_{25A} \dot{\phi} \\ & + \pi_{29A} \dot{z}_2 - \pi_{26A} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$\ddot{z}_1 = \pi_{46} z_T - \pi_{45} z_1 + \pi_{47} \phi + \pi_V Y_1 + \pi_{46A} \dot{z}_T - \pi_{45A} \dot{z}_1 + \pi_{47A} \dot{\phi} + \pi_{VA} \dot{Y}_1 \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} = & -\pi_{38} z_0 + \pi_{36} z_T - \pi_{39} z_1 - \pi_{37} \phi + \pi_{40} z_2 - \pi_{41} \theta - \pi_{38A} \dot{z}_0 + \pi_{36A} \dot{z}_T - \pi_{39A} \dot{z}_1 - \pi_{37A} \dot{\phi} \\ & + \pi_{40A} \dot{z}_2 - \pi_{41A} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$\ddot{z}_2 = \pi_{49}z_T + \pi_{50}\dot{\phi} - \pi_{48}z_2 + \pi_{51}\dot{\theta} + \pi_W Y_2 + \pi_{49A}z_T + \pi_{50A}\dot{\phi} - \pi_{48A}z_2 + \pi_{51A}\dot{\theta} + \pi_{WA}\dot{Y}_2 \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -\pi_{34}z_0 + \pi_{30}z_T - \pi_{35}z_1 - \pi_{31}\dot{\phi} + \pi_{33}z_2 - \pi_{32}\dot{\theta} - \pi_{34A}z_0 + \pi_{30A}z_T - \pi_{35A}z_1 - \pi_{31A}\dot{\phi} \\ & + \pi_{33A}z_2 - \pi_{32A}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Las ecuaciones para el vehículo tipo T3S2, quedan de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \ddot{\omega} = & -\pi_{66}\omega + \pi_{64}z_I + \pi_{67}\dot{\phi} + \pi_{65}z_T + \pi_{203}Y_1 + \pi_{202}Y_2 - \pi_{66A}\omega + \pi_{64A}z_I + \pi_{67A}\dot{\phi} + \pi_{65A}z_T \\ & + \pi_{203A}Y_1 + \pi_{202A}Y_2 \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\ddot{z}_I = -\pi_{61}\omega - \pi_{62}z_I + \pi_{63}\dot{\phi} + \pi_{60}z_T + \pi_{201}Y_2 - \pi_{61A}\omega - \pi_{62A}z_I + \pi_{63A}\dot{\phi} + \pi_{60A}z_T + \pi_{201A}Y_2 \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} = & -\pi_{52}z_I - \pi_{53}\omega - \pi_{50}\dot{\phi} - \pi_{51}z_0 + \pi_{49}z_T + \pi_{54}z_3 + \pi_{55}z_4 - \pi_{56}\dot{\theta} \\ & - \pi_{52A}z_I - \pi_{53A}\omega - \pi_{50A}\dot{\phi} - \pi_{51A}z_0 + \pi_{49A}z_T + \pi_{54A}z_3 + \pi_{55A}z_4 - \pi_{56A}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$\ddot{z}_0 = -\pi_{59}\dot{\phi} - \pi_{57}z_0 + \pi_{58}z_T + \pi_{200}Y_0 - \pi_{59A}\dot{\phi} - \pi_{57A}z_0 + \pi_{58A}z_T + \pi_{200A}Y_0 \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_T = & \pi_{37}\omega + \pi_{38}z_I + \pi_{34}\dot{\phi} + \pi_{36}z_0 - \pi_{33}z_T + \pi_{39}z_3 + \pi_{40}z_4 - \pi_{35}\dot{\theta} \\ & - \pi_{37A}\omega + \pi_{38A}z_I + \pi_{34A}\dot{\phi} + \pi_{36A}z_0 - \pi_{33A}z_T + \pi_{39A}z_3 + \pi_{40A}z_4 - \pi_{35A}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\ddot{z}_3 = \pi_{70}\dot{\phi} + \pi_{69}z_T - \pi_{68}z_3 - \pi_{72}\alpha + \pi_{71}\dot{\theta} + \pi_{70A}\dot{\phi} + \pi_{69A}z_T - \pi_{68A}z_3 - \pi_{72A}\alpha + \pi_{71A}\dot{\theta} \quad (3.66)$$

$$\ddot{\alpha} = -\pi_{77}z_3 - \pi_{78}\alpha + \pi_{77}z_4 - \pi_{77A}z_3 - \pi_{78A}\alpha + \pi_{77A}z_4 \quad (3.67)$$

$$\ddot{z}_4 = \pi_{75}\dot{\phi} + \pi_{74}z_T + \pi_{76}\alpha - \pi_{73}z_4 + \pi_{76}\dot{\theta} + \pi_{75A}\dot{\phi} + \pi_{74A}z_T + \pi_{76A}\alpha - \pi_{73A}z_4 + \pi_{76A}\dot{\theta} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -\pi_{47}\omega - \pi_{48}z_I - \pi_{42}\dot{\phi} - \pi_{46}z_0 + \pi_{41}z_T + \pi_{44}z_3 + \pi_{45}z_4 - \pi_{43}\dot{\theta} \\ & - \pi_{47A}\omega - \pi_{48A}z_I - \pi_{42A}\dot{\phi} - \pi_{46A}z_0 + \pi_{41A}z_T + \pi_{44A}z_3 + \pi_{45A}z_4 - \pi_{43A}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Las ecuaciones para el vehículo tipo T3S3, quedan de la siguiente manera

$$\ddot{z}_4 = \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_T + \kappa_4 \dot{\theta} + \pi_3 \dot{\phi} - \kappa_5 \alpha + \kappa_5 \beta + \kappa_1 z_4 + \kappa_2 z_T + \kappa_4 \dot{\theta} + \kappa_3 \dot{\phi} - \kappa_5 \alpha + \kappa_5 \beta \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_T = & \kappa_4 z_4 - \kappa_{33}\kappa z_T - \kappa_{35}\dot{\theta} + \pi_{34}\dot{\phi} + \kappa_{36}z_0 + \kappa_{38}z_I + \kappa_{37}\omega + \kappa_{39}z_3 + \kappa_Z z_5 + \\ & \kappa_{4A}z_4 - \kappa_{33A}z_T - \kappa_{35A}\dot{\theta} + \pi_{34A}\dot{\phi} + \kappa_{36A}z_0 + \kappa_{38A}z_I + \kappa_{37A}\omega + \kappa_{39A}z_3 + \kappa_{ZA}z_5 \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & \kappa_{45}z_4 + \kappa_{41}z_T - \kappa_{43}\dot{\theta} - \pi_{42}\dot{\phi} - \kappa_{46}z_0 - \kappa_{48}z_I - \kappa_{47}\omega + \kappa_{44}z_3 + \kappa_{ZZ}z_5 + \\ & \kappa_{45A}z_4 + \kappa_{41A}z_T - \kappa_{43A}\dot{\theta} - \pi_{42A}\dot{\phi} - \kappa_{46A}z_0 - \kappa_{48A}z_I - \kappa_{47A}\omega + \kappa_{44A}z_3 + \kappa_{ZZA}z_5 \end{aligned} \quad (3.72)$$



$$\ddot{\phi} = \kappa_{55} z_4 + \kappa_{49} z_T - \kappa_{56} \theta - \pi_{50} \dot{\phi} - \kappa_{51} z_0 - \kappa_{53} z_I - \kappa_{52} \omega + \kappa_{54} z_3 + \kappa_{XX} z_5 + \kappa_{55A} \dot{z}_4 + \kappa_{49A} \dot{z}_T - \kappa_{56A} \dot{\theta} - \pi_{50A} \dot{\phi} - \kappa_{51A} \dot{z}_0 - \kappa_{53A} \dot{z}_I - \kappa_{52A} \dot{\omega} + \kappa_{54A} \dot{z}_3 + \kappa_{XXA} \dot{z}_5 \quad (3.73)$$

$$\ddot{z}_0 = \kappa_{58} z_T - \kappa_{59} \theta - \kappa_{57} z_0 + \pi_{200} Y_0 + \kappa_{58A} \dot{z}_T - \kappa_{59A} \dot{\theta} - \kappa_{57A} \dot{z}_0 + \pi_{200A} \dot{Y}_0 \quad (3.74)$$

$$\ddot{z}_I = \kappa_{60} z_T - \kappa_{63} \phi - \kappa_{62} z_I - \kappa_{61} \omega + \pi_{201} Y_2 + \kappa_{60A} \dot{z}_T - \kappa_{63A} \dot{\phi} - \kappa_{62A} \dot{z}_I - \kappa_{61A} \dot{\omega} + \pi_{201A} \dot{Y}_2 \quad (3.75)$$

$$\ddot{\omega} = \kappa_{65} z_T + \kappa_{67} \phi + \kappa_{64} z_I - \kappa_{66} \omega + \pi_{203} Y_1 + \pi_{202} Y_2 + \kappa_{65A} \dot{z}_T + \kappa_{67A} \dot{\phi} + \kappa_{64A} \dot{z}_I - \kappa_{66A} \dot{\omega} + \pi_{203A} \dot{Y}_1 + \pi_{202A} \dot{Y}_2 \quad (3.76)$$

$$\ddot{z}_3 = \kappa_{69} z_T + \kappa_{71} \theta + \kappa_{70} \phi - \kappa_{68} z_3 - \kappa_{72} \alpha + \kappa_{69A} \dot{z}_T + \kappa_{71A} \dot{\theta} + \kappa_{70A} \dot{\phi} - \kappa_{68A} \dot{z}_3 - \kappa_{72A} \dot{\alpha} + \pi_{204} \dot{Y}_3 + \pi_{204A} \dot{Y}_3 \quad (3.77)$$

$$\ddot{z}_5 = \kappa_{74} z_T + \kappa_{76} \theta + \kappa_{75} \phi - \kappa_{73} z_5 + \kappa_{7XX} \beta + \kappa_{74A} \dot{z}_T + \kappa_{76A} \dot{\theta} + \kappa_{75A} \dot{\phi} - \kappa_{73A} \dot{z}_5 - \kappa_{7XXA} \dot{\beta} + \pi_{205} \dot{Y}_5 + \pi_{205A} \dot{Y}_5 \quad (3.78)$$

$$\ddot{\alpha} = \pi_{77} z_4 - \pi_{77} z_3 - \pi_{78} \alpha + \pi_{77A} \dot{z}_4 - \pi_{77A} \dot{z}_3 - \pi_{78A} \dot{\alpha} \quad (3.79)$$

$$\ddot{\beta} = -\kappa_6 z_4 - \kappa_6 z_5 - \kappa_7 \beta - \kappa_{6A} \dot{z}_4 - \kappa_{6A} \dot{z}_5 - \kappa_{7A} \dot{\beta} \quad (3.80)$$

donde, al igual que en las ecuaciones anteriores, las constantes quedan en función de las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los componentes, así como de las propiedades de masa y dimensiones.

### 3.3 Modelo de pavimento

La Figura 3.9 ilustra el modelo de pavimento empleado en esta tesis, consistente de un conjunto de ladrillos asfálticos no acoplados, sometidos a una carga de llanta a la vez. El concepto que se puede integrar en el modelo corresponde a la energía de deformación, la cual se almacena de manera transitoria en el pavimento durante del paso de las llantas de los vehículos. Las propiedades que se pueden incorporar en el modelo corresponden a la temperatura del pavimento, rigidez dinámica (en función del tiempo de permanencia del vehículo en el ladrillo), así como otras propiedades estructurales del material, tal como el porcentaje de huecos o su viscosidad.

De acuerdo a este modelo, la energía de deformación dependerá de las propiedades viscoelásticas del material, las cuales dependerán básicamente de la temperatura del material y de la velocidad de aplicación de la carga.

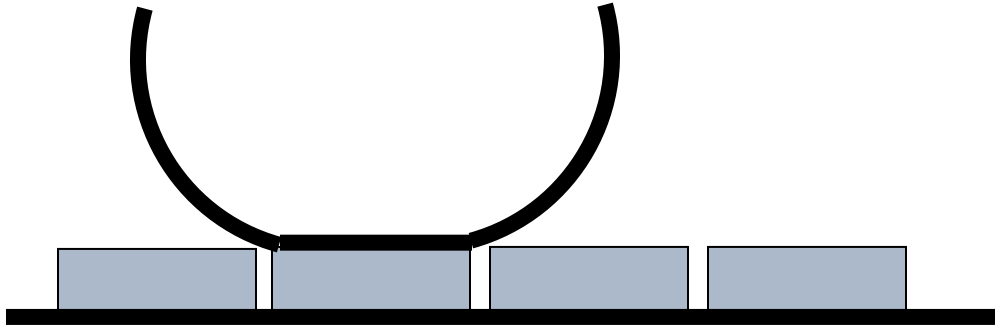


Figura 3.9 Modelo de pavimento discreto con propiedades viscoelásticas (rigidez dinámica)(Romero et al., 2013)

# Capítulo 4 Desarrollo de los Algoritmos para la Visualización

---

## 4.1 Algoritmo del programa

El programa fue diseñado de forma secuencial, muy parecido al asistente de instalación de programas; porque es un tipo de programa con el que la mayoría de los usuarios están familiarizados. Hay botones “Atrás”, “Siguiente”, “Guardar”, “Ayuda” y “Cancelar”. De esta manera se lleva la secuencia adecuada para evitar errores y que el programa sea fácil de usar. Se incluyen la ayuda en cada una de las secciones, en donde se explica la función de cada una de ellas y la manera en que el usuario puede navegar por el programa.

## 4.2 El programa: Perspectiva de usuario

La secuencia del programa está ordenada de manera que no se puede acceder a las últimas secciones si no se han completado las primeras, tal y como sucede en los videojuegos. Esto ayuda a evitar errores por no haber editado adecuadamente cada una de las secciones del programa. Una vez que se ha completado una sección, ya se puede acceder a la siguiente. Cuando se terminen todas las partes del programa, el usuario podrá acceder a cada una de estas en cualquier orden. De esta manera hay una mejor interacción con el programa y se pueden estar cambiando los parámetros para probar los resultados con diferentes valores.

El diagrama de la Figura 4.1 muestra, en resumen, la secuencia que el usuario tiene que seguir para poder hacer la simulación de los vehículos, comenzando con “INICIO”, que es cuando abre el programa.

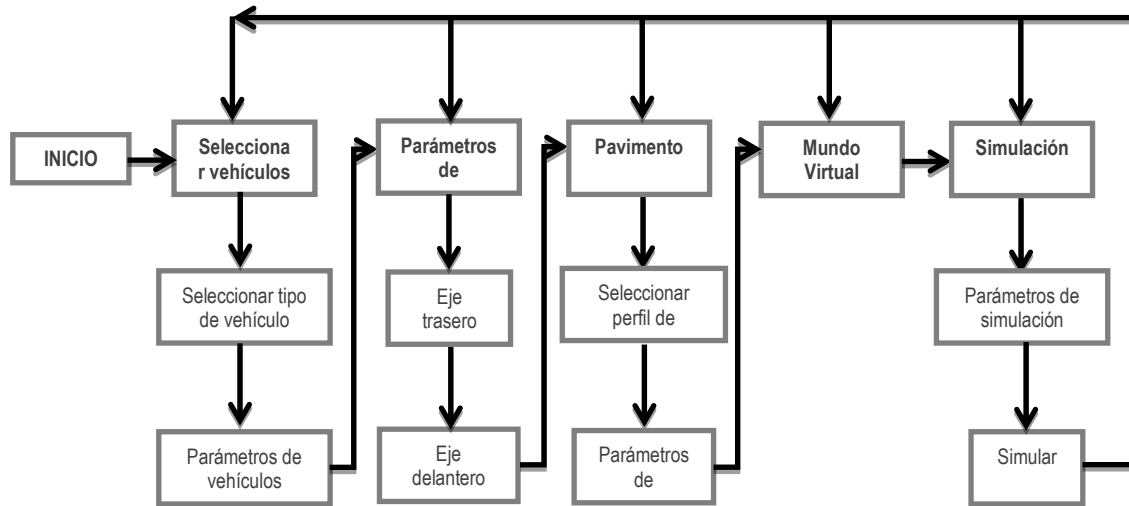


Figura 4.1 Diagrama de estructura del programa de visualización.

El programa está dividido en cinco partes principales, Figura 4.2. Cada parte cumple con una tarea específica. A su vez, cada parte está dividida en un número de secciones que dependen del tipo de vehículo que se seleccionó.

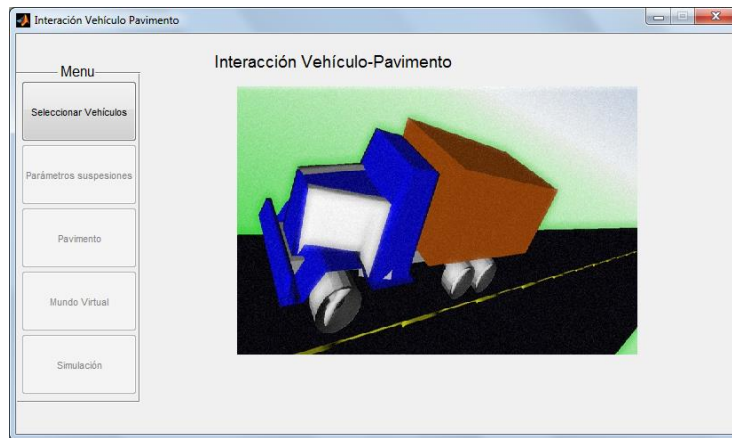


Figura 4.2 Pantalla principal del programa.

La primera parte es **Seleccionar vehículos**, Figura 4.3. En esta parte se selecciona el tipo de vehículo que se quiere simular: C2, C3, T2S, T3S2 o T3S3.

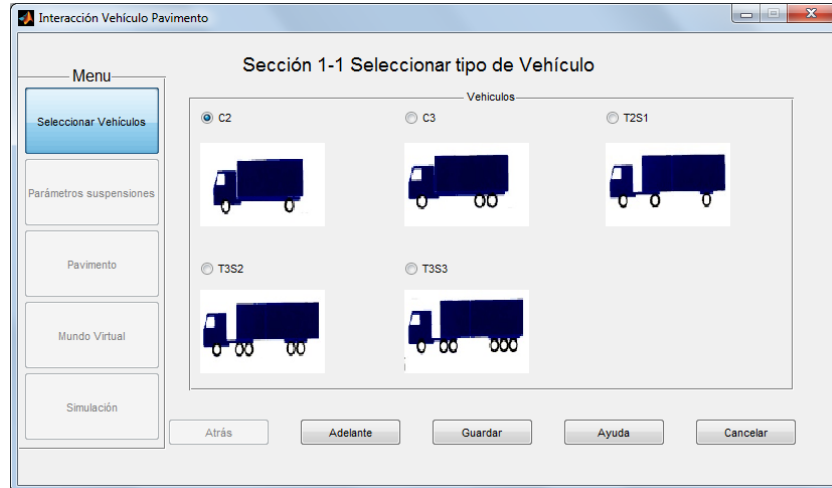


Figura 4.3 Pantalla de selección del tipo de vehículo por simular.

También, en esta misma parte, se escriben los parámetros generales de los vehículos, Figura 4.4. Los parámetros son los siguientes:

- Dimensiones del vehículo
- Masa total del vehículo
- Momento de inercia del vehículo
- Número de ejes del vehículo

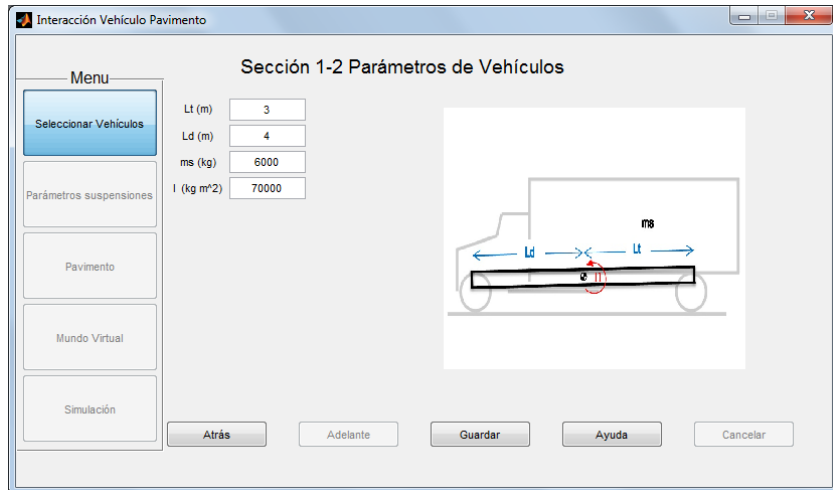


Figura 4.4 Pantalla de configuración del vehículo por cuanto a las propiedades dimensionales.

La siguiente parte es **Parámetros de suspensiones**. El número de secciones de esta parte depende de qué vehículo se ha seleccionado. En la primera sección se escriben los parámetros del primer eje, empezando por el trasero y terminando con el delantero, Figura 4.5, los parámetros que hay que escribir en esta sección son:

- Constantes de rigidez de la suspensión
- Constantes de rigidez de la llanta
- Constantes de amortiguamiento de la suspensión
- Masa de cada eje

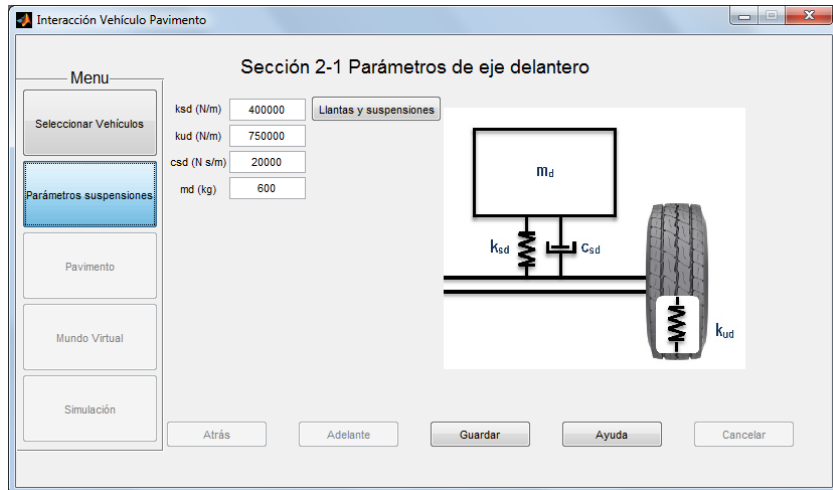


Figura 4.5 Pantalla de captura de datos de las constantes de rigidez y de inercia.

La siguiente parte es **Pavimento**. En esta sección se selecciona el perfil de pavimento. En la primera sección se muestra dos formas de seleccionar el pavimento, Figura 4.6. La primera opción es cargar un archivo .txt que contenga los datos del perfil. La segunda opción es elegir un perfil que el programa ya tiene cargado con un IR “Alto”, “Medio” o “Bajo”.

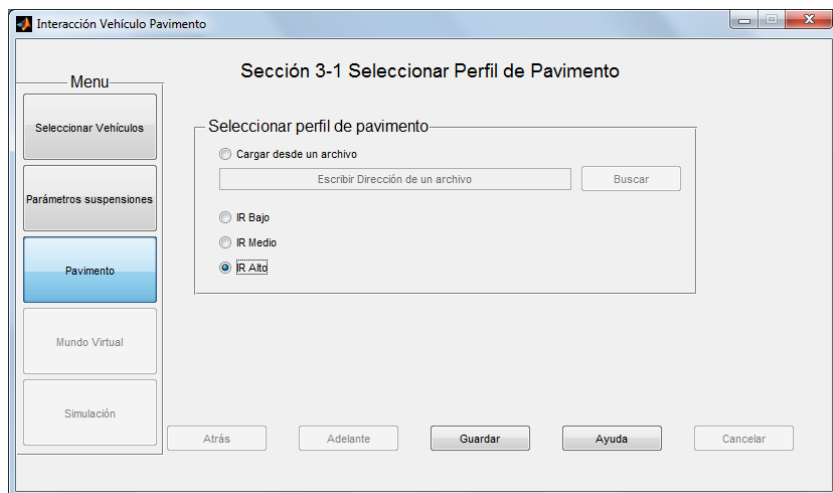


Figura 4.6 Pantalla de captura del perfil del pavimento.

En esa misma sección se requiere introducir la distancia entre muestras del perfil del pavimento, Figura 4.7. También se visualiza la forma del perfil de pavimento.

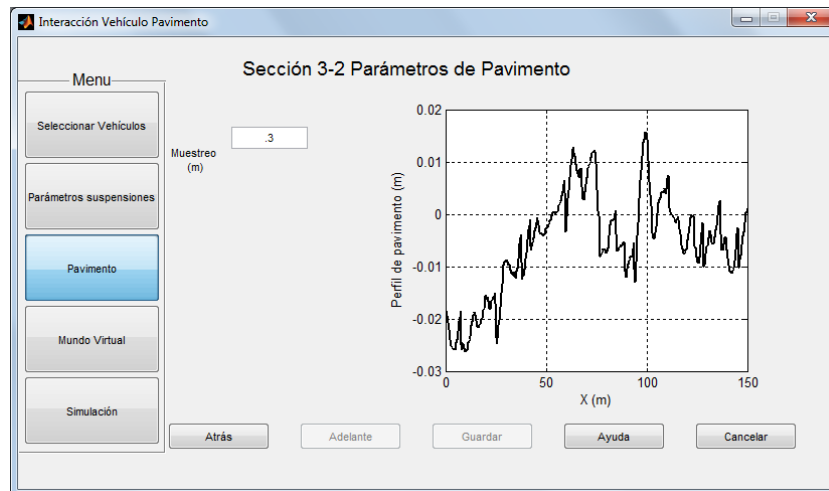


Figura 4.7 Pantalla de visualización del perfil del pavimento como perturbación.

La siguiente sección es **Mundo Virtual**. Esta sección es para cargar el Mundo Virtual, de acuerdo al tipo de vehículo que el usuario haya elegido, Figura 4.8



Figura 4.8 Pantalla de simulación.

La última parte es **Simulación y Visualización**. Esta parte es para visualizar la respuesta del vehículo de acuerdo a la edición de parámetros que se hizo en cada



una de las secciones. Aquí se pueden obtener los resultados del daño y el movimiento de las masas y guardar esos datos en un archivo .txt, Figura 4.9

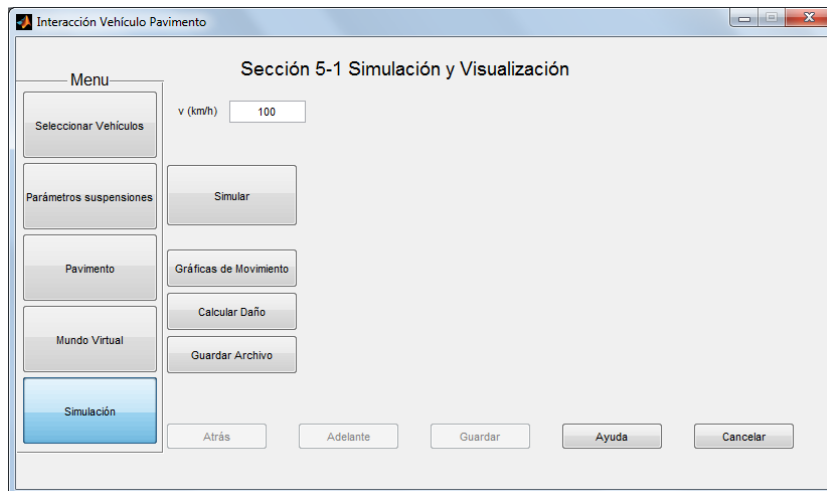


Figura 4.9 Pantalla de simulación y visualización.

En las **gráficas de movimiento** el usuario puede ver la vibración de las masas y de los ejes y una comparación de estos con el perfil del pavimento, Figura 4.10.

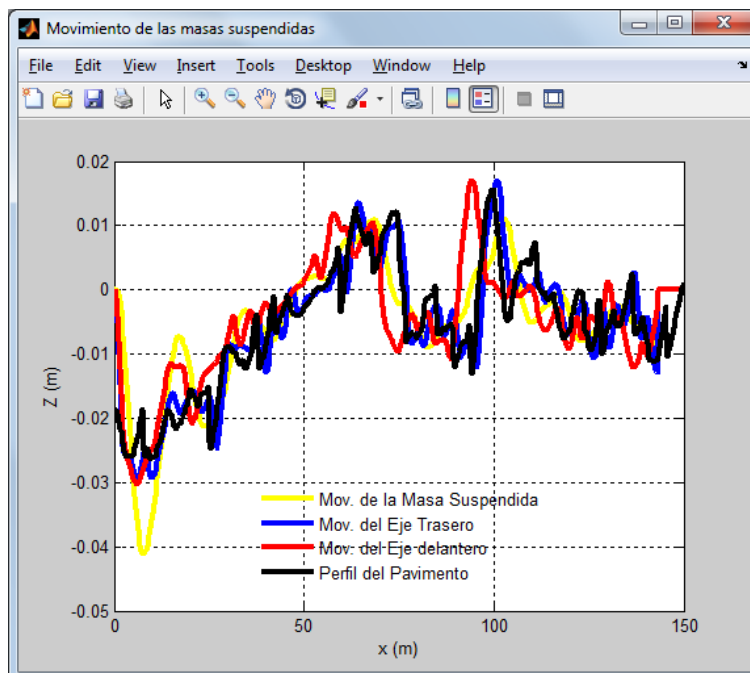


Figura 4.10 Despliegue gráfico de resultados

En la **medición del daño** se muestra una gráfica de espectro de colores. Las bandas de colores son una medida del daño que el camión simulado le causó al perfil de pavimento seleccionado. En color azul están los puntos menos dañados, mientras que en color rojo oscuro están los puntos más vulnerados, Figura 4.11.

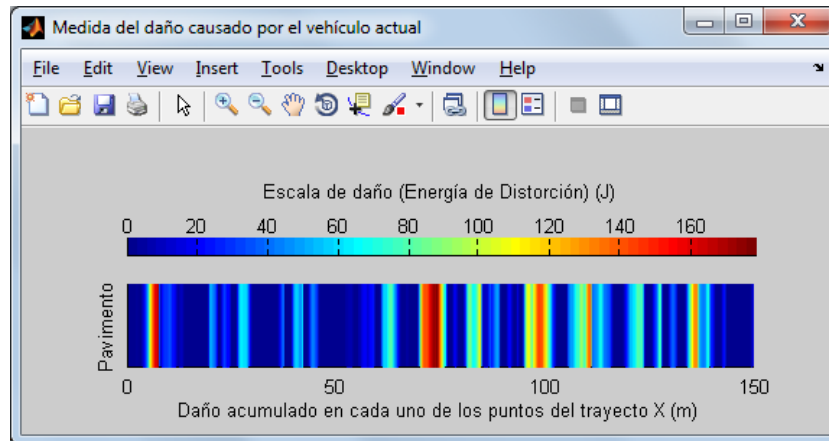


Figura 4.11 Pantalla del daño potencial causado al pavimento por el paso del vehículo simulado.

### 4.3 El programa: Perspectiva de programación

Internamente, el programa está formado por varias funciones creadas en Matlab. En el diagrama de la Figura 4.12 se trata de representar de forma general la interacción de estas funciones dentro del programa.

Como se muestra en el diagrama, todo empieza desde la **Interfaz** de usuario. Todos los parámetros que se escribieron y se guardaron se encuentran en esta parte.

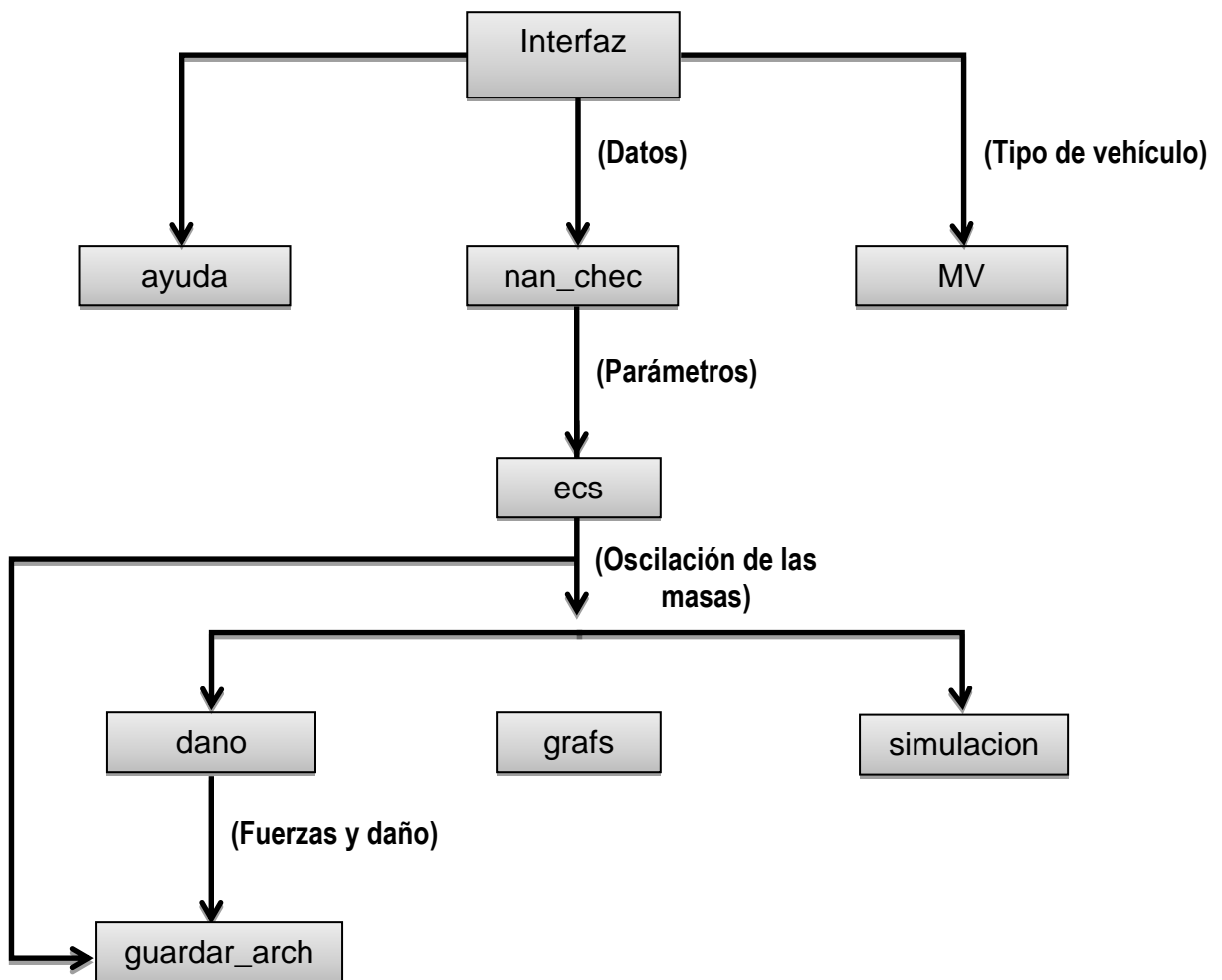


Figura 4.12 Diagrama de estructura del programa.

Cuando el usuario presiona el botón “Ayuda”, el programa busca la función **ayuda** para regresar una respuesta a esa petición, Figura 4.13.

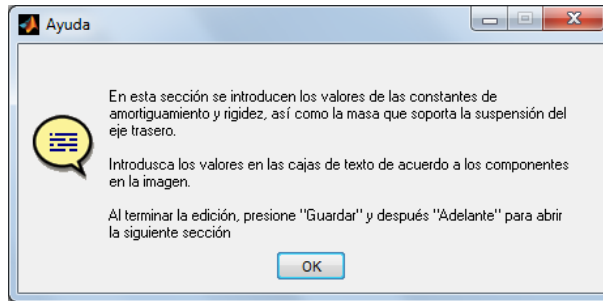


Figura 4.13 Pantalla de ayuda del programa.

El tipo de camión es una información que es tomada por la función **MV**, que es la función para abrir el Mundo Virtual; y, de acuerdo al camión seleccionado, la función se encarga de visualizar el camión correspondiente. Otros datos que también son tomados de la interfaz de usuario son los parámetros de las suspensiones, ejes, masas, etc. Estos datos los ocupa la función **ecs** para hacer los cálculos de las vibraciones de las masas. Los datos, antes de entrar a esta función, entran a otra función llamada **nan\_chec** que se encarga de checar si los datos que escribió el usuario son números y no otros caracteres, o cero, que pueda provocar errores de procesamiento. Ésta misma función, en caso de que el usuario haya introducido un “no numero” (“nan” en lenguaje de Matlab) manda llamar una ventana de error de que se introdujo un valor no aceptable en las cajas de texto, Figura 4.14

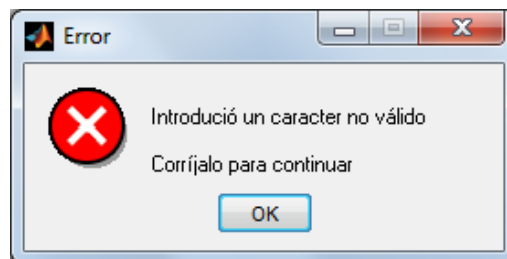


Figura 4.14 Pantalla de error en la captura de datos.

La función `ecs` regresa una matriz, cuyos valores son las oscilaciones de las masas. Esos datos se usan para calcular el daño (función `dano`), graficar el movimiento de las masas a lo largo del trayecto (función `grafs`) y para hacer la visualización de la respuesta dinámica (función `simulacion`).

Por último tenemos a la función `guardar_arch` que se encarga de crear un archivo `.txt` con los datos de oscilaciones y velocidades de las masas suspendidas, y la medición del daño al pavimento en cada muestra del perfil, Figura 4.15.

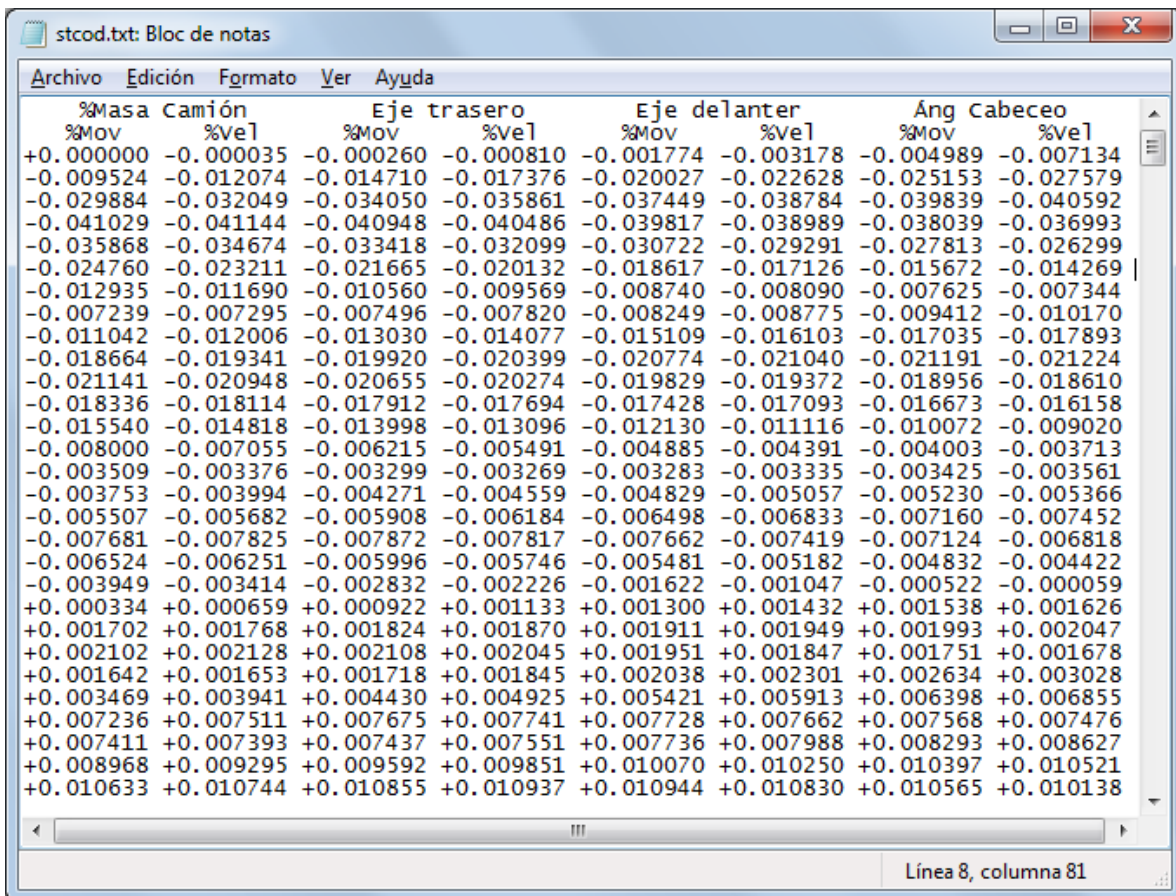


Figura 4.15 Pantalla de despliegue de resultados.

## Pseudocódigo

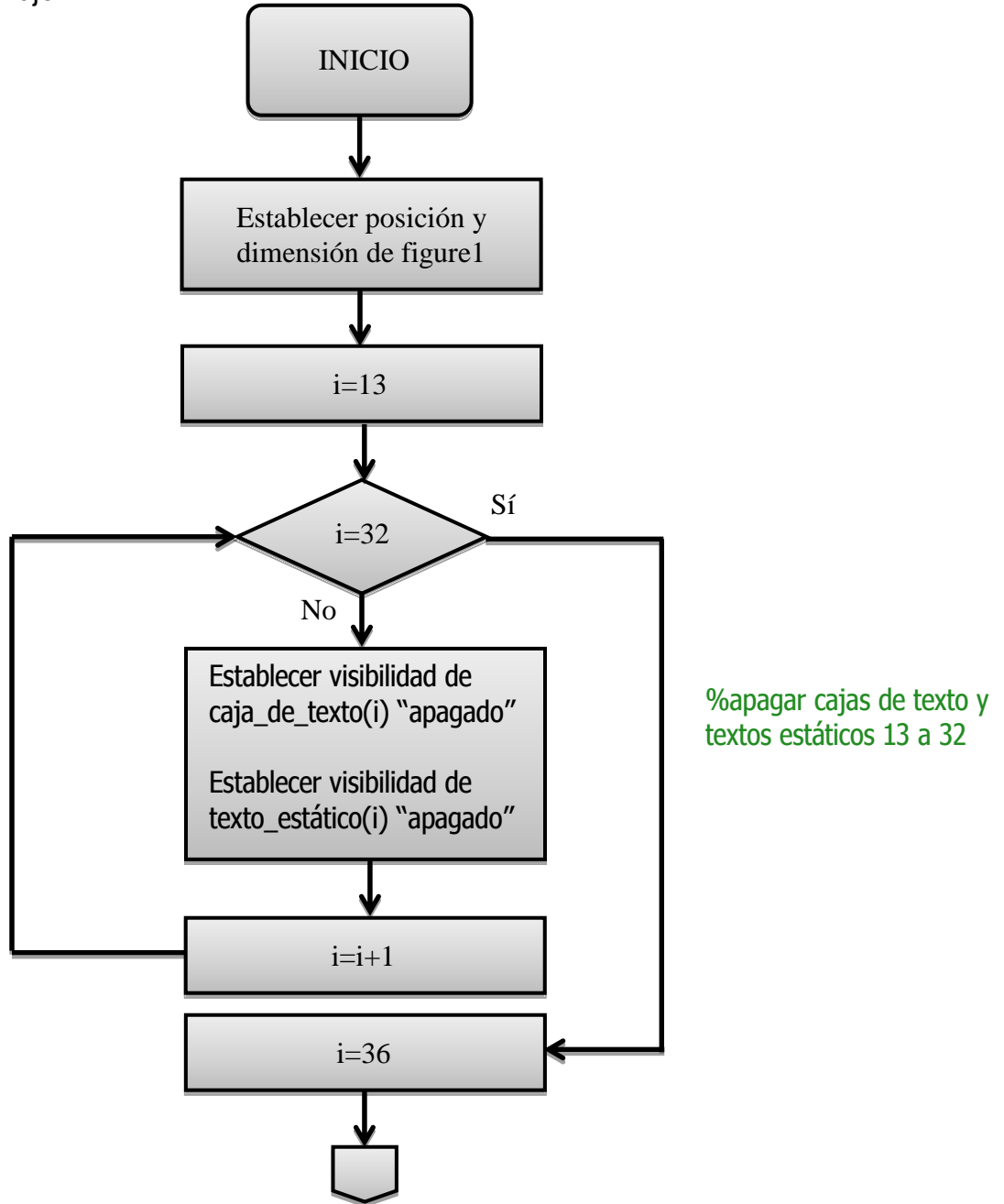
El cuerpo principal del programa es el código que se ejecuta durante el uso del programa. Éste tiene el conjunto de funciones creadas para el GUI que se diseñó.

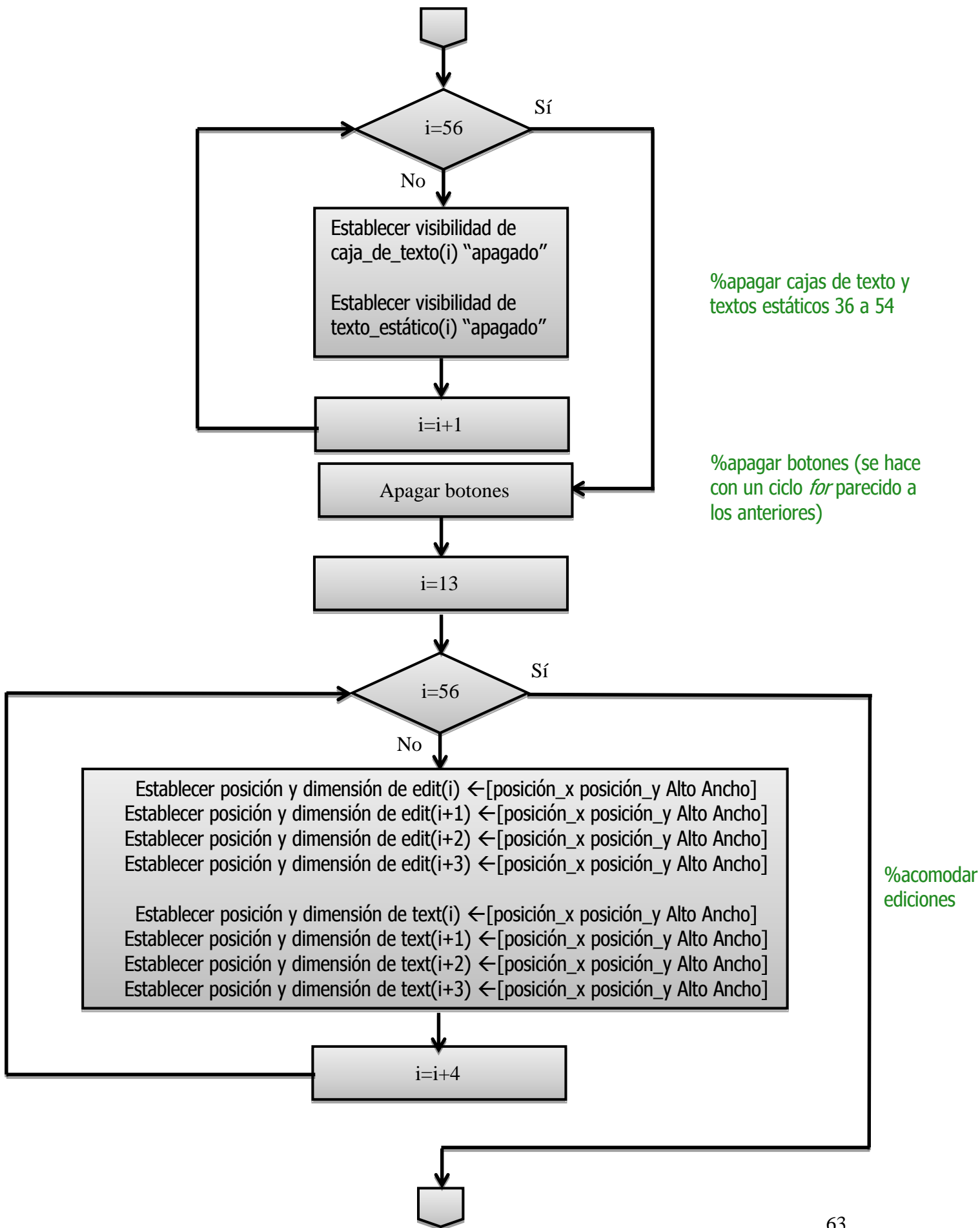
## Función de Inicio

---

El siguiente código se ejecuta justo antes de que aparezca la ventana de inicio Gui

Diagrama de flujo





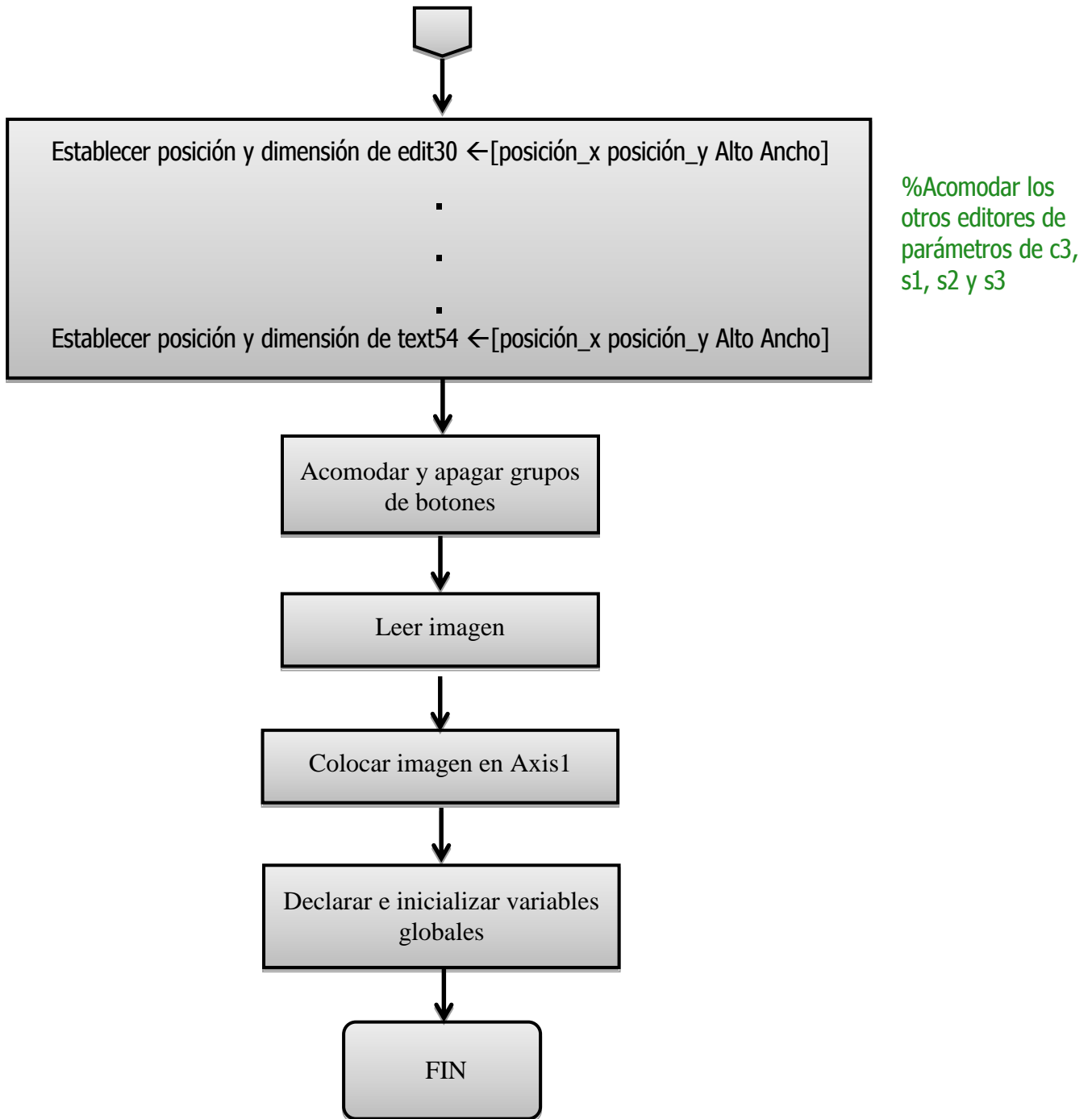


Figura 4.16 Diagrama de función de inicio



Pseudocódigo (líneas 48 hasta 176)

% --- Executes just before cam\_pv is made visible.

función cam\_pv\_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%redimensionar la interfaz

Establecer posición y dimensión de figure1 ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

%apagar cajas de texto y textos estáticos 13 a 32

para i=13 hasta i=32, incrementos de 1

Establecer visibilidad de caja\_de\_texto(i) "apagado"

Establecer visibilidad de texto\_estático(i) "apagado"

fin

%apagar cajas de texto y textos estáticos 36 a 54

para i=36 hasta i=54, incrementos de 1

if i==51

i=i+1; % saltarse el elemento 51, para evitar errores porque no existe

fin

Establecer visibilidad de caja\_de\_texto(i) "apagado"

Establecer visibilidad de texto\_estático(i) "apagado"

fin

%apagar botones

para i=3 hasta i=12, incrementos de 1

Establecer visibilidad de pushbutton(i) "apagado"

fin

%acomodar ediciones de c2

para i=13 hasta i=29, incrementos de 4

%cajas de texto

Establecer posición y dimensión de edit(i) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de edit(i+1) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de edit(i+2) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de edit(i+3) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

%textos estáticos

Establecer posición y dimensión de text(i) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de text(i+1) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de text(i+2) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de text(i+3) ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

fin

%Acomodar los otros editores de parámetros de c3, s1, s2 y s3

Establecer posición y dimensión de edit30 ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer posición y dimensión de text30 ← [posición\_x posición\_y Alto Ancho]

- 
- 
- 

Establecer posición y dimensión de edit54 ←[posición\_x posición\_y Alto Ancho]  
 Establecer posición y dimensión de text54 ←[posición\_x posición\_y Alto Ancho]

### %Acomodar grupos de botones

Establecer visibilidad de uipanel2 "apagado"  
 Establecer visibilidad de uipanel3 "apagado"  
 Establecer posición y dimensión de uipanel2 ←[posición\_x posición\_y Alto Ancho]

### %Imagen que aparece en la ventana de inicio

Manipular axes1  
 Imágen en axes1 escalada (leer\_imágen('presentacion.jpg'))  
 Apagar ejes

### %apagar axis'

Manipular axes2  
 Apagar ejes

- 
- 
- 

Manipular axes6  
 Apagar ejes

**Variables globales** parametros veh fig\_mv fig vropen pav\_file avnz\_pav grfs1 grfs2 dan\_fig A B  
 lenght\_est;

### %inicialización de variables globales

```
lenght_est=0;%longitud total del carro (usado en estacionamiento)
pav_file=0;%Indicador de qué perfil de pavimento se selecciona
vropen=1;%para que no se vuelva a abrir el mundo virtual al presionar el boton "mundo virtual"
fig_mv=0;%para que no se vuelva a abrir el mundo virtual al presionar el boton "mundo virtual"
parametros=ones(1,100);%aquí se guardan los valores de los parametros de los vehiculos
veh=0;%para guardar la imagen del vehiculo que se escoge
avnz_pav=0;%para no tener problema de avance al acceder a sección 3-2
grfs1=arreglo vacío;
grfs2= arreglo vacío;
dan_fig= arreglo vacío;
A= arreglo vacío;
B= arreglo vacío;
```

## Funciones de Cajas de Texto

---

El siguiente código es para obtener la información que se escribe en todas las cajas de texto (líneas 541 a 676)

**función** edit13\_Callback(hObject, eventdata, handles)

**h**=Manipulación de edit13;

**a**=convertir string a double de (obtener(**h**, 'string'));

nan\_chec(**a**,(**h**),(handles.pushbutton5));%llamado de la función nan\_chec(), que es un filtro de caracteres numéricos.

▪  
▪  
▪

**función** edit55\_Callback(hObject, eventdata, handles)

**h**= Manipulación de edit55;

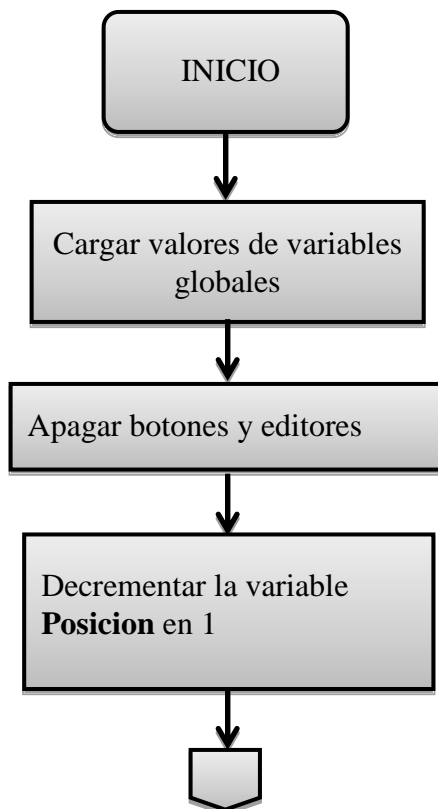
**a**= convertir string a double de (obtener lo que está escrito en **h**);

chechar si es un número mayor que cero(**a**,(**h**),(handles.pushbutton5));

## Función de botón Atrás

---

Diagrama de flujo



%apagar botones y editores se hace con varios ciclos *for* que ya se describieron en otras funciones

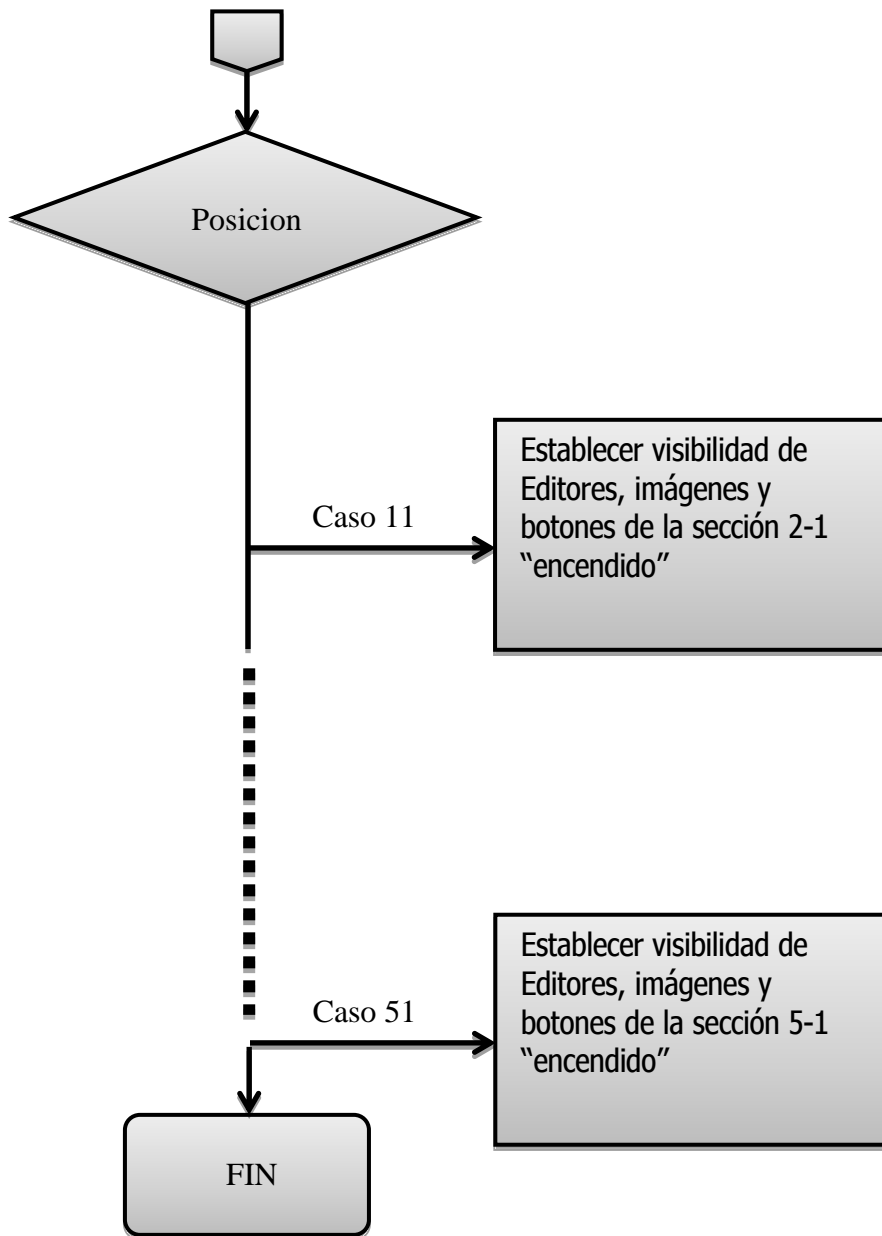


Figura 4.17 Diagrama de Botón Atrás

Pseudocódigo (líneas 680 a 876)

%.....atrás

función pushbutton3\_Callback(hObject, eventdata, handles)

Variables globales posicion veh pav\_file

%apagar cajas de texto y textos estáticos 13 a 32

para i=13 hasta i=32, incrementos de 1

Establecer visibilidad de caja\_de\_texto(i) "apagado"

Establecer visibilidad de texto\_estático(i) "apagado"

fin

%apagar cajas de texto y textos estáticos 36 a 54

para i=36 hasta i=54, incrementos de 1

if i==51

i=i+1; % saltarse el element 51 para evitar errores porque no existe

fin

Establecer visibilidad de caja\_de\_texto(i) "apagado"

Establecer visibilidad de texto\_estático(i) "apagado"

fin

%apagar botones

para i=3 hasta i=12, incrementos de 1

Establecer visibilidad de pushbutton(i) "apagado"

fin

decrementar **posicion** en 1

según **posicion**

caso 11

Establecer visibilidad de edit17 "encendido"

Establecer visibilidad de edit18 "encendido"

Establecer visibilidad de edit19 "encendido"

Establecer visibilidad de edit20 "encendido"

Establecer visibilidad de text17 "encendido"

Establecer visibilidad de text18 "encendido"

Establecer visibilidad de text19 "encendido"

Establecer visibilidad de text20 "encendido"

Establecer visibilidad de pushbutton3 "encendido"

Establecer visibilidad de pushbutton4 "encendido"

Establecer visibilidad de pushbutton5 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton6 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton9 "encendido"

Establecer habilitación de pushbutton3 "apagado"  
Establecer habilitación de pushbutton4 "encendido"

Establecer cadena de texto de text33 'Sección 2-1 Parámetros de eje delantero'

Manipular axes1  
Imágen en axes1 escalada(Leer\_imágen('sus\_d.jpg'))  
Apagar ejes

- 
- 
- 

#### caso 51

limpiar axes(manipular.axes1);  
apagar ejes

Establecer visibilidad de uipanel3 "encendido"

Establecer visibilidad de pushbutton3 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton4 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton5 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton6 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton9 "encendido"  
Establecer visibilidad de uipanel2 "encendido"

Establecer habilitación de pushbutton3 "apagado"  
Establecer habilitación de pushbutton4 "encendido"  
Establecer habilitación de pushbutton9 "encendido"

Establecer visibilidad de edit29 "encendido"  
Establecer visibilidad de text22 "encendido"

Establecer posición y dimensión de edit29 ←[posición\_x posición\_y Alto Ancho]  
Establecer posición y dimensión de uipanel3←[posición\_x posición\_y Alto Ancho]

Establecer visibilidad de pushbutton10 "encendido"

Establecer habilitación de edit29 "apagado"  
Establecer habilitación de pushbutton10 "apagado"

Establecer cadena de texto de text33 'Sección 3-1 Seleccionar perfil de Pavimento'

Si pav\_file==1  
Establecer habilitación de edit29 "encendido"  
Establecer habilitación de pushbutton10 "encendido"  
fin

Establecer visibilidad de pushbutton3 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton4 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton5 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton6 "encendido"  
Establecer visibilidad de pushbutton9 "encendido"

Establecer habilitación de pushbutton3 "apagado"  
Establecer habilitación de pushbutton4 "encendido"  
Establecer habilitación de pushbutton9 "apagado"

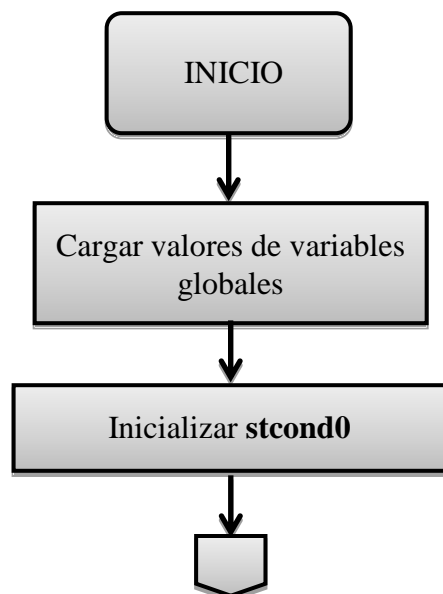
fin

## **Función de botón Guardar (Parámetros)**

---

El siguiente código se ejecuta cuando se presiona el botón "Guardar"

Diagrama de flujo



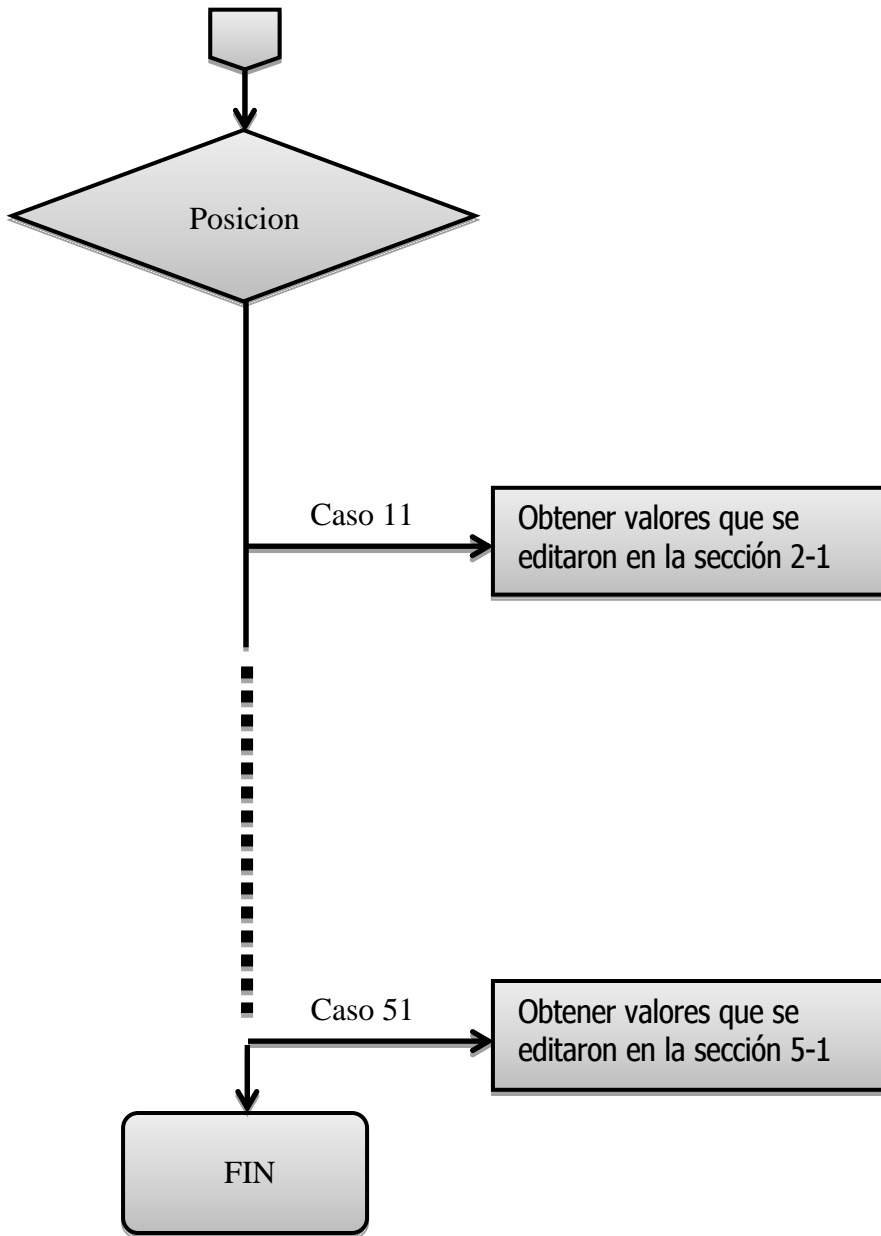


Figura 4.18 Diagrama de Botón Guardar



Pseudocódigo (líneas 1177 a 1281)

función pushbutton5\_Callback(hObject, eventdata, handles)

Variables globales posicion parametros stcond0 t carretera pav\_file avnz\_pav veh A B lenght\_est  
stcond0=arreglo de ceros (500,8); %%Matriz donde se guardan los movimientos de las masas  
según posicion

caso 11%%.....Parametros delanteros

parametros(elemento5)=convertir carácter-double(obtener(caracteres de edit17))  
parametros(elemento6)=convertir carácter-double(obtener(caracteres de edit18))  
parametros(elemento7)=convertir carácter-double(obtener(caracteres de edit19))  
parametros(elemento8)= convertir carácter-double(obtener(caracteres de edit20))  
Establecer habilitación de pushbutton4 "encendido"

- 
- 
- 

caso 51

avnz\_pav=1;%%habilitar adelante condicional  
Establecer habilitación de pushbutton4 "encendido"

según pav\_file

caso 1

carretera=0.001\*cargar(obtener(caracteres de edit29));

caso 2

cargar SMO.DAT  
carretera=0.001\*SMO;

caso 3

cargar MED.DAT  
carretera=0.001\*MED;

caso 4

cargar ROU.DAT  
carretera=0.001\*ROU;

fin

caso 52

Establecer habilitación de togglebutton2 "encendido"

fin

Establecer habilitación de pushbutton5 "apagado"  
Establecer habilitación de pushbutton9 "encendido"

fin

## Funciones que se utilizan fuera cuerpo principal

Las siguientes funciones son auxiliares en algunas tareas que se pueden hacer fuera del código que utiliza el GUI. El propósito de trabajar de esta manera es hacer más entendible y breve el código principal.

### Función `matriz_A_B`

El siguiente código se ejecuta cuando se llama la función “`matriz_A_B`”, la cual tiene como tarea crear la matriz de parámetros de las suspensiones y masas y la matriz de perturbación.

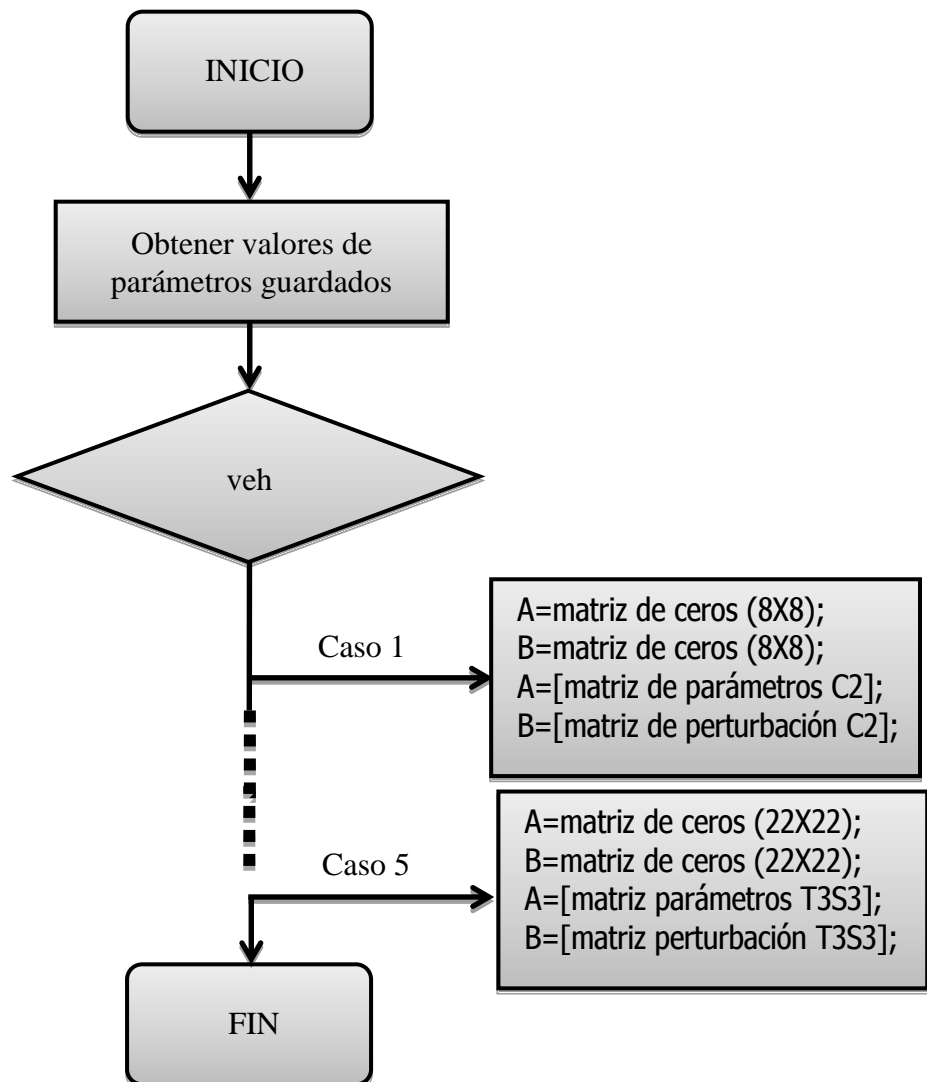


Figura 4.19 Diagrama de Función Matriz A B

función [lenght\_est,A, B] = matriz\_A\_B(parametros, veh)

```
dd=parametros(elemento14);kst=parametros(elemento1);ksd=parametros(elemento5);  
kut=parametros(elemento2);kud=parametros(elemento6);ms=parametros(elemento11);  
mt=parametros(elemento4);md=parametros(elemento8);cst=parametros(elemento3);  
csd=parametros(elemento7);I=parametros(elemento12);ld=parametros(elemento10);  
lt=parametros(elemento9);cut=4000;cud=4000;
```

Si veh==1

```
A=zeros(8);
```

```
B=zeros(8);
```

```
A=[matriz de parámetros del modelo del camión];
```

```
B=[matriz de perturbación];
```

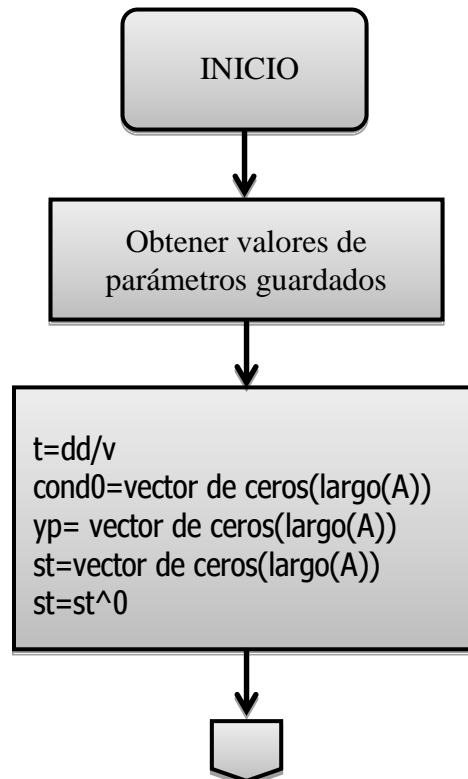
```
lenght_est=round((lt+ld)/dd);
```

fin

### Función ecs

---

El siguiente código se ejecuta cuando se llama la función “ecs”, la cual se encarga de hacer el cálculo de los movimientos de las masas y retorna esa información como un arreglo matricial.



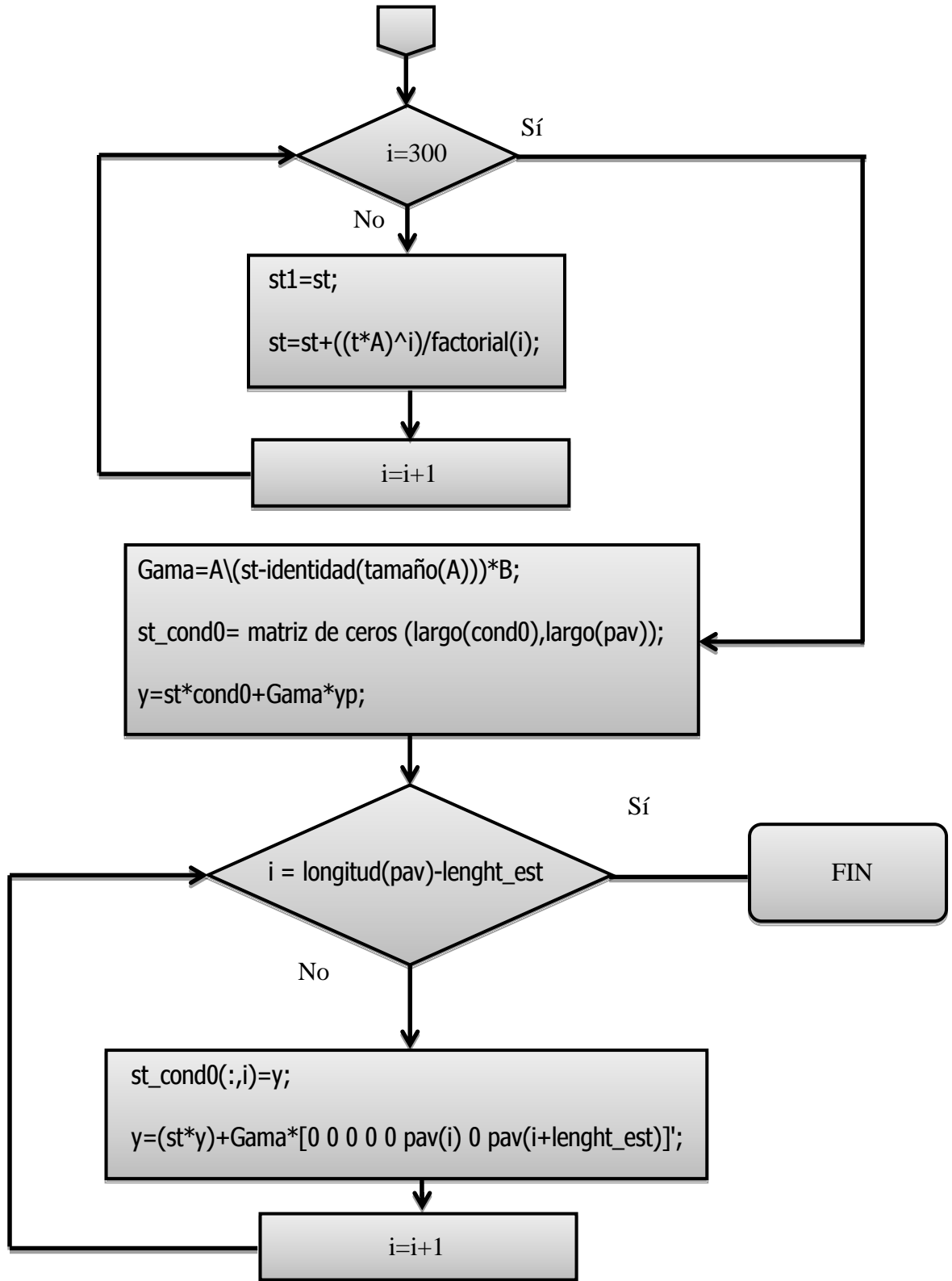


Figura 4.20 Diagrama de Función ecs

```

función [st_cond0, t] = ecs(parametros, carretera, A, B, lenght_est, veh)

vkm=parametros(13);
dd=parametros(14);
pav=carretera;
v=vkm/3.6;      % conversión km/h --> m/s
ld=parametros(10);

t=dd/v;%% tiempo de muestreo (para deiscretizar)(resolución) s

%Matriz de condiciones iniciales de las masas
cond0=vector de ceros(largo(A));

%Matriz de condiciones iniciales del perfil de pavimento
yp= vector de ceros(largo(A));

%Matriz de transición (serie de Taylor) (phi)
st=vector de ceros(largo(A));
st=st^0; %Matriz identidad

para i=1 hasta i=300, incrementos de 1
    st1=st;
    st=st+((t*A)^i)/factorial(i);
    Si st1==st
        interrumpir;
    fin
fin

Gama=A\(st-identidad(tamaño(A)))*B;%% Perturbación
st_cond0= matriz de ceros (largo(cond0),largo(pav)); %matriz del producto [A]*[cond0]

y=st*cond0+Gama*yp;%% primera iteración

para i=1 hasta i= longitud(pav)-lenght_est, incrementos de 1
    st_cond0(:,i)=y;
    y=(st*y)+Gama*[0 0 0 0 0 pav(i) 0 pav(i+lenght_est)];
fin
fin

```

# **Conclusiones y recomendaciones**

El objetivo es crear un software interactivo que pudiera identificar los puntos más dañados del pavimento y, al final, eso fue lo que se tuvo como producto. Se obtuvo bastante experiencia sobre el manejo del software MATLAB y Simulink, muchos de los comandos y operaciones fueron nuevos y se tenían que aprender a usar. Se escribieron alrededor de 2000 líneas de código, y se piensa que se podrían reducir hasta en un 20% cuando se conozca mejor el programa y todos sus comandos y funciones.

En un principio se intentó hacer el software con un programa diferente, Inventor<sup>TM</sup> de Autodesk<sup>®</sup>. Se observó que sería muy complicado a medida que se avanzaba. Afortunadamente, en las clases de robótica, se nos mostró un software que simplemente sirve para darle movimiento a unos objetos en tercera dimensión: Simulink 3D Animation. El programa que se hizo como proyecto final de Dinámica Avanzada sirvió como base para hacer este programa. Con él simplemente se tenía que usar el modelo que ya se había hecho y usarlo para mover los objetos en Simulink 3D Animation. También se tuvieron que hacer los modelos para los demás vehículos.

La parte más difícil del proyecto fue hacer un Software Interactivo y fácil de usar. Imaginarse cuáles podrían ser los errores que se podrían tener en el uso del programa, y hacerlo a prueba de usuarios poco experimentados, o distraídos, fue todo un reto. Hubo varias versiones del software, y actualmente se culminó con la sexta versión, porque hubo muchos cambios: errores que se tenían que corregir, nuevas formas de hacer las diferentes tareas, corrección de sinodales etc.

El programa está bastante completo para cualquiera que lo quiera usar en alguna investigación sobre el daño que causan estos vehículos al pavimento. El programa aún sigue en desarrollo. En un futuro se tratará de complementar este trabajo, posiblemente, con más modelos de vehículos y una simulación en grandes masas de miles de vehículos que transitan por un mismo lugar a cierta hora del día.

# Referencias

---

Bai, Y, Schrock, S.D., Hou, W., Liu, Ch., Firman, U., Mulinazzi, T.E. (2009) "Estimating Highway Pavement Damage Costs Attributed to Truck Traffic", Final Report, July 2008-December 2009, University of Nebraska at Lincoln/MATCH/FHWA. 172 pp.

Chatti, K., y Lee, D. (2000) Investigation of the relationship between Surface roughness, truck dynamic loading and pavement distress using field data from in-service pavements. Memorias. 6<sup>th</sup> International Symposium on Heavy Vehicles Weights and Dimensions. Saskatoon, Canada.

IAVE (2014) Tarifas casetas generales. IAVE.

IMT (1991) Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas. Publicación Técnica 21. Instituto Mexicano del Transporte. SCT. Sanfandila, Querétaro.

Marcus, A. (1993) Human communication issues in advanced UI's. Communications of the AGM 36(4): 101-109.

Mathworks (2014) MATLAB. The language of Technical Computing. <http://www.mathworks.es/products/matlab/>

Mathworks-3D (2014) Simulink 3D Animation. Animate, Visualize and Interact with models in 3D. <http://www.mathworks.es/products/3d-animation/>

Meirovitch L. (1986) Elements of Vibration Analysis. McGra Hill.

NCHRP (2012) Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating cost. National Cooperative Highway Research Program. Report 720. Transportation Research Board. Washington, D.C.

Sadeghi, F., Jalalahmadi, B., Slack, T.S., Raje, N., and Arakere, N.K. (2009) A review of rolling contact fatigue. Journal of tribology 131:1-15.

SCT (2013) Inversión sin precedente en conservación carretera. Comunicado 128. Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Simulink (2014) SIMULINK- Simulation and Model-based design. <http://www.mathworks.es/products/simulink/>

Romero, J.A., Lozano-Guzman, A., y Betanzo, E. (2006) Conceptual design of an intelligent toll station. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2006;13(1-2):98-106.

Romero, J.A., Lozano-Guzmán A. A., Betanzo-Quezada y S.A. Obregón Biosca (2013) A flexible pavement damage metric for a straight truck. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, Vol.20, Pag.209-221.

Sayers, M.W., (1990) Profiles of Roughness. *Transportation Research Record 1260*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Shneiderman, B. (1992) *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction: Second Edition*, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, MA.

Timbleby, H. (1990) *User Interface Design*, Addison Wesley, 1990



# **Apéndice: Manual de Usuario**

---

## **Manual de usuario**

*Programa para visualizar la interacción vehículo –  
pavimento*

**Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro**

*Gerardo Hurtado Hurtado*

*Agosto 2014*

### **Cuadro de Revisiones**

Versión	Fecha	Descripción de la revisión

**TABLA DE CONTENIDO**

1.0	Información general	
1.1	Perspectiva general .....	81
1.2	Referencias .....	81
1.3	Permiso para uso autorizado .....	82
1.4	Puntos de contacto .....	82
2.0	Resumen del Sistema	
2.1	Configuración del sistema .....	83
2.2	Manejo de información .....	84
2.3	Problemas .....	84
3.0	Uso del programa	
3.1	Secuencia de uso .....	85
3.2	Alimentación de datos .....	93
3.3	Elaboración de reportes y resultados gráficos.....	93

## 1.0 Información general

### 1.1 Perspectiva general

Durante poco más de 40 años se han venido creando “software” especializados en la simulación de todo tipo de maniobras y situaciones para una gran variedad de vehículos. La simulación de vehículos es una herramienta que tiene muchas ventajas sobre las pruebas físicas que se hacen a un vehículo. Con una simulación se puede conocer el comportamiento de un vehículo pesado sin tener los inconvenientes que tienen las pruebas físicas. De una simulación se puede obtener mucha información útil que sirven como base para dos importantes cuestiones que les interesan tanto a la Secretaría de Transporte como a las industrias que manejan este tipo de camiones: el daño que provocan los camiones al pavimento y el daño que provoca el pavimento a los camiones. Esto es de gran importancia para ambos sectores, porque se puede saber qué configuraciones de vehículos y qué tipo de pavimento les cuesta menos a ambas partes. En la simulación de interacción vehículo pesado-pavimento se pueden obtener esta información para hacer una estimación de cómo cada tipo de camión, con sus respectivas características de tipo de suspensión, número de ejes, velocidad de conducción y nivel de carga, daña el pavimento y en base a esto se puede hacer una estimación de la cuota que hay que atribuirles. Otro parámetro que hay que tomar en cuenta es la rugosidad del pavimento. Un pavimento en buen estado daña menos a los vehículos. La simulación está basada en la solución por Matrices de Transición. Este método es muy adecuado para este análisis porque el modelo que obtenemos es lineal.

### 1.2 Referencias

Sadeghi, F., Jalalahmadi, B., Slack, T.S., Raje, N., and Arakere, N.K. (2009) A review of rolling contact fatigue. *Journal of tribology* 131:1-15.

Mathworks (2014) <http://www.mathworks.es/products/matlab/>

(Simulink, 2014) <http://www.mathworks.es/products/simulink/>

Mathworks-3D (2014) <http://www.mathworks.es/products/3d-animation/>

[http://bustinza.eu/tesis/3\\_interfaz.pdf](http://bustinza.eu/tesis/3_interfaz.pdf)

<http://sebastiangomez.sytes.net/papers/DIU.pdf>

### 1.3 Permiso para uso autorizado

Mientras que no se reconoce propiedad intelectual alguna sobre las librerías y subrutinas empleadas del programa MatLab, sí se reconoce la autoría intelectual de la organización y algoritmos desarrollados para desplegar y manejar la información. El despliegue de la información obtenida de manera gráfica mediante la animación de objetos que representan los vehículos simulados en sus diferentes

configuraciones. Las otras salidas se dan de manera de tabulaciones que se pueden graficar para observar las tendencias y comportamientos generales observados.

De esta manera, el uso del programa se limita en la medida de las aportaciones propias hechas por el desarrollador de este soporte lógico.

#### **1.4 Puntos de contacto**

Cualquier duda o consulta acerca de este programa, se pide contactar al desarrollador: Gerardo Hurtado Hurtado ([sssp\\_333@hotmail.com](mailto:sssp_333@hotmail.com)).

2.1 Configuración del sistema

La figura 2.1 presenta una descripción de cómo están organizadas las funciones programadas en este soporte lógico.

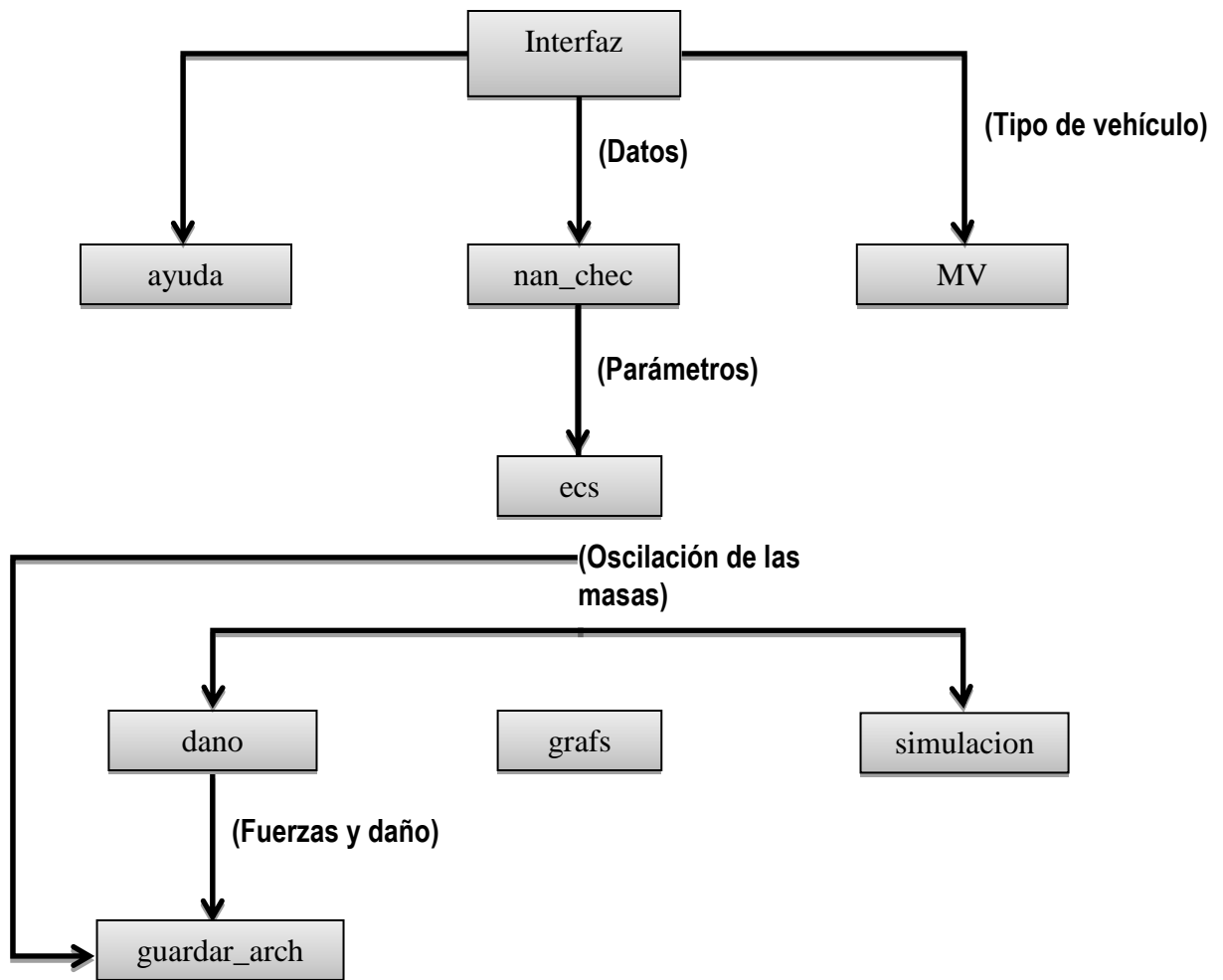


Figura 2.1 Funciones realizadas en el programa desarrollado.

## **2.2 Manejo de información**

El programa está diseñado para que el usuario pueda ya sea seleccionar de un menú los datos que alimentará el programa, o alimentar los datos de manera manual de acuerdo a la información de que disponga el usuario.

Por parte de las salidas del programa, éstas consisten de las respuestas dinámicas de los cuerpos vehiculares pertenecientes a los diferentes camiones modelados.

## **2.3 Problemas**

Un aspecto que puede complicar el uso del programa puede radicar en la licencia que es necesario contar del programa MatLab. Una vez que el usuario cuente con una licencia de este programa y lo tenga instalado en su computadora, los problemas pueden derivarse entonces de la capacidad de la computadora empleada por cuanto a las memoria RAM, la cual debe ser de al menos 4 GB para la operación sin contratiempos del programa.

## 3.0 Uso del programa

Para hacer este tutorial sólo se mostrará la secuencia que hay que seguir para simular el vehículo T3S3, que es el que tiene más secciones. Los demás vehículos son más sencillos de configurar; tienen menos secciones pero se debe seguir la misma secuencia que se muestra a continuación.

### 3.1 Secuencia de uso

Antes de hacer correr el programa, se tiene que tener los archivos con todas sus funciones dentro de la carpeta actual de Matlab.

Para hacer correr el programa, una vez que ya se tenga Matlab abierto, se escribe *cam\_pv2* en la ventana de comandos.

La primera pantalla que aparece al correr el programa se muestra en la Figura 3.1

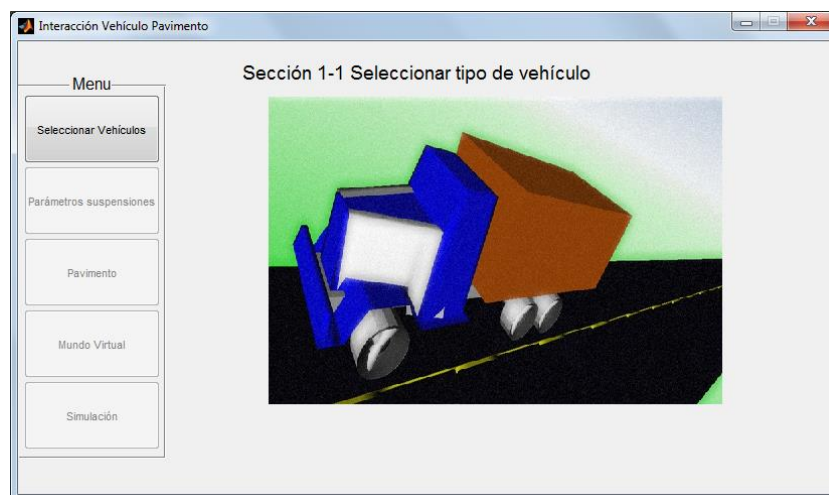


Figura 3.1 Pantalla principal del programa

Esta pantalla cuenta con las siguientes opciones a seleccionar. En esta imagen se ilustra una imagen que permite observar el escenario del mundo virtual creado en Simulink para visualizar la vibración del vehículo sobre el pavimento seleccionado. Para empezar hay que presionar el botón **Seleccionar Vehículos**.

Al presionar el botón nos lleva a la siguiente pantalla, Figura 3.2. En esta parte seleccionamos el vehículo T3S3, dándole clic en el pequeño círculo que está arriba de las imágenes de cada camión.

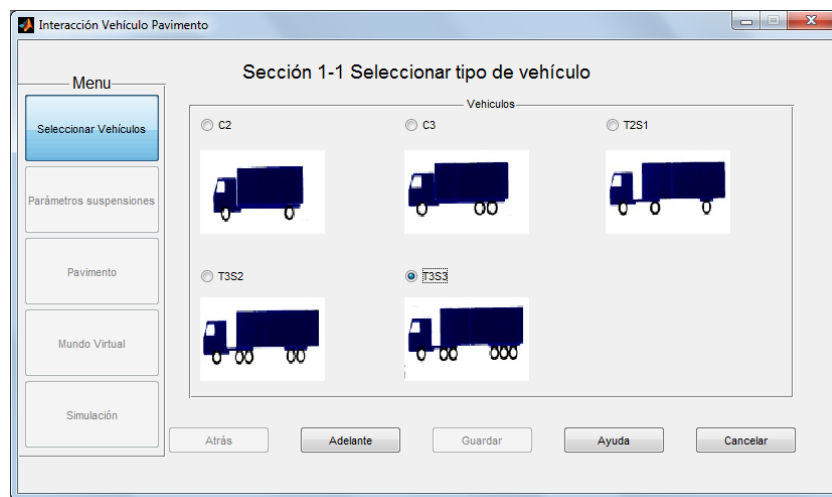


Figura 3.2 Pantalla de la opción Selección del vehículo a simular

Para seguir, hay que presionar el botón *Adelante*. En la *Sección 1-2 Parámetros de Tractocamión*, Figura 3.3, se colocan los valores de las dimensiones y parámetros que corresponden con la imagen que se muestra en esta sección. Cuando se termine la edición hay que presionar la tecla *Enter*, enseguida el botón *Guardar* y de esta forma se habilita el botón *Adelante*. Lo presionamos para avanzar.

Nota: de aquí en adelante, para avanzar a las siguientes secciones, siempre que se termine la edición, hay que presionar la tecla *Enter*, enseguida el botón *Guardar* y de esta forma se habilita el botón *Adelante*. Lo presionamos para avanzar a la siguiente sección. Para retroceder no es necesario guardar los valores.



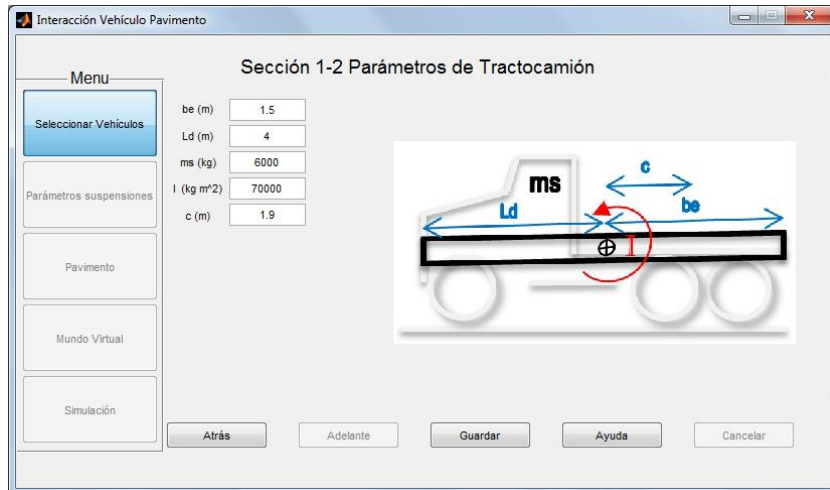


Figura 3.3 Pantalla para la configuración de las propiedades del tractocamión del T3S3.

La *Sección 1-3 Parámetros de Remolque* es para editar los valores del remolque de los camiones, Figura 3.4.

Nota: Esta pantalla no aparece el caso de los camiones C2 y C3.

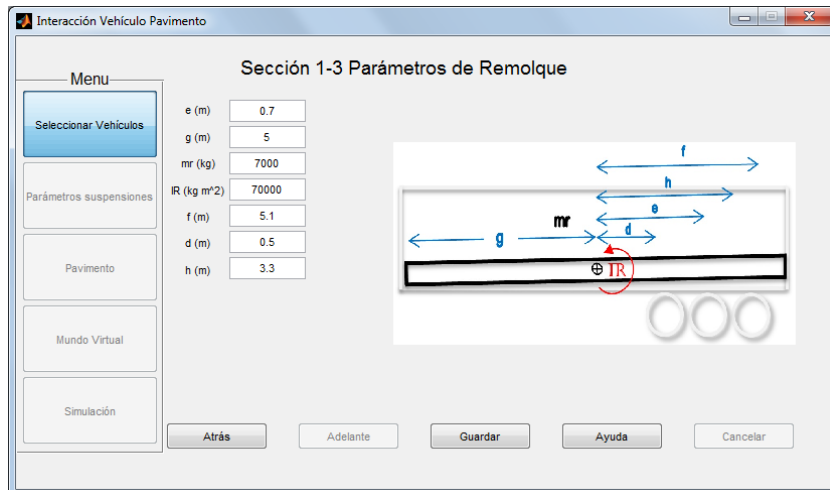


Figura 3.4 Pantalla para la configuración de las propiedades del remolque del T3S3.

Al guardar los valores se abre una nueva parte del programa, **Parámetros de Suspensiones**. Al presionar el botón de esta parte, aparece la siguiente sección: *Sección 2-1 Parámetros de eje delantero*, Figura 3.5.

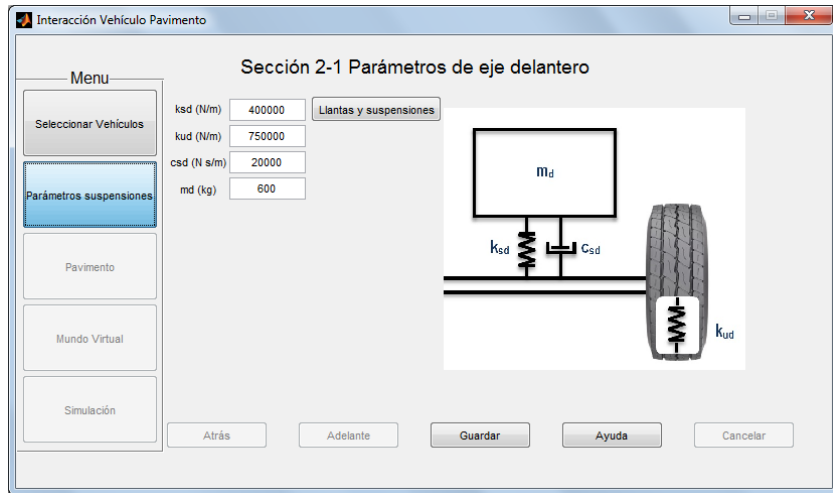


Figura. 3.5 Configuración de parámetros de eje delantero.

En esta sección se introducen los valores de rigidez y amortiguamiento de las llantas y la suspensión del eje delantero del tractocamión. Si no se cuenta con esos valores, en la pantalla se incluye un botón llamado *Llantas y suspensiones*, el cual despliega una tabla en donde vienen los valores más usados.

La siguiente es *Sección 2-2 Parámetros de eje trasero*, Figura 3.6. Aquí se introducen los valores de las suspensiones de los ejes traseros del tractocamión.

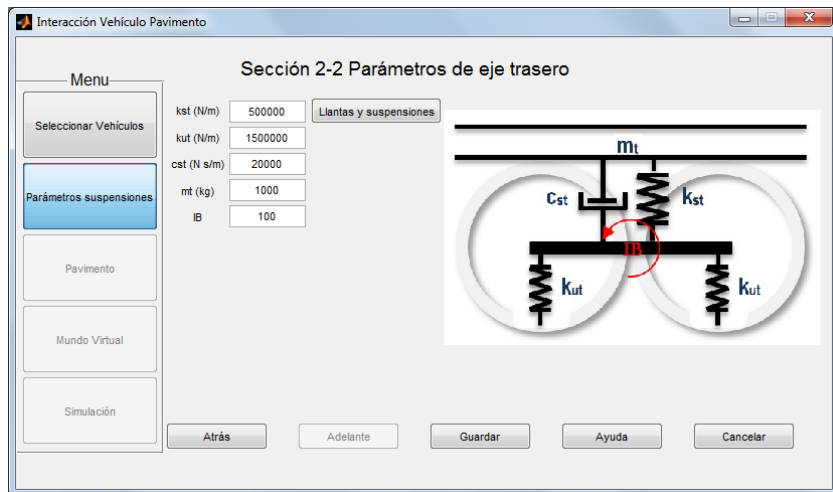


Figura. 3.6 Configuración de parámetros de eje trasero.

La siguiente es *Sección 2-3 Parámetros de ejes del remolque*, Figura 3.7. Aquí se introducen los valores de las suspensiones de los ejes del remolque.

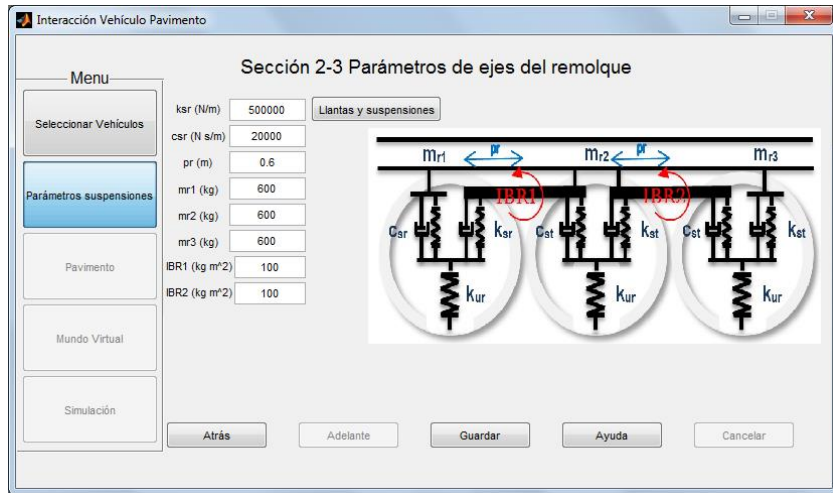


Figura. 3.7 Configuración de parámetros de eje del remolque.

Nota: esta configuración no es necesaria en los camiones C2 y C3.

La siguiente parte del programa es **Pavimento**. En esta parte se configura y se añade un perfil de pavimento al programa. La primera sección de esta parte se llama *Sección 3-1 Seleccionar perfil de Pavimento*, Figura 3.8. Hay dos formas de introducir los datos del perfil de pavimento al programa: Buscando un archivo .txt donde vengan estos datos, o seleccionando un perfil que el programa ya tiene cargado por default. Los perfiles que hay se seleccionan de acuerdo al nivel Índice de Rugosidad (IR).

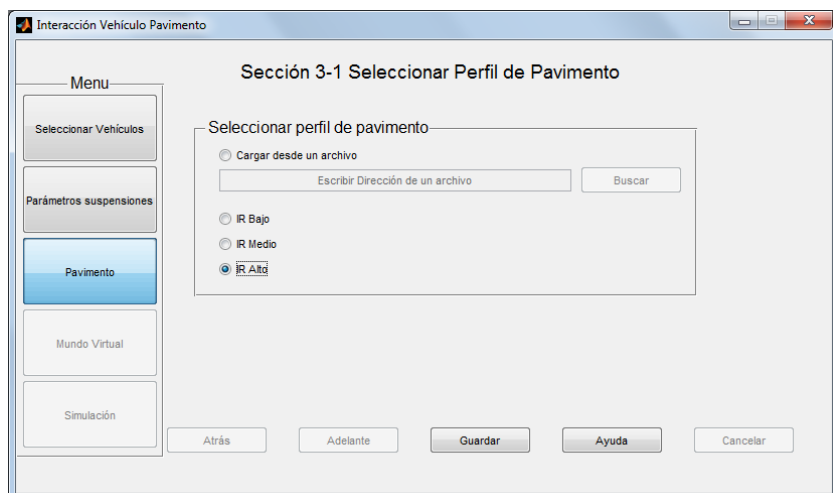


Figura. 3.7 Pantalla de selección de Perfil de Pavimento.

En la siguiente sección, titulada *Sección 3-2 Parámetros de Pavimento*, se introducen los valores del muestreo y la temperatura del pavimento. En cuanto se guardan los valores aparece una gráfica que muestra la forma y longitud del perfil del pavimento, Figura 3.8.

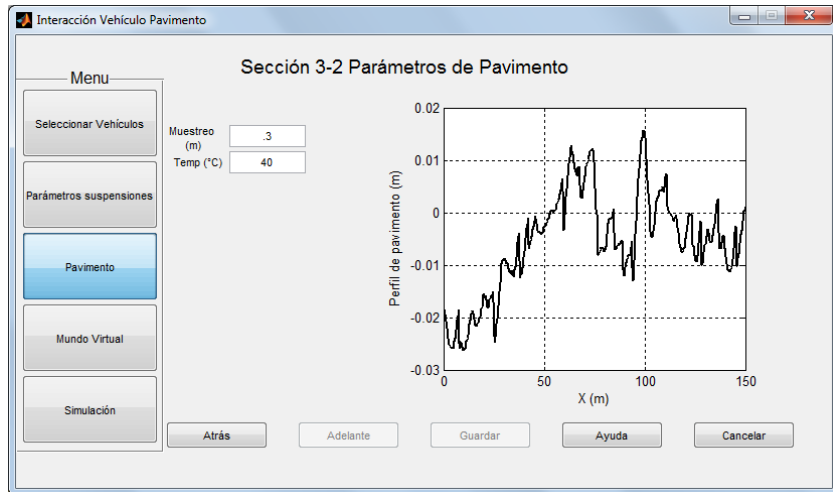


Figura 3.8 Despliegue de la gráfica del perfil del pavimento sobre el cual circulará el vehículo seleccionado.

La siguiente parte se titula **Mundo Virtual**. Esta parte sólo cuenta con una sección. Al presionar el botón para abrir la sección también se abre el mundo virtual. Se tarda unos momentos, dependiendo de la rapidez del procesador, Figura 3.9.

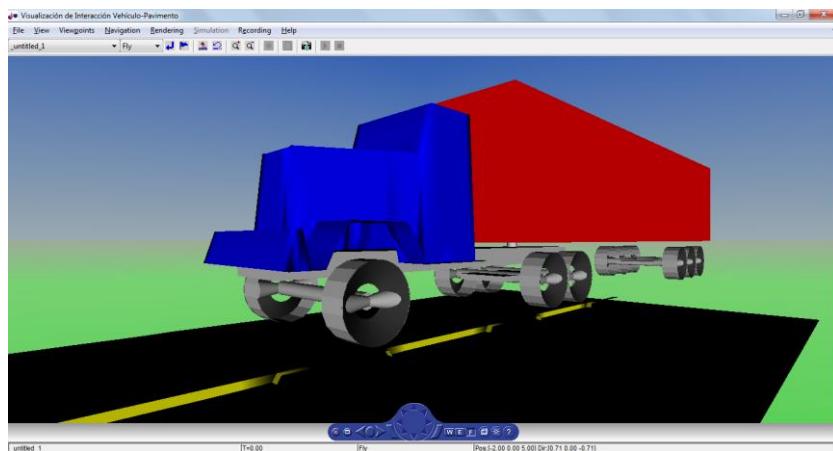


Figura 3.9 Pantalla de visualización bajo el esquema de Mundo Virtual.

La última parte del programa se titula **Simulación**, y también cuenta con una sola sección, Figura 3.10.

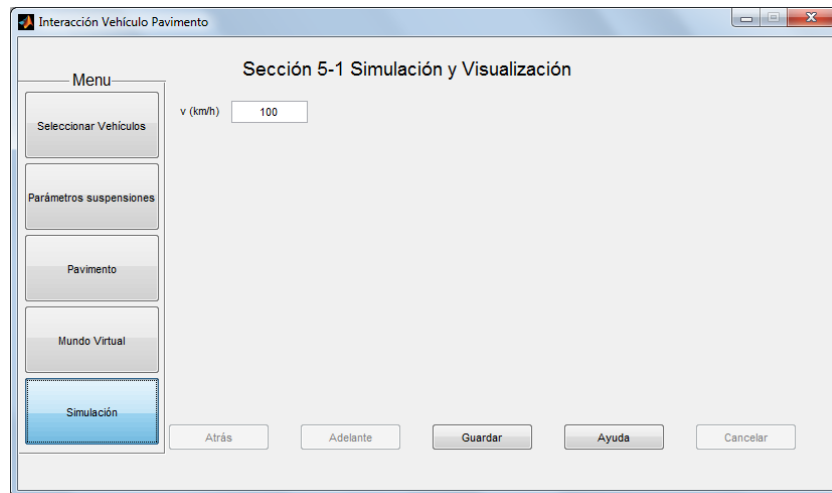


Figura 3.10 Pantalla de la última sección del programa.

En esta sección se configura la velocidad de la simulación. Al guardar este valor aparece el botón *Simular*, al pulsarlo empieza la visualización de la respuesta dinámica del vehículo en el mundo virtual. Cuando termina aparecen otros 3 botones, Figura 3.11.



Figura 3.11 Pantalla que se muestra después de la simulación.

Con el primer botón, *Gráficas de Movimiento*, se muestran, en este caso, dos gráficas de los movimientos de las masas suspendidas del tractocamión y del semirremolque por separado, Figura 3.12.

Nota: para el caso de los camiones C2 y C3 se muestra una sola gráfica para todo el sistema.

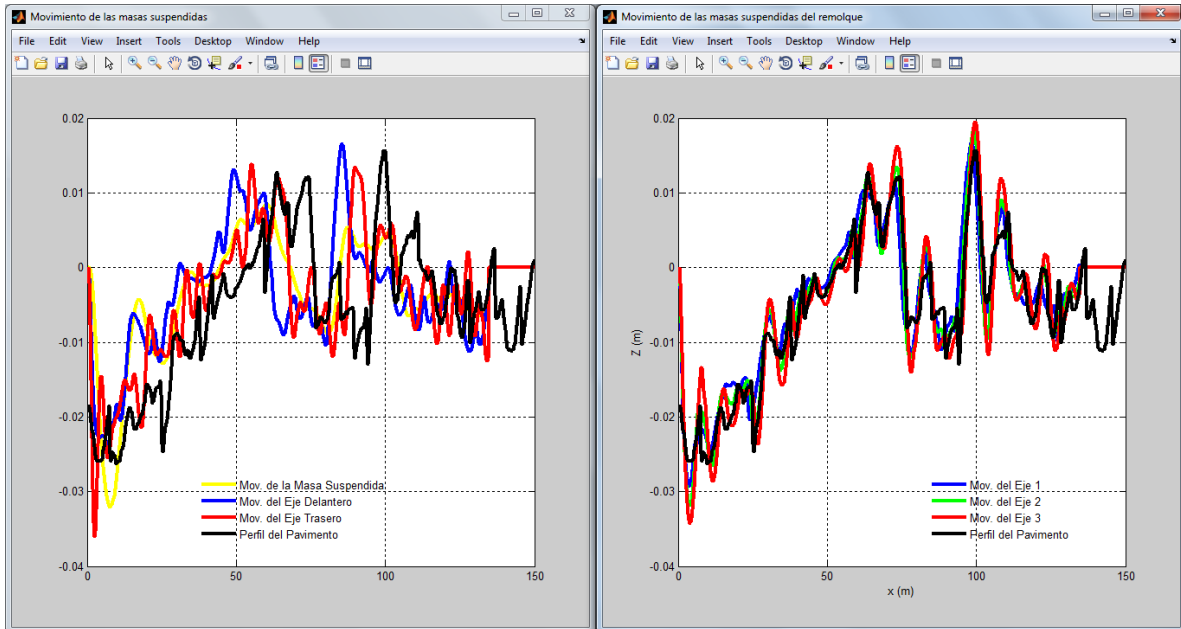


Figura 3.11 Gráficas de movimientos de las masas suspendidas del sistema simulado.

Para guardar los archivos con los datos, primero se guarda el de los movimientos de las masas y después el del daño al pavimento

### 3.2 Alimentación de datos

Como se ha indicado en las secciones anteriores, la alimentación de datos se facilita mediante el uso de un menú de propiedades de los componentes de los vehículos, en particular de las llantas. Pero existe siempre en el programa, la posibilidad de alimentar datos de diseño específicos, con objeto de efectuar estudios paramétricos, por ejemplo.

De esta manera, se recomienda contar con bases de datos de propiedades de los componentes de los vehículos, con objeto de alimentar datos que correspondan con componentes comerciales.

### 3.3 Elaboración de reportes y resultados gráficos

Las Figura siguientes describen las salidas posibles de obtener del programa. En la Figura 3.12 se presenta un detalle de las tabulaciones que es posible obtener, las cuales están en caracteres compatibles con cualquier programa tipo Hoja de Cálculo.

The screenshot shows a text editor window titled 'stcod\_3.txt: Bloc de notas'. The table contains 12 columns of data, each with a header and a numerical value. The columns are: Eje Remolque2, Masa Camión, Áng remolque, Áng Cabeceo, Eje delantero, ÁngBalncfn\_d, Eje trasero, Eje Remolque1, and Eje >. Each header is followed by a sub-header: %Mov and %Vel. The data values are small floating-point numbers, both positive and negative, representing various simulation parameters.

Figura 3.12 Tabulaciones que se pueden exportar de los grados de libertad del vehículo simulado.

La otra salida importante del programa consiste en una ilustración que a través de colores permite observar los puntos a lo largo del perfil del pavimento, en los cuales se estaría concentrando el deterioro. La Figura 3.13 presenta un ejemplo de esta salida que brinda el programa.

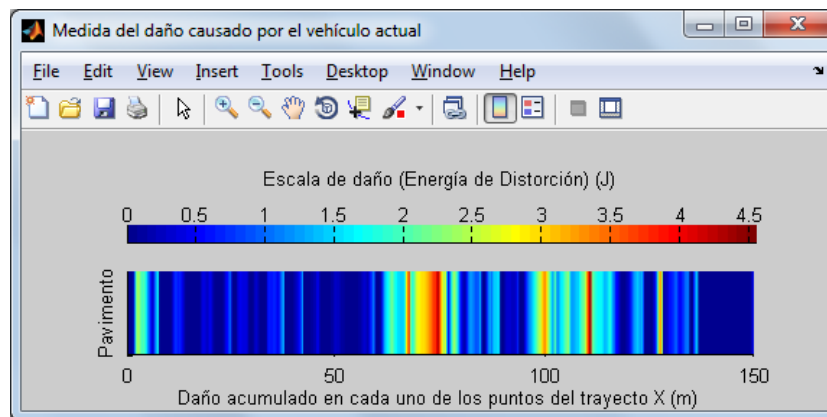


Figura 3.13 Pantalla del daño potencial causado al pavimento por el paso del vehículo simulado.

\*\*\*\*\*