

VIBRACIÓN DURANTE EL TRANSPORTE Y SU EFECTO EN PERECEDEROS. ENFOQUE INTRODUCTORIO

Manuel de Jesús Fabela Gallegos
José Ricardo Hernández Jiménez
David Vázquez Vega
Alejandro Lozano Guzmán

Publicación Técnica No. 188
Sanfandila, Qro. 2002

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

**Vibración durante el transporte y su
efecto en perecederos.
Enfoque introductorio**

**Publicación Técnica No. 188
Sanfandila, Qro. 2002**

Créditos

Este escrito fue elaborado por Manuel de Jesús Fabela Gallegos, José Ricardo Hernández Jiménez y David Vázquez Vega, de la Coordinación de Equipamiento para el Transporte. Colaboró también Alejandro Lozano Guzmán, asesor del Grupo de Dinámica Vehicular.

Se contó, además, con el apoyo, comentarios y sugerencias del Coordinador de Equipamiento para el Transporte, Miguel Martínez Madrid.

Indice

	Página
Resumen	V
Abstract	VII
Resumen Ejecutivo	IX
Introducción	1
1 Antecedentes	5
1.1 Aspectos del Manejo de Productos Postcosecha	5
1.2 El Transporte en la Generación de Daño Mecánico	7
1.3 Consideraciones para la Estimación del Daño	8
2 Vibración en Vehículos de Autotransporte	11
2.1 Parámetros Característicos de la Vibración	11
2.2 Vibración de Vehículos de Carga	12
2.2.1 Suspensiones típicas del transporte de carga	13
2.2.2 Suspensión de hojas o muelles	14
2.2.2 Suspensión neumática	15
2.3 Transmisión de la Vibración	18
3 Medición Experimental de la Vibración	21
3.1 Esquema General de Instrumentación	21

	Página
3.1.1 La cadena de adquisición de datos de vibración	21
3.1.2 Acelerómetro	22
3.1.3 Acondicionador y amplificador	24
3.1.4 Tarjeta de adquisición	25
3.1.5 Computadora	26
3.2 Proceso General de Adquisición	26
3.2.1 Selección de puntos de instrumentación	26
3.2.2 Frecuencia de muestreo	28
3.2.3 Identificación de características	28
4 Simulación de la Vibración	31
4.1 Generalidades	31
4.2 Simulación por Computadora	31
4.2.1 Transmisión de vibración	31
4.2.2 Modelos de suspensiones en vehículos	32
4.3 Simulación en Laboratorio	35
4.3.1 Necesidades de la simulación de vibraciones en laboratorio	35
4.3.2 Equipo para pruebas de vibración en laboratorio	36
4.4 Ejemplos Breves de Vibración en Perecederos	38
Conclusiones	43
Referencias	45

Resumen

En este escrito se remarca la importancia que tiene el proceso de transporte de productos agrícolas por carretera, especialmente del tipo perecedero, en la alteración de sus cualidades físicas y mecánicas, principalmente las debidas a la vibración. Se describe el desarrollo general del proceso de medición de vibraciones y su aplicación en la determinación de daño a productos agrícolas. Se enfatiza también la simulación de la vibración, tanto por medio de programas de cómputo para modelar vehículos y su sistema de suspensión, como por la reproducción de patrones de vibración empleando equipo de laboratorio. Finalmente, se presenta la combinación de la simulación numérica y de las pruebas de laboratorio para identificar preliminarmente la relación daño mecánico – vibración. Esta combinación se ejemplifica con estudios breves de vibración de frutos como aguacate, tomate y fresa.



Abstract

Vibration produced by road transport vehicles, specially heavy duty vehicles, has a great significance on agricultural products damage process, particularly on perishable fruits. The general process of vibration measurement and its application on the fruit mechanical damage determination, is presented. Also, vibration simulation using both, computer programs and laboratory tests, is remarked. Finally, it is shown the combination of vibration simulation using computer and laboratory for preliminary determining mechanical damage – vibration relationship. Also, brief experimental studies are presented, including simple vibration tests applied to several fruits like avocado, tomato and strawberry.



Resumen Ejecutivo

El sector agrícola no está excluido del uso de los medios de transporte. Entre los más empleados por este sector, está el transporte carretero, especialmente para la distribución de los productos. Durante esta etapa, los productos son expuestos a la vibración de los vehículos, cuyos niveles pueden ocasionar daño mecánico, ya sea alterando su forma, tamaño, color u otras propiedades físicas. En este aspecto, los productos perecederos, que tienen una vida relativamente corta después de la maduración, son los más propensos a sufrir un deterioro mecánico.

De acuerdo al tipo de interacción con sus alrededores, los daños mecánicos que puede sufrir un producto agrícola se clasifican de tres formas: por fricción, por impacto o por compresión. La fricción resulta del movimiento del producto contra objetos adyacentes, dando lugar a una abrasión superficial. El impacto se refiere al choque entre frutos o contra las paredes o piso del contenedor del producto, sobre todo cuando no hay restricción de movimiento vertical. La compresión se presenta debido a la presión que ejercen frutos u objetos en capas superiores, principalmente cuando el producto se transporta a granel.

Estos tipos de daño pueden generarse durante la transportación del producto por carretera, ya sea de forma individual o combinada. En la generación del daño, tiene influencia el tipo de empaque, el tipo de vehículo, las acciones de conducción y el estado superficial de la carretera, que son la fuente de la vibración que sufre el producto.

En México, los estudios sobre los efectos que el sistema de transporte ocasiona a los productos son prácticamente nulos. Estudios iniciales han mostrados algunos resultados relevantes, como la relación entre frecuencias y amplitudes de vibración con el daño sufrido por ciertos frutos. Así mismo, las investigaciones sobre vibración toman en cuenta sistemas mecánicos específicos del vehículo de transporte, como el sistema de suspensión y su comportamiento dinámico, para determinar su participación en el proceso de daño.

De manera concluyente, se ha establecido que el transporte de los productos agrícolas es una fuente potencial de daño a los mismos, cuya severidad depende de la intensidad y duración de la vibración y otras cargas combinadas que se producen durante el transporte. Bajo esta temática, en este escrito se remarca la importancia del efecto que tiene el proceso de transporte de estos productos por carretera, sobre todo los del tipo perecedero, en la alteración de sus cualidades físicas y mecánicas, principalmente las debidas a la vibración. Así mismo, se describe de manera general las variables que definen la vibración,

el desarrollo del proceso de medición y su aplicación en la determinación de daño a productos agrícolas.

Similarmente, se remarca el uso de herramientas computacionales y de laboratorio enfocadas al estudio de la relación de la vibración con el daño generado en los productos perecederos. Con estas herramientas, se puede determinar de manera preliminar las características mecánicas del proceso de generación del daño, con base en modelos de vehículos y sus sistemas de suspensión. Estos modelos proporcionan resultados iniciales que ayudan a definir algunos parámetros, para identificar preliminarmente una relación daño mecánico – vibración. Complementariamente, esta relación aparente se ejemplifica con breves estudios de vibración en diversos frutos como aguacate, fresa y tomate.

1 Antecedentes

1.1 Aspectos del Manejo de Productos Postcosecha

El precio de un producto agrícola está asociado en gran medida con su disponibilidad y su presentación. La disponibilidad depende de la producción obtenida a través de las cosechas, mientras que la presentación visual y la percepción de su estado físico es un factor de mayor influencia para su comercialización. Así, el precio de mercado se ve afectado directamente por el estado de madurez y el daño visible que el producto haya sufrido a lo largo de las actividades postcosecha, principalmente en las correspondientes al manejo en las etapas de recolección y de distribución. Exceptuando los aspectos que rigen la disponibilidad de frutas y hortalizas, el daño que sufren los productos durante la cosecha, la selección, empaque y transportación, se refleja en el costo final del producto.

Algunos frutos han sido sujetos a investigaciones intensas sobre el nivel de daño que sufren durante el manejo. Tal es el caso de la papa, que es uno de los productos sujetos a un manejo particularmente rudo, dada su consistencia y resistencia. Para este tubérculo, el principal indicador de daño visible es la apreciación del grado de escoriación de la piel, lo que expone la masa interna al ambiente generando una mayor propensión a la oxidación intensa en esas zonas [1, 2].

En México, solamente la quinta parte de los productos agrícolas movilizados se mueven a través del ferrocarril, mientras que el resto utiliza el transporte carretero. Los productos de mayor valor agregado, como frutas y hortalizas, se movilizan por este último medio [3]. Sin embargo, en la generación del daño sufrido por los productos transportados, el vehículo de transporte tiene una amplia participación, principalmente por la vibración transmitida desde el vehículo, generada como respuesta de su movimiento, por la interacción con la carretera y algunos otros factores del medio ambiente, sobre el producto que constituye la carga. Un efecto particular producido por el viento, que incide lateralmente sobre el vehículo, es el incremento del movimiento de oscilación lateral del vehículo, propiciado por las maniobras de corrección de la dirección por parte del conductor. En la mayoría de los casos, los efectos de estos factores en la participación de la vibración sobre el daño de los productos, es poco conocido por los agricultores.

Comúnmente los daños mecánicos se manifiestan de manera visible y el agricultor relaciona intuitivamente aspectos del transporte con los daños sufridos, pero sin una asociación implícita con la vibración a la que son expuestos. Más

aún, durante el proceso de daño se ven promovidas actividades fisiológicas de los tejidos del fruto, lo que conlleva a la posibilidad de alteración de su proceso normal de maduración.

De acuerdo con diferentes estudios sobre mermas de producto debidas al manejo postcosecha, se ha establecido que el volumen de pérdidas alcanzan del 20% al 35% del total de la cosecha, atribuyendo a los daños mecánicos una de las causas principales de estas pérdidas [4]. De una manera general, se ha descrito que el manejo rudo de los productos agrícolas afecta su proceso fisiológico, produciendo un incremento en la tasa metabólica y en los niveles de producción de etileno, formando parte, ambos factores, del proceso de maduración. Además, la ruptura de los tejidos externos de los frutos proporciona sitios de entrada a los microorganismos causantes de la putrefacción, lo cual disminuye la vida de presentación de los mismos [5].

La actividad de exportación de hortalizas en México se ha consolidado como una actividad sólida muy importante para el país, desde el punto de vista económico [6]. La exportación de frutas y hortalizas constituyen cerca de 3,4% de todos los bienes exportados y cerca del 45% de los productos agrícolas. De estas exportaciones, más de las dos terceras partes se destinan al mercado de los Estados Unidos, donde su valor alcanza más de los 700 millones de dólares, siendo el tomate fresco el principal producto exportado [7].

El medio de transporte utilizado para el movimiento de estos productos, son distintas configuraciones de vehículos de autotransporte con contenedores refrigerados. La duración del tiempo de arribo a las ciudades fronterizas es variable, desde unas cuantas horas hasta varios días, dependiendo de la ubicación de los lugares de producción. Sin embargo, una buena parte de los productos cosechados en los estados fronterizos son transportados en camiones no refrigerados [7], que aunque el tiempo de viaje es menor, los productos no están exentos de la posibilidad de sufrir daño mecánico, sin evitar de igual manera, el riesgo patente de aceleración del proceso de maduración o de alguna otra alteración fisiológica.

En el proceso de transporte deben considerarse otros aspectos que participan en la conservación de la integridad de los productos transportados. Entre estos aspectos se incluyen los conservadores del clima durante el transporte, particularmente lo concerniente a temperatura y humedad apropiados para el tipo de producto transportado. Además, las características del empaque y sus diversos arreglos para el acomodo (estibas, cajas, granel, etc.), deben mostrar afinidad con el comportamiento dinámico global del vehículo. Por ello, es importante tomar en cuenta este comportamiento, los componentes del vehículo, el tipo de configuración, entre otros, en la selección del vehículo de transporte.

1.2 El Transporte en la Generación de Daño Mecánico

El daño mecánico que un producto agrícola sufre, es cualquier lesión que altere su forma, su tamaño, su color o sus propiedades físicas. Se ha establecido que el transporte de los productos agrícolas es una fuente potencial de daño a los mismos, cuya severidad está en función de la intensidad y duración de la vibración y otras cargas combinadas que se generan durante el transporte [8].

Los estudios que se han desarrollado para tratar de evaluar y reducir los daños producidos por factores mecánicos, son escasos y poco profundos, especialmente en México. Estudios incipientes realizados sobre aguacate, fresa y tomate, mostraron que el aguacate es más sensible a las variaciones de frecuencia, mientras que el jitomate y la fresa lo son a las variaciones de la amplitud de la vibración. Además, en simulaciones de vehículos de transporte con distintos tipos de suspensión, se observó que la combinación de diferentes tipos en un vehículo articulado, como muelles y bolsas de aire, resulta desventajosa para el transporte de frutas [9], siendo que esta práctica de combinar tipos de suspensión resulta común en los vehículos articulados. Sin embargo, la evaluación del daño inducido a los productos puede resultar subjetiva, dado que la apariencia del fruto puede no mostrar el nivel de daño interno, por lo que este tipo de evaluación incluye cierto grado de incertidumbre. Tal es el caso de la estimación de la resistencia a la compresión y el daño que el fruto sufre debido al estrujamiento.

A nivel mundial también se ha identificado la necesidad de evaluar los efectos del transporte sobre la calidad y la vida de los productos agrícolas. En la búsqueda de esta evaluación, se han desarrollado sistemas que modelan la interacción carretera-vehículo-carga para predecir el daño mecánico de los productos transportados. Estos modelos incluyen características que tienen efecto en la generación y durante el proceso de daño. Así, por ejemplo, se asocia la energía absorbida por un elemento del modelo para calcular el daño físico de un fruto tipo manzana y, con esto, predecir el volumen de magullado en diferentes puntos de un vehículo hipotético [10]. Por otra parte, también se han desarrollado dispositivos contadores de impactos para determinar el nivel de daño por vibración que sufre una hortaliza a una aceleración determinada [11]. Se han utilizado también dispositivos electrónicos en forma de tubérculo, como es el caso de la papa, para simular el movimiento que sufre en diferentes sistemas de manejo [12]. Este tipo de estudios han mostrado que el daño físico real de los tubérculos tiene mayor correlación con el número de impactos aplicados, que con la magnitud de la fuerza del golpe.

Según una clasificación del tipo de daño mecánico, éste puede ser provocado por tres causas: la fricción, el impacto y la compresión [4]. Durante el transporte, estas acciones se pueden presentar de manera individual o combinada, en

función de las condiciones de empaque, características del vehículo, del estado de la carretera y de las condiciones ambientales. La vibración que se presenta durante el transporte de estos productos, es uno de los actores principales para que el daño mecánico se origine en cualquiera de las modalidades mencionadas. A pesar del establecimiento de los criterios para clasificar el daño mecánico de los productos agrícolas debido a la interacción con el medio circundante, no se han desarrollado muchos estudios que relacionen el daño mecánico con las alteraciones al proceso normal de maduración.

1.3 Consideraciones para la Estimación del Daño

En la estimación del daño mecánico sufrido por los productos agrícolas, especialmente los perecederos, deben considerarse los factores asociados para la identificación del tipo de daño, de los factores que lo causan y de la aplicación de métodos objetivos para su cuantificación.

Además de la manifestación visual de la alteración física de un producto dañado (apariencia y color), se presentan otros cambios en sus cualidades comestibles, que se basan en mediciones de ciertos parámetros que forman parte de un análisis de perfil de textura (TPA). El análisis de perfil de textura trata de obtener y medir las características que se presentan cuando una persona muerde y mastica algún vegetal, como dureza, resortividad, coherencia, masticabilidad, gomosidad, elasticidad y compresión, todas ellas encaminadas a una cuantificación de la sensación producida cuando un alimento es comido e ingerido. Aunque un estudio de comestibilidad requeriría de un análisis sensorial, el análisis de perfil de textura es esencialmente el resultado de la medición indirecta de ciertas propiedades mecánicas de los frutos y vegetales, a través de las cuales se obtienen indicadores de las características involucradas.

Aunque la evaluación de las características anteriores son indicadores de las propiedades mecánicas de los alimentos comestibles, este tipo de pruebas tiene mayor aplicación para determinar detalles significativos a nivel fisiológico, siendo realizadas a nivel de un laboratorio bioquímico, considerando la participación de los tejidos del fruto. Sin embargo, este tipo de análisis son complementarios para cuantificar el daño, una vez identificado éste. Por tanto, es necesario establecer el origen del daño, la relación entre los precursores, la evolución del proceso y las alteraciones posibles a las etapas que conlleva la maduración normal de las frutas y hortalizas.

Dentro del proceso de caracterización del daño debido al movimiento del vehículo de transporte, es importante acotar las condiciones mecánicas a las cuales se produce. Ya sea que el fruto u hortaliza se transporte de forma

individualizada o a granel, éstos estarán sujetos a la interacción mecánica producida por el movimiento del vehículo.

El contacto, el impacto y la compresión que experimentan los productos no son características constantes, sino que varían a lo largo del tiempo de transporte, por lo que se pueden incluir dentro de un esquema vibratorio. De esta manera, la vibración que se genera en los remolques de los tracto camiones y en los vehículos de carga, se considera la principal fuente de daño de los perecederos cuando son transportados.

Así, es importante tomar en cuenta, además de las características distintivas del tipo de producto y del vehículo, las características distintivas del fenómeno de vibración, es decir, amplitud y frecuencia asociadas a una dirección particular. La amplitud y la frecuencia de la vibración a que se someten los productos durante el transporte, son factores que deben ser considerados para evaluar el detrimento de la calidad. A su vez, estas características de la vibración determinan la simulación de las condiciones del movimiento de los productos mientras son transportados.

El conjunto carga - vehículo constituye un sistema mecánico, cuya respuesta depende de la combinación de las propiedades de ambos. Esta respuesta incide directamente sobre el nivel de deterioro experimentado por el producto transportado. Asimismo, el sistema de empaque puede responder amplificando dinámicamente los niveles de vibración, lo que puede promover una mayor ocurrencia de deterioro físico de los frutos.

3 Medición Experimental de la Vibración

Con objeto de conocer las condiciones reales de la vibración a la que están expuestos los productos perecederos, es necesario realizar mediciones durante su transporte. La medición de los niveles de vibración a los que se exponen los productos transportados, se obtiene a partir de un registro del desplazamiento, de la velocidad o de la aceleración en puntos estratégicos, utilizando un conjunto de instrumentos y dispositivos de almacenamiento y registro para su posterior análisis. Este proceso de medición y registro se denomina, de manera genérica, adquisición de datos.

3.1 Esquema General de Instrumentación

3.1.1 La cadena de adquisición de datos de vibración

La instrumentación es un punto importante en el proceso de adquisición de datos de vibración. Hoy en día, cualquier equipo especializado para un cierto tipo de adquisición depende de una computadora, ya sea que esta sea del tipo portátil o de escritorio, o con características específicas como puertos, circuitos, tarjetas, medios de almacenamiento y programas de procesamiento de señales especiales. En general, el equipo y la instrumentación para la medición consta de un transductor energizado, de un acondicionador, de un amplificador, de un sistema de adquisición y un equipo de cómputo que controla el proceso y dirige la señal a un medio de almacenamiento (Figura 12). La conexión adecuada y la compatibilidad entre cada uno de los elementos del equipo global, proporcionará datos precisos que permitan conocer las características de la vibración.

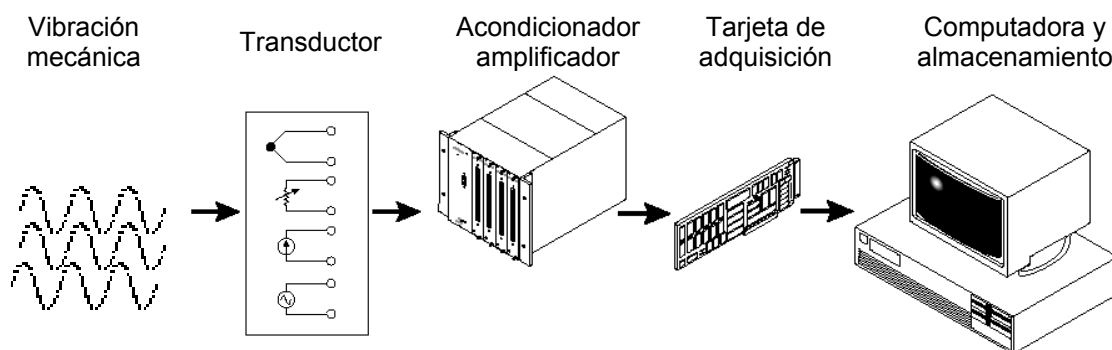


Figura 12. Esquema general de un sistema de adquisición de datos de vibración.

Cabe mencionar que la preparación del punto de medición comprende también la preparación física de la zona de la estructura y la colocación de dispositivos de sujeción. Estos dispositivos pueden ser tanto magnéticos como mecánicos,

dependiendo de las características de la estructura sujeta a medición, siendo en ocasiones diseñados exclusivamente para este propósito.

La adquisición de los datos se hace en función del tiempo, es decir, se registra la historia del movimiento y su duración. El análisis de datos se lleva a cabo en una etapa posterior, siendo normalmente trabajo de gabinete. Sin embargo, existen equipos integrales portátiles que realizan la medición, el registro y el análisis casi de manera simultánea, aunque presentan otras limitaciones. Las principales son menor capacidad de almacenamiento de datos y/o menor número de canales de adquisición, es decir, en el número de transductores que pueden ser conectados a la vez para obtener el registro de la vibración en distintas direcciones o puntos de instrumentación en una estructura. Un ejemplo de este tipo de equipo es como el mostrado en la Figura 13, denominado sistema colector analizador de vibraciones portátil, el cual tiene capacidad para sólo un sensor o transductor de vibraciones.



Figura 13. Sistema colector analizador de vibraciones portátil marca TEC, modelo VLF 1330 "Smart Meter" y transductor de aceleración.

3.1.2 Acelerómetro

Para el caso específico de medición de vibraciones, se requiere medir la magnitud del movimiento a que esté sujeto el punto de interés, así como su variación en el tiempo en una determinada dirección. Esta magnitud de medición puede ser el desplazamiento, la velocidad o la aceleración, entendiendo que unas y otras se pueden obtener a través de una diferenciación o integración numérica. En vibraciones, la aceleración es normalmente la magnitud que se mide, para lo cual se hace uso de sensores de movimiento llamados acelerómetros, como el mostrado en la porción derecha de la Figura 13. Estos acelerómetros son fundamentalmente la aplicación de un sistema encapsulado masa-resorte, cuyas características dinámicas son conocidas.

Básicamente, el acelerómetro traduce el movimiento mecánico en una señal eléctrica cuya magnitud, dentro de cierto intervalo, es proporcional a la magnitud del movimiento vibratorio. Esta proporcionalidad se obtiene como una medida de sensibilidad, que relaciona numéricamente la magnitud eléctrica con la magnitud mecánica. La señal eléctrica analógica que entrega el acelerómetro usualmente es en términos de voltaje (Volt, V) o carga eléctrica (Coulomb, C), por lo que la sensibilidad se expresa en unidades de $V/(m/s^2)$, de $C/(m/s^2)$, de V/g o de C/g , siendo g el valor estándar de la aceleración de la gravedad terrestre (aprox. $9,81 m/s^2$). Valores típicos de sensibilidad se encuentran en el intervalo de $10 mV/g$ a $1500 mV/g$, o de $0,1 pC/g$ a $150 pC/g$, aunque existen acelerómetros de aplicación especial con sensibilidades fuera de este intervalo.

Puesto que el acelerómetro a su vez es un sistema dinámico que no está exento de vibraciones propias, además de sus posibles limitantes físicas tiene también limitantes de aplicación debidas, entre otras, a su propia frecuencia natural. Si la frecuencia de medición es lo suficientemente cercana a la frecuencia natural del acelerómetro, se puede presentar el fenómeno de resonancia, lo que produce una distorsión en la señal producida por el acelerómetro debido al incremento constante en la amplitud de la masa interna del mismo. La selección de un acelerómetro para una aplicación en particular debe considerar esta condición, además de la sensibilidad y su capacidad de medición con respecto a la amplitud.

En la mayoría de los casos es necesario tener una idea preliminar del intervalo de frecuencias que se van a medir, así como de los niveles de amplitud esperados. Esta evaluación inicial se lleva a cabo con el propósito de seleccionar el acelerómetro más adecuado, considerando la disponibilidad de los instrumentos de un laboratorio. En algunas ocasiones se requiere realizar una medición preliminar en algunos de los puntos de interés, con objeto de tener una mejor idea de los intervalos de operación. En estos casos, se utiliza un acelerómetro de amplios márgenes de operación, cuyos datos faciliten la selección del acelerómetro aplicable.

Para medición de vibraciones de baja frecuencia (convencionalmente desde $0,3 Hz$ hasta $500 Hz$), resultan más prácticos acelerómetros con una alta sensibilidad que poseen un nivel de ruido intrínseco bajo, aunque su masa puede ser relativamente grande, comúnmente de $0,5 kg$ a $1,5 kg$. Sin embargo, las bajas frecuencias son típicas de estructuras grandes, en las que la masa del acelerómetro es poco significativa y las amplitudes de vibración menores a $5 g$.

Por otro lado, los acelerómetros de alta frecuencia (del orden de kHz) pueden ser de menor masa (de unos cuantos gramos), pero sus intervalos de medición de amplitud pueden ser amplios, por lo que su sensibilidad puede ser baja.

3.1.3 Acondicionador y amplificador

Un acelerómetro no funciona por sí solo. Para que el acelerómetro pueda ser empleado necesita ser alimentado eléctricamente, es decir, estar energizado para tomar un nivel de referencia sobre el cual se consideren las variaciones eléctricas asociadas a los cambios de aceleración.

Además de una fuente de alimentación, se requiere de un dispositivo que convierte la señal eléctrica generada por el acelerómetro en una señal de voltaje, amplificada a un nivel de resolución tal, que permita dar la continuidad adecuada a los requerimientos de la medición. También, la señal debida a la vibración mecánica debe ser aislada y filtrada de otras señales ajenas para obtener mayor exactitud en la medición. Más aún, la señal proporcionada por el acelerómetro debe ser optimizada y ajustada al intervalo de valores de entrada de la tarjeta de adquisición.

Los puntos anteriores son ejecutados por un acondicionador electrónico, como el mostrado en la Figura 14. Los dispositivos de acondicionamiento de señales analógicas incluyen frecuentemente la capacidad de multiplexión, a través de un multiplexor o conmutador digital, lo que permite medir diversas señales con un simple dispositivo de medición.

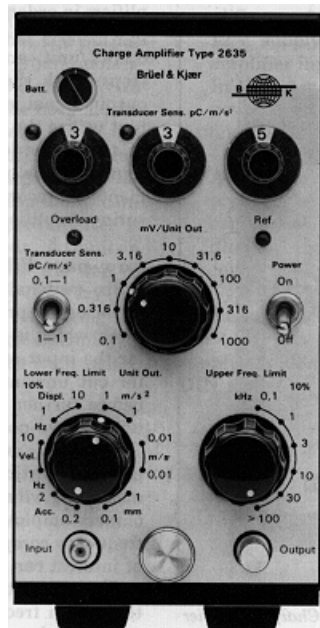


Figura 14. Acondicionador y amplificador de carga Brüel & Kjaer empleado en medición de vibraciones.

El filtraje de la señal es de gran importancia en la adquisición de datos. El propósito de filtrar una señal es remover componentes no deseadas que alteren

la señal propia de la vibración, así como frecuencias por arriba o por debajo del intervalo de frecuencias predominantes del movimiento, o frecuencias fantasmas debido a la velocidad de muestreo.

3.1.4 Tarjeta de adquisición

Una vez obtenida la señal en un intervalo adecuado de voltaje, ésta se hace pasar a través de una puerta electrónica que la reconoce y la transfiere al medio de control para la visualización, registro y almacenamiento. Esta puerta es la tarjeta de adquisición, que puede manejar tanto entradas analógicas como digitales, dependiendo de sus características de fabricación.

Las especificaciones básicas de una tarjeta de adquisición incluyen el número de canales, es decir, el número de puertas de entrada para las señales provenientes de los transductores; la resolución, correspondiente al número de bits con que se puede representar un valor; la velocidad de muestreo, relacionada con el número de datos adquiridos en un segundo, y el intervalo de entrada de voltaje permitido, es decir, los ajustes a los valores mínimo y máximo de la amplitud de la vibración.

Aunque la tarjeta de adquisición recibe sólo valores de voltaje, ésta puede ser configurada para hacer compatibles los valores de entrada con las unidades propias del fenómeno medido, con objeto de preparar la etapa de análisis de los datos. También, a través de la configuración de la conexión con los instrumentos de medición se pueden reducir otros efectos de “ruido” entre los instrumentos, de manera que la señal registrada conserve cierto nivel de pureza.

La tarjeta de adquisición puede colocarse dentro o fuera de una computadora, o ser parte integral de la misma, en el caso de un equipo especializado. Dos tipos de tarjeta se muestran en la Figura 15.

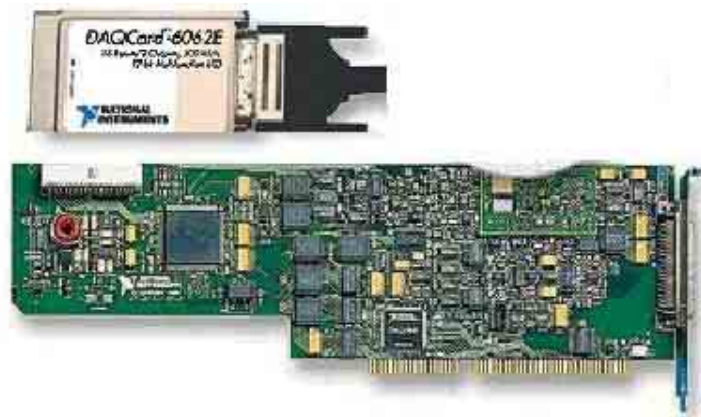


Figura 15. Tarjetas de adquisición de datos National Instruments para PC portátil (arriba) y para PC de escritorio (abajo).

3.1.5 Computadora

El uso de equipo de cómputo en el proceso de medición de vibraciones, transforma la computadora personal y el equipo especializado para la adquisición de datos en un sistema completo de adquisición, análisis y despliegue gráfico. La unidad principal de procesamiento de una computadora permite controlar y automatizar el proceso de adquisición, a través de software especializado de control de la señal de los instrumentos y de la tarjeta de adquisición. Además, dirige la señal para ser desplegada en pantalla o para ser almacenada en una base de datos.

Si la tarjeta lo permite, a través de la computadora se realiza la configuración y la secuencia de lectura de los distintos canales de medición, así como una manipulación previa de los datos adquiridos. En ella se establece también la organización de la adquisición de los datos para facilitar su presentación y análisis posterior.

3.2 Proceso General de Adquisición

El procedimiento para medir la vibración en el transporte consiste en instrumentar el vehículo de prueba con sensores de aceleración en los puntos de interés. Las mediciones de vibración se realizan cuando el vehículo recorre un trayecto del viaje. No debe perderse de vista que el objetivo de la medición es identificar las frecuencias y amplitudes de vibración, que se manifiestan con mayor intensidad en el vehículo durante el transporte.

3.2.1 Selección de Puntos de Instrumentación

La primera decisión que debe tomarse es definir qué puntos del vehículo deben instrumentarse, en qué dirección y cuántos son necesarios. Obviamente, esta decisión parte de consideraciones previas sobre modelaciones numéricas, el tipo de vehículo, el tipo de perecedero, el arreglo o distribución del producto para el transporte (a granel, contenerizado, en estibas o en empaques individuales), así como el acomodo de los empaques. Normalmente, se trata de identificar aquellos lugares sobre la plataforma del vehículo que presenten las mayores amplitudes de movimiento, siendo común la parte posterior en la dirección vertical, o si la plataforma no es muy rígida, la parte central.

Otros criterios de selección de los puntos parten de los antecedentes de viajes anteriores con el mismo tipo de carga y de vehículo. Los antecedentes pueden proporcionar información para determinar las zonas donde se presenta la mayor cantidad de daño e identificar el tipo de daño que pueda ser debido a la vibración, sea éste por aplastamiento, por fricción o por impacto. Además, se

puede considerar el comportamiento del empaque e instrumentar puntos en los cuales haya sospecha de comportamientos críticos en el empaque para su posterior simulación en laboratorio.

Como información complementaria para la interpretación de los resultados, se debe tomar nota de las características geométricas y mecánicas del vehículo y sus componentes principales, como llantas, suspensión, plataforma y, de ser posible, algunos aspectos de la operación por parte del conductor.

Una vez seleccionados los puntos donde se colocarán los acelerómetros, se prepara la superficie o algún elemento para asegurar que el acelerómetro permanezca fijo al punto de instrumentación. Aunque la mayoría de los acelerómetros pueden ser fijados por medio de una base magnética o atornillada a la estructura (Figura 16), en algunas ocasiones es necesario desarrollar dispositivos de sujeción exprofeso apropiados al elemento seleccionado como punto para instrumentar. Tal es el caso cuando el elemento de prueba no sea compatible con las bases magnéticas o que no permita ser perforado ni adherido por medio de pegamentos temporales. También, es conveniente asegurar la fijación del acelerómetro cuando exista la posibilidad de que las amplitudes del movimiento sean extremadamente grandes.

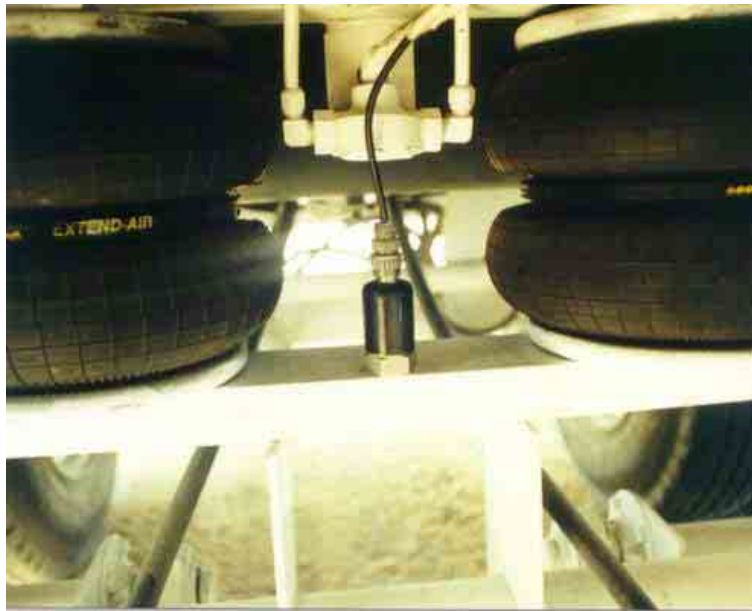


Figura 16. Acelerómetro fijo a la estructura de una suspensión por medio de una base atornillada.

Resueltos los aspectos anteriores, colocados el resto de los instrumentos y equipos en lugares seguros y hechas las conexiones adecuadas, entonces se deben establecer los parámetros de control para la adquisición de los datos.

3.2.2 Frecuencia de muestreo

Una de las variables más importantes para iniciar el proceso de adquisición es establecer la frecuencia de adquisición de los datos. Esta frecuencia se refiere a la velocidad de muestreo, es decir, la velocidad a la que se colectan los datos, expresada como el número de muestras por segundo que deben ser adquiridas por el sistema. Aunque la señal enviada por los acelerómetros se puede considerar continua, la adquisición de la señal se hace de una manera discreta, “leyendo” y registrando un valor para cada acelerómetro en un determinado tiempo. Así, la duración de cada evento de adquisición debe tomarse en cuenta.

La elección de la frecuencia de muestreo no es arbitraria. Si la frecuencia de muestreo es muy baja y el tiempo de adquisición de la señal muy corto, habrá problemas de resolución y la posible aparición de frecuencias “fantasma” que los registros indicarán, pero que realmente no existen en el movimiento vibratorio. Este fenómeno se denomina “*aliasing*”, el cual puede evitarse estableciendo una frecuencia de muestreo de cuando menos 2 a 2,5 veces la mayor frecuencia esperada del movimiento vibratorio. Además de lo anterior, deben utilizarse filtros (normalmente en el dispositivo acondicionador) que no permitan el paso de frecuencias fuera del intervalo de interés, así como atenuadores de amplitud para frecuencias altas que puedan afectar el ancho de banda (intervalo de frecuencias) de la medición.

3.2.3 Identificación de características

Como ya se ha mencionado, los datos registrados de las mediciones de vibración son la historia de la amplitud del movimiento durante el tiempo de adquisición. Puesto que esta historia es el resultado de un comportamiento aleatorio, a menudo la información obtenida de los acelerómetros no indica directamente las frecuencias a las que el vehículo y la carga, en los puntos instrumentados, están vibrando. Esta información no es fácilmente obtenida a través de un despliegue gráfico de los datos, por lo que es necesario realizar algunos cálculos para poder determinar tanto las frecuencias como las amplitudes principales, cuya combinación se ajuste con una adecuada aproximación al comportamiento del movimiento real.

Para obtener el valor de las frecuencias y sus correspondientes amplitudes, se hace uso de las series de Fourier, cuya expresión general está en términos de las funciones trigonométricas seno y coseno, que con propósitos ilustrativos se muestra a continuación [17]:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{p=1}^{\infty} (a_p \cos p\omega_0 t + b_p \sin p\omega_0 t)$$

En este caso, $f(t)$ representa la historia del movimiento, dependiente de las constantes ω_0 , a_0 , a_p y b_p . De esta serie, se expresa la primer frecuencia predominante f_0 , en función del argumento ω_0 , como se indica a continuación:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \text{ [Hz]}$$

Puesto que esta serie es infinita, la serie se puede truncar a un número finito de términos, cuyo número dependerá de la aproximación deseada a la función que describa realmente el fenómeno vibratorio. De aquí, cada combinación de coeficientes indicarán un valor de amplitud y frecuencia, lo cual permitirá caracterizar el movimiento sufrido por el vehículo y su carga. Obviamente, la aplicación de este tipo de funciones requiere de un mayor manejo numérico, así como algoritmos especializados, comunes en el análisis de vibraciones.

4 Simulación de la Vibración

4.1 Generalidades

La simulación de la vibración, ya sea a través de un programa de cómputo o de equipo de vibración en laboratorio, permite tener condiciones controladas del proceso de vibración. Estas condiciones ayudan a identificar intervalos de frecuencias y amplitudes a las que los perecederos agrícolas estén expuestos durante el transporte y, a la vez, identificar aquellas con posibilidad de producir daño mecánico.

La simulación con programas de computadora proporciona un primer acercamiento del proceso vibratorio. Los resultados de este acercamiento numérico sirven de base para realizar estudios más elaborados, sobre todo para identificar los posibles patrones de vibración en un vehículo o configuración vehicular particular, o cuando se carece de equipos e instrumentos adecuados para realizar pruebas de campo.

La simulación en laboratorio puede dar continuidad a los estudios realizados a través de equipo y programas computacionales, o de datos generados a través de mediciones de vibración en campo. La ventaja de ejecutar pruebas de vibración en laboratorio, es la capacidad de controlar los patrones de vibración, tanto individuales como combinados, tomados de mediciones sobre un vehículo en condiciones de operación reales. Esto permite determinar o verificar las posibles relaciones entre daño y vibración de manera experimental.

4.2 Simulación por Computadora

4.2.1 Transmisión de vibración

Puesto que las suspensiones de los vehículos son los sistemas con mayor responsabilidad en la atenuación de las vibraciones, producidas por el camino y la forma de operación del vehículo, los análisis de simulación se encaminan con un enfoque especial a estos componentes. Los modelos de simulación permiten determinar no sólo la respuesta preliminar de un tipo de suspensión, sino la combinación de varios tipos en un solo vehículo. Además, los resultados de estos análisis pueden sugerir los puntos más adecuados para la instrumentación, para el caso de requerirse medir vibración en un vehículo real, lo que a su vez, arrojaría datos para la validación de los modelos.

Como una secuencia en la investigación de la vibración en el transporte, los resultados de la simulación pueden dar la pauta para definir las características de la vibración, aplicables en un sistema de vibración de laboratorio. Estas características permitirían particularizar el efecto sobre componentes modulares de la carga, ya sea una estiba, una caja, un fruto o un conjunto de frutos a granel.

La magnitud del daño por magullamiento de una fruta se debe principalmente al número de veces que una fuerza se aplica en la misma zona, más que a la magnitud ésta. Por esta razón, se deduce que el tipo de suspensión del vehículo de transporte puede tener mucha influencia para el caso de frutas de consistencia suave, mientras que en otras sería menos importante la frecuencia del impacto, pero resaltaría la magnitud de la fuerza.

En el caso específico de México, se emplean vehículos de transporte pesado equipados ya sea con suspensión de aire, de muelles o híbridas. En el caso de vehículos articulados, es común encontrar que el tractor tenga suspensión de aire y los semi-remolques de muelles, o viceversa.

4.2.2 Modelos de suspensiones en vehículos

Para ilustrar la modelación de los tipos de suspensiones y su aplicación en diversas configuraciones vehiculares, se presenta someramente la simulación del comportamiento de una suspensión de aire y otra de muelles. Estas suspensiones se modelan en un vehículo unitario tipo C3 (camión de 3 ejes, eje direccional y tándem trasero) y en un vehículo articulado tipo T3-S2 (combinación de 5 ejes, 3 en el tractor y un tándem en el semi-remolque). Como ejemplos de resultados de la simulación, se puede obtener el desplazamiento y la aceleración del compartimiento de carga.

Para estos casos, se utilizó un programa comercial de simulación de dinámica del cuerpo rígido con representación en un plano, denominado *Working Model*TM, [18]. La suspensión de muelles que se tomó como referencia es la llamada "*walking beam*" (Figura 17), mientras que la suspensión de aire corresponde al tipo de ejes de carga (Figura 18). Para todos los casos, la suspensión delantera aplicada a las configuraciones sobre el eje direccional, es del tipo de muelles, como el representado en la Figura 19. Los parámetros de estas suspensiones se tomaron de valores típicos reportados en el documento DOT HS 807 185 [19].

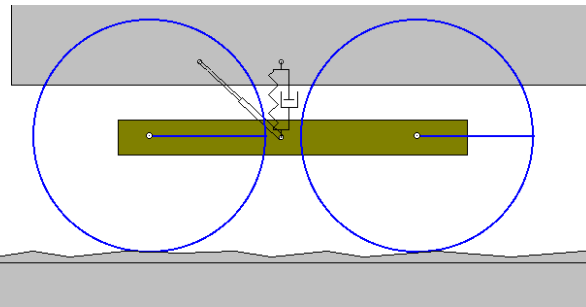


Figura 17. Modelo de suspensión de muelles tipo "walking beam".

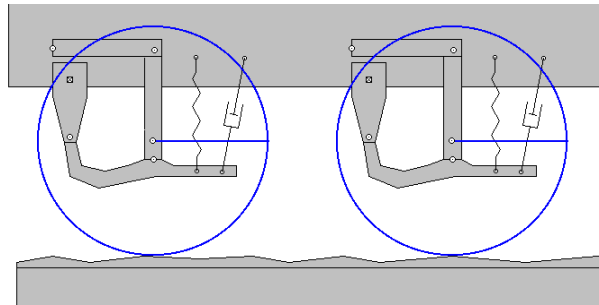


Figura 18. Modelo de suspensión de aire en los ejes de carga.

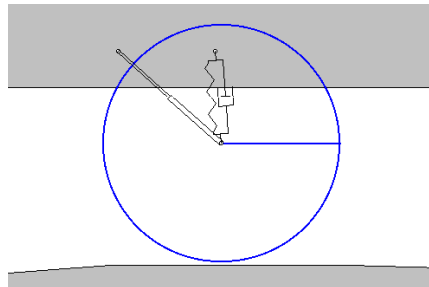


Figura 19. Modelo de suspensión de muelles

Con respecto a las configuraciones vehiculares, se incluyeron el C3 con suspensión de muelles y con suspensión neumática en los ejes traseros (Figura 20), el T3-S2 con suspensión de muelles, con suspensión de aire y con suspensión combinada, de muelles en el tractor y de aire en el semi-remolque, y de aire en el tractor y de muelles en el semi-remolque (Figura 21).

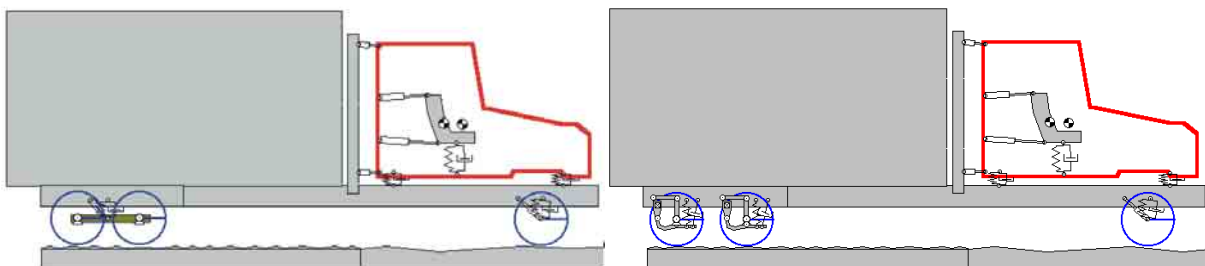


Figura 20. Vehículo unitario C3 con suspensión de muelles (izquierda) y suspensión de aire (derecha).

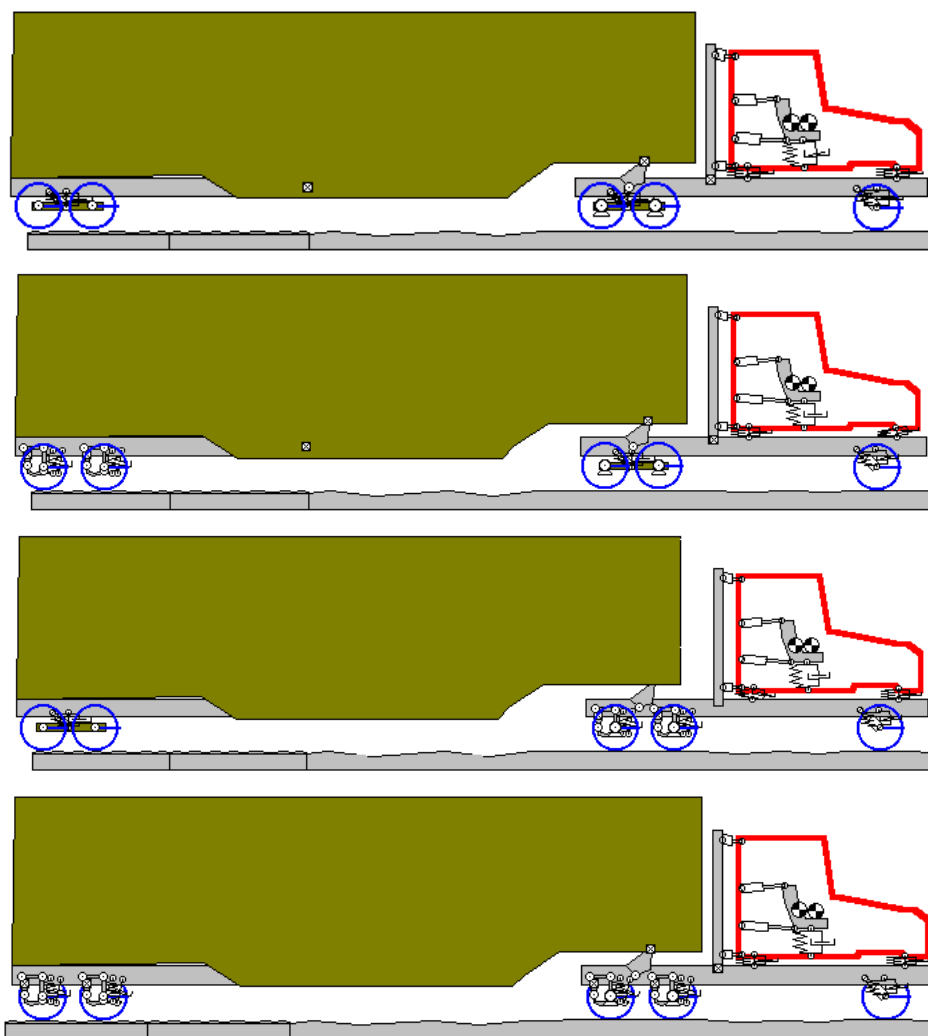


Figura 21. Vehículo articulado T3S2; en posición descendente: con suspensión de muelles, suspensión de muelles y aire (tractor, semi-remolque), con suspensión de aire y muelles (tractor, semi-remolque) y con suspensión de muelles.

Para cada configuración y arreglo, se puede controlar la velocidad de desplazamiento, el tipo de trayectoria, su longitud y el perfil vertical de la superficie del camino, como el mostrado en la Figura 22.



Figura 22. Entrada de desplazamiento como perfil del camino en simulación.

Así, el tipo de resultados que se desprenden de la simulación del movimiento de estos modelos, suponiendo una velocidad de desplazamiento de 60 km/h, con el vehículo describiendo una trayectoria rectilínea sobre un camino con un perfil rugoso como el mostrado en la figura anterior, son como se muestra en las Figuras 23 y 24, para aproximadamente 110 m de recorrido [9].

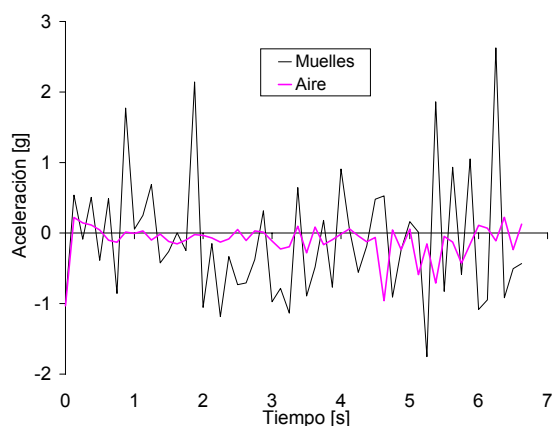


Figura 23. Aceleración en el compartimento de carga resultante de la simulación de la suspensión para la configuración C3.

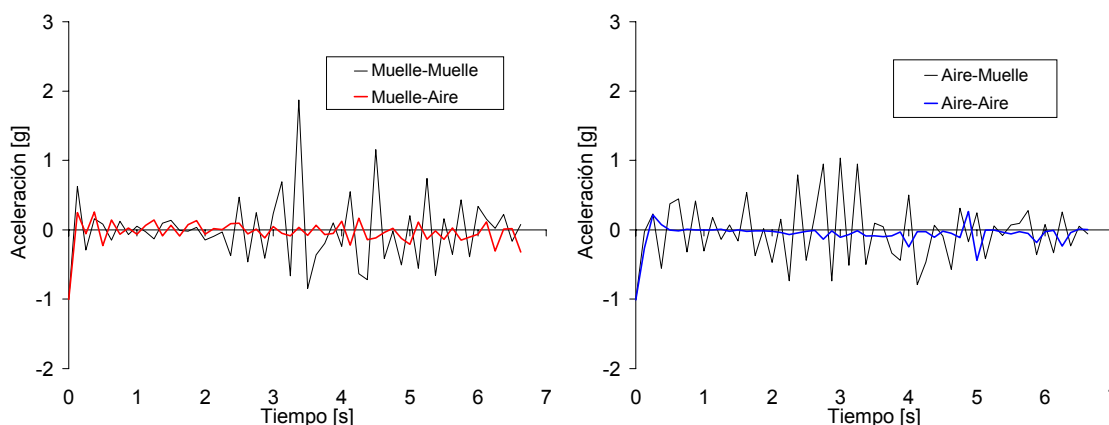


Figura 24. Aceleración en el compartimento de carga resultante de la simulación de la suspensión para la configuración T3S2.

Aunque estos resultados muestran comparativamente el movimiento resultante en el compartimento de carga, se pueden observar tendencias que podrían utilizarse como punto de partida para pruebas de vibración en campo o en laboratorio. Estos datos pueden requerir un tratamiento más elaborado para identificar las frecuencias y amplitudes a partir de la historia de la aceleración, como es el caso de la aplicación de las series de Fourier y sus diversos algoritmos, como se comentó en un capítulo anterior.

4.3 Simulación en Laboratorio

4.3.1 Necesidad de la simulación de vibraciones en laboratorio

En muchas ocasiones, para enunciar hechos concluyentes sobre el proceso de vibración, no es suficiente sólo con medir los niveles de vibración en un vehículo durante su operación o determinar las condiciones del comportamiento

dinámico de los modelos de simulación numérica. Tales situaciones pueden ser complementadas con la ejecución de pruebas de vibración controlada en laboratorio. Para ello, se utiliza equipo especializado para generar los patrones de vibración y la instrumentación de un modelo físico de representación de la carga en el vehículo de prueba. Así, se pueden separar conjuntos de condiciones para su análisis individual, cuyo efecto sobre los productos no podría aislarse con precisión en un recorrido normal del vehículo, debido a la diversidad de frecuencias y amplitudes que se presentan de manera simultánea.

Una vez identificados los subconjuntos de características de vibración de la historia del movimiento, éstos pueden ser reproducidos en el laboratorio, dentro del intervalo de operación de los equipos.

4.3.2. Equipo para pruebas de vibración en laboratorio

Para la simulación de la vibración en laboratorio, se requiere de un equipo generador de vibraciones, así como de instrumentos de control y medición de frecuencias y amplitudes. El sistema en su conjunto debe ser capaz de reproducir el intervalo de frecuencias a las que está expuesto el producto durante su transporte. El sistema generador de vibraciones se compone básicamente de tres equipos: el generador de vibración, un amplificador de señales y un actuador, comúnmente conocido como mesa vibratoria. Un sistema típico se muestra esquemáticamente en la Figura 25, mostrando además la colocación de un acelerómetro de monitoreo y de retroalimentación de la señal para control preciso.

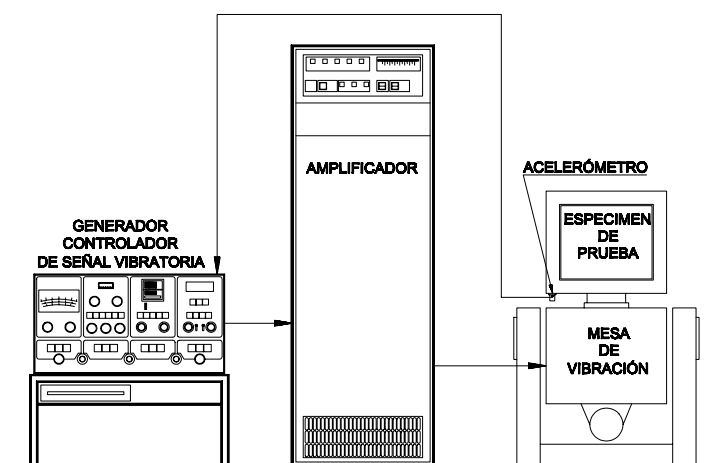


Figura 25. Esquema típico de un sistema generador de vibraciones de laboratorio

El dispositivo generador de vibración genera una señal eléctrica proporcional al nivel de vibración. La capacidad de estos dispositivos son la de poder generar una señal periódica, típicamente una señal senoidal, en un amplio intervalo de

frecuencias y amplitudes. De acuerdo a la señal generada, la amplitud de la vibración puede ser entonces establecida como un desplazamiento, una velocidad o una aceleración. A la vez, este dispositivo de generación tiene los medios para controlar los parámetros de la vibración durante la ejecución de una prueba. En algunos dispositivos es posible introducir una señal aleatoria para reproducir cualquier espectro vibratorio.

Una vez generada la señal eléctrica, ésta debe ser amplificada a un nivel tal, en términos de voltaje y corriente, que pueda ser capaz de generar el movimiento mecánico en la mesa vibratoria. Dada la magnitud de la amplificación, se requiere de un equipo especial que pueda convertir esa señal generada a una señal potente de varios órdenes de magnitud (mayores a 10^3). Correspondientemente, este equipo se denomina amplificador de potencia.

La señal amplificada es entonces suministrada a la mesa vibratoria (Figura 26), que es el convertidor de la señal eléctrica en el movimiento vibratorio. En general, las limitantes del movimiento están en función de las características de construcción de la mesa.



Figura 26. Mesa vibratoria del sistema generador de vibraciones Ling Dynamic System.

Como especificaciones generales, el sistema generador de vibraciones contempla el intervalo de frecuencia reproducible, la amplitud del desplazamiento por la mesa vibratoria y la capacidad de soporte de carga. Estas especificaciones pueden comprender, por ejemplo, frecuencias desde poco menos de 1 Hz hasta varios miles de Hz, de amplitudes de desplazamiento de unos cuantos milímetros y capacidades de soporte de carga desde unos cuantos kilogramos hasta varias toneladas, dependiendo de las características mecánicas de la mesa vibratoria.

4.4 Ejemplos Breves de Vibración de Perecederos

Algunas investigaciones sobre vibración en transporte han mostrado que las primeras frecuencias de los vehículos pesados son menores a 25 Hz [16]. Con el propósito de ilustrar la aplicación de la simulación de vibraciones en laboratorio, se presentan los aspectos generales de un estudio preliminar de vibración en perecederos [9], en el que se combinaron datos de amplitud de la aceleración, obtenidos a través de la simulación del tipo de suspensiones en un vehículo unitario C3 y en un vehículo articulado T3S2. Para ejecutar las pruebas de laboratorio se seleccionaron frecuencias de 10 Hz y 20 Hz, con amplitudes de vibración de 5 mm y 10 mm de desplazamiento. Estas pruebas se aplicaron a frutos como tomate, aguacate y fresa transportados a granel en contenedores de plástico. Una de estas cajas, montada sobre una mesa de vibración, se aprecia en la Figura 27.



Figura 27. Pruebas de vibración en laboratorio para tomate a granel y detalle de la colocación de un acelerómetro sobre el contenedor de fresa.

Después de que los frutos hubieron sido sometidos a vibración, se midió su capacidad de resistencia al aplastamiento, empleando un dispositivo simple (Figura 28) para medir su deformación diametral al aplicar una carga de compresión. Las Figuras 29 y 30 muestran algunos de los resultados obtenidos de estas pruebas.



Figura 28. Dispositivo para medir deformación diametral en tomate bajo carga de compresión.

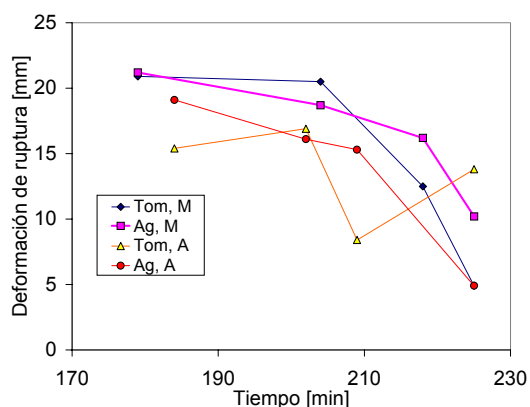


Figura 29. Deformación diametral obtenida para distintos tiempos de exposición a vibración. Para tomate (Tom) y aguacate (Ag), con datos de un vehículo C3 con suspensión de muelles (M) y suspensión de aire (A).

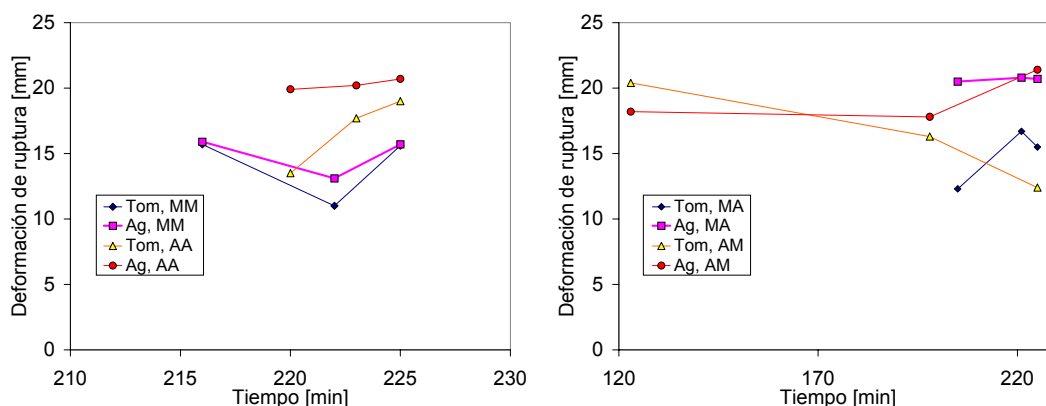


Figura 30. Deformación diametral obtenida para distintos tiempos de exposición a vibración. Para tomate (Tom) y aguacate (Ag), con datos de un vehículo T3S2 con combinación de suspensión de muelles (M) y de aire (A) en tractor y semi-remolque, respectivamente.

Además de someter a vibración los frutos a granel, se realizaron pruebas sobre frutos individuales, para observar el efecto de la interacción de éstos contra las paredes del recipiente contenedor y evaluar el daño unitario. La disposición para esta prueba se presenta en la Figura 31.



Figura 31. Arreglo para aplicación de vibración a un fruto individual.

Ejemplo de resultados del tiempo de exposición a la vibración, necesario para obtener la ruptura del fruto, se presentan en la tabla I.

Tabla I. Resultados del tiempo de ruptura de diversos frutos sometidos a vibración

Fruta	Frecuencia [Hz]	Amplitud (mm)	Observaciones
AGUACATE	10	5	Se rompe después de 80 min.
	10	10	Se rompe después de 20 min.
	20	5	Se rompe después de 70 min.
	20	10	Se rompe después 15 min.
FRESA	10	5	En 200 min. de prueba no se detectó ruptura.
	10	10	Se rompe después de 150 min.
	20	5	Se rompe después de 120 min.
	20	10	Se rompe después de 60 min.
TOMATE	10	5	Se rompe después de 200 min.
	10	10	Se rompe después de 36 min.
	20	5	Se rompe después de 37 min.
	20	10	Se rompe después 15 min.

Además de estas pruebas, se presenta una variante de medición de vibración para un arreglo especial de la fresa [20], con objeto de simular los niveles de vibración en la dirección horizontal en lo alto de una estiba, arreglo que se muestra en la Figura 32, incluidos algunos detalles de la colocación de acelerómetros para monitoreo de los niveles de vibración.

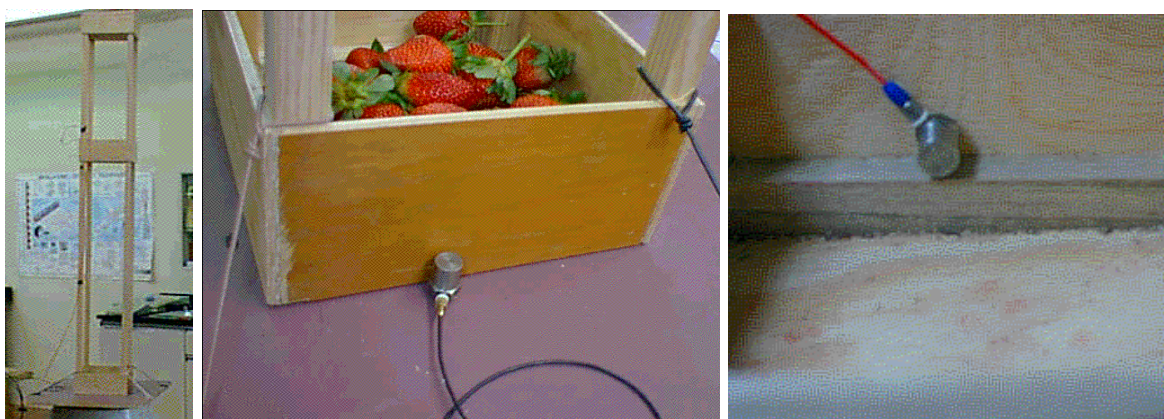


Figura 32. Montaje de un dispositivo para simular un arreglo de estiba durante pruebas de vibración en fresa (izquierda) y detalle de la colocación de acelerómetros para monitoreo de la vibración en un plano vertical (izquierda) y en un plano horizontal (derecha).

La representación de la vibración registrada por los acelerómetros en las direcciones vertical y horizontal, como se apreciaría en la pantalla de un osciloscopio, se muestra en la Figura 33. Este tipo de despliegue gráfico exhibe valores de voltaje con una cuadrícula de referencia.

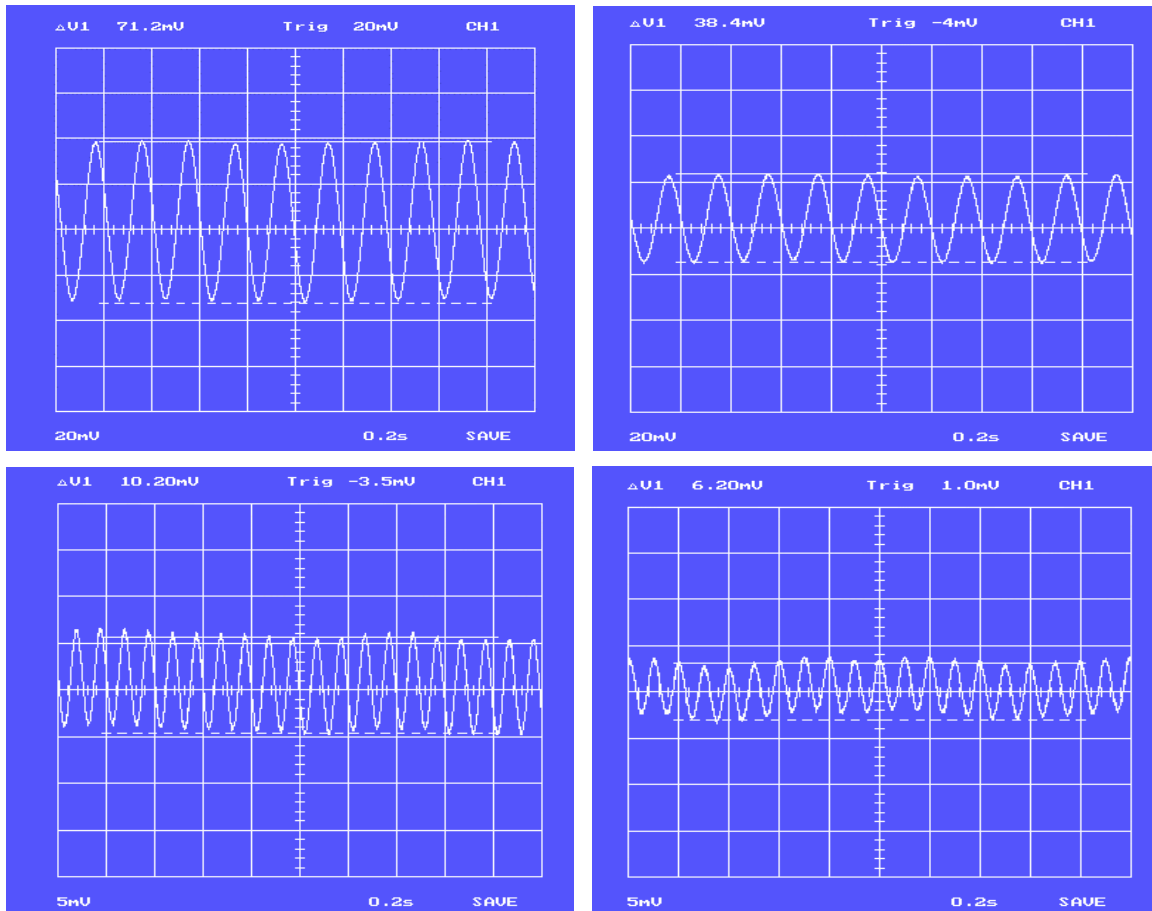


Figura 33. Despliegue en un osciloscopio del comportamiento de la aceleración en la dirección horizontal en la parte superior (izquierda) e inferior (derecha) de la estiba de fresa, para 5 Hz (arriba) y 10 Hz (abajo). Se muestra distinta escala vertical.

Las simulaciones y los datos presentados tienen un propósito ilustrativo. Para determinar completamente el daño que sufren los frutos percederos por vibración durante el transporte, es necesario realizar pruebas adicionales de tipo bioquímico, en los que se evalúen las características fisiológicas de los frutos. Sin embargo, los resultados de las pruebas de vibración mecánica, pueden ser un criterio para considerar, con base en la apariencia del fruto, si éste ha sufrido un daño de moderada magnitud.

Conclusiones

El transporte carretero es el principal medio de movilización de los productos agrícolas, principalmente del tipo perecedero. Dadas las características fisiológicas de estos productos de vida corta, son más susceptibles a la alteración del proceso de maduración y a sufrir daños mecánicos.

El mayor volumen de mermas en los productos agrícolas se da en las actividades de postcosecha. Además del manejo durante la cosecha y la selección y empaque de los productos, la distribución de los mismos en los que participa el transporte, representan un amplio porcentaje de estas mermas.

En México, los productores agrícolas desconocen globalmente el tipo de daño que se genera durante el transporte. Sin embargo, la vibración de los vehículos son promotores del deterioro mecánico de los productos. En algunos casos, estas alteraciones repercuten en el proceso normal de maduración de frutos y hortalizas.

La vibración de los vehículos se debe principalmente al movimiento relativo de los componentes del vehículo, a las maniobras de conducción, a la interacción con la superficie del camino y a las condiciones del medio ambiente. El sistema de suspensión de los vehículos atenúa y modifica los patrones de vibración transmitidos hacia la carga y los pasajeros.

La medición experimental de las vibraciones en puntos estratégicos del vehículo y la carga, permiten determinar las características que pueden tener mayor incidencia en la generación de daño mecánico a los productos agrícolas transportados. Estas mediciones se pueden conjugar con simulación numérica y con pruebas de vibración simplificadas de laboratorio, para determinar con mayor precisión el efecto de la vibración sobre el daño sufrido por el producto.

Globalmente, el propósito de este trabajo es mostrar los componentes sobresalientes, que intervienen en los estudios del efecto de las vibraciones durante el transporte de perecederos agrícolas. El conocimiento del proceso de daño debido a las vibraciones mecánicas, permite proponer alternativas para la disminución o eliminación del daño sufrido durante el transporte y, de esta manera, incrementar la calidad de frutas y hortalizas.

Referencias

- 1 Grant, S. W.; Turczyn, M. T.; Ashby, B. H.; Hallee, N. D.; Kleinschmidt, G. D.; Wheaton, F. W.; Dunton, W. L. 1886. "Potato Bruising During Transport". TRANSACTIONS of the ASAE 29(4):1176-1179.
- 2 Turczyn, M. T.; Grant, S. W.; Ashby, B. H.; Wheaton, F. W. 1986. "Potato Shatter Bruising During Laboratory Handling and Transport Simulation". ASAE Paper No. 85-6023.
- 3 Beilock, R.; Dunn, J.; Prentice, B.; Clemmons, R. 1995. "Transportation-Related Problems and Opportunities for U.S./Mexican Produce Trade". Procc. of International Conference: Harvest and Postharvest Technologies for Fress Fruit and Vegetables. Guanajuato, México. p. 638.
- 4 Kays, S. J. 1991. "Postharvest Physiology of Perisheable Plant Products". Van Nostrand Reinhold, New York. p 379.
- 5 Kader, A. A. 1987. "Respiration and Gas Exchange of Vegetables". En Weichmann (ED.) Postharvest Physiology of Vegetables. Marcel Dekker, Inc. New York. p 23.
- 6 CNPH. 1995. Boletín Anual Temporada 1994-1995. Confederación Nacional de Productores de Hortalizas. México.
- 7 Yahia, E. M. 1995. "Postharvest Handling of Horticultural Crops in México". Symposium of Postharvest Physiology, Pathology and Technology for Horticultural Commodities. Recent Advances. Marruecos.
- 8 O'Brien, M.; Claypool, L. L.; Leonard, G. J.; York, G. K.; MacGillivray, J. H. 1963. "Causes of Fruit Bruising on Transport Trucks". Hilgardia, 35(6):113-243.
- 9 Lozano Guzmán, A.; Hernández Jiménez, J. R. 1998. "Effect of Suspension Type on Fruit Damage During Transportation". Symposium on Recent Advances in Transportation Systems and Technologies, CSME FORUM 98. Montreal, Canada.
- 10 Jones, C. S.; Holt, J. E.; School, D. 1991. "A Model to Predict Damage to Horticultural Produce During Transport". Journal of Agricultural Engineering-Research, 50(4):245-272.

- 11 Imou, K.; Takenaga, H.; Morishima, H.; Seo, Y.; Kawagoe, Y. 1996. "Impact Counter for Fruits During Transportation". *Japan Agricultural Research Quarterly*, 20(4):245-248.
- 12 Leppack, E. 1995. "Measuring Damage in Potato Preparation Plants". *Kartoffelbau*, 46(9):374-379.
- 13 Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2000. "Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal". Dirección General de Autotransporte, Subsecretaría de Transporte. México.
- 14 Hilton, D. J. 1993. "Impact and Vibration Damage to Fruit During Handling and Transportation". *Postharvest handling of tropical fruits, Proceedings of International Conference, Chiang Mai, Thailand, 19-23 July 1993*, pp 116-126.
- 15 Sternberg, E. R. 1992. "Heavy Duty Truck Suspensions". SAE Paper 760369 - The Twenty-Second L. Ray Buckendale Lecture published February 1976. *Truck Systems Handbook Design SAE PT-41*.
- 16 Gillespie, T. D. 1992. "Heavy Truck Ride". SAE Paper 850001 – The Thirty-First L. Ray Buckendale Lecture published February 1985. *Truck Systems Handbook Design SAE PT-41*.
- 17 Meirovitch, L. 1986. "Elements of Vibration Analysis". Second Edition, McGraw-Hill Book Company International Editions. New York, USA.
- 18 Knowledge Revolution. 1995. *Working Model™ Software version 3.0 for Windows™ and Macintosh™ and User's Manual*. Knowledge Revolution; CA, USA.
- 19 US Department of Transportation. 1987. "A Vehicle Dynamics Handbook for Single-Unit and Articulated Heavy Trucks". National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 807 185, May 1987.
- 20 Juárez Guaní, A.; Serwatowski, R.; Hernández Jiménez, J. R., Lozano Guzmán, A. 1998. "Notas de Resultados Parciales del Efecto de la Vibración en la Calidad de la Fresa". Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad de Guanajuato; Instituto Mexicano del Transporte.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx