



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

---

---

# **DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA CASETA DE COBRO INTELIGENTE PARA CARRETERAS DE CUOTA**

José Antonio Romero Navarrete  
Miguel Martínez Madrid  
Eduardo Betanzo Quezada  
Alejandro Lozano Guzmán

**Publicación Técnica No 242  
Sanfandila, Qro, 2004**

---

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

**Diseño conceptual de una caseta de cobro  
inteligente para carreteras de cuota**

**Publicación Técnica No. 242  
Sanfandila, Qro. 2004**

---

# Presentación

---

En el contexto del estudio de los equipamientos empleados en el transporte carretero, se presenta el diseño conceptual de un equipo que pretende establecer de mejor manera las tarifas que los vehículos pesados pagan en las carreteras de cuota.

El presente trabajo es una continuación de las actividades de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural en este campo.



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>XIII</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Generalidades de la cuota en el uso de infraestructuras</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Diseño en Ingeniería</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Necesidades de una Caseta de Cobro Inteligente, CCI</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Objetivo y alcance de este trabajo</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2. Tecnologías para el cobro del peaje</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Tecnología IRD(<i>Internacional Road Dynamics Inc</i>)</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Máquina avanzada para el pago automático del peaje</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Modelo taiwanés con pesaje en movimiento</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Carretera abierta de cuota 407 en Ontario</b>	<b>17</b>
<b>2.5 Carreteras de cuota exclusivas para camiones</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Otras tecnologías para el cobro electrónico</b>	<b>19</b>
<b>Capítulo 3. Vulnerabilidad de pavimentos asfálticos</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Energía de deformación del pavimento</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Montos de acuerdo con la energía almacenada</b>	<b>23</b>
<b>Capítulo 4. Diseño conceptual</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Módulos de la Caseta de Cobro Inteligente, CCI</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Descripción del diseño conceptual de la Caseta de Cobro Inteligente, CCI</b>	<b>36</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>39</b>
<b>Referencias</b>	<b>43</b>



# Resumen

---

Bajo el concepto de aplicar de manera directa los costos financieros y de conservación de las infraestructuras a los usuarios de éstas, se ha estado promoviendo a nivel mundial la construcción de carreteras de cuota. Sin embargo, en los pagos que los usuarios realizan no se toman en cuenta las diferentes características de los vehículos y de las infraestructuras. Esto es, todos los montos derivados de la construcción y operación de los caminos, se dividen por igual entre los diferentes usuarios, a lo más clasificados en familias de automotores.

Un esquema de mayor equidad en el pago de las cuotas de los caminos, consistiría en que los diferentes usuarios pagasen como una función de los parámetros que afectan el estado de los pavimentos. Estos parámetros incluyen el peso por eje y global del vehículo, la separación de los ejes, y la presión de inflado de sus llantas; son características que ejercen un efecto en las carreteras, pero que no son tomados en cuenta en el cobro del peaje. Por su parte, los pavimentos presentan diferentes niveles de vulnerabilidad, en especial los asfálticos, que son altamente sensibles a la temperatura.

Hay estudios que indican que el cociente del máximo y mínimo daño provocado al pavimento por un tipo de vehículo, bajo diferentes condiciones de carga y de temperatura del pavimento, puede ser de hasta 48 veces.

Los sistemas de cobro electrónico de peajes, a pesar de contar con los medios para ponderar el monto de las casetas como una función del peso de los vehículos, limitan el uso de sus sistemas de pesaje en movimiento a multar al usuario en caso de que la unidad esté sobrecargada.

En este trabajo se presenta el diseño conceptual de una caseta de cobro inteligente, en la que el monto a pagar se establece de acuerdo con una metodología que estima el efecto potencial de los vehículos sobre la carpeta, como una función de las descargas por eje y de la temperatura de los pavimentos. Los diferentes módulos del diseño conceptual se describen, y se definen sus principios de operación.



# Abstract

---

Whereas toll roads increase their number, variable fees at toll booths, as a function of per axle load and traffic level, have been considered. While congestion charges are mainly applied in toll systems equipped with electronic toll collection devices, fares based on per axle load still is at a conceptual stage. So, in spite of the general awareness that the amount of damage to roads caused by heavy vehicles is a function of per axle load, fees paid at toll stations are insensitive to that parameter. Neither is another important parameter related with the damaging effect of vehicles on asphalt pavements, that is, the pavement temperature.

In this publication a toll station conceptual design is proposed, aimed to establish the toll fee as a function of per axle load and temperature of the pavement. The operational basis of the proposed design consists of a methodology that considers the elastic deformation energy that is stored within the pavement during the pass of the vehicles axles, which is binder-temperature sensitive.

A simulation of different vehicle-infrastructure interaction scenarios is presented, showing that differences in payload and pavement temperature can create relative variations in a vehicle damaging effect of up to 40 to 1. The toll station design includes some weigh in motion devices and a vehicle-pavement interaction simulator that establishes the toll fee as a function of axle loads and asphalt pavement temperature.



# Resumen ejecutivo

---

De acuerdo con las tarifas diferenciales reportadas por los administradores de las distintas carreteras de cuota, existe a nivel mundial el criterio de fijar tales tarifas o cuotas mediante la distribución uniforme de los costos financieros y de conservación entre todos los usuarios, divididos en familias vehiculares. Esto es, no se toman en cuenta para establecer tales montos las condiciones en las que las unidades se encuentran, o aquellas del pavimento por donde circulan.

A pesar de que se ha reconocido que distintas características de los vehículos influyen de manera diferente en el deterioro del pavimento, y de que éste mantiene una diversidad de vulnerabilidad como una función de variables ambientales, los peajes de las carreteras de cuota se dividen por grupos, dependiendo de si son varios o de un sólo cuerpo vehicular, y de acuerdo con el número de ejes. De esta manera, las tarifas no toman en cuenta el nivel de carga del vehículo, u otras características tales como la separación de sus ejes, las cuales afectan el estado de deterioro de la carpeta.

La equidad de un sistema de cuotas que efectúe, por ejemplo, los montos como una función del nivel de carga de los vehículos, ha sido reconocida desde el siglo XVIII, sin embargo, hasta ahora tan sólo se han tenido expresiones conceptuales en ese sentido.

Aunque no directamente correlacionados entre sí, los cargos de peaje por nivel de carga de los vehículos y del estado de vulnerabilidad del pavimento, son análogos a los costos por congestión, los cuales se han aplicado con relativo éxito en algunos países. Este esquema de cuotas variables, sin embargo, es común en otras aplicaciones de la vida moderna, como en el servicio telefónico, cuyo precio depende de la hora del día en que se empleen las líneas.

Algunos resultados de simulaciones de tránsitos reales en pavimentos flexibles, involucrando variaciones por cuanto a la temperatura de las carpetas y los niveles de carga hace ver que, como producto de ambas variaciones, las diferencias en el deterioro a los pavimentos puede ser de 48 a 1, entre el peor y mejor de los escenarios, de acuerdo con flujos reales de automotores.

En este trabajo se atienden los aspectos de definir una cuota diferenciada para los transportistas, como una función de las descargas por eje y la temperatura del pavimento asfáltico. El diseño conceptual respectivo incluye la incorporación de varios módulos, a saber: vías de acceso a la caseta y vialidades; sistema de pesaje en movimiento; respaldo lógico para calcular en tiempo real el peaje a pagar, y un medio de identificación vehicular.

Los principios de operación de estos diversos módulos son definidos. En particular, el de soporte lógico se considera apropiado que esté basado en una aproximación propuesta por los autores, concerniente a la energía que se almacena de manera transitoria en el pavimento durante el paso de los vehículos. Los diferentes principios de operación para algunos de los módulos se evaluaron de tal forma que se configurara la Caseta de Cobro Inteligente (CCI).

Como herramienta de diseño se emplean los principios del diseño metodológico, el cual se describe y compara con algunos otros procedimientos.

# 1 Introducción

---

Se revisan algunos elementos de información antecedente para el diseño conceptual de la Caseta de Cobro Inteligente (CCI), incluyendo la especificación de las características necesarias de este equipamiento. Los diferentes aspectos involucran asimismo, la filosofía detrás de las carreteras de cuota, realizando sus configuraciones generales por cuanto al tipo de información que administran. Se incluye también una descripción del diseño metodológico, como procedimiento acabado para llegar a la definición conceptual.

## 1.1 Generalidades sobre la cuota en el uso de infraestructuras

En el contexto de una política encaminada a distribuir los costos de las infraestructuras bajo un concepto presumiblemente de equidad, se puede observar a nivel mundial la proliferación de caminos de cuota (Queiroga, 1998). Este concepto de equidad se relaciona con la idea de que quien cause el deterioro de los caminos pague los costos de su mantenimiento y conservación (TC, 2001), a la vez que se relaciona con la implementación de esquemas de tarifas flexibles, similares a aquellos para el uso de las infraestructuras cuando éstas se encuentran congestionadas (cargos por congestión).

Mientras que los cargos por congestión representan una práctica relativamente común, el cobro de cuotas como una función del peso del vehículo se encuentra todavía en la etapa conceptual; Kishore y Klashinsky (2000) han propuesto uno de tales esquemas, basado en tecnologías de pesaje en movimiento. Por cuanto a la aplicación de montos por congestión, tal parece que esa política depende de la disponibilidad de sistemas automáticos para el cobro de cuotas, que eliminen el manejo de dinero en efectivo, de tal suerte que este tipo de pago en general es independiente de la hora del día a la cual es usada la infraestructura (PANNJ, 2001).

Los cargos en las estaciones de peaje cubren diferentes conceptos, incluyendo las utilidades y montos financieros, así como los gastos en mantenimiento y conservación de las vialidades. En esta estructura de costos, presumiblemente el concepto más importante está representado por las inversiones en mantenimiento y rehabilitación, las cuales son necesarias para mantener la seguridad y el uso económico de los caminos, así como para evitar se afecte el estado de las infraestructuras.

Los daños de los pavimentos son producto de una combinación de factores relacionados con el pavimento, el vehículo y el ambiente. Los relacionados con la carpeta asfáltica en un deterioro acelerado incluyen su rugosidad, características

de diseño y la calidad de los materiales empleados. Los factores ambientales comprenden la temperatura, la radiación solar, y las precipitaciones pluviales y de nieve. En cuanto a características vehiculares, que afectan a los pavimentos comprenden la configuración de los ejes, la carga por eje, el ancho de las llantas, la presión de inflado neumático, y las características dinámicas de las suspensiones empleadas (Samuel, et al, 2002).

Los diferentes factores asociados al pavimento, al ambiente y a los vehículos, que contribuyen al deterioro se combinan para crear diferentes escenarios de afectación. Las propiedades de caminos flexibles, o asfálticos, dependen fuertemente de la temperatura al hacerlos más vulnerables a la deformación permanente, en la medida que este parámetro crece.

De esta manera, las situaciones extremas para el uso de las infraestructuras en cuanto a su potencial deterioro, estarían representadas por un lado, por un automotor que circule en vacío por un pavimento flexible cuando éste es menos vulnerable. La otra situación extrema estaría interpretada por un vehículo, que a plena carga, circula por un asfalto en su momento de mayor afectación.

La consideración de cuotas para disponer de un servicio carretero se remonta a muchos años atrás, al igual que la discusión sobre su pertinencia y montos. Aparentemente se encuentran en Roma los orígenes de lo que se conoce ahora como “cuotas” (OECD, 2003). De acuerdo con Izquierdo y Vasallo (OECD, 2003), se incluyeron estos pagos para entrar a las ciudades y para pasar por los puentes, viaductos y ríos; originalmente no representaban una fuente de financiamiento para construcción, mantenimiento y reparación de los caminos. Posteriormente, (de acuerdo con estos mismos autores), con el advenimiento del pensamiento liberal, fue que las cuotas tomaron forma de fuentes de financiamiento para el mantenimiento de obras públicas. En la atmósfera de esta forma de pensamiento fue que se incorporó el concepto de equidad y de distribución de la riqueza, instrumentado ello a través de cuotas diferenciadas para los distintos usuarios de las infraestructuras.

Izquierdo y Vasallo (OECD, 2003) reproducen un pasaje del pensamiento de Adam Smith (1723-1790), mismo que es traducido y reproducido aquí también; en su texto “Del gasto de la obra pública y de las instituciones públicas” (*Of the Expense of Public Works and Public Institutions*):

*“Cuando el carruaje que pasa por la carretera o sobre un puente, y la embarcación que navega por un canal, pagan una cuota en proporción a su peso o tonelaje, ellos pagan por el mantenimiento de esas obras públicas, en una exacta proporción al desgaste y daño que ocasionan sobre éstas. Parece difícil inventar una manera más equitativa de mantener tales infraestructuras. Adicionalmente, este impuesto o cuota, aunque es pagada por el transportista, finalmente será pagada por el consumidor, a quien se le cargará en el precio de los bienes”*

De esta manera, resulta interesante cómo un concepto de evidente equidad, planteado hace cientos de años, aún no se ha puesto en práctica en el mundo actual. Esto es, los que transitan los caminos pagan una tarifa que resulta de dividir los costos de la infraestructura entre todos los usuarios, sin discriminar la cantidad de carga que transportan. Se paga entonces una cuota plana, en vez de una no-plana, que diferencie los diferentes escenarios de uso de las infraestructuras (Chu y Tsai, 2004).

Acerca de las políticas gubernamentales para financiar el mantenimiento y reparación de los caminos se han propuesto diferentes metodologías, incluyendo aquellas que apuntan hacia la combinación de esquemas de financiamiento, basados en dinero público y dinero proveniente de las estaciones de cobro de peajes (Ferrari, 2002; Bichsel, 2001)

Los problemas inherentes a la erogación de un servicio se asocian también a la demanda de un mejor servicio de parte del usuario, de tal suerte que se llegase a negociar los baches por los peajes (Craumer y Marshall, 1997)

La importancia de las vías de cuota se considera enorme para el desarrollo carretero. Se considera a estos caminos como una fuente de financiamiento para nuevos caminos, bajo un esquema que refleje los principios de cotización con base en el costo marginal (Levinson, 2004).

### **1.1.1 Esquemas de cobro dependientes de la hora del día**

Los sistemas que operan bajo una tarifa variable como una función de la hora del día, se refieren esencialmente al cargo por congestión. Estas consideraciones de peaje variable, sin embargo, están ganando participación al tratar de desalentar el uso de las infraestructuras durante embotellamientos, proporcionando un alivio a dicha situación (Burriss y Pendyala, 2002). Se menciona que, en teoría, la industria de carreteras y puentes de cuota posee lo necesario para establecer una variación horaria en sus precios (i.e, la demanda no es uniforme; la demanda excede la oferta en periodos bastante regulares y predecibles; y un incremento en la oferta, incurre en costos muy elevados). Se señala que la razón por la cual los administradores de infraestructura no introducen dichas variantes, es por razones políticas. De esta manera, en el mundo entero se señala que solamente existen operando bajo ese régimen de cuota flexible, alrededor de 19 estaciones. Burriss y Pendyala (2002) señalan una fuerte sensibilidad a los cambios en las tarifas de los peajes, señalando elasticidades en un rango de 0.03 a 0.36.

En el caso de unidades para el transporte de mercancías, la situación es un tanto diferente respecto a la de los vehículos de pasajeros, en tanto los movimientos de las cargas están relacionados con la actividad industrial y comercial de las

ciudades, lo que hace complicado un esquema flexible de cuotas de acuerdo con el horario.

### **1.1.2 Principales desventajas de las carreteras de cuota**

La principal desventaja que presentan radica en los costos en tiempo que el usuario tiene que invertir para el pago, aparte del monto del peaje. Es por ello que se han realizado muchos esfuerzos en el sentido de desarrollar sistemas para el pago de aranceles encaminados a minimizar afectaciones a la circulación, las cuales han alcanzado niveles, que en ocasiones provocan una elevación y concentración de la contaminación, habiendo sido en parte aliviada mediante esquemas de cobro electrónico. Al respecto, se reportan reducciones hasta del 41% en las emisiones, como resultado de la aplicación de esquemas de cobro electrónico de peaje (Saka, et al, 2000)

### **1.1.3 Principales ventajas de las carreteras de cuota**

El impacto del incremento de caminos de cuota sobre la economía del transporte, se puede observar desde diferentes perspectivas. De manera general, las vías de cuota cuentan con mejor diseño geométrico, permitiendo el ahorro de combustible y evitando la contaminación ambiental en general al incorporar túneles, puentes y viaductos, de tal suerte que las distancias entre los distintos puntos se ven reducidas.

Una ventaja potencial de estos sistemas es que ellos incorporen sistemas más equitativos para calcular el monto de las cuotas, como una función del efecto de los vehículos sobre las infraestructuras.

### **1.1.4 Cargos por congestión**

Se derivan de la necesidad de regular el tráfico durante las horas de mayor demanda mediante políticas de “castigar” la circulación en automóvil por tales vialidades. Esta diferenciación de tarifas resulta análoga a la que aplican otros medios de comunicación, tales como los teléfonos, con cargos por “congestión” de las líneas.

En el caso de las telefónicas, y como se plantea en las funciones de las cuotas, el ingreso extra por sobrecargo en el uso de vías en horas pico, sirve para capitalizar la construcción de mayor infraestructura, tal como sucede en caso de líneas telefónicas, o caminos.

## 1.2 Diseño en Ingeniería

El desarrollo de nuevos productos y sistemas se presenta en la actualidad como el resultado de diferentes acciones y actitudes, teniendo como base la innovación tecnológica respaldada en actitudes creativas. Estas diferentes metodologías se listan a continuación, incluyendo las referencias fundamentales de su desarrollo.

- Despliegue de la función de la calidad, *Quality Function Deployment* (QFD, 2004). QFD representa una técnica en la que los propósitos de creatividad e innovación se “despliegan” en todas las áreas y departamentos del sistema o fábrica. Aplicada en el contexto del diseño de las carreteras de cuota, habría énfasis en incorporar sistemas de mejora continua en cada uno de los componentes del sistema, con lo que de manera integral se estaría mejorando el servicio proporcionado por estas estaciones de cobro.
- Puertos en el diseño ingenieril (Liang and Paredis, 2004) La idea de los puertos en el diseño de productos se asocia a la creación de subsistemas y sus interacciones; los orígenes de la metodología se remontan a 1984. La ontología o teoría de la existencia de los puertos, señala que dichas instalaciones son lugares para la interacción de los diferentes subsistemas definidos, constituyendo así elementos importantes en el diseño de un sistema. Los puertos son abstracciones para la comunicación de señales, energía o materiales, y pueden tener diferentes dominios de energía, tales como forma o comportamiento, que constituyen los atributos de un puerto. Los axiomas respectivos están asociados a su refinación potencial, a la verificación de su compatibilidad, y a la instauración de los modelos de interacción. Algunas de esas ideas podrían aplicarse en el desarrollo de una Caseta de Cobro Inteligente, por representar estas infraestructuras una especie de puertos, en donde fluye información diversa.
- Teoría axiomática del modelado del diseño (Zeng, 2002) Mediante esta práctica se propone establecer un modelo formal para el diseño que represente una estructura sintáctica de los objetos y propósito dinámico del diseño en una evolución jerárquica. Ramani (2003) y Banerjeel, *et al* (2002) presentan algunas aplicaciones de estos conceptos, los cuales podrían dar en una fase más avanzada, elementos de alta eficiencia a ser considerados en el diseño de la CCI.
- Innovación Colaborada (CI), y Desarrollo Integral del Producto (IPD) Estos conceptos se adaptan en el diseño innovador de los productos (Zeidner y Wood, 2000), y como su nombre lo indica, pretenden realizar un diseño en el que participen diferentes disciplinas relacionadas con el éxito de un producto. En ese sentido, se asignan ciertas técnicas para mejorar la comunicación y entendimiento entre los diversos agentes, aunque su aplicación está sumamente especializada a productos de consumo masivo.

- TRIZ es el acrónimo en ruso, de “Teoría de la Solución Inventiva de Problemas” (TRIZ, 2004). Se creó en Rusia a finales de la Segunda Guerra Mundial, como resultado de la experiencia manufacturera y de diseño durante ese conflicto (Sawaguchi, 2000). En este trabajo se incluyen algunos elementos, aplicados al diseño conceptual creativo de la CCI.
- Ingeniería del valor (*Value Engineering*). El proceso de ingeniería del valor se aplica tanto al desarrollo de equipo como a la evaluación y optimización de proyectos. Consiste en seleccionar un proyecto o producto y estudiarlo, para luego establecer a través de un proceso especulativo en el que se **consideran soluciones posibles, los méritos de algunas mejoras**, Posteriormente se pasa al desarrollo del proyecto o producto, y a la presentación del mismo a los usuarios (VE, 2004; Szykman, 2001). Estas técnicas se consideran aplicables una vez que se cuente con el prototipo de una CCI.
- Diseño metodológico. Es la disciplina que servirá de base en la presente propuesta de metodología, constituyendo un modelo validado de secuencia de actividades para el desarrollo de diseños originales y adecuados para el cliente. Las diferentes etapas y conceptos respectivos se describen a continuación (Dieter, 1986).

### **1.2.1 Diseño metodológico**

Los elementos y etapas que conforman al diseño metodológico lo identifican como una aproximación académico-industrial al proceso de innovación tecnológica y satisfacción de necesidades.

Es importante mencionar que existe un paralelismo entre el método científico y el proceso de diseño metodológico (Dieter, 1986), pudiéndose observar que la etapa de conceptualización de dicho proceso corresponde al planteamiento de la hipótesis del método científico. Esta fase es la más importante de ambos desarrollos, dado que en ella se definen, de alguna forma, los alcances de las actividades científicas y de ingeniería. Atendiendo los efectos que de estas tareas en la sociedad, se puede decir que en tanto que el conocimiento científico se incrementa como producto de la investigación científica, en el caso del proceso de diseño en ingeniería lo que se modifica es el estado de la técnica, comprendiendo dicho “estado”, aquellos equipos y procesos que describen el *status* tecnológico en determinado momento. Al respecto, se espera que tal estado de la técnica evolucione como resultado de aplicar los nuevos conocimientos generados en la investigación científica.

La correspondencia entre los procesos científico y de diseño en cuanto a su motivación, representa la diferencia fundamental entre ambos. De esta manera, mientras que la curiosidad científica es el detonador de un proceso de investigación, la definición de ciertas necesidades constituye un estímulo para el diseño en ingeniería. Otra diferencia fundamental entre los dos consiste en que la satisfacción de necesidades se da en un esquema de tiempos rígidos, en tanto que en la investigación científica el tiempo de desarrollo de las investigaciones no es un factor tan determinante.

Es necesario destacar que en la conceptualización del diseño es común realizar una multitud de aproximaciones matemáticas, de laboratorio o de campo, que validen los desarrollos conceptuales propuestos. En esta etapa, se encuentra implícita la aplicación del método científico. Por otro lado, la característica común de los procesos descritos, el científico y el de diseño, es que ambos son iterativos.

Como resultado de los procesos, ya sea del método científico o del de diseño, siempre habrá posibilidad de “regresarse” a las distintas etapas de los mismos (replanteamiento de las hipótesis, y la *reconceptualización*).

### Etapas en el proceso de diseño

Las seis principales etapas en el diseño metodológico son (Dieter, 1986):

- Reconocimiento de una necesidad
- Definición del problema
- Recolección de información
- Conceptualización
- Comunicación del diseño

#### *Reconocimiento de una necesidad*

En esta etapa se obtiene la mayor cantidad de características del producto o proceso nuevo por desarrollar. Su importancia radica en que el cuidado que sea puesto en ella, afectará la satisfacción de las necesidades así definidas.

Como resultado del proceso de reconocimiento y caracterización de las necesidades, se contará con parámetros con los cuales se establezca la medida en que las necesidades se satisfagan; para ello se busca definir indicadores objetivamente verificables.

Los riesgos inherentes a un proceso defectuoso de reconocimiento de necesidades consisten en malinterpretar las necesidades del cliente, y realizar satisfactores para demandas no existentes.

### *Definición del problema*

Trata de poner en un esquema de ingeniería las necesidades planteadas, procurando ubicarlas en términos de las distintas disciplinas de esta área, planteando entradas, salidas y recursos, así como enfoques para solucionar el problema.

### *Recolección de la información*

En esta etapa se debe establecer el estado de la técnica respecto al problema planteado. Las fuentes de información son de distinta naturaleza, desde observaciones de campo hasta la consulta de acervos especializados (patentes, revistas, normas).

### *Conceptualización*

Se identifican módulos vinculados al proceso o equipo en desarrollo. Incluye la definición de las interacciones entre los distintos módulos definidos.

Los principios de operación de cada módulo se definen en esta etapa. Al respecto, la validación de los principios de operación puede implicar la realización de modelos teóricos y experimentales.

Es importante destacar que en esta fase se debe divergir por cuanto a las alternativas de los principios de operación, a manera de contar con la mayor cantidad de soluciones posibles al problema planteado.

### *Evaluación*

Es el momento en que se realiza la prueba del proceso o equipo desarrollado, a nivel prototipo. Se determina, de manera objetiva el nivel de satisfacción de las necesidades planteadas al principio del proceso.

### *Comunicación del diseño*

Finalmente, se tiene que dar a conocer el diseño, documentando el proceso desarrollado, desde la definición de las necesidades hasta el producto del mismo.

## 1.3 Necesidades de una CCI

Se ha presentado hasta ahora la “filosofía” detrás de las carreteras de cuota, y los fundamentos del diseño en ingeniería. De acuerdo con el método seleccionado se discuten ahora las necesidades de un sistema como la Caseta de Cobro Inteligente. Los requerimientos para el caso se derivan de los diferentes participantes, en cuanto a proveedores y usuarios de la infraestructura.

### 1.3.1 Requerimientos por parte de los usuarios

Los requerimientos por parte de los usuarios podrían ser:

- Menos tiempo para efectuar el pago, incluyendo la posibilidad de que sea “transparente” el sistema de identificación
- Flexibilidad en la forma de pago, de acuerdo con el nivel de carga que se lleve
- Un sistema flexible en cuanto a la forma de pago, ya sea por descuento en una cuenta predeterminada, en efectivo, o con tarjeta de crédito
- Un sistema orientado a que le cobren lo justo.

Sobre el último punto se tendría necesidad, como usuario, de contar con información que justifique el pago diferencial efectuado. Adicionalmente, se pediría el mejor estado posible de las infraestructuras, o al menos información objetiva sobre ese aspecto. Esto es, requerir que por algún medio se le brinde respaldo de datos sobre los índices internacionales de rugosidad, por ejemplo.

Los otros requerimientos se derivan de la necesidad de evitar tiempos perdidos a los usuarios, aparte de que le permitan incluso efectuar un seguimiento de los pagos efectuados, para efectos de seguridad.

### 1.3.2 Requerimientos por parte de los administradores de los caminos

Una caseta de cobro inteligente debe garantizar diversos aspectos de seguridad y productividad (Lipičnik, 2001). Los de seguridad incluyen el diseño geométrico del tramo de aproximación a la caseta; los avisos y señales de información y advertencia a los otros usuarios de las infraestructuras; así como un conjunto de vialidades en caso de que los vehículos tengan que ser regresados por alguna

razón. La productividad se refiere a que el diseño de las casetas se encauce a minimizar el impacto en el tráfico.

En particular, se necesita que las tarifas se calculen en función del peso por eje y de la temperatura del pavimento, por lo que la CCI debe contar con los medios apropiados para tal efecto.

A fin de evitar mayores alteraciones en el tráfico, las cargas en los ejes de los vehículos deben determinarse mediante un Sistema de Pesaje en Movimiento (SPM). Debido a que la precisión de los dispositivos SPM depende en buena medida de la velocidad a la que transiten los vehículos; de ahí el propósito de contar con los medios adecuados en las proximidades de la caseta.

Para evaluar el efecto potencial de los ejes sobre los pavimentos, la CCI debe aplicar un programa que le permita calcular, en fracciones de segundo, tal efecto y el pago del usuario. Considerando las dificultades para que el conductor tenga el efectivo preciso el sistema de pago deberá incluir un equipo de identificación del vehículo, que involucre una cuota de una cuenta preestablecida.

Aunque la agilidad en el proceso de cobro podría representar para el administrador de carreteras una prioridad, se podría decir que en última instancia, lo que le interesa a éste es que se incluyan en el cobro la mayor cantidad de características del conjunto vehículo-pavimento, que hagan atractivo a los transportistas recurrir a las infraestructuras de cuota.

El interés por parte del administrador de proponer variantes en cuanto a los montos a pagar se podría derivar de la necesidad de hacer atractivo ese tipo de vías a ciertos segmentos de un mercado caracterizado por acarrear mercancías que no alcanzan en ocasiones el peso permitido máximo. Este es el caso de vehículos que efectúan cruces fronterizos internacionales, con diferentes normatividades en cuanto a pesos y dimensiones.

En este contexto, ofrecer variantes a los usuarios bajo horarios de uso, podría llevar a los proveedores solicitar al desarrollador de una CCI, que el cobro se hiciese atendiendo el daño potencial a los pavimentos, así como por congestiónamiento.

Las características de la CCI con respecto al pesaje en movimiento, podrían complementarse con la medición de la distancia entre ejes, la cual también constituye un factor que afecta a los pavimentos.

La tabla 1.1 resume las necesidades para la CCI en cuanto a los usuarios y a los administradores. Otras características, acerca del costo de tal equipamiento, extensión del terreno, etc, salen del alcance del diseño conceptual discutido en el presente estudio.

En términos generales, en donde habría coincidencia por parte de los usuarios y de los administradores o dueños de las infraestructuras, radica en contar con un sistema ágil y justo de asignación de tarifas. Asimismo, en la necesidad de que fluya la información entre ambas partes.

## 1.4 Objetivo y alcance de este trabajo

Se propone el diseño conceptual de una caseta de cobro inteligente, en la que la definición de las cuotas se basa en el efecto potencial dañino de los vehículos en los pavimentos.

En el capítulo 2 se describen algunas características de uso de las infraestructuras, con diferentes niveles de vulnerabilidad acerca del daño por los vehículos. Esta información forma parte de la revisión del estado de la técnica, en lo correspondiente al proceso de diseño. En particular, se discute una metodología para evaluar dicho efecto potencial.

Requerimientos	
Usuarios	Administradores
Mínimo o nulo tiempo para efectuar el pago	Sistema ágil para efectuar el cobro
Flexibilidad en cuanto al cobro, como función del horario y del nivel de carga	Flexibilidad de tarifa en cuanto al horario y al nivel de la carga, como una función del nivel de daño potencial causado al pavimento
Flexibilidad respecto al pago en efectivo, por crédito, o por contrato previo	Sistema de pesaje en movimiento, y equipamientos de corrección por velocidad
Conocer el estado de las infraestructuras y el costo diferencial	Proveer información al usuario sobre el estado de las infraestructuras

**Tabla 1.1.**  
**Requerimientos para la CCI**

En el capítulo 3 se presenta, también como parte del proceso de revisión de la literatura, una descripción de las diferentes tecnologías para el cobro/pago en los sistemas carreteros de cuota.

El capítulo 4 corresponde al diseño conceptual de la CCI, incluyendo los diversos módulos en los que se divide, y los diferentes principios de operación propuestos. En lo que toca a uno de sus componentes principales, el relativo a fijar monto de las “cuotas”, se emplearán los resultados de la metodología descrita en el Capítulo 2. Se realiza una evaluación de los distintos principios de operación para los diferentes módulos identificados, que componen la CCI.

Finalmente, en el capítulo 5 se incluye una síntesis de los aspectos más relevantes presentados, proponiendo una serie de conclusiones y recomendaciones relacionadas con el desarrollo futuro de estos equipamientos.

## 2 Tecnologías para el cobro del peaje

---

Se revisan las más importantes tecnologías actuales acerca del cobro de cuotas en carreteras; incluyen desde modelos sencillos en vías de cuota cerradas, hasta modelos de mayor complicación caminos de cuota abiertos. Los esquemas de este último grupo se refieren precisamente a la eliminación virtual de las casetas de pago.

### 2.1 Tecnología IRD

La empresa IRD (*International Road Dynamics, Inc*) tiene una división para el desarrollo de componentes de sistemas de peaje (IRC, 2004). Las posibilidades de los equipos desarrollados incluyen:

Sensores montados en tapetes. Este sistema consta de sensores piezoeléctricos, que localizan por presión la presencia de las llantas de los vehículos. En su forma más sencilla, son capaces de detectar los ejes, mientras que en arreglos combinados saber el número de neumáticos en un eje. Consisten en una estructura de acero, tipo soporte de registro para coladeras, la cual aloja insertos de aluminio en los que se fijan los sensores piezoeléctricos. La construcción modular de estos equipos permite la expansión de los alcances de los mismos, y su fácil reposición (IRC, 2004).

Sistemas de pesaje en movimiento. Los tapetes descritos pueden completarse mediante sistemas de pesaje en movimiento, con el propósito de determinar la cuota para cada uno de los vehículos. De acuerdo con información de la empresa, el sistema se integró como un módulo de pre-pesaje para fijar la cuota. En particular, se ha instalado en un puente de la provincia de Nueva Escocia, Canadá (*Murray MacKay Bridge*). Entre las especificaciones se incluyen el pesaje de unidades desde 0 hasta 20 km/h, con exactitudes entre el 1 y el 2 %.

A pesar de que las modalidades de una tarifa flexible, como una función del peso de los ejes o de la separación de los mismos, es aparentemente factible mediante las tecnologías desarrolladas por la empresa IRC, la principal aplicación es en la administración y verificación del cobro global de las cuotas. Esto es, corroborar que lo que “entra” en la caja de cobro corresponde al uso dado de las infraestructuras. Esto responde a un concepto de *auditoria en el cobro de peajes*.

El esquema de un sistema electrónico, no inteligente para peajes, proporcionado por esta empresa, consiste de los siguientes equipos:

- Sistema de video para detección de incidentes
- Sistemas de pago electrónico (carta prepagada, tarjetas de crédito y *transponders* en radio frecuencia, *RF*)
- Opción de pesaje en movimiento

- Computadoras del carril de pago
- Unidad de interfaz del carril, que consiste del *bus* para recopilar la información de todos los carriles
- Sensores montados en tapetes, para clasificación del tráfico

### Separación de los ejes

A pesar de no contar con alguna aplicación sobre un sistema más complicado, la empresa IRC indica que los diferentes criterios para establecer - en tiempo real - la cuota que debe pagar un vehículo en particular, incluyen el tipo de camión, los espaciamientos y número de los ejes, así como el peso del vehículo.

## **2.2 Máquina avanzada para el pago automático del peaje (ATPM: *Advanced Toll Payment Machine* (Crump, 2004))**

Este sistema cuenta con sensores para determinar el número de ejes, lo cual le permite establecer el tipo de vehículo y el monto del peaje; acepta pago en efectivo o con tarjeta de crédito, y es capaz de dar cambio. La fig 2.1 muestra un diagrama general de la operación e incluye algunos sensores de presencia, y una base de datos para determinar el pago.

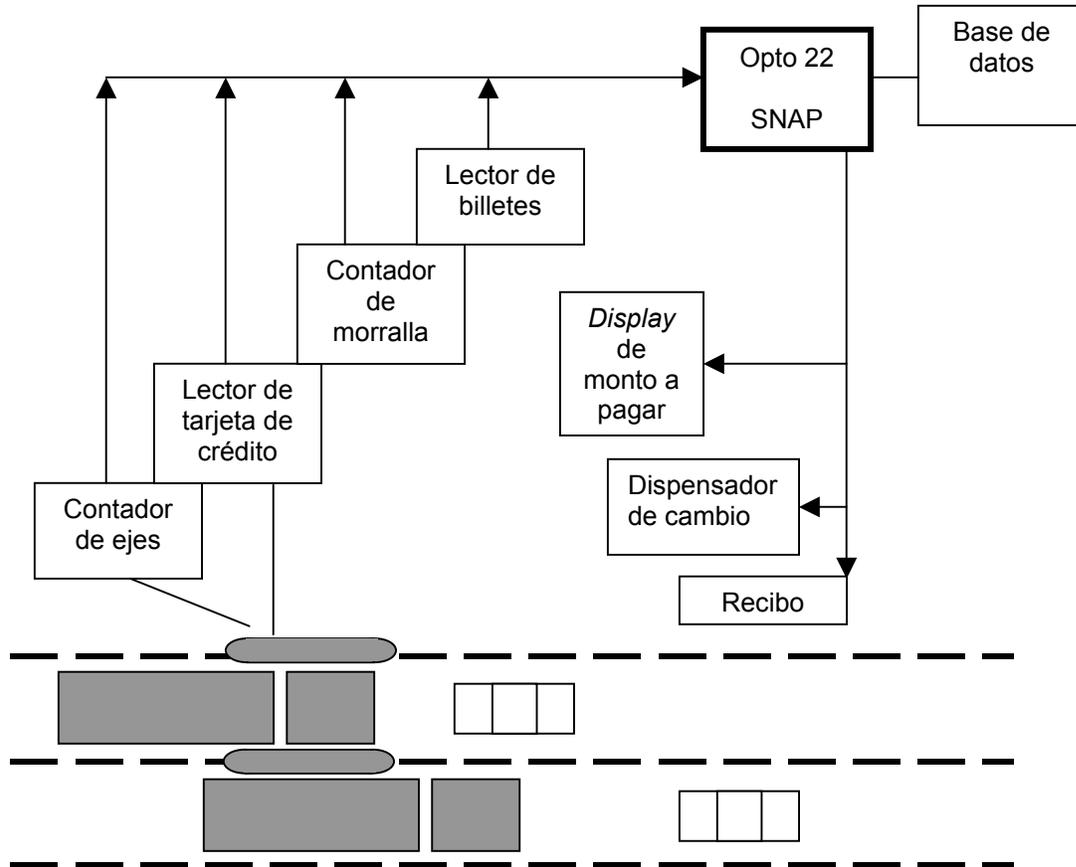
El sistema *Snap Ultimate I/O* es un controlador basado en *Ethernet*, capaz de comunicarse con los controladores de cada carril: emplea hasta 16 módulos de entrada/salida, estando equipado cada uno de ellos con cuatro canales separados para los sensores, con objeto de comunicarse con los controladores de carril; lectores de tarjetas de crédito; contadores de monedas; pantallas de la caseta; dispensadores de cambio, y otros dispositivos de entrada/salida.

Cada módulo comprende conectores para el alambrado con los dispositivos entrada/salida, mediante un conector tipo *Ethernet*, el cual opera para cerrar el lazo de comunicación, por encima del procesador. Como cerebro de este sistema ATPM, para efectuar las comunicaciones *TCP/IP* de la red en internet, se tiene un microcontrolador *ColdFire 5407*.

## **2.3 Modelo taiwanés con pesaje en movimiento**

Chuo y Chen describen un sistema que integra el pesaje en movimiento a un sistema de cobro electrónico. Aunque aún se encuentra en la etapa de prototipo, está enfocado a detectar vehículos con sobrecarga; y sustituye esquemas anteriores en los que el pesaje se realizaba de manera estática. Si bien el equipo podría potencialmente proporcionar con bastante exactitud el peso de los vehículos, el sistema está pensado en una cuota pareja, con base en el tipo de camión y número de ejes, o sea no establece una cuota en función del peso bruto

y por eje. La fig 2.2 presenta en términos generales, algunos bloques funcionales de este equipamiento.



**Fig 2.1.**  
**Máquina avanzada para el pago automático del peaje (ATPM: *Advanced Toll Payment Machine*)**

Como se puede observar, el sistema se interesa en los aspectos legales de los vehículos, como son si viola o no el peso permitido, o si el registro de la licencia y demás aspectos están en orden.

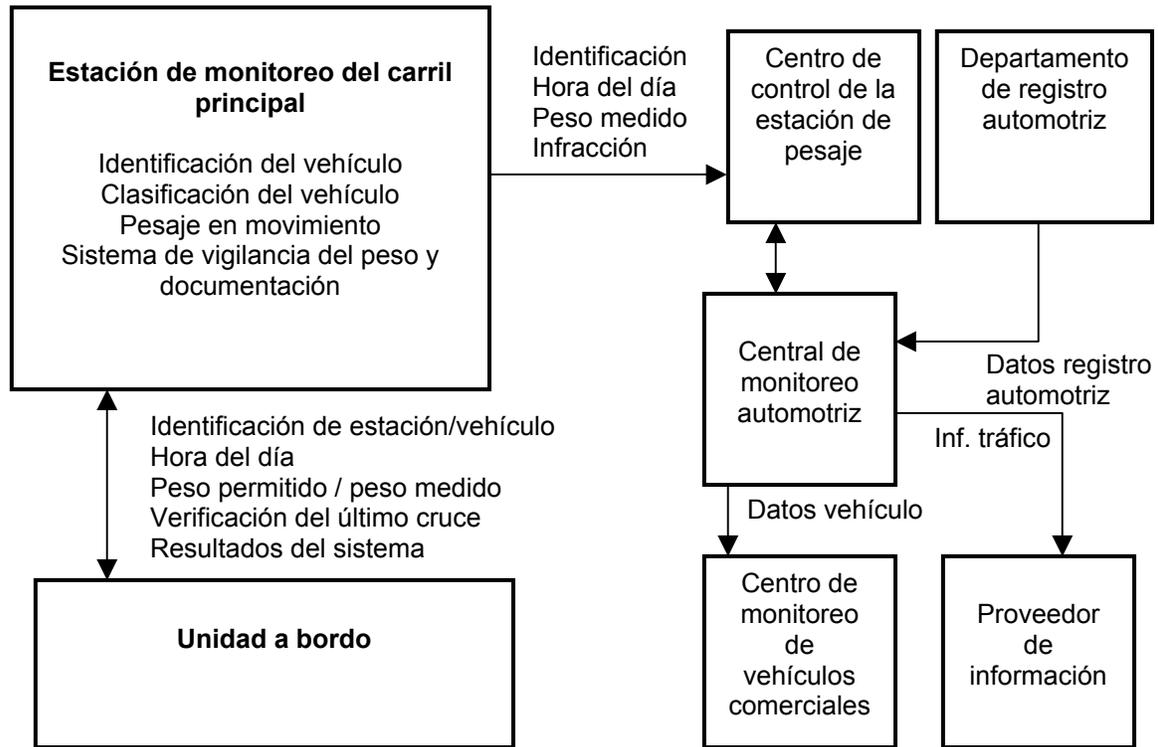


Fig 2.2.

**Flujo de datos en un sistema que integra pesaje-en-movimiento al sistema de cobro electrónico del peaje**

La incorporación de un sistema de peaje no-plano, que tome en cuenta el peso bruto vehicular y el peso de los ejes parece ser de incorporación inmediata. Como este sistema puede medir la separación de los ejes, es factible incorporarlo en el establecimiento de la cuota.

Por otro lado, la tecnología requiere ser mejorada en cuanto al pesaje en movimiento, ya que emplea equipos de tipo *portátil*. Los datos que pueden conocerse mediante el sistema son: longitud del vehículo; velocidad; peso de cada eje; distancia entre ejes, y peso bruto vehicular. La secuencia de información se da de tal forma que los datos son verificados y analizados en el trayecto, desde su pesaje en movimiento hasta que llega a un semáforo de distribución “pasa/no pasa” (a unos 100 m de distancia). Esto es, las verificaciones se realizan en cuestión de unos cuantos segundos, dado que el sistema se piensa para una velocidad entre 80 y 90 km/h.

No se mencionan en el artículo los costos que se deben cubrir para contar con *la unidad a bordo*, la cual semeja una televisión miniatura.

## 2.3 Carretera abierta de cuota 407 en Notario (Canadá)

En 1997 se inauguró una carretera de cuota, llamada 407, en la que se introdujeron muchas innovaciones tecnológicas con objeto de interferir lo menos posible con el tráfico vehicular. Se construyó para aliviar un tanto la saturación de la carretera 401, que corre paralela al Río San Lorenzo, y que es de las de más circulación en Norteamérica (TC, 2004).

La 407 se pensó como la primera carretera de cuota abierta en el mundo, refiriéndose ello a que no se requieren de casetas de cobro en las entradas y salidas de la misma, estableciendo para el peaje la combinación de identificación automática del vehículo, y el monitoreo de las entradas y salidas, para enviar al domicilio registrado la factura por el uso de la carretera.

Las tecnologías en esta vía consisten en un sistema de identificación automática que puede estar basado en un *transponder*, o bien en la de la placa de circulación, empleando en este caso un programa especialmente desarrollado para ello.

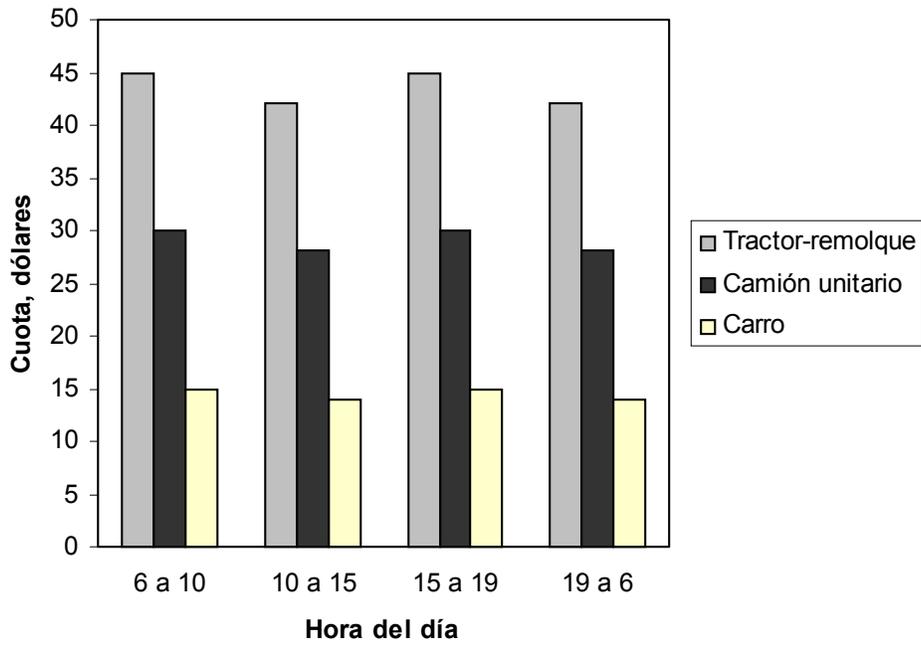
Las características de uso de la infraestructura, que pueden tomarse en cuenta para establecer el peaje, incluyen la hora del día; clasificación del vehículo; distancia recorrida, y el tipo de sistema de pago, ya sea por prepago o por factura a domicilio.

Otras características que son prometedoras para complementar el esquema tecnológico actualmente empleado, comprenden sistemas para detectar accidentes en la carretera; advertir a usuarios sobre situaciones adversas en la misma; un sistema de pesaje en movimiento para efectos del control del peso; y un “monitoreo ambiental” de la superficie del pavimento, especialmente en invierno.

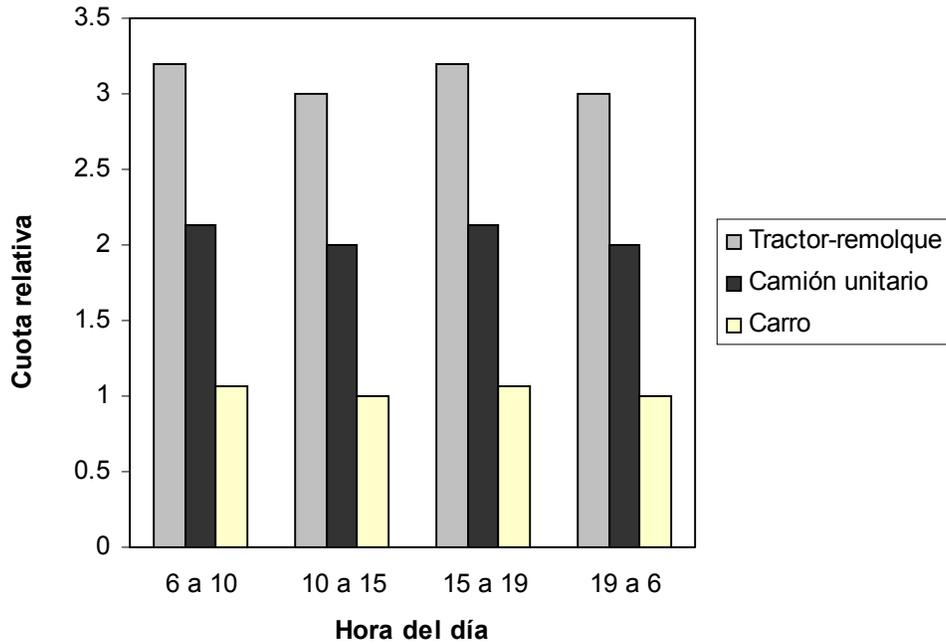
Como ejemplo de las tarifas para este sistema de cuotas, la fig 2.3 muestra los diferentes montos con respecto a la hora del día y del tipo de vehículo de que se trata, en un recorrido *de punta a punta* en dicha carretera 407, que comprende 107.27 km.

Las gráficas muestran una severa rigidez de los pagos, estableciendo costos menores de 10 a 15 h y de las 19 las a las 6 de la mañana, identificándose por tanto una especie de cobro por congestión, dado que la mayor demanda de servicio estaría en los periodos de inicio y final del día laboral, o sea de 6 a 10 de la mañana, y de 3 a 7 de la tarde-noche.

Las variaciones porcentuales por efecto de los cargos por congestión, resultan iguales para todo tipo de vehículos, y son del 6.4 %.



a)



b)

**Fig 2.3.** Ejemplo de pago de cuota en la carrera 407 de Ontario, Canadá. a) en dólares canadienses; b) en términos de la tarifa mínima

La fig 2.3 b) muestra que el cobro por tipo de vehículo consiste, en forma aproximada en duplicar lo que paga uno ligero cuando se trata de uno pesado no articulado, y de aproximadamente el triple en caso de uno pesado articulado.

Las cuotas en esta carretera son ajenas a muchos factores relacionados con el efecto potencial de los vehículos en las infraestructuras, incluyendo la vulnerabilidad del pavimento, el nivel de peso de las unidades y sus características geométricas, tales como la separación de sus ejes.

Adicionalmente, no contempla en un futuro establecer las cuotas como una función del nivel de carga, ya que pretende incluir los sistemas de sistemas de pesaje en movimiento para aspectos puramente regulatorios.

Sin embargo, su enorme ventaja es que consiste en un sistema abierto, en el cual y con objeto de prevenir situaciones en las que los vehículos no cuenten con el *transponder*, o sus placas traseras resulten ilegibles, se efectúa un cobro manual parejo de 50 dólares.

## **2.5 Carreteras de cuota exclusivas para camiones**

Como una forma interesante para convertir una carretera en una de cuota, existe una propuesta de supercarreteras exclusivamente para vehículos pesados (Orski, 2002). Este tipo de esquemas puede facilitar la incorporación de tecnologías aun más avanzadas para la asignación de cuotas como una función del efecto potencial de tales automotores sobre los pavimentos.

Sin embargo, aún está en la etapa de diseño conceptual, y las razones para emprender la aplicación de una facilidad de este tipo, se encuentran supeditadas a cuestiones de carácter político-económico.

## **2.6 Otras tecnologías de cobro electrónico**

Otros modelos se han propuesto para optimizar los sistemas de cobro, los cuales atienden el aspecto financiero, sin abordar en algunos casos, el impacto de tecnologías modernas (Levinson y Chang, 2003). En ese sentido Acha (2000) ha llevado a cabo una revisión de tecnologías para el cobro electrónico, incluyendo las empleadas en México.



## 3 Vulnerabilidad de pavimentos asfálticos

---

Se presenta una metodología para estimar el efecto de diferentes características de los vehículos y del pavimento que afectan el potencial deterioro de los pavimentos flexibles, debido al tránsito de unidades pesadas.

### 3.1 Energía de deformación del pavimento

El efecto dañino de los automotores en los pavimentos será caracterizado ahora a través de una metodología basada en la energía que se almacena de manera transitoria en la carpeta durante el paso de los vehículo (Romero y Lozano, 2000).

La fig 3.1a) ilustra la variación del daño potencial causado al pavimento (energía almacenada) como una función de la temperatura de éste para una carga constante en la llanta. El incremento en la energía almacenada con el desarrollo de la temperatura, se desprende del cambio en la rigidez del betún,  $E_b$ , expresado de la siguiente manera (Collop, 1993):

$$E_b = 1.157 \cdot 10^{-7} \cdot t_\ell^{-0.368} \cdot 2.718^{-PI^{(R)}} \left( T_{RB}^{(R)} - T_{asp} \right)^5 \quad (3-1)$$

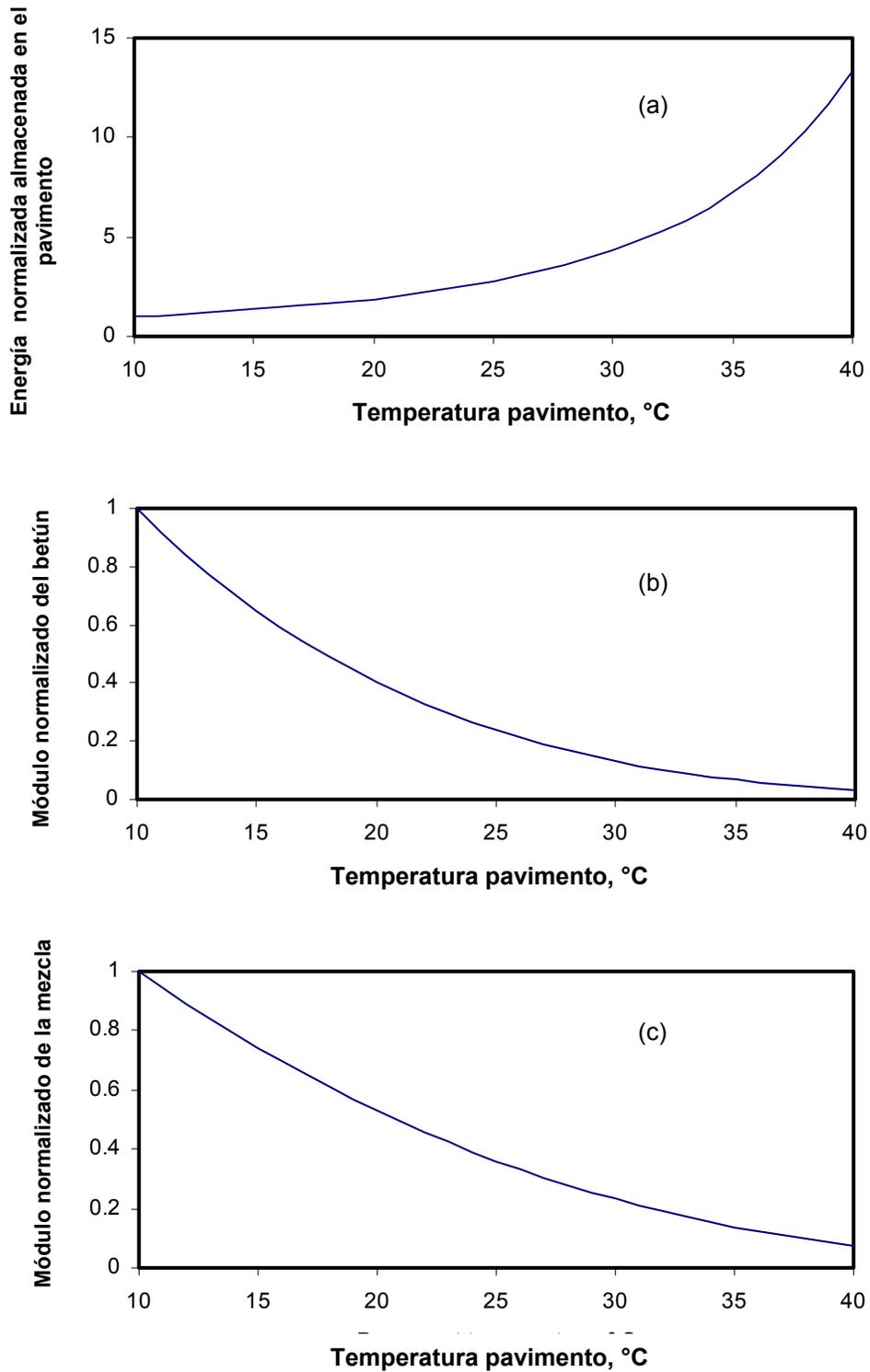
en donde  $t_\ell$  es el tiempo de aplicación de la carga;  $T_{asp}$  la temperatura promedio de la mezcla asfáltica;  $T_{RB}^{(R)}$  la temperatura de suavización del asfalto recuperado y  $PI^{(R)}$  el índice de penetración.

La fig 3.1b) muestra las variaciones normalizadas correspondientes del módulo  $E_b$  ante variaciones de la temperatura, mismas que también afectan al módulo de la mezcla,  $E$ , como sigue (Collop, 1993):

$$E = E_b [1 + (257.5 - 2.5 \cdot VMA) / n(VMA - 3)]^n \quad (3-2)$$

donde  $VMA$  describe el porcentaje de huecos, y el exponente  $n$  está dado por:  
 $n = 0.83 \log_{10} (4 \cdot 10^4 / E_b)$  .

La fig 3.1c) ilustra estas variaciones normalizadas de  $E$  con la temperatura.

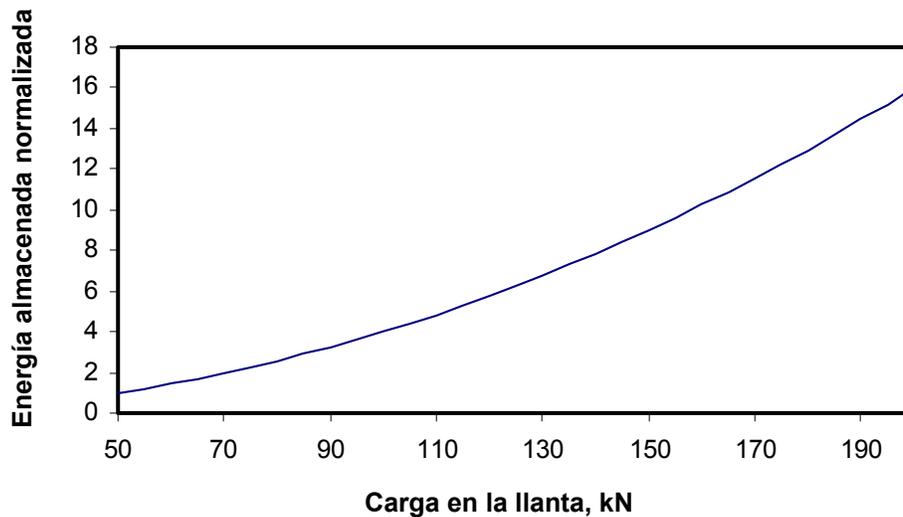


**Fig 3.1.**  
Efecto de la temperatura del betún sobre: a) energía almacenada; b) módulo del betún, y c) módulo de la mezcla. ( $t_\ell = 0.05$  s;  $T_{RB}^{(R)} : 70$  °C; IP = -1; carga de la llanta = 50000 N)

La fig 3.2 ilustra el efecto potencial de las variaciones del nivel de carga sobre el pavimento, y su efecto en el pavimento (descrito como la energía almacenada  $V$ ), que toma la relación cuadrática:

$$V = \frac{1}{2E} \sigma^2 \quad (3-3)$$

En donde  $\sigma$  es el esfuerzo en el pavimento.



**Fig 3.2.**

**Efecto de la carga en la llanta sobre la energía almacenada ( $t_\ell = 0.05$  s;  $T_{RB}^{(R)}$ : 70 °C; IP = -1; VMA = 30.;  $T_{asp} = 12$  °C)**

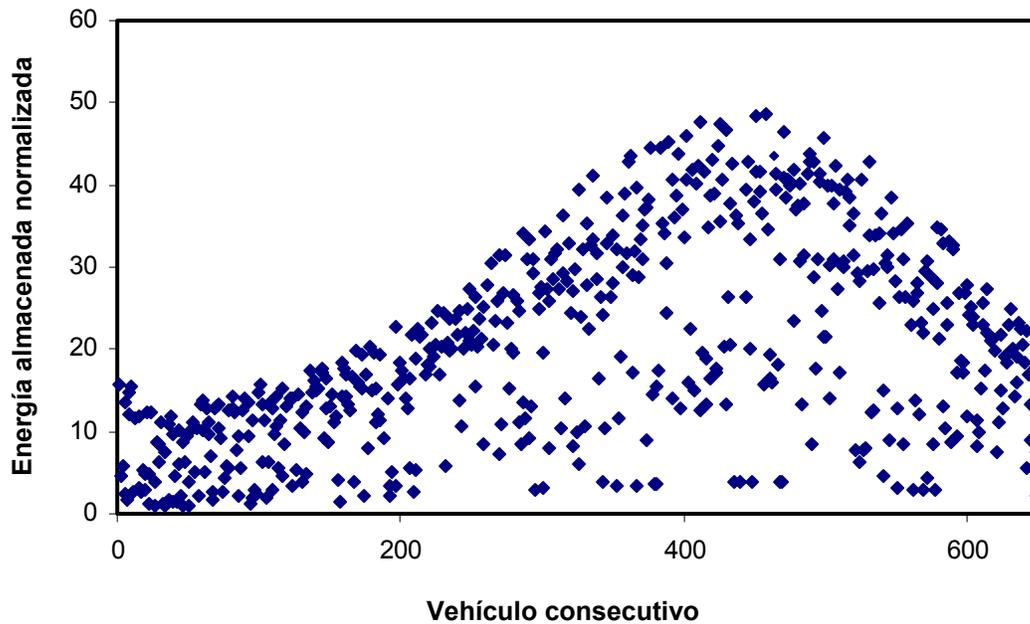
## 3.2 Montos de acuerdo con la energía almacenada

De acuerdo con la metodología descrita respecto a la energía almacenada de manera transitoria en el pavimento durante el paso de los vehículos, la fig 3.3 señala la dispersión potencial de los efectos de las unidades en el pavimento para un tráfico de transportes pesados no articulados de dos ejes sobre cierto segmento de carretera. En estos cálculos, la variación de la temperatura del pavimento se ha asumido sinusoidal, con una variación entre 11 y 26 °C y el nivel de carga oscilando entre cero y carga plena. Los datos de distribución horaria y nivel de carga están reportados aparte (IMT, 1996).

Los resultados de la fig 3.3 muestran que la relación máxima sobre la mínima alcanza un valor de 48, lo cual resulta del efecto combinado de la temperatura del pavimento y de la carga en los ejes. Al respecto, es importante reconocer que a pesar de tales diferencias significativas del potencial efecto nocivo de los

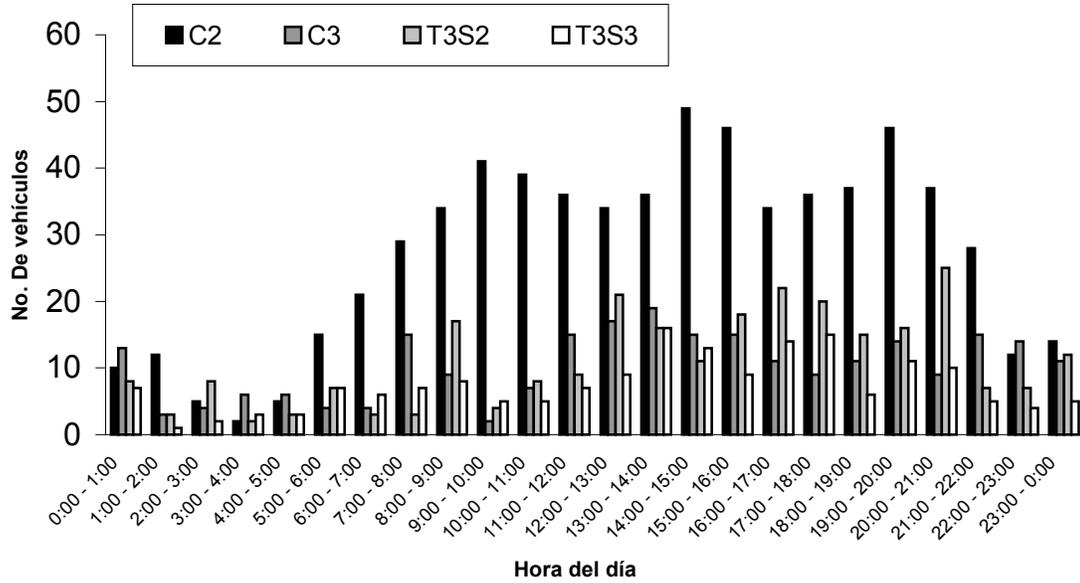
diferentes vehículos sobre el pavimento, en una carretera de cuota no inteligente todos estos transportes pagarían la misma tarifa.

Para los resultados de la fig 3.3, la 3.4 corresponde a una distribución medida del tráfico de vehículos pesados en México (IMT, 1996), mientras que la 3.5 se refiere a la distribución de unidades en términos de la temperatura a la cual habían usado la infraestructura, de acuerdo con la variación armónica indicada antes para la temperatura.

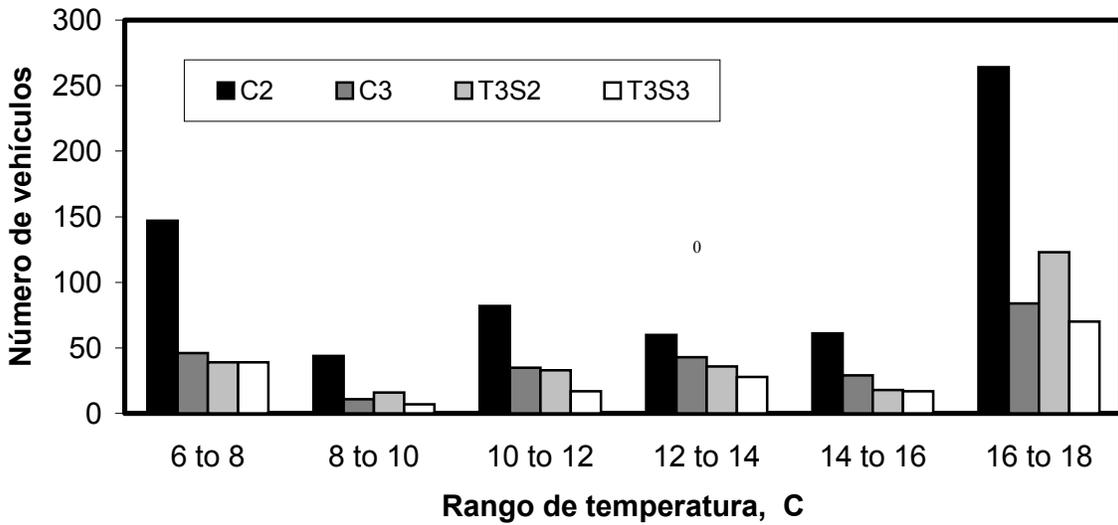


**Fig 3.3.**  
**Efecto potencial sobre el pavimento para un tráfico medido**

Estos resultados y mediciones dan idea de lo diverso que puede ser el efecto de los vehículos en los pavimentos, por lo que toma enorme relevancia incorporar este tipo de metodologías en el cobro de los peajes de las carreteras de cuota. En el Cap 4 se compara esta metodología con otras publicadas en la literatura.



**Fig 3.4.**  
Distribución del tráfico de vehículos pesados durante un periodo medido de 24 h



**Fig 3.5.**  
Distribución de los vehículos en el tránsito, en términos de la temperatura del pavimento



## 4 Diseño conceptual

---

En esta etapa del diseño se describirán los diferentes módulos que componen a la Caseta de Cobro Inteligente, así como sus principios de operación, en los cuales se toman en cuenta las necesidades planteadas el Cap 1 así como la revisión del estado de la técnica y la vulnerabilidad del pavimento, discutidos en los dos capítulos anteriores, respectivamente.

### 4.1 Módulos de la CCI

Los diferentes elementos que conformarán la CCI pueden agruparse en una representación por bloques, como en la fig 4.1: camino de la caseta (INF); sistema de pesaje en movimiento (SPM); soporte lógico (SLO); unidad de cobro (UCO); sistema de identificación del vehículo (SIV), y un sistema de comunicaciones (SCO). Las interacciones entre estos diferentes módulos se ilustran también en dicha figura. A continuación se describe el proceso de selección de los principios de operación de cada uno de estos módulos.

#### 4.1.1 Módulo, camino de la caseta (INF)

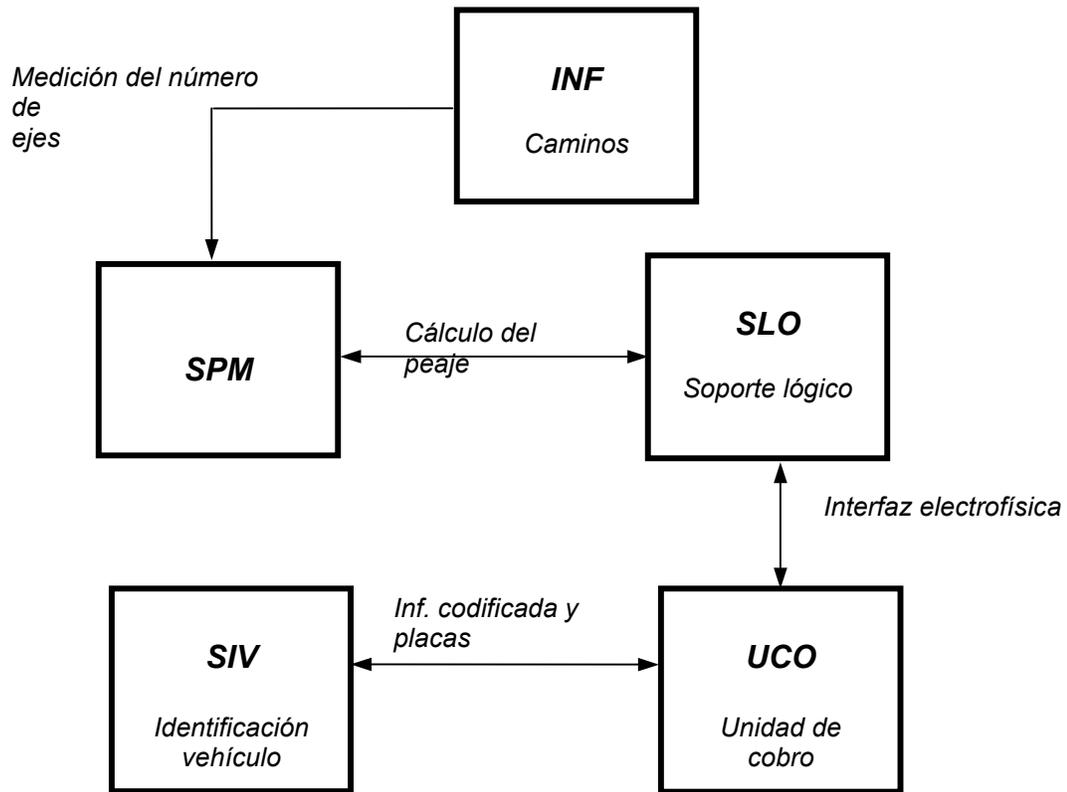
Este módulo representa los segmentos carreteros para la aproximación y salida del área de la caseta de cobro, que deben guiar el tráfico a lo largo de los diferentes segmentos de la CCI. Como una función del nivel esperado de tráfico, tales segmentos deberán construirse usando materiales que presenten gran resistencia a la fatiga, como el concreto hidráulico armado.

La longitud de los diferentes segmentos deberá definirse de acuerdo con la velocidad a la cual se desea que los vehículos pasen por la CCI. Esta longitud de camino también proporcionará el tiempo para que el soporte lógico (SLO) calcule la tarifa a pagar, al tiempo que el diseño geométrico debe satisfacer todos los requerimientos de las normas vigentes (Shen-Prassas, *et al*, 2003).

De esta manera, no existen más opciones que el material de que estarán hechos los caminos de acceso a la CCI. Como debe existir una compatibilidad total de los pavimentos de la CCI y el resto de la carretera, se propone que éstos sean de las mismas características que el resto de la carretera.

#### 4.1.2 Módulo de Sistema de Pesaje en Movimiento (SPM)

Los sistemas SPM disponibles comercialmente cuentan con distintas características y principios operacionales, que van desde placas en flexión hasta elementos tubulares capacitivos. Entre estos principios de operación, se considera que la placa en flexión es la mejor opción al presentar la suficiente precisión aun para fines regulatorios (Koniditsiotis, *et al*, 1995).

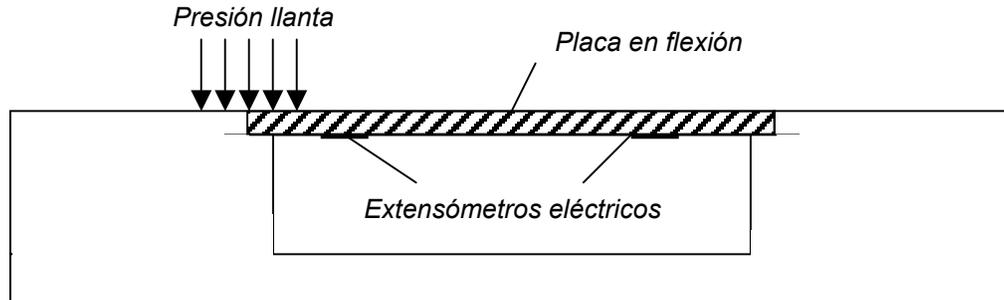


**Fig 4.1.**  
**Diagrama de bloques del sistema CCI**

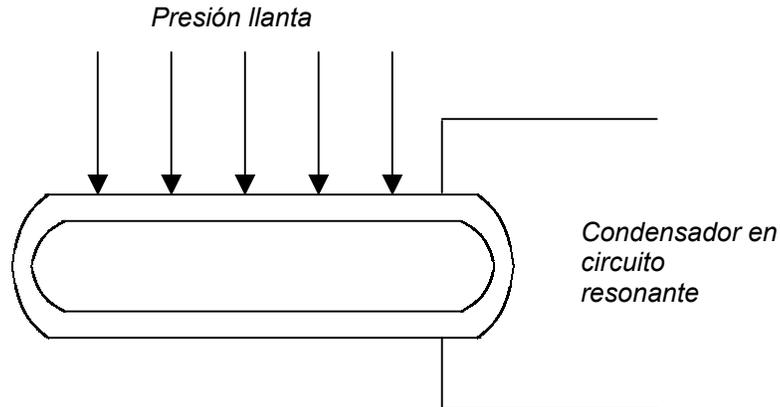
Los dispositivos de pesaje en movimiento pesarán por separado los dos grupos de llantas de cada eje individual, y deben tener transductores complementarios para contar el número de ejes que correspondan al vehículo particular que pase por este sistema. Se considera pertinente la existencia de dos sistemas SPM independientes, con objeto de promediar las mediciones.

La fig 4.2 indica las dos variantes de transductores para los dispositivos de pesaje en movimiento; esto es, la placa en flexión y los elementos de capacitancia.

Por su parte, la tabla 4.1 muestra la matriz de evaluación de los distintos principios de operación que es posible aplicar para este módulo. Los factores de evaluación se consideran ponderados, de tal suerte que la confiabilidad y precisión se toman como los elementos de evaluación más importantes. De acuerdo con tal evaluación, la placa en flexión resulta ligeramente con la mejor calificación.



a) Placa en flexión



b) Condensador

**Fig 4.2.**  
**Tipos de transductores de la carga de las llantas.**

La información que se colecte en estos equipamientos puede ser transmitida por cable o inalámbricamente a la estación de pesaje (Chou, *et al*, 2003). En cuanto a estos otros principios de operación, la tabla 4.2 presenta la matriz de evaluación para este sistema de comunicación. Como variantes para la comunicación, se tiene una red a base de fibra óptica, o mediante microondas.

Los parámetros para evaluar los distintos principios de operación consisten en el costo, la confiabilidad y la durabilidad. Una red de fibra óptica resulta de mayor confiabilidad y sobre todo, menos susceptible de sufrir interferencia por los vehículos que pasen por la estación.

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Placa en flexión, %	Elementos capacitancia, %
Precisión	0.4	80 / 32	90 / 36
Confiabilidad	0.5	90 / 45	80 / 40
Durabilidad	0.1	90 / 9	80 / 8
<b>Resultado de la evaluación</b>	<b>1.0</b>	<b>86</b>	<b>84</b>

**Tabla 4.1.**  
**Matriz de evaluación para el módulo SPM**

CRITERIO A EVALUAR	Factor de ponderación	Comunicación inalámbrica, %	Comunicación por fibra óptica, %
Insensibilidad a la interferencia	0.6	60 / 36	90 / 54
Confiabilidad	0.4	80 / 32	80 / 32
<b>Resultado de la evaluación</b>	<b>1.0</b>	<b>68</b>	<b>86</b>

**Tabla 4.2.**  
**Matriz de evaluación para el módulo de comunicación en cuanto a su característica de continuidad**

### 4.1.3 Soporte lógico (SLO)

Las cargas por eje serán alimentadas a un programa de computadora que determine la tarifa que cualquier vehículo particular pague en la caseta de cobro. Los principios operacionales de ese programa deberían representar una metodología validada y bien reconocida, e implicar un programa de cálculo que efectúe las operaciones en fracciones de segundo. Se considera que dicha metodología podría basarse en la aproximación energética al problema, planteada en el Cap 3. Otras metodologías estarían basadas en el valor de las fuerzas, y en su posible elevación a una potencia dada.

Se presenta una evaluación de las distintas metodologías posibles para el módulo de soporte lógico.

Coeficiente de carga dinámica (Dynamic load coefficient, DLC), es una medida estandarizada del componente dinámico de las fuerzas que se aplican al pavimento, expresado mediante la fórmula (Lin, et al, 1994):

$$DLC = \frac{s}{\bar{F}} \quad (4-1)$$

donde  $s$  es la desviación estándar de las fuerzas, y  $\bar{F}$  la fuerza media para un número  $N$  de datos en el tiempo.

Factor de esfuerzo en el camino (Road Stress Factor  $RSF, \Phi$ ), se basa en la Ley de la Cuarta Potencia, aplicada tomando en cuenta las variaciones en el componente de la carga dinámica (OCDE, 1992).  $RSF$  se expresa mediante la ecuación (Cebon, 1993):

$$\Phi = (1 + 6\bar{s}^2 + 3\bar{s}^4) P_{stat}^4 \quad (4-2)$$

en donde  $P_{stat}$  es la fuerza estática (promedio) transmitida por la llanta, y  $\bar{s}$  el coeficiente de variación de las fuerzas dinámicas en las llantas ( $DLC$ ).

Factor de impacto del 95 percentil (IF95,  $IF_{95^{th}}$ ), esta medida toma en cuenta la repetibilidad de las cargas sobre el pavimento, de tal suerte que se obtiene un incremento con respecto al  $DLC$ , y se calcula mediante la fórmula (Kulakowski, et al, 1995):

$$IF_{95^{th}} = 1 + 1.645 \text{ DLC} \quad (4-3)$$

95 percentil del factor de esfuerzo del camino (RS95,  $\Phi_{95^{th}}$ ), se expresa de la siguiente manera (Kulakowski, et al, 1995):

$$\Phi_{95^{th}} = (IF_{95^{th}})^4 \quad (4-4)$$

La fuerza máxima, o fuerza pico (FMÁX,  $F_{máx}$ ) de un conjunto de  $N$  datos de las fuerzas  $F_i$  que los vehículos transmiten al pavimento, ha sido también propuesta como una medida del efecto potencial de los vehículos sobre los pavimentos (Lin, et al, 1994):

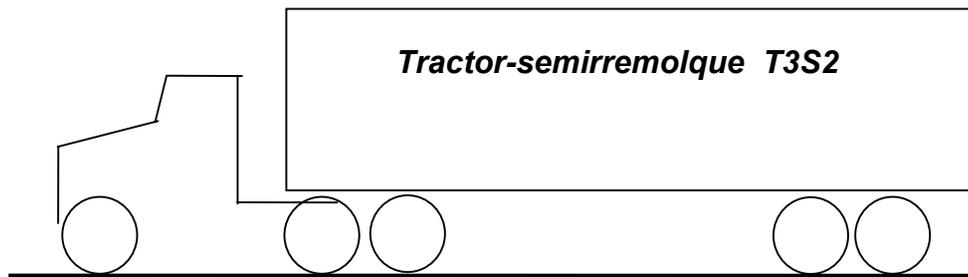
$$F_{máx} = \text{Máx}\{F_i, i=1, N\} \quad (4-5)$$

95 percentil del criterio de la cuarta potencia (4POW95), se define en este estudio como referencia a la fuerza que cada uno de los ejes del vehículo

transmite al pavimento, a la cual se aplica el 95 percentil para considerar la posible repetibilidad de los patrones de distribución espacial de las fuerzas de los vehículos en el pavimento (Sweatman, 1983). Es importante destacar que bajo una base agregada en relación con la carpeta, las relaciones de la cuarta potencia han sido seleccionadas en diversos estudios para el análisis de los efectos eventuales de los vehículos sobre el pavimento (Cole and Cebon, 1998; Cebon, 1993).

#### Comparación de las medidas de desempeño

Con objeto de comparar las distintas medidas de desempeño que pueden ser empleadas para el Módulo SLO, diversas simulaciones se llevaron a cabo acerca de la circulación de un tractor-semirremolque como el de la fig 4.3.



**Fig 4.3.**  
**Vehículo empleado para la simulación de las distintas medidas de desempeño del Módulo SLO**

Las figs 4.4 y 4.5 muestran las evaluaciones de las distintas medidas de desempeño, considerando exclusivamente los dos últimos ejes de la combinación tractor-semirremolque respectivamente, de acuerdo con la matriz de pruebas de la tabla 4.3. La tabla 4.4 corresponde a las evaluaciones comparativas de estas diferentes medidas de desempeño.

<i>Factores</i>		<i>Niveles</i>		
<i>Velocidad (km/h)</i>		65	85	105
<i>Carga/carga legal máxima</i>	0	0.5	1	1.5
<i>Rugosidad del pavimento</i>	<i>Parejo</i> <i>(IRI=0.52 mm/m)</i>	<i>Media rugosidad</i> <i>(IRI=2.05 mm/m)</i>	<i>Rugoso o disparejo</i> <i>(IRI=4.23 mm/m)</i>	

**Tabla 4.3.**  
**Factores y niveles considerados en la evaluación de las medidas de Desempeño para el Módulo SLO**

<b>CRITERIO A EVALUAR</b>	<b>Factor de ponderación</b>	<b>Coefficiente de carga dinámica, DLC %</b>	<b>RSF</b>	<b>IF95</b>	<b>RS95</b>	<b>F máx</b>	<b>Energía, EN</b>	<b>4POW95</b>
Reproducibilidad	0.1	80/8	90/9	90/9	90/9	90/9	90/9	90/9
Simplicidad de cálculos	0.1	90/9	90/9	90/9	90/9	90/9	80/8	90/9
Confiabilidad	0.2	90/18	80/16	90/18	90/18	90/18	90/18	90/18
Sensibilidad a parámetros del vehículo	0.3	90/27	80/ 24	90/27	90/27	90/27	90/27	90/27
Sensibilidad a parámetros del pavimento	0.3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	90/27	0/0
<b>Resultado de la evaluación</b>	<b>1.0</b>	<b>62</b>	<b>58</b>	<b>63</b>	<b>63</b>	<b>63</b>	<b>89</b>	<b>63</b>

**Tabla 4.4.**  
**Matriz de evaluación de las medidas de desempeño a ser empleadas para el módulo SLO**

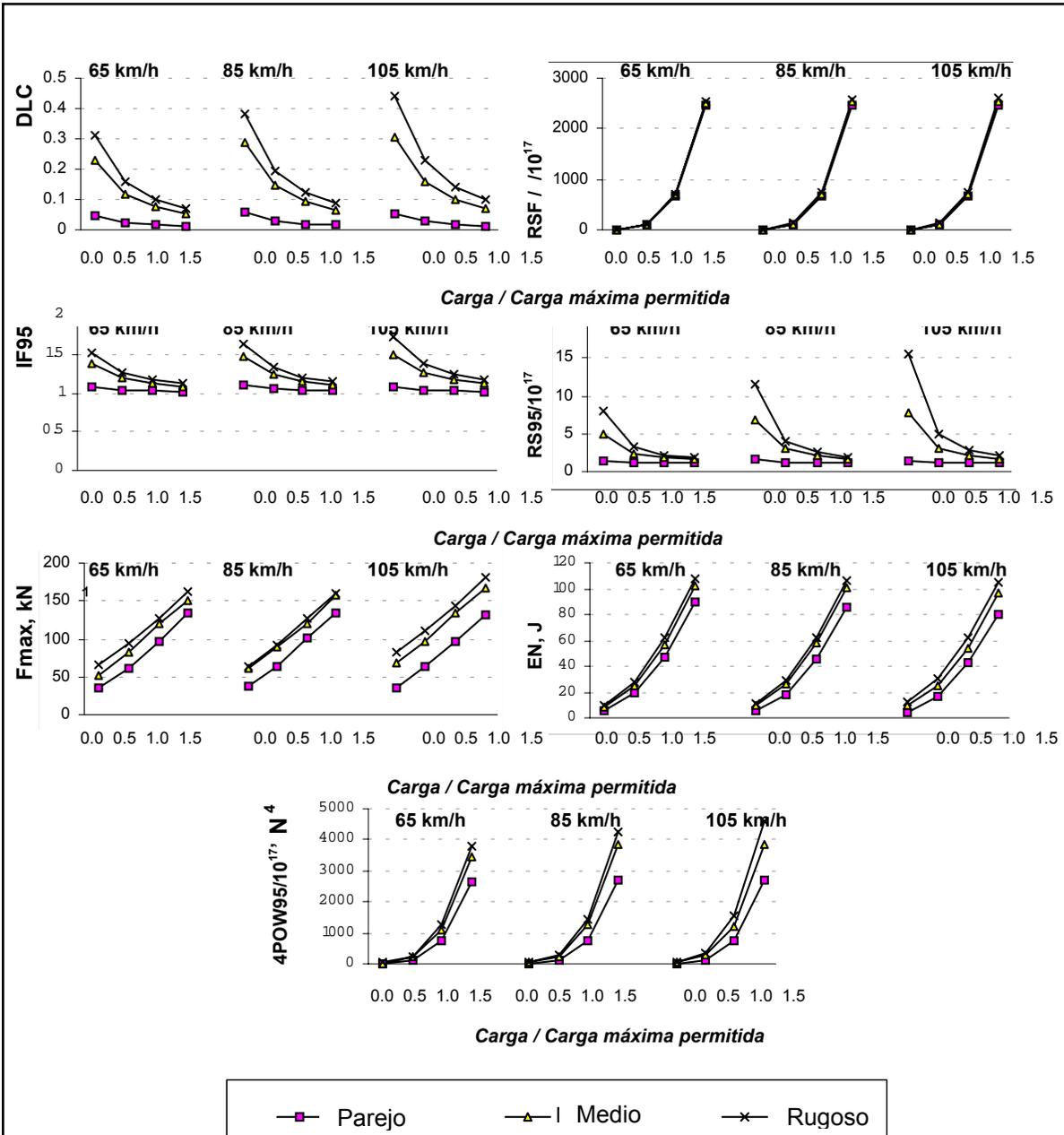


Fig 4.4.

Análisis comparativos de las diferentes medidas de desempeño, para el eje delantero del semirremolque del vehículo T3S2, como una función del nivel de carga, velocidad y condición de rugosidad del pavimento

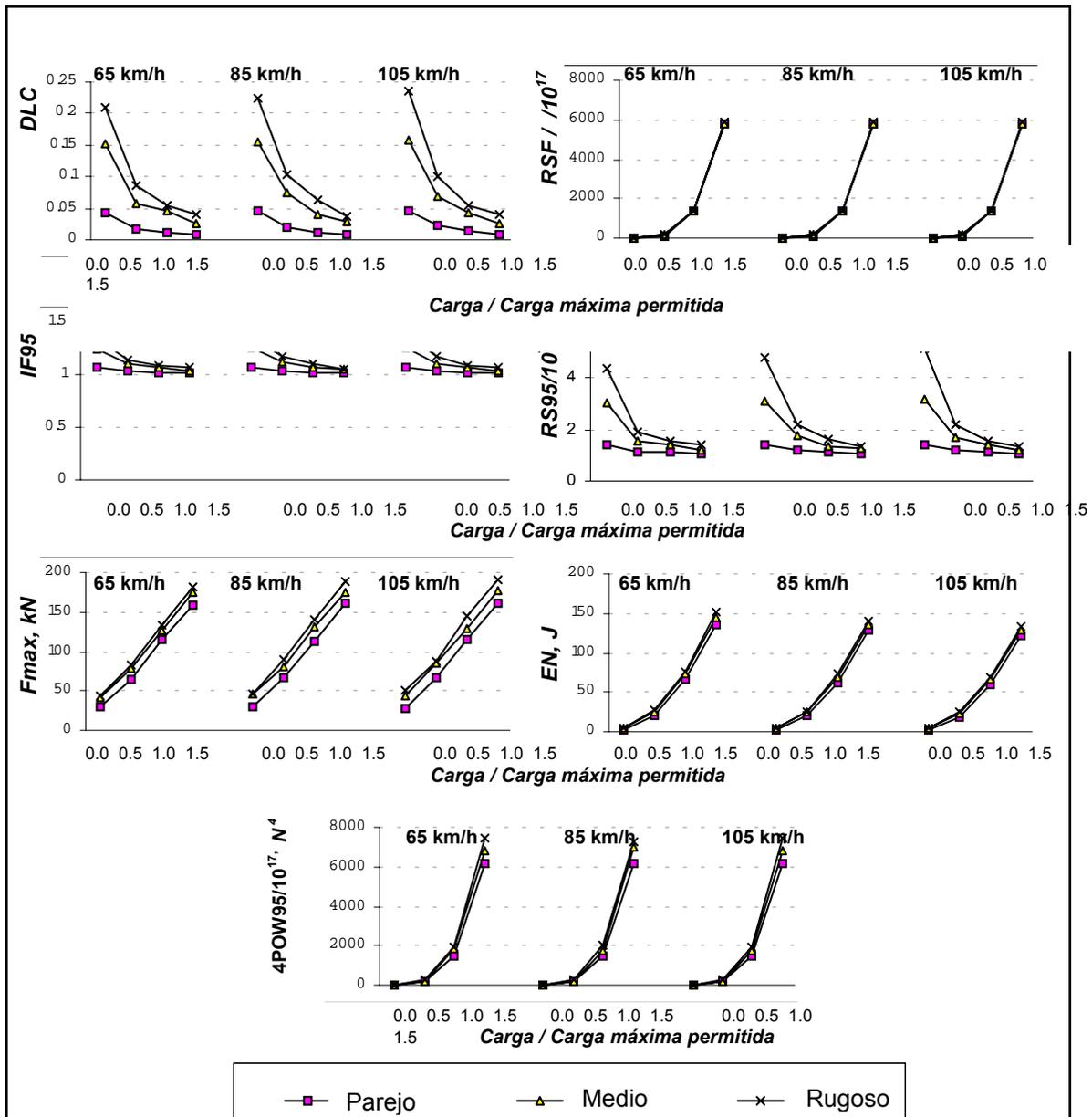


Fig 4.5.

**Análisis comparativos de las diferentes medidas de desempeño, para el eje trasero del semirremolque del vehículo T3S2, como una función del nivel de carga, velocidad y condición de rugosidad del pavimento**

La medida de desempeño que mejor evalúa el efecto de los vehículos en el pavimento resulta ser la energía de la deformación, debido fundamentalmente a que las otras medidas no toman en cuenta la deformación y respuesta general de los pavimentos. Sin embargo, es importante haber comparado todas las medidas

de desempeño, para efectos de ubicar la medida seleccionada en el universo de medidas e interacciones vehículo-pavimento.

#### **4.1.4 Unidad de cobro (UCO)**

La CCI debería contar con los medios para efectuar el cobro ya sea manual o automáticamente. Esto es imperativo en tanto que muchos de los usuarios podrían no estar dados de alta en el sistema. Esta situación implica que para evitar retrasos en la administración de los cambios a los usuarios, las cifras de la cantidad a pagar sean redondeadas para evitar fracciones de unidad monetaria. Otra posibilidad es que se empleen máquinas de alta velocidad para proveer el cambio exacto.

En este caso se identifica una restricción importante, por cuanto a las variantes posibles de este módulo; es decir, que las necesidades planteadas en el capítulo correspondiente señalan de manera específica contar con dispositivos para recolectar el dinero en diferentes formas, ya sea efectivo, tarjeta de prepago o tarjeta de crédito.

#### **4.1.5 Sistema de identificación del vehículo (SIV)**

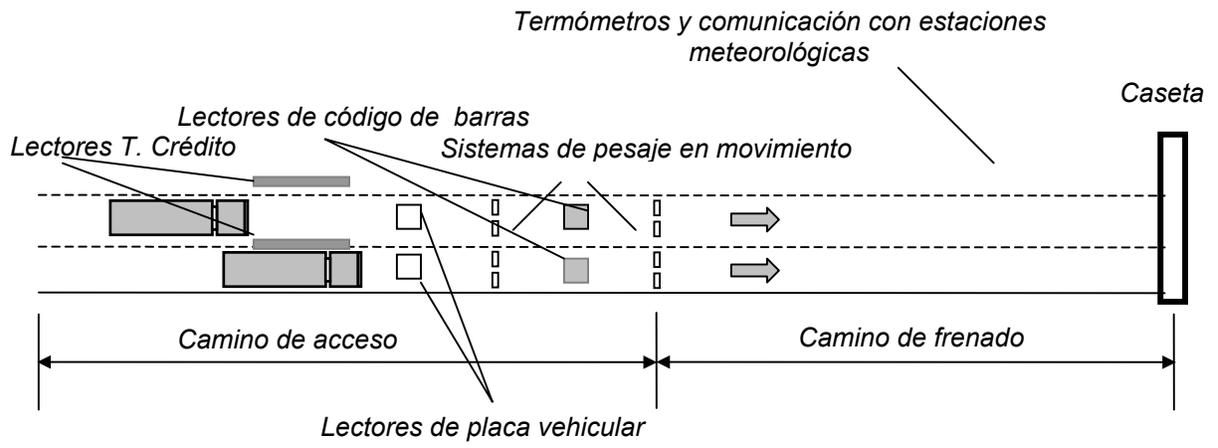
Cada vehículo que pase por la caseta deberá ser identificado. Para este caso, dos principios de operación deben considerarse: uno estaría basado en *transponders*, combinado con un sistema para reconocer los caracteres en las placas de circulación. Ambos deberían ser capaces de ser usados de manera indistinta. Al respecto, las comunicaciones para el cobro electrónico de peajes han evolucionado recientemente, en particular las tecnologías emergentes de comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC por sus siglas en inglés), que se han aplicado de manera exitosa en las comunicaciones, en el derecho de vía.

Para la identificación inequívoca del vehículo se considera el uso de tres sistemas redundantes: la identificación de la placa por análisis de imágenes; la identificación con base en código de barras, y la identificación mediante el uso de *transponders*.

### **4.2 Descripción del diseño conceptual de la CCI**

La fig 4.6 ilustra la caseta de cobro inteligente, que emplea los principios de operación discutidos en esta sección. Es importante destacar que algunos otros sistemas de verificación podrían incorporarse en el CCI, como un sistema de comprobación de las dimensiones máximas de los vehículos, y la verificación de la separación de los ejes.

Se hace notar que el diseño de detalle de todos los componentes y sistemas especializados habría de efectuarse en una etapa posterior, concerniente a los diseños preliminar y de detalle.



**Fig 4.6.**  
**Caseta de cobro inteligente**



## 5 Conclusiones y recomendaciones

---

En la actualidad, el criterio para fijar las tarifas o cuotas que pagan los vehículos que transitan por caminos de cuota, es el resultado de dividir entre todos los usuarios los costos directos e indirectos involucrados en la operación y mantenimiento de las infraestructuras. Esto es, las tecnologías empleadas actualmente para fijar las tarifas que pagan los distintos usuarios de tales infraestructuras no discrimina entre un vehículo en vacío, o uno a plena carga. Menos aun toman en cuenta estos sistemas los diferentes grados de vulnerabilidad a los que las infraestructuras son usadas.

La idea de las carreteras de cuota es identificable desde tiempos remotos, en los que la movilidad de las personas y mercancías resultó de mayor relevancia. Desde el siglo XVIII se ha identificado la necesidad de establecer caminos de cuota en los que los vehículos paguen de manera diferenciada, como una función del daño potencial que estén causando a las infraestructuras. Sin embargo, tales esquemas no se han visto reflejados en la práctica actual.

Los esquemas existentes por cuanto al cobro de cuotas como una función de la hora del día, obedecen a cargos por congestión. Esto es, se trata de crear mediante cuotas adicionales, conciencia acerca de la necesidad de no saturar las vías de comunicación, distribuyendo su uso a lo largo del día. Estos esquemas, sin embargo, han resultado infructuosos en la mayor parte de las eventuales aplicaciones y, políticamente inviables.

En la literatura se reportan muchas aplicaciones de sistemas de cobro electrónico, en el que las tarifas pagadas se calculan de manera automática como una función del tipo de vehículo y del número de ejes. Sin embargo, aunque en algunos casos se pesan los diferentes ejes de los vehículos, esta información corresponde a propósitos de vigilancia del peso de las unidades, efectuando la separación del vehículo en caso de que éste sobrepase las descargas globales y por eje establecidas en las normatividades. De acuerdo con esto, los sistemas de cobro electrónico, en lo que a automotores pesados se refieren, está íntimamente ligada con la legalidad de los vehículos.

No obstante, los sistemas de cobro electrónico de las casetas exhiben eficiencias notables por cuanto a la adquisición de tales pagos, disminuyendo incluso los niveles de contaminación que tales estaciones de cobro provocan en el ambiente, como resultado del congestionamiento vehicular a su alrededor.

Una metodología, parcialmente validada, basada en la energía que se almacena en el pavimento durante el paso de los vehículos, y que toma en cuenta los diferentes niveles de vulnerabilidad de los pavimentos asfálticos por cuanto a su temperatura, podría servir para establecer los montos de las tarifas que los diferentes usuarios deberían pagar, con base en el diferente daño potencial a los caminos.

Resultados de esta metodología aplicada a flujos reales de vehículos, señalan que la relación del daño causado por el más perjudicial de los transportes, entre el que menos daño causa es del orden de 48 veces. Esta cifra se considera relevante, y debería tomarse en cuenta en los desarrollos.

Esta metodología energética para calcular el monto de las casetas, podría aplicarse para estimar en tiempo real tales montos, dadas las formulaciones y programas de cómputo asociados, de alta eficiencia.

Para el diseño conceptual de una Caseta de Cobro Inteligente es posible aplicar diferentes mecanismos de pensamiento, incluyendo diversas aproximaciones para el diseño de equipamientos y sistemas. Estas metodologías pueden consistir en esquemas comerciales para la incorporación de innovación tecnológica, o contener de manera significativa una liga con las metodologías científicas a través del diseño metodológico en Ingeniería. Esta opción comprende diferentes etapas, y su objetivo final es modificar el estado de la técnica, mientras que el método científico busca modificar es el estado del conocimiento.

Las diferentes etapas del diseño metodológico parten de la revisión de la tecnología o estado del arte, y concluyen en la construcción del prototipo y prueba en campo. La etapa de diseño conceptual del diseño metodológico es una parte crucial del desarrollo del diseño, ya que en ella se identifican los diferentes bloques conceptuales que conforman el sistema y la interacción entre ellos, así como sus distintos principios de operación.

El proceso de diseño metodológico se aplica en este trabajo a una Caseta de Cobro Inteligente, la cual emplea como principio de operación para establecer los montos de los peajes, una metodología basada en la energía almacenada de manera transitoria en la carpeta durante el paso de vehículos. Otros módulos que comprenden una Caseta de Cobro Inteligente tienen que ver con el pesaje en movimiento de los vehículos involucrados, así como con el establecimiento de una temperatura característica y significativa de los pavimentos de las infraestructuras. Otros equipamientos serían incorporados con base en las necesidades del pago en estas casetas, ya sea en efectivo o con sistemas de cobro inteligente, en el que un *transponder* es instalado en el vehículo. Un sistema más simple, y redundante con el *transponder*, consistiría en un código de barras, en el parabrisas de la unidad.

El diseño conceptual resultante incluye un sistema para conocer las placas de los vehículos, como un tercer método para la identificación del transporte.

Las ventajas del uso de una Caseta de Cobro Inteligente incluyen una más justa asignación de las cuotas, que podrían promover el uso de infraestructuras que en muchos casos están siendo subutilizadas. Se recomienda, por tanto, la construcción de uno de estos sistemas, desarrollando para ello un diseño de

detalle de los diferentes sistemas y la construcción de un prototipo, a ser instalado en uno de los carriles de una de las varias casetas de cobro existentes.

De manera particular, este esquema de cobro inteligente podría establecerse en uno de los módulos de inspección por sobrecarga, como el instalado en la población de Calamanda, Querétaro. De manera piloto, esta facilidad podría proveer un esquema de prueba de los esquemas propuestos, de forma relativamente simple e inmediata.



# Referencias

---

- Acha, J A, "Tecnologías para el cobro electrónico de cuotas en carreteras y puentes", *Publicación Técnica 159*, Instituto Mexicano del Transporte (2000).
- Banerjeel, P, Bochenek, G M, y Ragusa, J M. "Analyzing the Relationship of Presence and Immersive Tendencies on the Conceptual Design Review Process" *Transactions of the ASME*, Vol 2, pp 59-64 (Mar 2002).
- Bichsel, R. "Should Road Users Pay the Full Cost of Road Provision", *Journal of Urban Economics*, 50 , pp 367-383 (2001).
- Burris, MW, y Pedyala, R.M. "Discrete Choice Models of Traveler Participation in Differential Time of Day Pricing Programs", *Transport Policy* 9, pp 241-251 (2002).
- Cebon, D. 'Interaction between Heavy Vehicles and Roads'. *SAE SP-951*. SAE (1993).
- Chou, C, Chen, Y, y Chen, I-C "The Integration of Weigh-in-motion, Automatic Vehicle Identification, and Electronic Toll Collection into Commercial Vehicle Operation", *Paper 03-1382*, TRB 2003 Annual Meeting (2003).
- Chu, Ch-P y Tsai, J-F "Road Pricing Models with Maintenance Costs" *Transportation* 31, pp 457-47(2004).
- Cole, D J. y Cebon, D, "Influence of Tractor-trailer Interaction on Assessment of Road Damaging Performance". *Procs Institution of Mechanical Engineers*. Vol. 212. Part D (1998).
- Collop, AC. "Effects of Traffic and Temperature on Flexible Pavement Wear," PhD Thesis, *Cambridge University*, England (1993).
- Craumer, P y Marshall, L. "Telecommunicating from and Electronic Cottage: Negotiating Potholes and Tool Booths", *Online*, Vol. 21 Issue 6, p 94(Nov-Dec 1997).
- Crump, D. "Controller Simplifies Tool Booth Automation", *Design News* 08.16.04, p 24 (2004).
- Dieter, G. ***Engineering Design. A Materials and Processing Approach***, Mc Graw-Hill, New York (1983).
- Ferrari, P. "Road Network Toll Pricing and Social Welfare", *Transportation Research Part B* 36, pp 471-483 (2002).

- IMT “Estudio de pesos y dimensiones”, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Operación y Seguridad del Transporte (1996).
- IRC “DYNAX Treadles – for Toll Roads”, Catálogo del producto, <http://products.irdinc.com/pdf/brochure/treadle/treadle.pdf>, fecha de consulta: Ago 2004.
- Kishore A. y Klashinsky, R. “Prevention of Highway Infrastructure Damage through Commercial Vehicle Weight Enforcement”, *Annual Indian Roads Congress*, Calcuta, India, Nov 4-7 (2000).
- Kulakowski, BT, Streit, D.A., Wollyung, RJ, y Kenis, WJ,. ‘Proceedings of the *Fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*. UMTRI. Ann Arbor (1995).
- Liang, VC y Paredis, CJJ. “A Port Ontology for Conceptual Design of Systems”, *Transactions of the ASME*, Vol 4,. pp 206-217 (Sep 2004).
- Lin, W-K, Chen, Y-C, Kulakowski, BT, y Streit, DA,. ‘Dynamic Wheel/pavement Force Sensitivity to Variations in Heavy Vehicle Parameters, Speed and Road Roughness’. *Heavy vehicles systems. Special series. Int J of Vehicle Design*. Vol 1, No 2 (1994).
- Koniditsiotis, C, Buckmaster, R, y Fraser, P. “Australian High Speed Weigh-in-motion – an overview”, *Proceedings, Road Transport Technology – 4*, pp 143-151 (1995).
- Levinson, D, y Chang, E. “A Model for Optimizing Electronic Toll Collection Systems”, *Transportation Research, Part A 37*, pp 293-314 (2003).
- Levinson, HS. “Highways, People and Places: Past. Present, and Future”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol 130 (4), pp 406-411 (Jul, 2004).
- Lipičnik, M. “Implementation of a Cellular Phone Terminal in Transportation Processes as a Function of Traffic Safety Improvement”, *Proceedings, Road Safety on Three Continents*, Moscow, Swedish National Road, and Transport Research Institute (2001).
- Lozano, A, Romero, JA, y Jauregui, JC. “Heavy Vehicles Suspension Dynamic Response and its Relation with Potential Damage to Roads”. *The International Journal of Vehicle Design*. Vol 6. Nos 1-4 (1999).
- OECD. ***Tolls on Interurban Road Infrastructure. An Economic Evaluation. Economic Research Centre, Report of the Round- table 118***, Paris, del 30 de noviembre al 1 de diciembre de 2000, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2003).

- Orski, CK. "Toll Truckways: Toward a Model 21<sup>st</sup> Century Freight Highway System", *Innovation Briefs*, Vol 13, Issue 5 (2002).
- PANYNJ "The Port Authority of New York and New Jersey's New Toll Rates", online version [www.panynj.gov](http://www.panynj.gov) (2001).
- QFD "Quality Function Deployment Institute", [www.qfdi.org](http://www.qfdi.org). Fecha de consulta: Ago 2004.
- Queiroga, A "Modern Toll Collection Auditing Systems", *5th ITS World Congress*, Seoul, Korea (Oct 12-16, 1998).
- Ramani, K, et al. (2003) "CADDAC: Multi-client Collaborative Shape Design System with Server-based Geometry Kernel", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol 3, pp 170-173 (Jun 2003).
- Romero, J.A. y Lozano, A. "A Simulation Methodology for Analysis of Vehicles – pavement Interactions in a Real Traffic Environment", *Proceedings, 6<sup>th</sup> International Symposium on Vehicle Weights and Dimensions*, Saskatoon, Jun 18-22, pp 229-238 (2000).
- Romero, J.A. y Lozano, A. "Study of Road Damage Potentials of Mixed Traffic", *IMECHE 2000*, Orlando, (Jul 2000).
- Samuel, P, Poole, RW. Jr., y Holguin-Veras, J. "Toll Truckways: A new Path Toward Safer and More Efficient Freight transportation", *Reason Public Policy Institute*, 39 pp (2002).
- Saka, AA, et al. "An Estimation of Mobile Emissions Reduction from Using Electronic Toll Collection in the Baltimore Metropolitan Area: A Case Study of the Fort McHenry Tunnel Toll Plaza", *National Transportation Center Morgan State University Baltimore*, Maryland, (Mar 2000).
- Sawaguchi, M. "Effective Approaches to Solving Technical Problems by Combining TRIZ with VE", *TRIZCON 2000*, (May, 2000).
- Shenk-Prassas, E, McLeod, D., y Bonyani, G. "Freeway Planning Methodology", *Paper 03-3149*, TRB 2003 Annual Meeting (2003).
- Shladover, SE. "DSRC – It's not Just for Tool Collection any More", *Telematics*, Jan/Feb, Issue 10, 16 pp (2002).
- Sweatman, PF, 'A Study of Dynamic Wheel Forces in Axle Group Suspension'. *Australian Research Board*. Special Report No 27 (1983).

Szykman, S; Sriram, R D; y Regli, W C. "The Role of Knowledge in Next-generation Product Development Systems", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 1 (Mar 2001).

TC, "Canada Transportation Act Review", Chapter 10: Paying for Roads, *Transport Canada* (2001).

TC "Highway 407, Engineered for Efficiency", "[http://www.tc.gc.ca/pol/en/brochure/highway\\_407.htm](http://www.tc.gc.ca/pol/en/brochure/highway_407.htm), Transport Canada. Fecha de consulta Ago 2004.

TRIZ "What is TRIZ" TRIZ, Journal, [www.triz-journal.com](http://www.triz-journal.com), Fecha de consulta: Ago 2004.

VE "Value Engineering Course, Value Engineering Methodology for Manufacturing" [www.vecourse.com](http://www.vecourse.com), Fecha de consulta: Ago 2004.

Zeidner, L y Wood, R. "The Collaborative Innovation (IC) Process", *The TRIZ Journal*, (Jun 2000).

Zeng, Y. "Axiomatic Theory of Design Modeling", Society for Design and Process Science, *Transactions of the SDPS*, Vol 6, No 3, pp 1-28 (Sep 2002).



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

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

**CIUDAD DE MÉXICO**

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

**SANFANDILA**

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

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)