



ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA DETERMINAR EL ÁNGULO DE BALANCEO Y LA ACELERACIÓN LATERAL EN EL MOVIMIENTO OSCILATORIO DE UN PÉNDULO

Javier Hernández Pérez
Manuel de Jesús Fabela Gallegos

Publicación Técnica No. 248
Sanfandila, Qro. 2004

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

**Esquema de instrumentación para
determinar el ángulo de balanceo y la
aceleración lateral en el movimiento
oscilatorio de un péndulo**

**Publicación Técnica No. 248
Sanfandila, Qro. 2004**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M. C. Javier Hernández Pérez y el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, asistente e investigador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se agradecen los comentarios y sugerencias del M. C. David Vázquez Vega, del M. C. José Ricardo Hernández Jiménez y del Dr. Miguel Martínez Madrid, de la misma Coordinación.

Para su elaboración se tomó como base el documento “Esquema de instrumentación para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral en el movimiento oscilatorio de un péndulo”, presentado en el 2004 por el Ing. Javier Hernández Pérez como Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Querétaro.

Índice

	Página
Resumen	V
Abstract	VII
Resumen ejecutivo	IX
Introducción	1
1 Antecedentes	5
1.1 Evaluación del desempeño dinámico de vehículos	5
1.2 La aceleración lateral	5
1.3 Efecto del ángulo de balanceo y su medición	8
1.4 Objetivo	10
2 Análisis de la aceleración	11
2.1 Aceleración general de un vehículo	11
2.2 Componentes de la aceleración debida al movimiento	14
2.3 La aceleración de la gravedad en el movimiento de un vehículo	16
3 Instrumentos para medir aceleración	19
3.1 La aceleración de la vibración mecánica	19
3.2 Instrumentos de medición del movimiento	19
3.2.1 Transductores de desplazamiento	10
3.2.2 Transductores de velocidad	20
3.2.3 Transductores de aceleración (acelerómetros)	20
3.3 Principios de construcción de transductores piezoeléctricos	20
3.3.1 Características generales	20
3.3.2 Materiales piezoeléctricos	21
3.3.3 Construcciones típicas de un acelerómetro piezoeléctrico	22
3.3.4 Sensibilidad	24
3.3.5 Consideraciones en la selección de un acelerómetro	25
3.4 Acelerómetros capacitivos	26
3.4.1 Principio de operación	26
3.5 Analogía del funcionamiento de acelerómetros	27

	Página
4 Esquema de instrumentación	33
4.1 Generalidades de parámetros de medición.....	33
4.2 Instrumentación propuesta aplicada en un péndulo	33
4.3 Preparación de pruebas.....	35
4.3.1 Equipos e instrumentos	35
4.3.2 Generalidades de la adquisición de datos	39
4.3.3 Instrumentación del péndulo	42
4.4 Pruebas.....	43
4.4.1 Pruebas estáticas	43
4.4.2 Pruebas dinámicas	45
5 Resultados	49
5.1 Pruebas estáticas.....	49
5.2 Pruebas dinámicas.....	51
5.2.1 Pruebas de oscilación libre	51
5.2.2 Pruebas de oscilación forzada.....	55
5.3 Estimación de la aceleración tangencial en oscilación libre	57
5.3.1 Cálculo teórico	57
5.3.2 Estimación práctica.....	59
5.3.3 Discusión y comentarios	61
Conclusiones	63
Referencias	65

Resumen

En este escrito se describen las dificultades técnicas de instrumentación durante el proceso de medición práctica de la aceleración lateral en vehículos de autotransporte y se identifica la dependencia del ángulo de balanceo. Como una alternativa para solucionar esas dificultades, se propone un esquema básico de instrumentación para medición experimental con instrumentos convencionales medidores de aceleración. El esquema es aplicado para determinar el ángulo de balanceo sobre un mecanismo de tipo pendular. Con ese fin, se analiza el movimiento oscilatorio del péndulo en un plano vertical, identificando las aceleraciones debidas al movimiento y el efecto de la dirección y magnitud de la aceleración de la gravedad. El análisis utiliza la dirección de la gravedad como parámetro de referencia para determinar el ángulo de inclinación del péndulo durante su movimiento oscilatorio. De esta manera, se identifican los tipos de acelerómetros de acuerdo a sus principios de operación, con factibilidad de aplicarse en la instrumentación. El esquema de instrumentación resultante incluye dos tipos de acelerómetros; uno piezoeléctrico clásico inmune al efecto de aceleraciones constantes y otro capacitivo con capacidad de registrar estas aceleraciones. El proceso experimental incluyó tanto pruebas estáticas como dinámicas; las primeras para verificar el efecto de la gravedad en ambos tipos de acelerómetros y las segundas para comprobar el funcionamiento del esquema. Los resultados mostraron un buen comportamiento estático y dinámico para determinar el ángulo de balanceo, pero baja precisión en la determinación de la aceleración tangencial debido a las especificaciones de aplicación de los acelerómetros empleados, sensibles tanto a la amplitud como al intervalo de frecuencia del movimiento del péndulo utilizado.



Abstract

In this work, some instrumentation technical difficulties found during the practical measurement process of vehicle's lateral acceleration are described, and the dependence with roll angle is identified as well. A basic instrumentation scheme based upon conventional accelerometers is proposed as an alternative to determine roll angle. Such scheme is applied on a pendulum, whose oscillatory movement is analyzed for identifying acceleration due to movement and the effects that both, direction and magnitude of gravity acceleration, have on it. In order for determining pendulum tilt angle, the gravity acceleration direction is used as reference. Along with the analysis process, accelerometer types for using in the instrumentation scheme are identified, according to their operational principles. Hence, one type has to be no sensitive to constant accelerations and other type has to be able to register them, such as piezoelectric and capacitive accelerometers, respectively. The experimental process included static tests as well as dynamic ones, verifying the acceleration gravity effect and the correct experimental scheme operation. Results showed acceptable static and dynamic behaviour in determining roll angle, but low precision in determining tangential acceleration. It might be due to the characteristic dynamic response of actual employed accelerometers.



Resumen ejecutivo

Los vehículos automotores no guiados que circulan por carreteras, son considerados como uno de los principales medios de transporte, dada su gran versatilidad de empleo. Desde su invención hasta la actualidad, el desarrollo de los vehículos autopropulsados ha estado ligado a los avances tecnológicos, lo que les ha conferido mayores capacidades en su desempeño. Sin embargo, si el usuario de un vehículo desconoce su funcionamiento y sus límites operacionales, puede generar situaciones de riesgo o una operación incompatible con las características del vehículo, lo cual incide sobre la seguridad durante su tránsito. Por esta razón surge la necesidad de tener un conocimiento sobre el comportamiento mecánico del vehículo, es decir, considerando tanto aspectos estáticos como dinámicos, que lleven a una adecuada operación de acuerdo al entorno en el que el vehículo se desplace.

Desde la introducción del automóvil y hasta épocas recientes, tradicionalmente en México se han determinado sus cualidades operativas y sus capacidades de uso considerando principalmente los enfoques de análisis estáticos. Sin embargo, la percepción de estas capacidades puede verse limitada cuando el vehículo se encuentra en movimiento, debido a que el comportamiento dinámico resultante involucra en gran medida la interacción de diversos factores, tanto del medio ambiente como del conductor, del vehículo mismo y del pavimento.

Uno de los parámetros de desempeño dinámico de los vehículos es la llamada aceleración lateral, la cual refleja indirectamente la magnitud del par requerido para volcar un vehículo en movimiento sobre una trayectoria curvilínea. Por ello, la magnitud de esta aceleración se considera como un indicador de su estabilidad global. No obstante, la medición práctica de la aceleración lateral del centro de masa representa una tarea complicada debido al efecto del movimiento de balanceo transversal del chasis del vehículo durante el tránsito. Este movimiento angular alrededor del eje longitudinal, conocido como ángulo de balanceo, dificulta la medición directa de la aceleración lateral, requiriéndose instrumentos complejos y sofisticados para su determinación.

Como una alternativa para solucionar esas dificultades, en este escrito se presenta un esquema básico de instrumentación para medición experimental con instrumentos convencionales medidores de aceleración, que permita determinar el ángulo de balanceo cuando un cuerpo está en movimiento. Para ello, se toma como base un dispositivo de laboratorio tipo péndulo, cuyo movimiento oscilatorio permite ser aplicado para mostrar el principio teórico y su posible representación en un marco experimental. Para ello, se analiza el movimiento oscilatorio del péndulo en un plano vertical, identificando las aceleraciones debidas al movimiento y el efecto de la dirección y magnitud de la aceleración de la gravedad.

El análisis utiliza la dirección de la gravedad como parámetro de referencia para determinar el ángulo de inclinación del péndulo durante su movimiento oscilatorio. De esta manera, se identifican los tipos de acelerómetros de acuerdo a sus principios de operación, factibles de aplicarse en la instrumentación. El esquema de instrumentación resultante incluye dos tipos de acelerómetros, uno piezoeléctrico clásico, inmune al efecto de aceleraciones constantes, y otro capacitivo, sensible a estas aceleraciones.

El proceso experimental incluyó pruebas estáticas y dinámicas aplicando diversas combinaciones de acelerómetros. Las pruebas estáticas fueron realizadas para verificar el efecto de la gravedad en ambos tipos de acelerómetros, mientras que las dinámicas se aplicaron para probar el funcionamiento global del esquema de instrumentación propuesto.

Los resultados obtenidos con los esquemas de instrumentación propuestos mostraron la aplicabilidad del principio de medición para determinar el ángulo de balanceo, tanto estática como dinámicamente, no obstante que la aceleración tangencial medida mostró diferencias significativas con la aceleración esperada. Estas diferencias revelaron que existe una fuerte dependencia del comportamiento de la sensibilidad de los acelerómetros piezoeléctricos con la frecuencia del movimiento. Así mismo, en la aplicación experimental influyen las características electrónicas del funcionamiento de los acelerómetros, así como los intervalos de respuesta al movimiento, tanto de frecuencia como de amplitud. La precisión del esquema de instrumentación depende de las características físicas y de funcionamiento de los instrumentos, por lo que deben utilizarse acelerómetros piezoeléctricos de menor masa y tamaño, con un menor límite inferior de respuesta en frecuencia, menor tiempo de estabilización y sensibilidades de mayor uniformidad en intervalos de bajas frecuencias.

Introducción

En la vida cotidiana es indispensable el uso de los vehículos de autotransporte debido a la necesidad de desplazar tanto personas como bienes materiales. Los vehículos automotores no guiados que circulan por carreteras son considerados como uno de los principales medios de transporte, dada su gran versatilidad de empleo.

Desde la invención del vehículo autopropulsado hasta la actualidad, su desarrollo ha estado ligado a los avances tecnológicos. Como un ejemplo, una de las tendencias que han evolucionado es el incremento de la comodidad, suavizando la calidad de marcha, ruidos y vibraciones. Actualmente los vehículos tienden a ser menos pesados y alcanzar velocidades cada vez mayores, con mejor eficiencia en el consumo de combustible.

No obstante, si el usuario desconoce el funcionamiento y los límites operacionales de un vehículo puede generar situaciones de riesgo o una operación incompatible con sus características, lo cual incide sobre la seguridad durante el tránsito. Por esta razón, surge la necesidad de tener un conocimiento sobre el comportamiento mecánico del vehículo, es decir, considerando aspectos tanto estáticos como dinámicos, que lleven a una adecuada operación conforme al entorno en el que el vehículo se desplace.

A principios del siglo pasado, el área de estudio del comportamiento dinámico de un vehículo era prácticamente desconocida. El interés por optimizar el uso de transporte asociado a mayores índices de seguridad ha requerido que esta área retome mayor énfasis en los tiempos modernos. Países como Canadá y Estados Unidos, entre otros, han hecho grandes esfuerzos por tratar de analizar y evaluar el comportamiento dinámico de un vehículo, con el propósito de incrementar sus niveles de seguridad y su uso como transporte en general.

Desde la introducción del automóvil y hasta épocas recientes, en México tradicionalmente se han determinado las cualidades operativas y las capacidades de uso de un vehículo considerando principalmente los enfoques de análisis estáticos [1, 2]. Sin embargo, la percepción de estas capacidades puede verse limitada cuando el vehículo se encuentra en movimiento, debido a que el comportamiento dinámico resultante involucra en gran medida la interacción de diversos factores, tanto del medio ambiente como del conductor, del vehículo mismo y del pavimento.

Uno de los parámetros considerado como una medida del desempeño dinámico de los vehículos no guiados que circulan por las carreteras, es la llamada aceleración lateral, la cual, entre otros aspectos, es considerada como un indicador de su estabilidad global, que puede interpretarse como su tendencia a la volcadura. Este indicador se obtiene a partir de la consideración de que un

vehículo, durante su movimiento, requiere de cambios de dirección y, consecuentemente, de trayectoria.

Para que un vehículo vuelque, supuesto como modelo de cuerpo rígido, es necesario que sobre él actúe un sistema de fuerzas que produzcan su giro, de manera que generen un par que contrarreste las reacciones que soportan el cuerpo, obligándolo a rotar sobre un apoyo. Cuando este cuerpo se desplaza sobre un plano describiendo una trayectoria curva, sobre su centro de masa actúa una aceleración que puede descomponerse ortogonalmente en direcciones tangente y perpendicular a la trayectoria. La primera de estas componentes se refiere a la aceleración tangencial, mientras que la segunda puede denominarse aceleración normal, radial o centrífuga, dependiendo del contexto de análisis.

Si el centro de masa del vehículo que se mueve sobre el plano se encuentra alejado de la superficie de apoyo o de rodamiento, entonces el producto de la masa por la aceleración centrífuga da origen a una fuerza que actúa sobre su centro de gravedad que, multiplicada por la altura del “piso” a este centro, genera un par. Dependiendo de la magnitud de este par, el cuerpo puede volcar. Si la velocidad de desplazamiento sobre la trayectoria es constante y la masa, las dimensiones y la ubicación del centro de gravedad son invariables, entonces el par que puede originar la volcadura depende únicamente de la aceleración centrífuga. De esta manera, esta aceleración lateral refleja indirectamente la magnitud del par requerido para volcar un vehículo en movimiento sobre una trayectoria curvilínea.

Si se incrementa la complejidad de un análisis del comportamiento dinámico se puede observar que, como respuesta de la interacción de los distintos elementos que lo componen, como las llantas y el sistema de suspensión, el vehículo sufre una inclinación transversal. Este movimiento angular alrededor del eje longitudinal, es conocido como ángulo de balanceo.

En la práctica, la medición de la aceleración lateral del centro de masa requiere de instrumentos complejos y sofisticados. El uso de un acelerómetro convencional colocado en un plano horizontal cuando el vehículo está inmóvil, resulta inconveniente para determinar el valor real cuando se encuentra en movimiento. Esta inconveniencia se debe a que con esta disposición la medición de la aceleración se realiza únicamente en la dirección lateral del plano transversal del vehículo, el cual se balancea con el mismo. Para poder determinar la componente de la aceleración en el plano horizontal, es necesario conocer el ángulo de inclinación transversal del vehículo correspondiente al tiempo de la medición de la aceleración. Por esta razón, la aceleración lateral del centro de masa es un parámetro difícil de determinar experimentalmente, pero necesario para identificar su comportamiento dinámico.

Conforme a la razón anterior, en este trabajo se presenta un esquema alternativo para determinar el ángulo de balanceo cuando un cuerpo está en movimiento, atendiendo a las características cinemáticas del movimiento. Este esquema debe mostrar factibilidad técnica para implementarse en un vehículo, atendiendo al

plano vertical transversal del mismo. Para probar su factibilidad se toma de base un dispositivo de laboratorio tipo péndulo, cuyo movimiento oscilatorio permite ser aplicado para mostrar el principio teórico y su posible representación en un marco experimental. Así, con este trabajo se proporcionan algunas bases para desarrollar esquemas de instrumentación de mayor detalle que puedan ser útiles para estimar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral del centro de masa de un cuerpo en movimiento.

El esquema de medición considera el empleo de instrumentos de medición de aceleración convencionales, atendiendo a sus diversos principios de funcionamiento. De los tipos de implementación de estos principios en la construcción de esos instrumentos, se aprovecha la sensibilidad y la insensibilidad al efecto de aceleraciones constantes. Este hecho conduce a que se pueda tomar de referencia la dirección y la magnitud de la aceleración de la gravedad.

El escrito se organiza en cinco capítulos. El primero trata de algunos antecedentes y aspectos generales que enmarcan la aplicación de conceptos de la dinámica que son útiles para el estudio del comportamiento de vehículos. En el segundo se establece el análisis general de la aceleración, identificando la participación de la aceleración de la gravedad en el movimiento de un vehículo, como ejemplo. El tercer capítulo corresponde a la descripción de los instrumentos para medir aceleración y de los principios empleados en su operación y funcionamiento. El cuarto capítulo introduce el esquema de instrumentación, de acuerdo a los principios de operación de instrumentos, para determinar el ángulo de oscilación y la componente de la aceleración en un plano horizontal absoluto, además de presentar el proceso básico experimental con el uso de un péndulo de laboratorio, en el que se aplican instrumentos convencionales de medición de aceleración en un esquema simple para determinar los parámetros antes mencionados. Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas del desarrollo de este trabajo, así como algunas sugerencias y recomendaciones que conduzcan a mejorar los procesos de análisis y la aplicación de la instrumentación propuesta, para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral.

Esquema de instrumentación para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral en el movimiento oscilatorio de un péndulo

1 Antecedentes

1.1 Evaluación de la dinámica de vehículos

A lo largo del tiempo, los vehículos de autotransporte se han desarrollado manteniendo como objetivo principal mejorar las características de su desempeño. Estas mejoras convergen de manera integrada con el propósito de incrementar los niveles de seguridad en su operación y durante su tránsito por carreteras.

El desempeño de un vehículo involucra aspectos de su funcionamiento mecánico, de su comodidad (confort) y de su manejabilidad, [3]. En estudios realizados sobre el área de dinámica vehicular se ha determinado que para conocer las capacidades de un vehículo, es necesario evaluar su desempeño en condiciones de funcionamiento preestablecidas. Conforme a lo anterior, se han desarrollado diversos criterios físicos y mecánicos para describir las características de su operación. Además de características estáticas y dimensionales, existen medidas de desempeño dinámico tales como manejabilidad, umbral estático de volcadura, estabilidad dinámica a la volcadura, amortiguamiento del coleo, demandas de fricción, desvío de trayectorias y desempeño al frenado, [4], que permiten ubicar los límites de operación de un vehículo.

Tanto en Canadá y Estados Unidos, como en algunos países europeos, se han hecho grandes esfuerzos por tratar de caracterizar el comportamiento dinámico de los vehículos que circulan por sus carreteras. Al respecto, sobresalen instituciones dedicadas al estudio de vehículos, como la *Road and Transportation Association of Canada* (RTAC) cuyas principales áreas de estudio son la estabilidad de los vehículos y la respuesta del pavimento, desarrollando diversos parámetros para su evaluación [5]. Muchas de estas medidas dependen del conocimiento de variables como la altura del centro de gravedad, la distribución de la masa, rigidez de los sistemas de suspensión, magnitud de la aceleración lateral, entre otras, que facilitan la cuantificación de características operativas.

De las variables enunciadas, la aceleración lateral es una de las que intervienen en la evaluación de gran parte de las medidas de desempeño. Por ejemplo, la aceleración lateral es un indicador de la tendencia a la volcadura y de la estabilidad dinámica global. Sin embargo, experimentalmente es difícil de medir directamente, ya que usualmente los instrumentos de medición convencional utilizados para medir aceleración, son dependientes de su posición y fijación en una estructura.

1.2 La aceleración lateral

Desde una perspectiva teórica, el análisis del movimiento de los cuerpos requiere del uso de diversos modelos físicos y mecánicos. Dependiendo de los alcances de un análisis determinado, los modelos pueden considerar el tamaño, la geometría, las características de rigidez, de atenuación del movimiento o de deformabilidad

del objeto modelado. Por ejemplo, en la Figura 1.1 se representa el movimiento de un cuerpo, representado como una partícula.

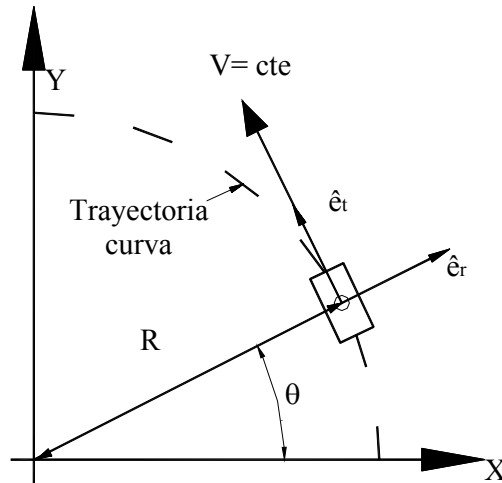


Figura 1.1
Vehículo en movimiento considerado como una partícula sobre una trayectoria curva, [6].

De este esquema, a partir de un sistema de referencia fijo representado en este caso como el sistema XY, considerando el movimiento del cuerpo en una trayectoria circular de radio R, el vector de posición \vec{r} expresado en coordenadas radial y tangencial [6], es:

$$\vec{r} = R \hat{e}_r \quad (1.1)$$

Del manejo diferencial de esta expresión con respecto al tiempo, se obtiene la aceleración $\ddot{\vec{r}}$, siendo:

$$\ddot{\vec{r}} = R\ddot{\theta} \hat{e}_t - R\dot{\theta}^2 \hat{e}_r \quad (1.2)$$

Suponiendo que la velocidad de avance de esta partícula es constante, la aceleración que experimenta es la componente normal a la trayectoria:

$$\ddot{\vec{r}} = -R\dot{\theta}^2 \hat{e}_r \quad (1.3)$$

Puesto que para este tipo de movimiento la velocidad de avance puede expresarse como:

$$V = R\dot{\theta} \quad (1.4)$$

De aquí, la aceleración normal, A_n , puede expresarse como:

$$A_n = V\dot{\theta} = R\dot{\theta}^2 = \frac{V^2}{R} \quad (1.5)$$

Esta aceleración corresponde a la aceleración lateral del objeto modelado, cuyo conocimiento, como el caso de un vehículo, proporciona elementos importantes sobre las características geométricas de su movimiento. Con base en estos argumentos se deduce que cuando un vehículo circula a velocidad constante sobre una curva de radio constante, experimenta una aceleración en una dirección perpendicular a la tangente de la curva, que da origen al efecto denominado “acción centrífuga”, asociado a una “fuerza centrífuga” [7].

Sin embargo, modelos de mayor detalle quedan limitados por el empleo de modelos de una partícula. Retomando el ejemplo del vehículo, éste se conforma por diversos sistemas y componentes que se mueven en conjunto que, en el caso de una partícula, sufren idealmente el mismo desplazamiento. Para ampliar el nivel de análisis de un cuerpo de esta clase, se pueden utilizar modelos que combinan el uso de cuerpos rígidos con elementos flexibles. Así, la aceleración lateral de interés sería aquella que experimenta el centro de gravedad de este conjunto de elementos que componen el vehículo. La aceleración, combinada con su masa de acuerdo a la segunda ley de Newton, sería la fuerza centrífuga, la cual produce un par con respecto al piso que puede hacer rotar al vehículo sobre su eje de avance, [8].

Lo anterior puede visualizarse con ayuda de la Figura 1.2, que representa el diagrama simplificado de cuerpo libre de un vehículo proyectado en su plano transversal, al circular sobre una trayectoria curva girando a la izquierda.

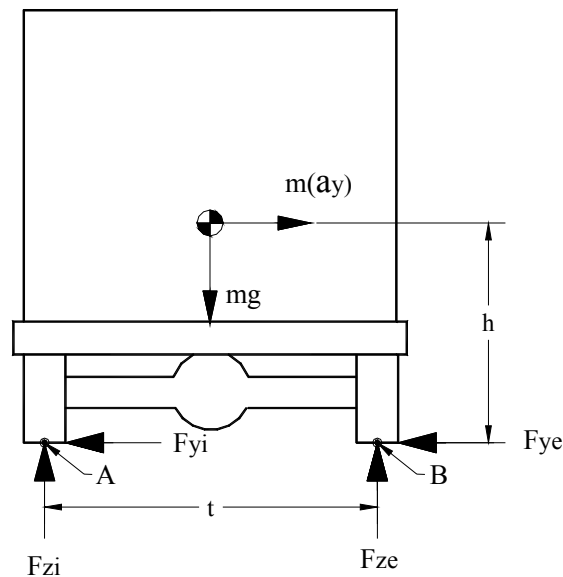


Figura 1.2
Balance de fuerzas sobre el plano transversal.

En este diagrama, se indica:

m : masa total del vehículo

a_y : aceleración lateral

g: aceleración de la gravedad

h: altura del centro de gravedad con respecto al piso

t: distancia de vía (entrevía)

F_{zi} : fuerza vertical aplicada en las llantas internas de la curva

F_{ze} : fuerza vertical aplicada en las llantas externas de la curva

F_{yi} : fuerza lateral aplicada en las llantas internas de la curva

F_{ye} : fuerza lateral aplicada en las llantas externas de la curva

Partiendo de una condición de equilibrio dinámico, el momento resultante, M, de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, da origen a la expresión siguiente (con respecto a B, punto central de contacto de la llanta externa con el piso):

$$\sum M = (m \cdot a_y \cdot h) - (m \cdot g \cdot t/2) + (F_{zi} \cdot t) = 0 \quad (1.6)$$

Si las condiciones del movimiento produjeran la volcadura del vehículo hacia la derecha, entonces F_{zi} y F_{yi} serían nulos, por lo que la expresión resultante sería:

$$(m \cdot a_y \cdot h) - (m \cdot g \cdot t/2) = 0 \quad (1.7)$$

Esta expresión representa la condición mínima para que el vehículo vuelque, por lo que la aceleración lateral a_y mínima requerida es:

$$a_y = \frac{tg}{2h} \quad (1.8)$$

En otras palabras, la aceleración lateral del centro de gravedad de un cuerpo constituye un indicador de su condición de volcadura; en este caso, ejemplificada con un vehículo.

1.3 Efecto del ángulo de balanceo y su medición

En la realidad son pocos los cuerpos que se representan por el tipo de modelo mostrado en la Figura 1.2; además, en la práctica es difícil medir la aceleración lateral. Esta dificultad estriba en que cuando un cuerpo cambia de dirección, debido a elementos flexibles que lo componen sufre una inclinación hacia el lado contrario del giro que realiza. Prosiguiendo con el ejemplo del vehículo, la interacción de distintos elementos como las llantas y el sistema de suspensión, el vehículo sufre la inclinación transversal descrita. Este movimiento angular alrededor del eje longitudinal, es conocido como “ángulo de balanceo”, lo cual representa una dificultad práctica para medir la aceleración lateral. Si en estas condiciones se utilizara un acelerómetro convencional (instrumento para medir aceleración), éste tendría que colocarse fijamente a la estructura del vehículo y orientado transversalmente. Si el vehículo se inclina, el registro del acelerómetro correspondería a la componente sobre el eje de orientación del vehículo, mas no

al de la aceleración lateral, que yace sobre el plano horizontal. Así la aceleración lateral pudiera estimarse si se conociera el ángulo de inclinación, el cual depende de las condiciones del movimiento, normalmente variando con el tiempo.

En algunos países se han desarrollado instrumentos sofisticados y tecnologías avanzadas para medir el ángulo de balanceo y la aceleración lateral, con base en el principio del giróscopo, [9]. Las ventajas que ofrecen este tipo de dispositivos es su "rigidez dinámica", lo que se aprovecha para mantener una dirección de referencia absoluta. Sin embargo, su desarrollo implica la integración de conocimientos y tecnologías de construcción avanzadas, lo cual dificulta su consecución debido a su alto costo, de alrededor de varios miles a decenas de dólares [9]. Un ejemplo de esta clase de instrumentos, con un alto nivel de sofisticación tecnológica, se muestra en la Figura 1.3.



Figura 1.3
Giróscopo vertical de fibra óptica (Fiber Optic Vertical Gyros), [10].

Anteriormente, los giróscopos verticales utilizaban un sistema mecánico. En este caso, se utiliza un sistema de referencia inercial asociado a la verticalidad de la acción de la gravedad, lo que le permite realizar mediciones de ángulos con respecto a un eje vertical o a un plano horizontal absoluto.

Actualmente, los sistemas de medición inercial en estado sólido para pruebas automovilísticas, utilizan la combinación de los giróscopos de fibra óptica con la tecnología de sensores micro-maquinados de silicón (MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems), extendiendo sus alcances de medición a otras variables cinemáticas, como velocidades angulares y aceleraciones lineales, creando electrónicamente un estabilizador llamado "vertical gyro". Este tipo de instrumentos se han denominado como "Fiber optic vertical gyro systems", como el mostrado en la figura anterior. Este tipo de instrumentos tienen la capacidad de medir aceleraciones en tres ejes ortogonales, además de ángulos de rotación y velocidades angulares, tanto en condiciones estáticas como en dinámicas [10]. El dispositivo mostrado se compone de fibras ópticas aplicadas al movimiento giroscópico, acelerómetros y sensores de temperatura, que en conjunto proporcionan una señal analógica que es adquirida por una computadora personal. Esta señal se actualiza a través de un algoritmo digital de calibración continua con referencia a la dirección y sentido de la gravedad. La señal

procesada proporciona información en formato digital o analógico que puede visualizarse a través de un programa de cómputo de aplicación del instrumento.

1.4 Objetivo

El propósito de este trabajo es proporcionar las bases de un esquema de instrumentación que pueda aplicarse para estimar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral del centro de masa de un cuerpo en movimiento.

El trabajo pretende mostrar y desarrollar un esquema alternativo para determinar el ángulo de balanceo, con base en la medición de las componentes de la aceleración que experimenta un dispositivo de laboratorio tipo péndulo, atendiendo a las características cinemáticas. El movimiento oscilatorio de este dispositivo permite ser aplicado para mostrar el principio teórico y su posible representación en un marco experimental, empleando instrumentos convencionales de medición de aceleración, típicos de un laboratorio de medición de vibraciones.

2 Análisis de la aceleración

En este capítulo se introduce el análisis de la aceleración de un cuerpo, ejemplificado por las características del movimiento de un vehículo de autotransporte. Se enfatiza el efecto del campo gravitatorio de la tierra como componente de aceleración. Los principales parámetros involucrados se asocian al desplazamiento angular transversal y al cambio de la velocidad lateral lineal del vehículo en el tiempo.

2.1 Aceleración general de un vehículo

Un vehículo está conformado por diversos sistemas y componentes que se mueven en conjunto. Por ejemplo, durante una maniobra de frenado, el vehículo reduce su velocidad como una unidad. Desde este enfoque, su movimiento puede representarse como el de una masa concentrada en un punto, denominado centro de masa o centro de gravedad (CG), con propiedades inerciales apropiadas [8]. Ahora, para hacer referencia al movimiento del vehículo, se debe recurrir a un sistema inercial fijo para poder determinar sus desplazamientos, velocidades y aceleraciones absolutas (Figura 2.1).

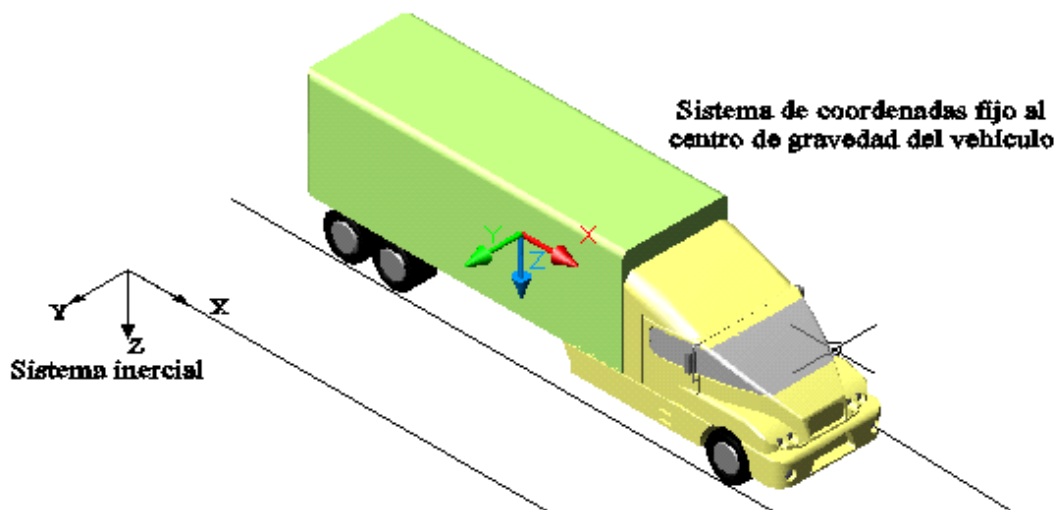


Figura 2.1

Sistemas de referencia para el análisis del movimiento de un vehículo.

Con el propósito de determinar la aceleración lateral del vehículo, como componente cinemática de su movimiento, es necesario atender al estado de aceleraciones que experimenta en el plano transversal que contiene su centro de gravedad (Figura 2.2).

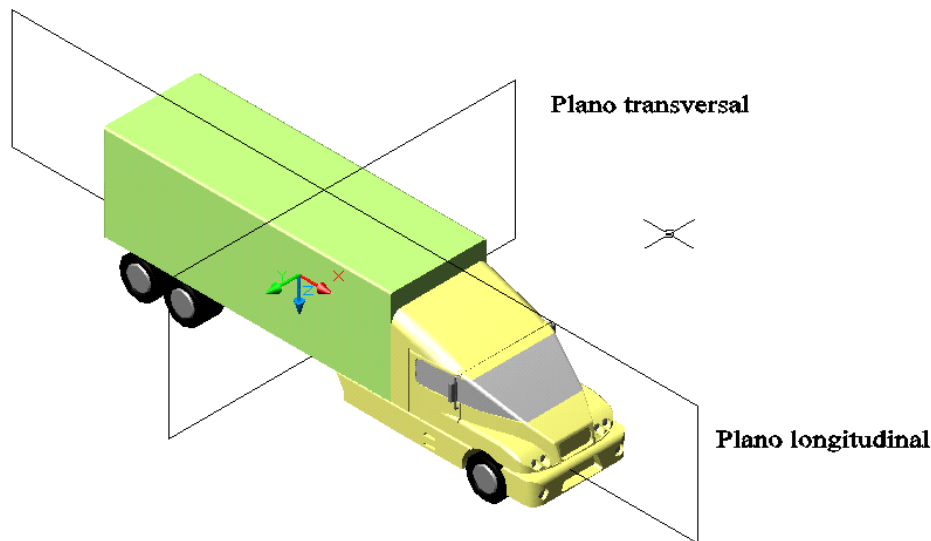


Figura 2.2
Planos de referencia del vehículo.

Para completar las consideraciones de este enfoque es necesario suponer, además, que cada elemento que compone al vehículo es infinitamente rígido; resulta, por tanto, una unidad indeformable. Bajo esta concepción, para los análisis de aceleración, de frenado y de movimiento general, es suficiente considerar su masa global, tomando la modelación del cuerpo como el de una partícula. Este caso se ilustra en la Figura 2.3, en el que la posición de la partícula se establece por medio del vector "r", siendo su velocidad "V" y su aceleración "a".

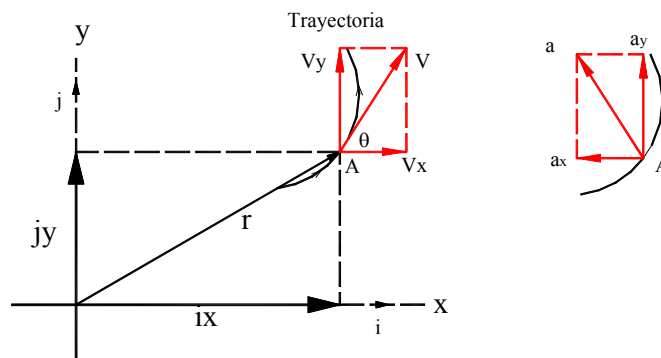


Figura 2.3
El vehículo como una partícula con movimiento en un plano xy, [6].

Sin embargo, para una mejor representación física de su comportamiento se requiere utilizar, además de las dimensiones globales, dos tipos de masas en el cuerpo del vehículo: masa suspendida y masa no suspendida (Figura 2.4). La razón de introducir estos conceptos se sustenta por el hecho de que existe un movimiento relativo considerable entre el cuerpo principal (componentes unidos al chasis y a la carrocería) y el conjunto formado por los ejes y las llantas a través del sistema de suspensión. Esta introducción incrementa la complejidad del análisis, involucrando además las características físicas de ambas masas.

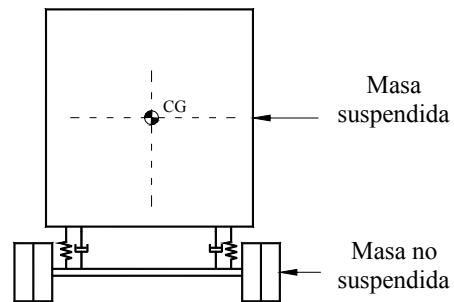


Figura 2.4
Masa suspendida y no suspendida de un vehículo.

Para llevar a cabo el análisis del movimiento de esta nueva representación, se debe utilizar un sistema de referencia que permita conocer los cambios en la posición en función del tiempo y, partiendo de ello, determinar su velocidad y su aceleración. Para el caso del análisis del movimiento de un vehículo, comúnmente se acepta la convención sugerida por la norma SAE J670e [11], la cual menciona que los movimientos del vehículo son definidos con referencia a un sistema coordenado cartesiano dextrógiro fijo al mismo, cuyo origen se ubica en el centro de gravedad de la masa suspendida. Este sistema, con el vehículo en reposo, se orienta como sigue (Figura 2.5):

Eje x: paralelo al eje longitudinal del vehículo, positivo hacia la parte delantera

Eje y: transversal al cuerpo principal del vehículo, positivo hacia la derecha

Eje z: vertical, positivo hacia abajo

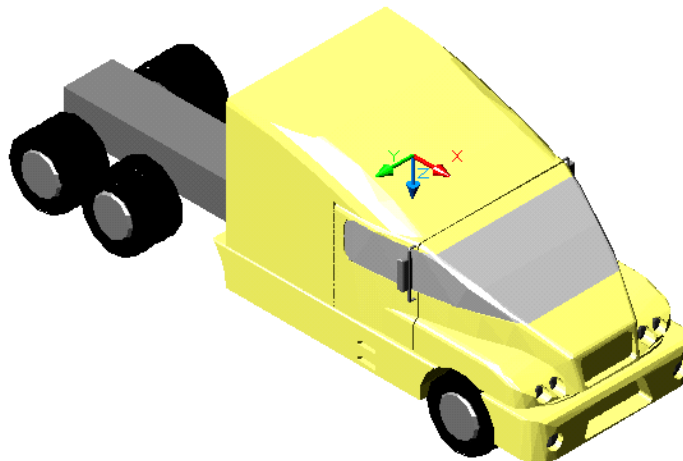


Figura 2.5
Sistema coordenado fijo al vehículo, orientado según SAE J670e.

Los movimientos angulares respectivos a cada eje, se definen como balanceo (*roll*), si es alrededor del eje longitudinal (eje x), cabeceo (*pitch*) si es alrededor del eje transversal (eje y) y coleo (*yaw*) para el movimiento alrededor del eje vertical (eje z).

Los movimientos absolutos del vehículo y su sistema coordinado móvil, son referidos a un sistema fijo a la tierra. Además, para el análisis se utiliza un sistema auxiliar, que al inicio del movimiento coincide con el sistema descrito, pero contenido en un plano horizontal invariable; es decir, los ejes longitudinales de ambos sistemas coinciden permanentemente. Este plano auxiliar permite determinar la rotación del cuerpo principal del vehículo alrededor del eje longitudinal.

2.2 Componentes de la aceleración debida al movimiento

Salvo en las maniobras de frenado o de aceleración, en el estudio general de la dinámica de los vehículos se utilizan diversas maniobras de conducción, ya sea en trayectoria recta o curvilínea, en las cuales se condiciona mantener la velocidad de avance constante. Con esta base, la aceleración longitudinal se mantiene nula o con magnitudes muy pequeñas, que pueden considerarse despreciables para fines prácticos.

La aceleración resultante en el plano transversal se puede descomponer en sus componentes horizontal y vertical, como se muestra en la Figura 2.6.

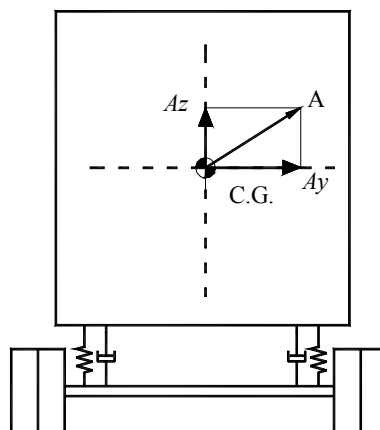


Figura 2.6
Aceleración resultante en el plano transversal.

Tal como se mencionó, el plano de interés para el análisis de la aceleración lateral y el ángulo de balanceo, es el plano transversal. Cuando el vehículo sigue una trayectoria curva a velocidad constante, debido al movimiento curvilíneo se genera una aceleración hacia el centro de la curva como resultado de la interacción de las llantas con el piso. Sin embargo, el efecto inercial del movimiento de la masa produce una tendencia del cuerpo a salirse de su trayectoria (fuerza centrífuga), efecto que puede determinarse en función de la componente horizontal (A_y) de la aceleración (A) del vehículo. La componente vertical, A_z , se genera por el movimiento de avance debido a las condiciones de la carretera, de la acción de los sistemas de suspensión, etc. Por efecto del movimiento y de la interconexión con los elementos de la suspensión y las llantas, el cuerpo principal del vehículo se

inclina lateralmente, dando lugar al ángulo de balanceo (θ) [8], como lo muestra la Figura 2.7.

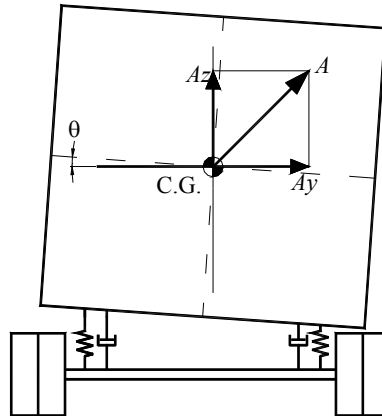


Figura 2.7
Aceleración transversal y ángulo de balanceo.

Tomando en cuenta los principios básicos de análisis vectorial de la aceleración, se tiene que una aceleración resultante se puede descomponer con respecto a la orientación de un sistema de referencia, es decir, dependiendo de la inclinación las componentes tendrán una magnitud distinta a partir de una misma resultante (Figura 2.8).

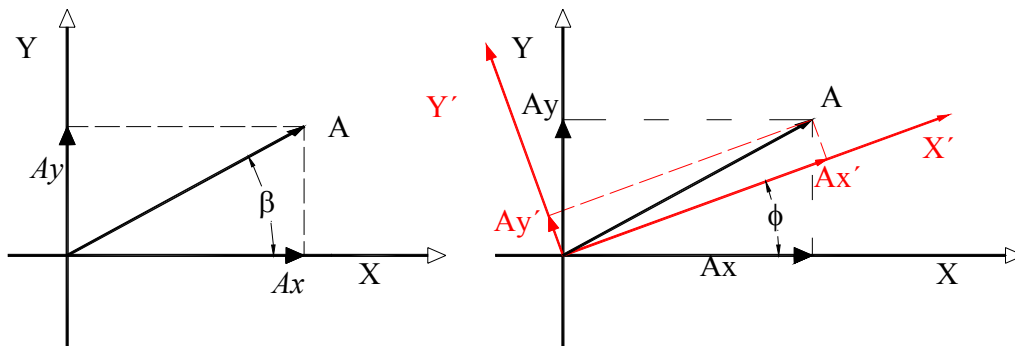


Figura 2.8
Descomposición del vector aceleración en un sistema de coordenadas inclinado $x'y'$.

En el sistema cuyos ejes están orientados vertical y horizontalmente, las componentes A_x y A_y del vector aceleración A son:

$$A_x = A \cos \beta \quad (2-1)$$

$$A_y = A \sin \beta \quad (2-2)$$

$$A = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2} \quad (2-3)$$

En el sistema del lado derecho en la figura, inclinado un ángulo ϕ con respecto al primero, las componentes del vector A son Ax' y Ay' . La relación entre las componentes en el sistema horizontal e inclinado, son de la siguiente forma:

$$Ax = Ax' \cos \phi - Ay' \sin \phi \quad (2-4)$$

$$Ay = Ax' \sin \phi + Ay' \cos \phi \quad (2-5)$$

Este análisis preliminar constituye la base para la descomposición de la aceleración en un vehículo, considerando que un sistema permanece con un eje orientado horizontalmente y otro que se inclina con el cuerpo principal del vehículo.

2.3 La aceleración de la gravedad en el movimiento de un vehículo

Dependiendo del enfoque aplicado, la aceleración se analiza considerando ya sea la aceleración promovida por el movimiento o la aceleración absoluta. Los análisis del primer enfoque son más comunes, sobre todo en análisis de movimiento plano horizontal; sin embargo, el movimiento del vehículo se ve afectado por la presencia de la aceleración de la gravedad.

Bajo esta perspectiva, la aceleración transversal resultante de un vehículo es la suma vectorial de todas las aceleraciones que intervienen en el plano transversal. Participan, entonces, la gravitacional (g), orientada verticalmente y que ayuda a mantener el contacto con el piso, la lateral (Ay) y la vertical (Az), orientadas perpendicular y paralelamente a la dirección de g , respectivamente (Figura 2.9).

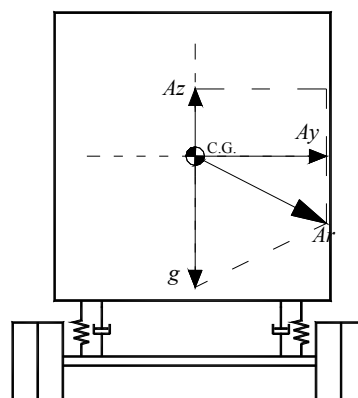


Figura 2.9
Aceleraciones presentes en el plano transversal.

En este sentido, una de las ventajas de introducir en los análisis la aceleración de la gravedad es que su dirección, sentido y magnitud permanecen constantes para los alcances de la aplicación práctica. De esta manera, la invariabilidad de la aceleración de la gravedad puede tomarse como referencia para determinar el ángulo de balanceo, [12]. Cuando un vehículo experimenta un ángulo de balanceo

se emplea, además del sistema de referencia sobre el plano transversal del vehículo con un eje perpendicular (horizontal) y otro paralelo (vertical) a la dirección de la aceleración de la gravedad, un sistema de referencia relativo al anterior que se inclina transversalmente con el vehículo. Por tanto, este sistema gira transversalmente con el vehículo en la misma magnitud que el ángulo de balanceo θ , como se ve en la Figura 2.10.

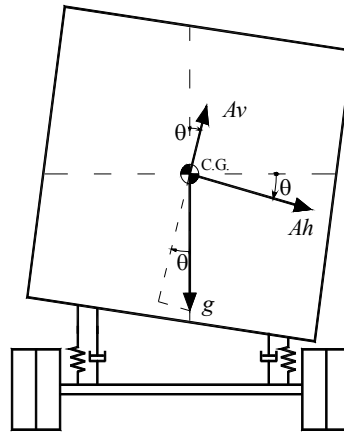


Figura 2.10
Aceleración gravitacional y componentes A_v , A_h , de la aceleración del movimiento.

Excluyendo la participación de la aceleración de la gravedad, las componentes de la aceleración sobre estos ejes se indican por A_v y A_h . Combinando la aceleración de la gravedad con estas últimas componentes, se obtiene una descomposición global con la resultante absoluta A_r , mostradas en la Figura 2.11.

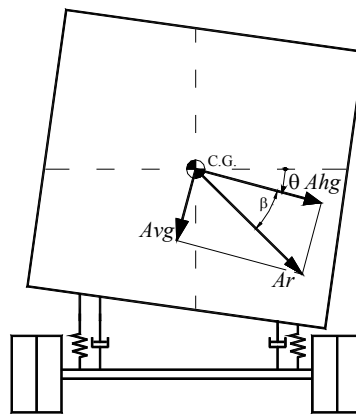


Figura 2.11
Componentes de la aceleración resultante incluyendo la aceleración de la gravedad.

$$A_{vg} = A_v - g \cos \theta \quad (2-6)$$

$$Ahg = Ah + gsen\theta \quad (2-7)$$

De este proceso resultan expresiones que relacionan la magnitud y dirección de la aceleración de la gravedad y ángulo de inclinación θ , el cual se puede determinar despejándolo de las expresiones (2-6) y (2-7) como sigue:

$$g \cos \theta = Av - Avg \quad (2-8)$$

$$gsen\theta = Ahg - Ah \quad (2-9)$$

Expresando el cociente de las ecuaciones (2-8) y (2-9), se tiene:

$$\frac{gsen\theta}{g \cos \theta} = \frac{Ahg - Ah}{Av - Avg} \quad (2-10)$$

Esta expresión conduce a la función tangente y, por tanto, al ángulo θ en función de las componentes manejadas, [12]:

$$tg\theta = \frac{Ahg - Ah}{Av - Avg} \quad \therefore \quad \theta = arctg\left(\frac{Ahg - Ah}{Av - Avg}\right) \quad (2-11)$$

Además, la magnitud de la aceleración absoluta, Ar , expresada en términos de Ahg y Avg , es:

$$|Ar| = \sqrt{Avg^2 + Ahg^2} \quad (2.12)$$

Como el objetivo es determinar las componentes Ay y Az , conocidas las componentes Av , Ah , Ahg y Avg , así como la magnitud de Ar , se tienen, por tanto, Ay y Az de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Ay = Ar \cos(\beta + \theta) \quad (2-13)$$

$$Az = -Ar \sen(\beta + \theta) \quad (2-14)$$

El proceso mostrado para determinar Ay y Az , puede también enunciarse en función del ángulo β únicamente, considerando las componentes originales Ahg y Avg , que dan lugar a la resultante Ar . Posteriormente se determinan las componentes iniciales en el sistema inclinado Av , Ah y θ .

Lo aquí discutido puede ser entonces aplicable a cualquier cuerpo que tenga un plano de oscilación vertical. Por tanto, el siguiente paso sería identificar los instrumentos con los cuales pueden realizarse las mediciones de aceleración en un contexto experimental.

3 Instrumentos para medir aceleración

3.1 La aceleración en la vibración mecánica

La vibración mecánica es el movimiento que experimenta un cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio, [13]. Este movimiento periódico se puede definir por la magnitud máxima del movimiento (amplitud), como por su duración (periodo) o velocidad de oscilación (frecuencia).

La medición de vibraciones se aplica tanto para el diagnóstico de fallas y supervisión de maquinaria en el área industrial, como para estudiar su efecto en el ser humano en el área de salud. Dentro de esta gran diversidad de aplicaciones sobresalen las pruebas de vibración que apoyan el diseño de ingeniería y el análisis estructural, y los métodos experimentales para determinar el comportamiento dinámico de estructuras, incluidos los vehículos y sus componentes.

Uno de los puntos importantes en la medición de vibraciones es contar con los elementos adecuados que conviertan las vibraciones mecánicas en señales que puedan ser almacenadas, manejadas y analizadas técnicamente. Uno de los tipos de señales que permiten realizar lo anterior son las señales eléctricas. De acuerdo a las necesidades de medición y a las características de las vibraciones que se pretenden medir, se seleccionan los instrumentos y los equipos adecuados para llevar a cabo la medición, de manera que se obtengan registros precisos y confiables, [14].

El movimiento vibratorio de un elemento, sistema o estructura, consiste físicamente en la variación del desplazamiento, de la velocidad y de la aceleración. Estos tres parámetros están matemáticamente relacionados y se pueden obtener a partir de la entrada de un detector de movimiento oscilatorio, [14]. En este trabajo es importante conocer la aceleración, por lo que los instrumentos que se utilicen deben proporcionar, directa o indirectamente, su magnitud y la variación en el tiempo.

3.2 Instrumentos de medición del movimiento

3.2.1 Transductores de desplazamiento

Los transductores de desplazamiento son empleados en mediciones de baja frecuencia y desplazamientos de muy baja amplitud. Estos transductores se utilizan en aplicaciones tales como mediciones de movimientos de flechas y mediciones de holguras. La medición de desplazamientos ha recurrido a los detectores de proximidad de no-contacto, tales como los transductores que utilizan la técnica de corrientes de Eddy. Actualmente los transductores piezoeléctricos de desplazamiento (acelerómetros integrando electrónicamente dos veces la señal detectada) han sido desarrollados para subsanar algunos de los problemas

asociados con el montaje de los detectores de no-contacto. Ellos dan una salida proporcional al movimiento absoluto de la estructura, no sólo del movimiento relativo dado por los detectores de no-contacto, [15].

3.2.2 Transductores de velocidad

Los transductores de velocidad son usados para mediciones de baja a media frecuencia. Estos equipos son útiles para monitorear la vibración y el balanceo de las máquinas rotativas. Los detectores de velocidad, en comparación con los detectores de aceleración, tienen sensibilidades más bajas para vibraciones de alta frecuencia. Por tanto, estos transductores son menos susceptibles de amplificar sobrecargas, las cuales pueden comprometer la fidelidad a bajas amplitudes y frecuencias de las señales. Tradicionalmente, los detectores de velocidad usan sistemas electromagnéticos (bobina e imán) para generar la señal de velocidad; sin embargo, ahora los detectores piezoeléctricos de velocidad (acelerómetros que integran internamente la señal) son más resistentes y han ganado popularidad debido a sus capacidades mejoradas, [15].

3.2.3 Transductores de aceleración (acelerómetros)

Los transductores de aceleración, comúnmente denominados acelerómetros, son los detectores de movimiento preferidos para aplicaciones de supervisión de aceleración, puesto que su funcionamiento está directamente relacionado con esta variable física. Estos instrumentos son útiles para mediciones tanto de muy baja como de muy alta frecuencia, pudiendo encontrarse comercialmente una amplia variedad que cubre prácticamente cualquier tipo de aplicación, tanto para propósitos generales como para propósitos específicos. Los acelerómetros son los instrumentos más utilizados en los sistemas de supervisión y medición de vibraciones, [15].

3.3 Principios de construcción de transductores piezoeléctricos

3.3.1 Características generales

El tipo de acelerómetros generalmente más utilizados es el piezoeléctrico. La razón de ello se debe a las siguientes propiedades:

- Son utilizables en un amplio intervalo de frecuencias
- Tienen excelente linealidad sobre un muy amplio intervalo dinámico
- La señal de aceleración puede ser electrónicamente integrada para proporcionar datos acerca de la velocidad y del desplazamiento
- Es posible realizar mediciones de vibración en una amplia variedad de condiciones ambientales, lográndose mantener una excelente exactitud

- Ya que generan automáticamente su señal, ninguna fuente de poder externa se hace necesaria
- Por no tener partes móviles, su durabilidad es muy alta
- Son extremadamente compactos teniendo una alta sensibilidad respecto a su relación de masa

Cuando el acelerómetro vibra, una fuerza equivalente al producto de la aceleración de la masa interna del acelerómetro por el valor de esta masa, actúa sobre cada elemento piezoeléctrico, los cuales generan una carga proporcional a la fuerza aplicada, [18]. Como éstas están aceleradas con la misma magnitud y fase que la base del acelerómetro, sobre un amplio intervalo de frecuencia, la salida del acelerómetro es proporcional a la aceleración de la base y, por tanto, a la aceleración de la superficie sobre la cual el acelerómetro se encuentra montado.

3.3.2 Materiales piezoeléctricos

Un material piezoeléctrico es aquel que desarrolla una carga eléctrica cuando se encuentra sujeto a una fuerza. Los materiales que exhiben esta propiedad son intrínsecamente monocristales piezoeléctricos tales como el cuarzo y la sal de Rochelle, [18]. Artificialmente se pueden crear materiales cerámicos ferroeléctricos polarizados, los cuales son una mezcla de diferentes compuestos tales como el titanato de bario, el circonato de plomo y el metaniobato de plomo, mismos que presentan propiedades piezoeléctricas.

El proceso por medio del cual se polarizan los materiales cerámicos es similar al proceso de magnetización de una pieza de hierro dulce por un campo magnético. La aplicación de una fuente de alto voltaje a través de los extremos del material, origina que los dominios dentro de la estructura molecular se alineen en la dirección del campo eléctrico. Una vez alineados, cuando una fuerza externa se aplica a la estructura y causa deformación de los dominios, se desarrollan cargas de polaridad opuesta en los extremos opuestos del material. Ahora bien, cuando un acelerómetro piezoeléctrico vibra, actúan sobre los dominios fuerzas proporcionales a la aceleración aplicada y la carga generada por ellos se recoge por medio de unos contactos. Existe una gran relación lineal entre la fuerza aplicada y la carga desarrollada, aun para un amplio intervalo dinámico y de frecuencia. Lo anterior incide en la obtención de excelentes características en los acelerómetros piezoeléctricos. La sensibilidad de un material piezoeléctrico está dada en unidades de carga eléctrica (comúnmente en órdenes de 10^{-12} Coulombs) por unidad de fuerza (Newton) (pC/N), [16]. El elemento piezoeléctrico puede trabajar tanto a deformaciones por compresión como a deformaciones por efecto cortante. En ambos casos, una carga se desarrollará a lo largo de las superficies sobre las cuales actúan las fuerzas.

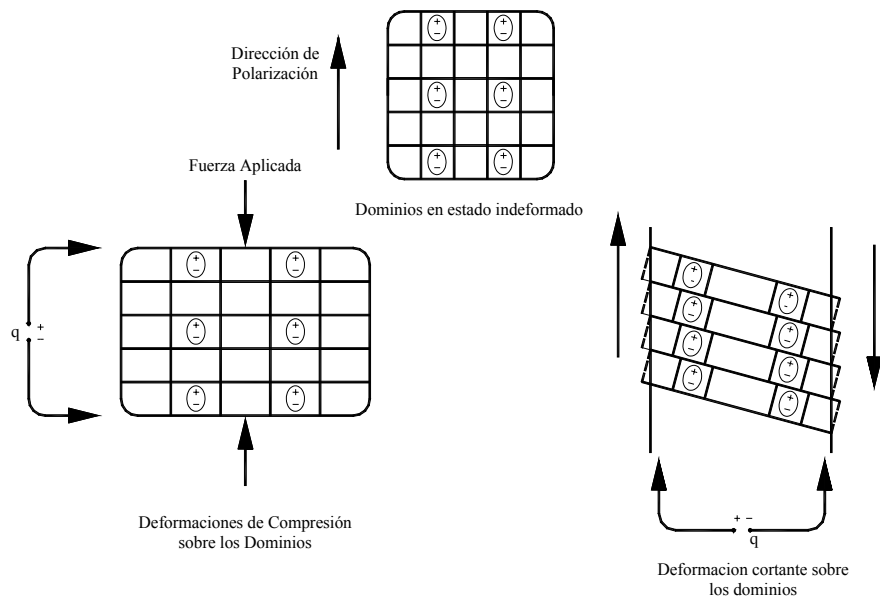


Figura 3.1
Modelo simple de un material piezoeléctrico.

Cuando hay deformación por compresión, la carga eléctrica es inducida en la dirección de polarización. Este efecto puede ser desventajoso si el material se somete a ambientes cuyas temperaturas puedan generar fuerzas que compriman el material piezoeléctrico, generando de esta manera, una carga eléctrica adicional que no se debe a la vibración. Sin embargo, cuando se usan diseños con estos elementos sujetos a deformación cortante, la carga es inducida en una dirección perpendicular a la de polarización, por lo que el efecto por fluctuaciones de temperatura es marginal. Esta es una de las razones por las cuales los acelerómetros con diseños de arreglo en modo cortante tienen un mejor desempeño que el diseño de compresión.

Los cerámicos ferroeléctricos pueden ser producidos en cualquier forma deseada y su composición puede variar para enfatizar propiedades especiales de acuerdo a las diferentes aplicaciones. Con materiales monocristales piezoeléctricos como el cuarzo, no puede lograrse lo anterior debido a que su composición es fija y su forma y tamaño se restringe a aquellos obtenidos al momento de que son cortados. Debido a estas condiciones, los monocristales presentan una menor sensibilidad y capacitancia interna que los cerámicos ferroeléctricos.

3.3.3 Construcciones típicas de un acelerómetro piezoeléctrico

Existen tres diferentes construcciones mecánicas usadas en el diseño de acelerómetros piezoeléctricos. Estos tres tipos de construcción son el delta cortante, el planar cortante y el de compresión. Debido a su mejor desempeño y versatilidad, el delta cortante es usado en casi todos los acelerómetros piezoeléctricos, [16].

Construcción tipo cortante delta

En este tipo de construcción, tres elementos piezoeléctricos y tres masas se arreglan en una configuración triangular en torno a un poste central. Tanto los elementos como las masas quedan soportados por medio de un aro de alta resistencia a la tensión, que pre-esfuerza los elementos piezoeléctricos para dar un mayor grado de linealidad. La carga generada es recolectada entre la estructura envolvente y el aro sujetador.

El tipo delta cortante brinda una alta relación sensibilidad-masa, comparado con otros tipos de construcción, teniendo además una relativa alta frecuencia de resonancia y buen aislamiento a las deformaciones de la base y los transitorios de temperatura, [16]. Estas características los hacen adecuados para una gran variedad de aplicaciones y tipos especiales. En la Figura 3.2 se muestra el tipo de construcción delta cortante y sus distintos elementos como la base, B, el anillo sujetador, R, el elemento piezoeléctrico, P, y la masa sísmica, M.

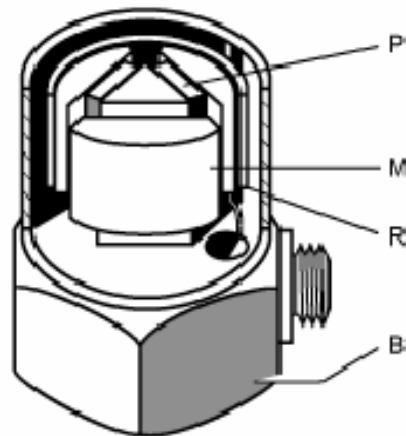


Figura 3.2
Construcción tipo delta cortante.

Construcción tipo cortante plano

Semejante al cortante delta, en este tipo de construcción el elemento piezoeléctrico se somete a una deformación por cortante como se ilustra en la Figura 3.3, conteniendo los mismos elementos que el tipo delta cortante. Este tipo consiste de un poste central rectangular y dos masas, colocando dos piezas rectangulares de material piezoeléctrico entre el poste y las masas, sujetas de manera similar al diseño anterior con un aro envolvente de alta resistencia a la tensión, [16].

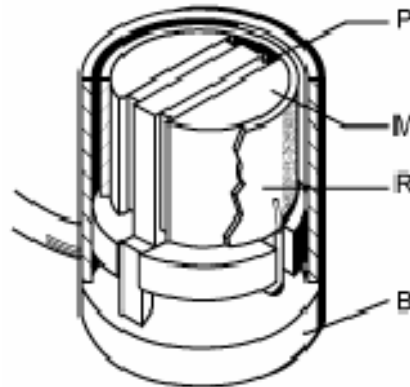


Figura 3.3
Construcción tipo cortante plano.

Construcción tipo compresión montado al centro

Este es el tipo tradicional de construcción simple y con una razón sensibilidad-masa moderadamente alta. El sistema elemento piezoeléctrico-masa-resorte se monta sobre un poste central cilíndrico sujeto a la base del acelerómetro. Sin embargo, debido a que la base y el centro del poste actúan como un resorte en paralelo con los elementos piezoeléctricos, cualquier cambio dinámico en la base como la flexión o expansión térmica, pueden causar esfuerzos en los elementos piezoeléctricos y como consecuencia, lecturas erróneas.

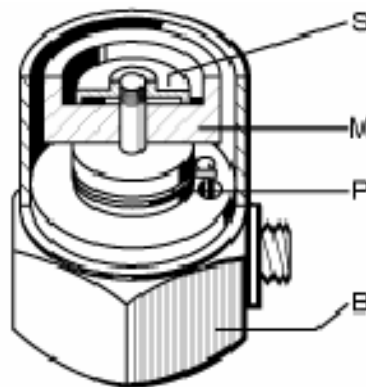


Figura 3.4
Construcción tipo a compresión.

Debe mencionarse que los instrumentos a base de materiales piezoeléctricos requieren de un acondicionador y, en ocasiones, de un amplificador. La función principal del acondicionador es la de proporcionar una señal en voltaje a partir de la carga generada.

3.3.4 Sensibilidad

La sensibilidad en un acelerómetro se define como la salida de voltaje o carga por unidad de entrada de aceleración, [17]. Esta salida se especifica por unidad de aceleración, usualmente en milivolts (mV, 10^{-3} Volts), si es en voltaje, o en

picocoulombs (pC, 10^{-12} Coulombs), si es en carga. La unidad de aceleración comúnmente empleada es el múltiplo del valor de la aceleración de la gravedad de la Tierra, indicada por **g**. Este valor de **g** se ha estandarizado en $9,80655 \text{ m/s}^2$. Algunos ejemplos de la expresión de la sensibilidad podrían ser:

Voltaje: 10 mV/g, 100 mV/g, 1 volt/g, 5Volts/g

Carga: 10 pC/g, 25 pC/g

Aunque la sensibilidad de los acelerómetros se toma como un valor único, en la mayoría de los instrumentos de medición un valor de sensibilidad se asocia con un intervalo de frecuencia y amplitud. Por tanto, para un mismo acelerómetro la sensibilidad puede ser distinta, dependiendo de las características del movimiento y de parámetros ambientales, como la temperatura de operación, [18]. Así, los términos detallados de expresión de la sensibilidad se pueden ejemplificar de la siguiente manera: 100 mV/g a una frecuencia de 100 Hz, para un nivel de aceleración pico de 1g, a 24°C.

Aunque un instrumento puede tener una sensibilidad “típica”, ésta suele diferir. Las especificaciones de funcionamiento incluyen una tolerancia que se expresa como un porcentaje de variación, por ejemplo 100 mV/g $\pm 5\%$. Este ejemplo significa que la sensibilidad real está dentro del intervalo de 95 a 105 mV/g, lo cual se verifica cuando se encuentra en condiciones estables, [18]. Con el propósito de realizar mediciones confiables, se recomienda calibrar y verificar periódicamente el funcionamiento y la sensibilidad de los instrumentos.

3.3.5 Consideraciones en la selección de un acelerómetro

Para seleccionar el transductor o detector de aceleración (acelerómetro) adecuado, se deben tener en cuenta la sensibilidad y el intervalo de frecuencia deseados. Ahora bien, la sensibilidad de los acelerómetros se encuentra típicamente entre los valores de 10 mV/g a 1000 mV/g; sin embargo, existen acelerómetros con sensibilidades más bajas y más altas. Para elegir el acelerómetro con la sensibilidad adecuada, es útil tener una idea de los niveles de amplitud de la vibración a medir. Si el espécimen a medir produce vibraciones de alta amplitud ($> 10 \text{ g rms}$), se elegirá definitivamente un acelerómetro de baja sensibilidad (10 mV/g). Si las mediciones de interés son de baja amplitud ($< 10 \text{ g rms}$) podría en este caso requerirse un acelerómetro de media sensibilidad (100 mV/g). Finalmente, si los niveles de vibración a medir son muy pequeños ($< 2 \text{ g rms}$) la selección más adecuada será un acelerómetro de alta sensibilidad (1000 mV/g), [15].

Se debe tener presente que si hay vibraciones de alta amplitud con valores muy por encima del intervalo de aplicación del acelerómetro, éstas podrían sobrecargar a amplificador y causar una distorsión en la señal. Una de las grandes propiedades de los acelerómetros piezoeléctricos es su amplio intervalo de operación; sin embargo, esto es solamente útil si se elige adecuadamente la sensibilidad para una aplicación en particular.

3.4 Acelerómetros capacitivos

3.4.1 Principio de operación

En los sensores más simples, los acelerómetros capacitivos operan con una técnica donde la capacitancia del elemento sensor interno cambia en proporción a la aceleración aplicada. Esto se ejemplifica con la representación mostrada en la Figura 3.5.

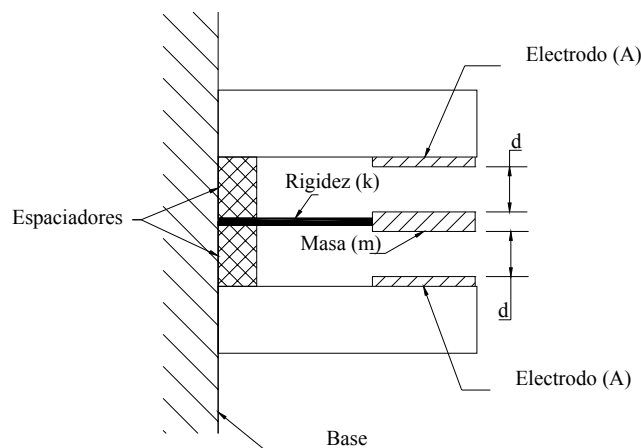


Figura 3.5

Modelo físico del funcionamiento de un acelerómetro capacitivo.

En la figura anterior se representa el elemento sensor, que consiste en dos placas conductoras paralelas tipo electrodo con área de exposición (A) y una masa (m) suspendida por medio de un elemento con rigidez (k). Entre la masa y los electrodos existe una distancia base (d) simétrica, que se controla con precisión, por lo que el aire que existe en el hueco entre cada electrodo y la masa sísmica forma un “capacitor mecánicamente variable”, [19].

Cuando el elemento es acelerado, como se muestra en la Figura 3.6, de acuerdo con la Segunda Ley de Newton, se presenta una fuerza inercial (F), proporcional a la aceleración que sufre la masa (m):

$$F = m a \quad (3-1)$$

Esta fuerza produce que la masa se mueva cierta distancia (x) cercana y lejana, respectivamente al electrodo inferior y al electrodo superior. Puesto que el elemento de soporte tiene una rigidez (k), la distancia de separación se expresa como:

$$x = F / k \quad (3-2)$$

El cambio en la distancia corresponde a los cambios en la capacitancia (C):

$$C_1 = (A\varepsilon)/(d + x)$$

$$C_2 = (A\varepsilon)/(d - x)$$
(3-3)

Donde:

A: area del electrodo

ε : permitividad del aire (constante dieléctrica)

d: distancia entre la masa y el electrodo en la condición de 0g

x: desplazamiento de la masa

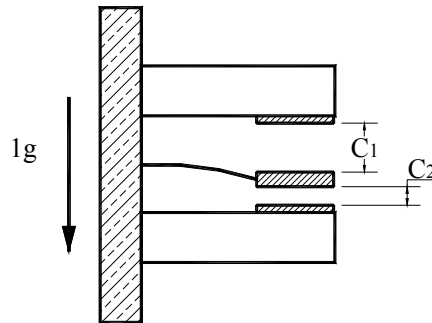


Figura 3.6

Acelerómetro capacitivo bajo aceleración de 1 g.

Estos acelerómetros incorporan circuitos microeléctricos que usan puentes capacitivos para convertir el cambio de capacitancia a una señal de voltaje útil.

3.5 Analogía del funcionamiento de acelerómetros

El modelo básico del funcionamiento de un acelerómetro consiste simplemente del arreglo de una masa m suspendida de un resorte de rigidez k (Figura 3.7).

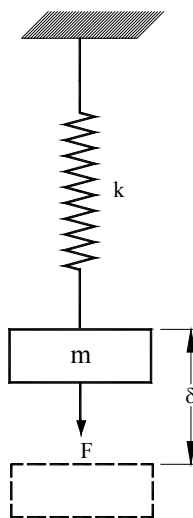


Figura 3.7

Sistema masa-resorte sujeto a una fuerza F.

Considerando que el comportamiento del resorte es lineal, es decir, la fuerza F aplicada es proporcional a la deformación δ :

$$k = F/\delta \quad (3-4)$$

La representación gráfica de este comportamiento se muestra en la Figura 3.8.

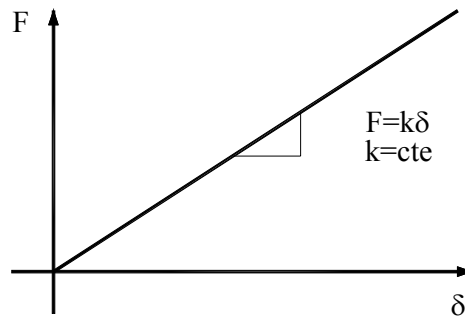


Figura 3.8
Comportamiento lineal de la relación F vs δ .

Combinando este modelo y considerando que no exista una excitación externa sobre la masa de manera que sobre ella actúe solamente la aceleración del campo gravitacional, resulta la condición mostrada en la Figura 3.9.

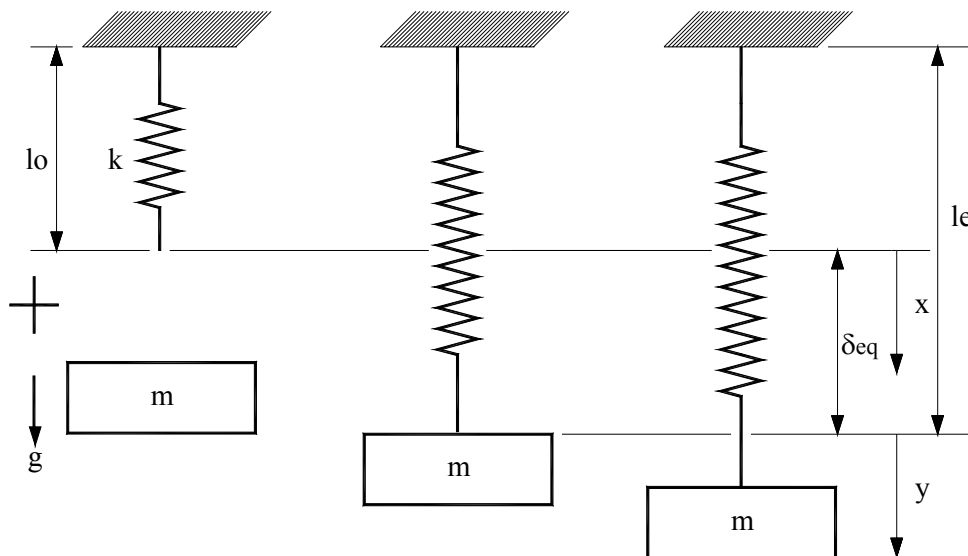


Figura 3.9
Elementos del sistema masa-resorte bajo la acción de la gravedad.

Partiendo del diagrama de cuerpo libre para la masa en un estado de equilibrio, mostrado en la Figura 3.10, las condiciones de movimiento nulo son:

$$\frac{d}{dt}x = 0, \quad \frac{d^2x}{dt^2} = 0 \quad (3-5)$$

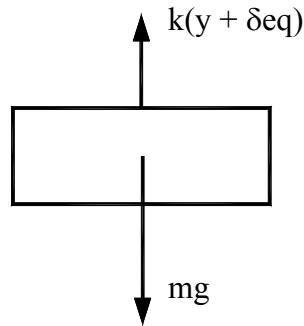


Figura 3.10
Fuerza resultante del movimiento sobre la masa.

La suma de fuerzas en la dirección vertical, permite obtener la deformación experimentada por el elemento elástico (resorte), es decir:

$$\begin{aligned}
 + \downarrow \sum F &= 0 \\
 m \cdot g - k \cdot \delta eq &= 0 \\
 k \cdot \delta eq &= m \cdot g & (3-6) \\
 k = \frac{m \cdot g}{\delta eq} &\quad \therefore \delta eq = \frac{m \cdot g}{k}
 \end{aligned}$$

Por otro lado, cuando existe movimiento en el sistema con una velocidad variable, las condiciones son:

$$\frac{d}{dt}x \neq 0, \quad \frac{d^2x}{dt^2} \neq 0 \quad (3-7)$$

Por lo tanto el desplazamiento sufrido verticalmente por la masa es:

$$x = y + \delta eq; \quad (3-9)$$

En esta expresión, y se refiere al desplazamiento debido al movimiento de la masa. De esta manera, la velocidad y la aceleración de la masa, se expresan como:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt}; \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} \quad (3-10)$$

Introduciendo la componente dinámica en el sistema (Figura 3.11), la condición de movimiento conduce a la expresión de equilibrio dinámico en la dirección vertical

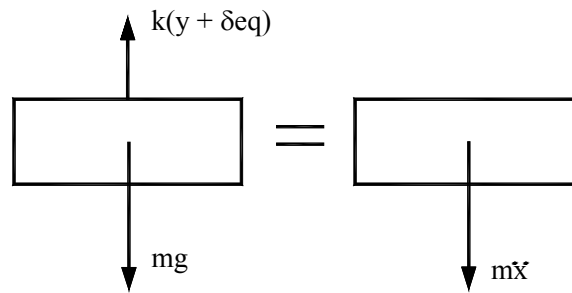


Figura 3.11

Diagrama de cuerpo libre de la masa del sistema masa-resorte.

Atendiendo al equilibrio dinámico en la dirección vertical, se obtiene:

$$mg - k(y + \delta eq) = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-11)$$

Como:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3-12)$$

Además:

$$mg = k\delta eq \quad (3-13)$$

Entonces:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + ky = mg - k\delta eq \quad (3-14)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + ky = 0 \quad (3-15)$$

Esta última expresión puede reducirse a la siguiente:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (3-16)$$

La solución típica de la ecuación diferencial lineal y homogénea, como la obtenida en la ecuación del movimiento de la masa, es del tipo, [13]:

$$y = C_1 \cos \omega(t) + C_2 \sen \omega(t) \quad (3-17)$$

Donde:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-18)$$

Considerando que tanto C_1 como C_2 son diferentes de cero, los términos pueden reagruparse para dar origen a la expresión de la forma:

$$y(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \quad (3-20)$$

donde, además:

$$A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (3-21)$$

y ϕ es un ángulo de fase definido por:

$$\operatorname{sen} \phi = \frac{C_1}{A} \quad y \quad \operatorname{cos} \phi = \frac{C_2}{A} \quad \therefore \quad \tan \phi = \frac{C_1}{C_2} \quad (3-22)$$

De esta manera, la expresión para x , considerando la elongación estática, es de la forma:

$$x = y + \delta e q = A \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \left(\frac{m \cdot g}{k} \right) \quad (3-24)$$

Típicamente, un acelerómetro piezoeléctrico toma como referencia la posición de equilibrio estático, mientras que un piezorresistivo considera la posición original (elongación nula). Esto significa que el piezoeléctrico no tiene capacidad para registrar $\delta e q$, el cual sí se detecta con el piezorresistivo. Dicho de otra manera, el primero, piezoeléctrico, registra el cambio de posición definido por el desplazamiento y , mientras que el segundo, piezorresistivo, detecta incluso la posición no deformada del elemento de soporte de la masa, o sea el desplazamiento x .

En la Figura 3.12 se representa gráficamente el funcionamiento de uno y otro acelerómetro de acuerdo a su principio de operación, ya sea del tipo piezoeléctrico o del tipo piezorresistivo-capacitivo.

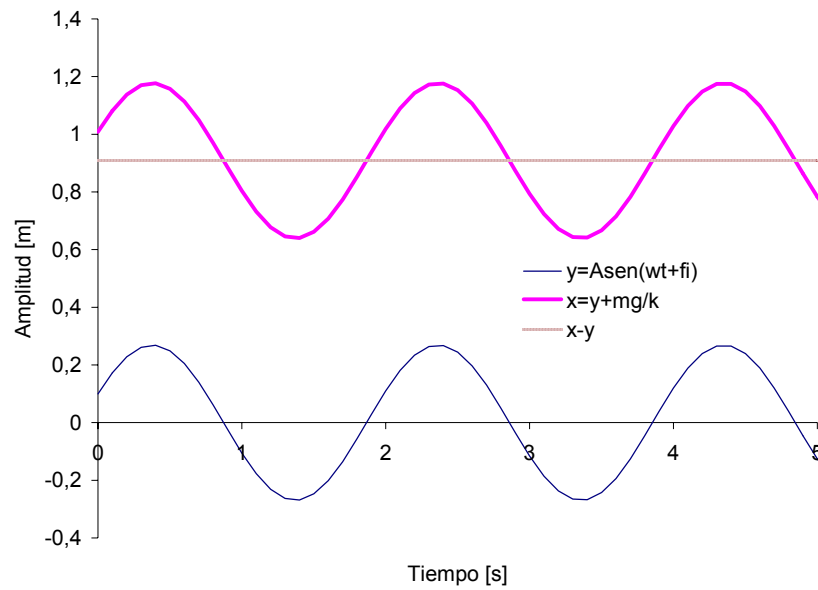


Figura 3.12

Respuesta gráfica, considerando el sistema de referencia.

Los valores correspondientes a los parámetros representados para este ejemplo, se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1
Valores del ejemplo gráfico.

C_1 [m]	C_2 [m]	m [kg]	k [N/m]	g [m/s^2]	A [m]	ω [1/s]	ϕ [rad]
0,1	0,25	1,0	10,0	9,806	0,269	3,1623	0,381

En esta figura se observa el desfase entre las señales, ocasionado por la consideración o no de la acción gravitatoria. Esta diferencia puede utilizarse como una ventaja en la medición de parámetros del movimiento de los cuerpos asociados a la dirección de la gravedad, como se expone en el siguiente capítulo.

4 Esquema de instrumentación

En este capítulo se presenta el esquema de instrumentación para determinar el ángulo de oscilación y la componente de la aceleración en un plano horizontal absoluto, de acuerdo a los principios de operación de los instrumentos para medición de aceleración comentados en capítulos previos.

4.1 Generalidades de parámetros de medición

Como se expuso en el capítulo anterior, una forma de tomar como referencia la verticalidad de la dirección de la aceleración de la gravedad, es mediante el uso de un acelerómetro del tipo capacitivo (o piezorresistivo), cuya ventaja estriba en su capacidad para medir aceleraciones constantes. Este tipo de acelerómetros indicaría la variación de la posición angular con respecto a la vertical, aplicable para situaciones estáticas. Sin embargo, cuando se trate de medir el movimiento se deben discriminar las componentes dinámicas, por lo que su uso se complementa con la utilización de un acelerómetro del tipo piezoeléctrico, el cual es insensible al efecto de la aceleración de la gravedad. Este uso combinado para determinar el ángulo de balanceo y la componente de la aceleración sobre un eje horizontal absoluto, se muestra sobre el movimiento oscilatorio de un péndulo de laboratorio. Consecuentemente, el esquema de instrumentación propuesto va orientado a la estimación del ángulo de balanceo y de la aceleración lateral. Esta estimación parte de las mediciones de la aceleración tangencial del péndulo mientras oscila en un plano vertical, suministradas simultáneamente por acelerómetros de los tipos mencionados.

4.2 Instrumentación aplicada en un péndulo

Supóngase la representación simplificada de un péndulo, como se muestra en la Figura 4.1. En un punto genérico sobre este péndulo se colocan dos acelerómetros, uno piezoeléctrico y otro piezorresistivo o capacitivo, orientando sus ejes de medición en la dirección tangencial del movimiento de oscilación.

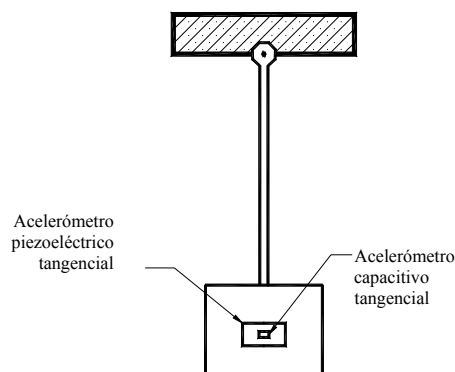


Figura 4.1
Posicionamiento de los acelerómetros.

De acuerdo con el proceso de análisis de la aceleración expuesto en el capítulo II, las componentes del estado general de aceleración en el punto de ubicación de los acelerómetros, para la posición indicada, es como se muestra en la Figura 4.2.

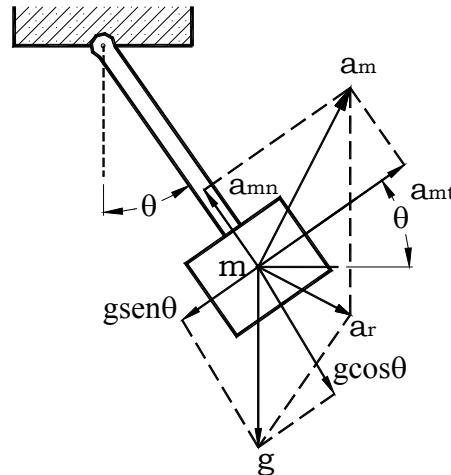


Figura 4.2

Componentes de aceleración presentes en el movimiento del péndulo.

Para la posición genérica mostrada en la figura, se observa que la aceleración debida al movimiento del péndulo es únicamente a_m , cuyas componentes normal y tangencial son a_{mn} y a_{mt} , respectivamente. Así mismo, la aceleración de la gravedad g , tiene sus componentes normal y tangencial correspondientes $g\cos\theta$ y $g\sin\theta$. Bajo este esquema, la aceleración “absoluta” es la indicada por a_r , combinando los efectos del movimiento y del campo gravitatorio.

Debido a que los acelerómetros están orientados tangencialmente, son insensibles a las componentes normales de la aceleración, por lo que únicamente registran el efecto del movimiento tangencial, ilustrado en la Figura 4.3.

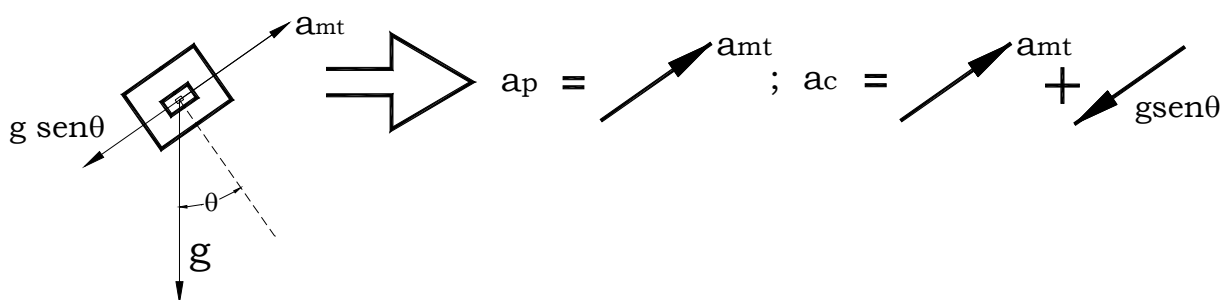


Figura 4.3

Componentes de la aceleración registradas por los acelerómetros.

De acuerdo a la Figura, y considerando el principio de operación de cada acelerómetro, el piezoeléctrico, indicado como a_p , registrará la componente a_{mt} , mientras que el capacitivo, representado por a_c , registrará tanto la componente del movimiento, $a_{mt} = a_p$, como la componente de la aceleración de la gravedad, $g\sin\theta$. Matemáticamente, lo anterior implica que:

$$a_c = a_p - g \operatorname{sen} \theta \quad (4-1)$$

$$g \operatorname{sen} \theta = a_p - a_c \quad (4-2)$$

Manipulando algebraicamente la expresión anterior, se obtiene el ángulo θ , tomado con respecto a la vertical, quedando:

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{(a_p - a_c)}{g} \quad (4-3)$$

$$\theta = \operatorname{Arcsen} \frac{(a_p - a_c)}{g} \quad (4-4)$$

De esta manera, con el esquema propuesto se puede determinar el ángulo θ y la componente de aceleración tangencial. Con el conocimiento complementario de otros valores, como sería el caso de la componente radial, pudieran determinarse las componentes del movimiento en alguna otra dirección de interés. Por ejemplo, la componente de la aceleración en un plano horizontal absoluto, a_x , pudiera determinarse de acuerdo a:

$$a_x = a_{mt} \cos \theta - a_{mn} \operatorname{sen} \theta \quad (4-3)$$

Naturalmente, para realizar mediciones experimentales este esquema debe incluir los equipos e instrumentos necesarios para que la instrumentación sea completamente funcional. Los aspectos considerados para el desarrollo experimental se presentan en el siguiente punto.

4.3 Preparación de pruebas

4.3.1 Equipos e instrumentos

Como ya se mencionó, el dispositivo principal para prueba de la instrumentación es del tipo pendular. Para tal caso, se dispuso del péndulo mostrado en la Figura 4.4, que consiste de una estructura metálica que sostiene un cuerpo oscilador. Montado sobre el eje tiene, además, una placa para indicar el desplazamiento angular experimentado por el cuerpo oscilador, para un intervalo de oscilación de 180° , es decir, de -90° a 90° con respecto a la vertical.



Figura 4.4

Péndulo para aplicar el esquema de instrumentación.

Los instrumentos disponibles para ser colocados en el péndulo son acelerómetros piezoeléctricos marca Vibrametrics, modelo CBM2000, de 1,25 kg de masa y con un intervalo nominal de respuesta en frecuencia de 0,1 Hz a 500 Hz, con una sensibilidad típica de 1,5 V/g, [17]. Este acelerómetro se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5

Acelerómetro piezoeléctrico vibrametrics modelo CBM2000, [17].

Adicionalmente, se empleó un acelerómetro piezoeléctrico de la marca TEC, modelo 195, para aplicaciones de baja frecuencia del orden de 0,5 Hz a 500 Hz, con una sensibilidad típica de 0,5 V/g, [20]. Este acelerómetro se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6

Acelerómetro piezoeléctrico modelo TEC 195, [20].

Debe notarse que aunque estos acelerómetros son de alta sensibilidad, su sensibilidad está en función de las características del movimiento, principalmente de la frecuencia, como se muestra en la Figura 4.7. Esto implica que particularmente a bajas frecuencias, aún en anchos de banda estrechos, se presentan cambios significativos en la sensibilidad de estos acelerómetros. Así mismo, esta variación es propia de cada acelerómetro, por lo que acelerómetros del mismo modelo presentan valores distintos, aunque sus comportamientos son similares.

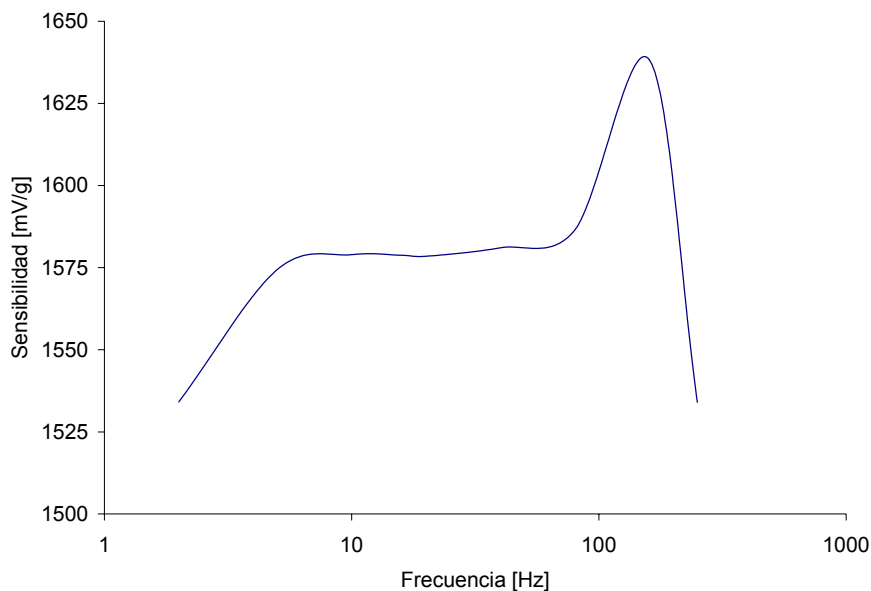


Figura 4.7

Dependencia típica de la sensibilidad con la frecuencia para acelerómetros piezoeléctricos.

Tanto el acelerómetro CBM2000 como el TEC 195, requieren para su funcionamiento un voltaje de alimentación de 15 a 30 V, estableciendo un voltaje

de referencia en 7 V (voltaje “bias”). Los acelerómetros se conectan a fuentes acondicionadoras de la señal a través de los cables de los tipos mostrados en la Figura 4.8.



Figura 4.8

Cables de conexión de los acelerómetros CBM2000 y TEC 195 a las fuentes acondicionadoras de señal.

Una forma de montaje de los acelerómetros es mediante bases magnéticas (Figura 4.9), cuando la superficie de montaje del dispositivo lo permite, como es el caso de las estructuras de acero.

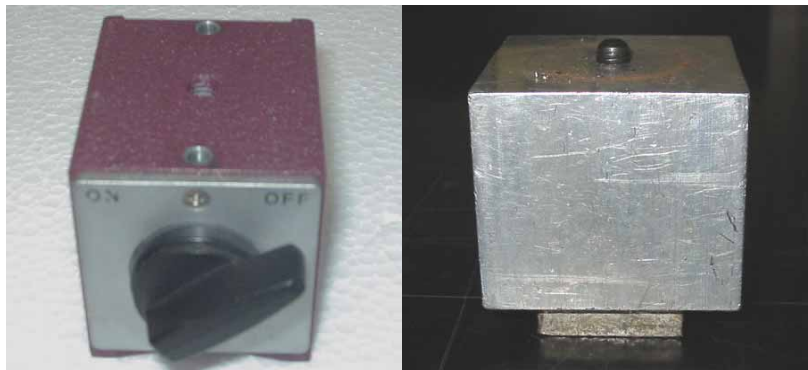


Figura 4.9

Bases magnéticas para montaje del acelerómetro CBM2000 (izquierda) y TEC 195 (derecha).

Para la alimentación y acondicionamiento de la señal de los acelerómetros, se utilizaron fuentes acondicionadoras marca Kistler, modelo 5118A2, con un indicador luminoso de correcta operación y dos terminales posteriores del tipo BNC, [21]. Con el propósito de eliminar ruidos electrónicos y frecuencias altas, en las fuentes se montaron filtros de frecuencias pasa-bajas de 10 Hz. Esta fuente se muestra en la Figura 4.10, conjuntamente con un cable coaxial con terminales BNC.



Figura 4.10
Fuente acondicionadora KISTLER, [21], y cable con terminales BNC.

Los acelerómetros piezorresistivos utilizados en este esquema de instrumentación fueron acelerómetros capacitivos marca Analogic Device (AD), modelo ADXL05EM-1 y Crossbow modelo CXL02LF1. Los acelerómetros AD tienen un intervalo de medición de aceleración de $\pm 4g$ y una sensibilidad típica de 0,5 V/g; mientras que el intervalo de los Crossbow es de $\pm 2g$ y sensibilidad de 1,0 V/g. [22, 23]. Ambos tipos tienen anchos de banda en frecuencia de 0 (DC) a 100 Hz, requiriendo para su energización una fuente de alimentación de corriente directa. Estos dos tipos de acelerómetros son compactos, con masa no mayor de 150 gramos (Figura 4.11).

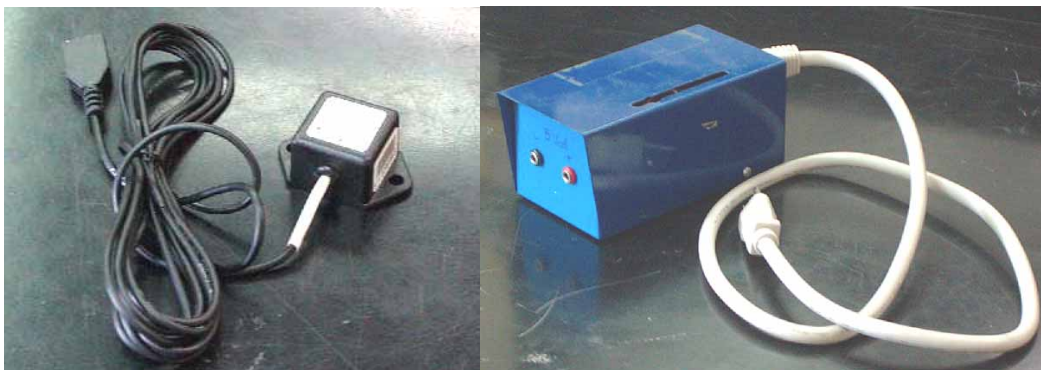


Figura 4.11
Acelerómetro capacitivo, [22], y fuente de alimentación de corriente directa.

El tipo de acelerómetro capacitivo utilizado proporciona directamente la señal al sistema de adquisición o de registro de datos. Esta señal es acondicionada internamente mediante microcircuitos electrónicos a base de puentes capacitivos que convierten el cambio de capacitancia interna en una señal de voltaje, de acuerdo a la aceleración aplicada, [19].

4.3.2 Generalidades de la adquisición de datos

El objetivo del sistema de adquisición de datos es propiamente la captura de la señal útil de voltaje eléctrico proporcionado por los diferentes transductores, los cuales, a su vez, son sensibles al cambio de las variables físicas. Un sistema típico puede consistir de los elementos mostrados en la Figura 4.12.

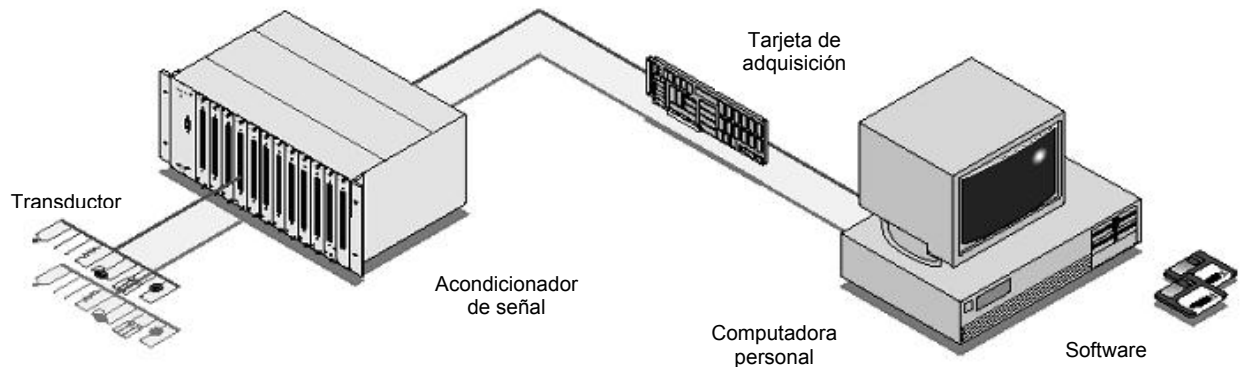


Figura 4.12
Elementos de un sistema típico de adquisición de datos.

Una vez dispuestos los elementos transductores, así como su energización, el sistema de adquisición se compone de diversos dispositivos que preparan la señal para ser colectada por una tarjeta de adquisición y su respectivo almacenamiento, [24]. La conexión del puerto de salida de los transductores o de los acondicionadores, en su caso, se direcciona físicamente hacia un bloque concentrador (bloque de conexiones), con comunicación directa con la tarjeta de adquisición, usualmente instalada en una computadora. Los parámetros de la adquisición, así como el almacenamiento, se realizan a través de un programa de control, adecuado a la plataforma computacional manejada.

En la instrumentación propuesta, el bloque de conexiones mostrado en la Figura 4.13, es el SCB-68 de National Instruments (NI), con capacidad de conexión de 16 canales, [24].



Figura 4.13
Bloque de conexiones NI SCB-68, [24].

Este bloque, a través de un cable de conexión compatible, se conectó a la tarjeta marca NI modelo AT-MIO-16DE-10 (Figura 4.14), instalada en una computadora personal. La tarjeta tiene capacidades de conexión de hasta 16 canales simples, con frecuencia máxima de muestreo de 100 mil muestras por segundo, pudiendo admitir señales de voltaje en el intervalo de -10 a 10 V, [24].

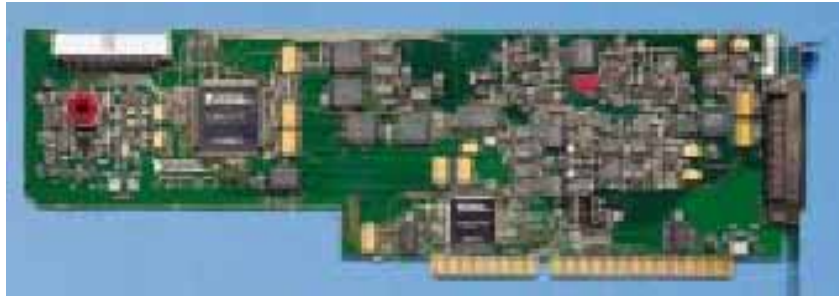


Figura 4.14

Tarjeta de adquisición NI serie E multifunción, modelo AT-MIO-16E-10, [24].

Las características de la computadora sobre la cual se instaló la tarjeta son un procesador Intel Pentium III a 500 MHz, con 320 MB en RAM, con plataforma Windows 98. El programa de control para la adquisición es NI LabView versión 5.1, [25], que ofrece las herramientas necesarias para personalizar el proceso de control y manejo de la señal obtenida de los acelerómetros y generar un archivo de datos para ser manejado externamente. Detalles del despliegue del programa personalizado empleado para la adquisición, así como del equipo empleado, se muestran en la Figura 4.15 y en la Figura 4.16.

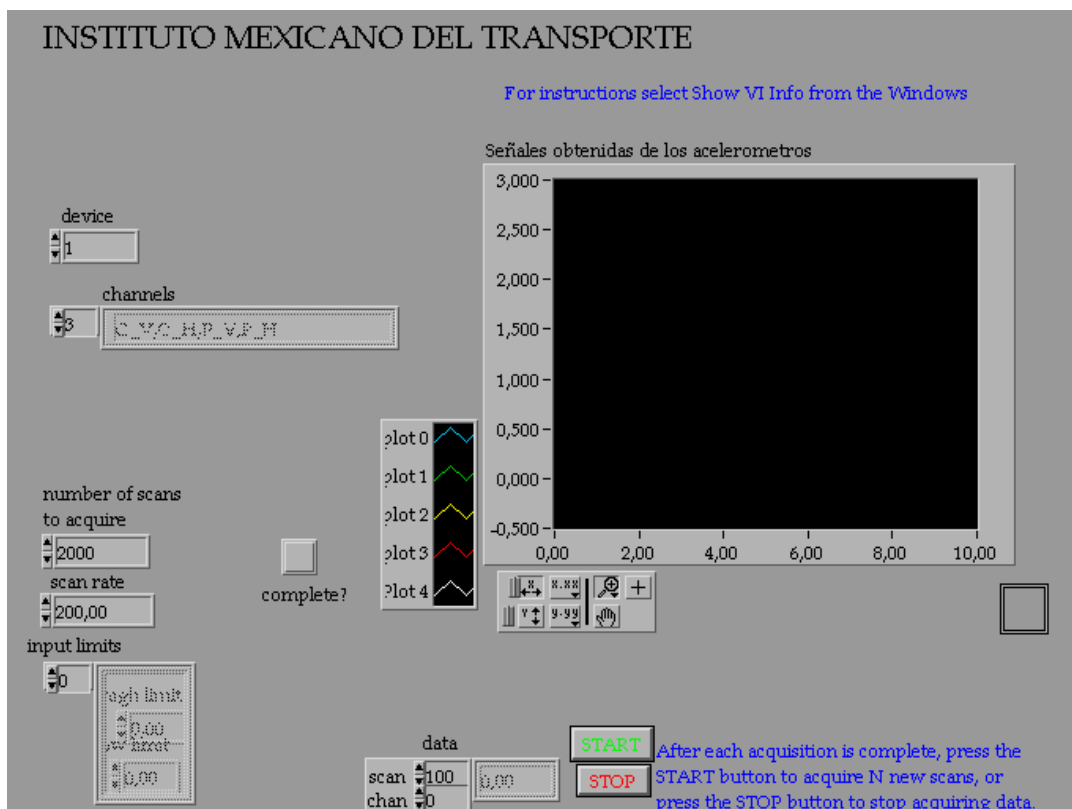


Figura 4.15

Pantalla para visualización y captura de la señal.



Figura 4.16
Equipo para la adquisición de datos.

Con este conjunto de instrumentos y el programa de control descritos, se realizaron diferentes pruebas de oscilación sobre un péndulo.

4.3.3 Instrumentación del péndulo

Dada la disponibilidad de varios acelerómetros del mismo tipo, se utilizó una instrumentación redundante, es decir, se emplearon dos pares de acelerómetros unidireccionales cada par compuesto por un acelerómetro piezoeléctrico y uno capacitivo. Cada par de acelerómetros constituyó un esquema de instrumentos, denominados como **E1**, **E2** y **E3**. Para mantener la misma ubicación del punto de medición sobre el cuerpo oscilador del péndulo, el acelerómetro capacitivo, más pequeño, se fijó sobre el piezoeléctrico CBM2000, de mayor tamaño y peso. Dada la geometría y la dirección de medición del acelerómetro TEC195, éste se combinó con el capacitivo del primer esquema (**E1**). El conjunto de acelerómetros utilizados se colocaron orientados tangencialmente, sobre el mismo plano radial del péndulo, como se muestra en la Figura 4.17.

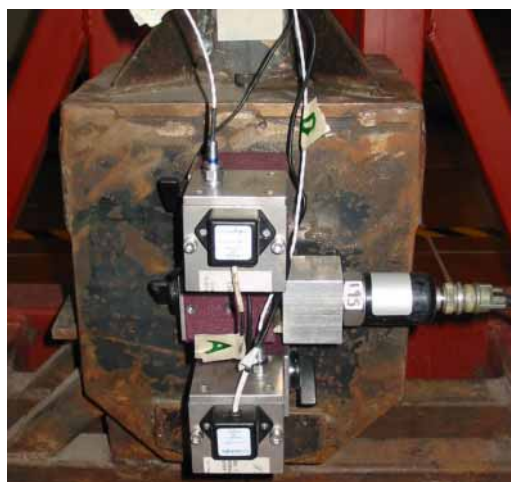


Figura 4.17
Colocación de los acelerómetros radialmente en el péndulo; esquemas E1 (arriba), E2 (abajo) y E3 (medio y abajo).

Tanto la orientación de los acelerómetros, como la verticalidad del cuerpo oscilador en posición estática, fueron verificadas con un nivel de precisión. Para propósitos de colección de datos, se inicializaron 5 canales de adquisición, cada uno correspondiendo a la señal de un acelerómetro. La Tabla 4.1 muestra los acelerómetros utilizados en las distintas variantes de la instrumentación del péndulo.

Tabla 4.1
Acelerómetros utilizados en la instrumentación.

Esquema	Capacitivo	Piezoeléctrico
E1a	Analog Device CA (C1)	CBM2000 160 (P1)
E2a	Analog Device CR (C2)	CBM2000 163 (P2)
E3a	Analog Device CA (C1)	TEC 195 (P3)
E1b	Crossbow 131 (C1)	CBM2000 166 (P1)
E2b	Crossbow 130 (C2)	CBM2000 168 (P2)
E3b	Crossbow 131 (C1)	TEC 195 (P3)

En la Figura 4.17, el esquema **E1** corresponde al par de acelerómetros colocados en la parte de arriba, el E2 al par ubicado en la parte de abajo, mientras que el **E3** se refiere al acelerómetro TEC en la parte media, combinado con el capacitivo del esquema **E1**. Con la instrumentación de estos esquemas en el péndulo, se agregó una masa adicional aproximada de 4,5 kg.

4.4 Pruebas

El procedimiento de prueba consistió fundamentalmente en realizar mediciones tanto estáticas como dinámicas, que mostraran aspectos del funcionamiento de los acelerómetros y de la instrumentación, de acuerdo a los principios descritos para cada tipo de acelerómetro. Los parámetros de adquisición se establecieron en 200 Hz (200 muestras/s) por canal, durante al menos 10 s de adquisición, lo que representan 2000 datos por cada canal para un evento de medición típico.

4.4.1 Pruebas estáticas

Las pruebas estáticas comprendieron la medición y registro de la señal proporcionada por los acelerómetros mientras el péndulo se mantenía en una posición fija. Previamente, la señal de voltaje en los acelerómetros capacitivos fue medida colocándolos en posiciones horizontal y vertical, para corroborar los valores correspondientes a un ángulo de 90°. Posteriormente, ya colocados sobre el péndulo, el cuerpo oscilador se mantuvo inmóvil en distintas posiciones angulares, correspondiendo éstas a ángulos de inclinación de 0° a 90°, en incrementos de 10°. La Figura 4.18 y la Figura 4.19 muestran algunos aspectos de la posición del cuerpo oscilador durante las mediciones estáticas.



Figura 4.18

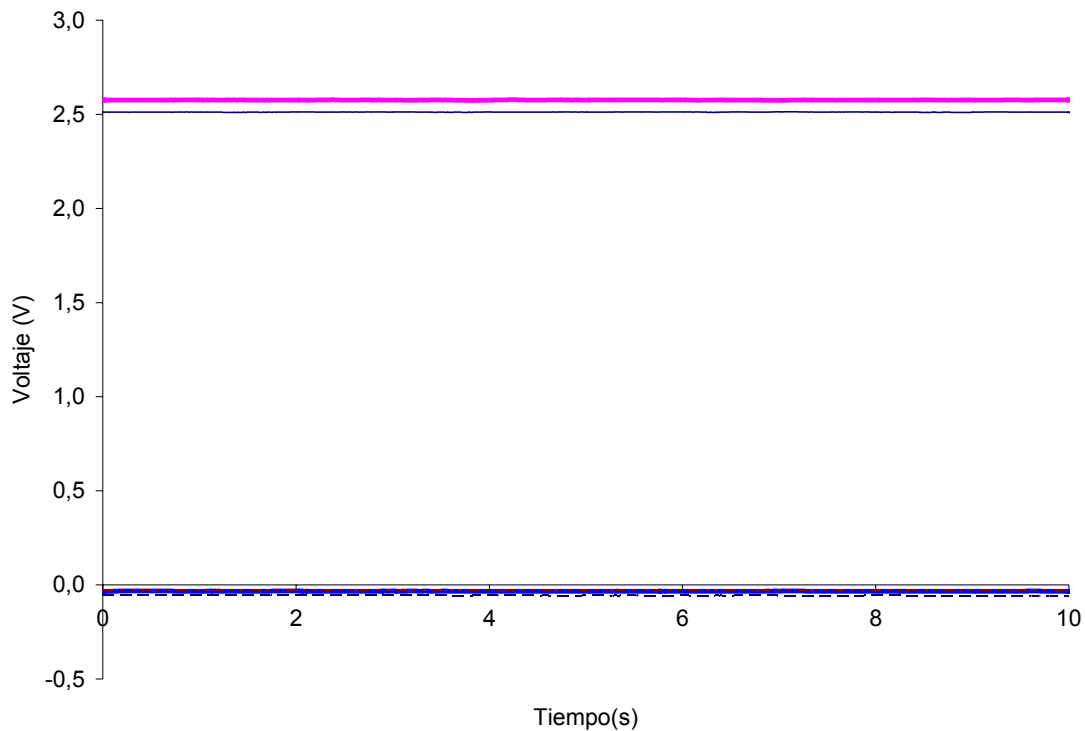
Cuerpo oscilador del péndulo instrumentado en posición de equilibrio estático, tomado como referencia un ángulo de 0° respecto a la vertical.



Figura 4.19

Péndulo en una posición estática inclinada, con ángulo aproximado de inclinación indicado en la placa en el eje de giro.

Una vez estabilizada la energización de los instrumentos, se registraron los valores de voltaje proporcionados por los acelerómetros, generando un archivo de datos por cada evento medido. El tipo de señal obtenida a partir de las pruebas estáticas, se presenta en forma gráfica en la Figura 4.20.

**Figura 4.20****Tipo característico de señal obtenida en pruebas estáticas.**

La gráfica anterior representa el comportamiento de la señal en voltaje de los acelerómetros bajo condiciones de inmovilidad. Los trazos en la porción superior corresponden a los capacitivos, mientras que los cercanos a la línea de 0 V representan la señal de los piezoeléctricos.

4.4.2 Pruebas dinámicas

Complementariamente a las pruebas estáticas, se realizaron mediciones y registro de la señal de voltaje de los acelerómetros mientras el cuerpo oscilador del péndulo estaba en movimiento. Las pruebas se desarrollaron bajo dos condiciones, correspondiendo una al caso de oscilación libre y otra al de oscilación forzada, produciéndose el movimiento en este caso manualmente (Figura 4.21).

En el primer caso se dejó oscilar el péndulo libremente a partir de una posición con inclinación predefinida, normalmente dentro de un intervalo angular de 0 a 45° con respecto a la vertical. En el caso forzado se trató de mantener la frecuencia de oscilación y la amplitud, estando normalmente en valores de -5° a 5° con respecto a la vertical, debido a las dificultades para mover el cuerpo oscilador a mayores amplitudes por su masa, alrededor de 35 kg.

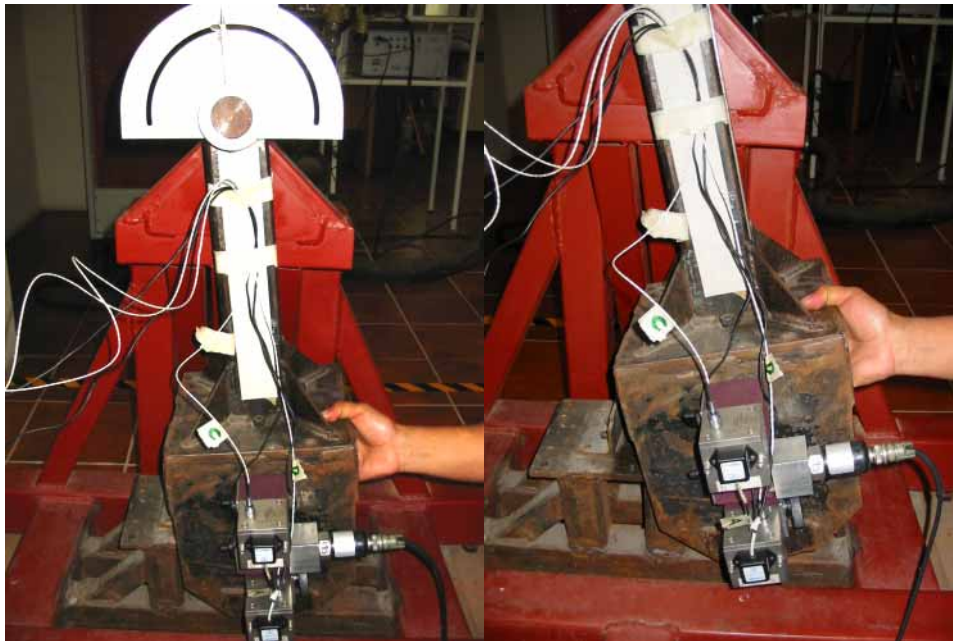


Figura 4.21

Detalle de la ejecución de pruebas de oscilación forzada.

Gráficas típicas de estas pruebas se muestran en las Figuras 4.22 y 4.23, en las que se presenta un registro de las señales de voltaje obtenidas durante una prueba de oscilación libre y otro de oscilación forzada, aplicando en este último el movimiento manualmente.

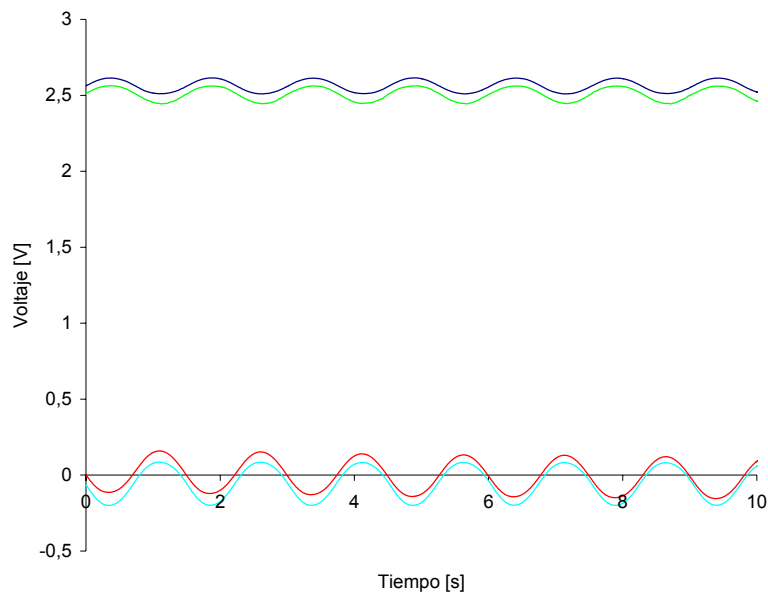
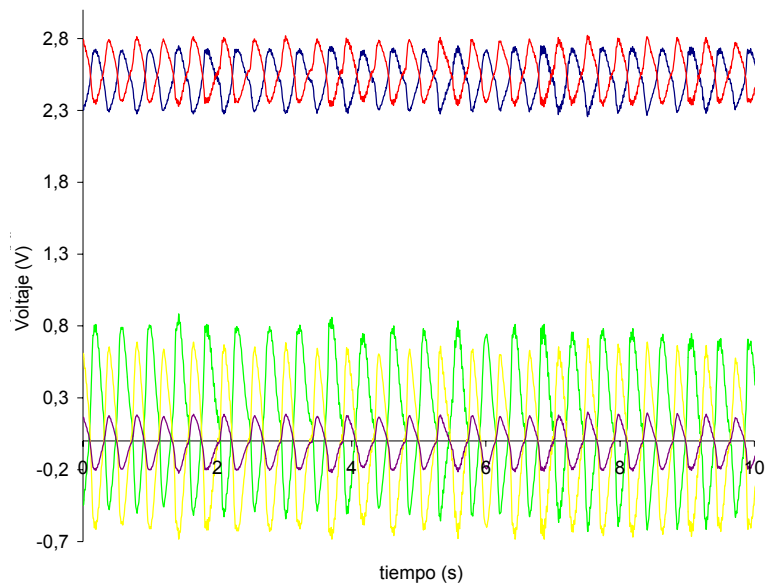


Figura 4.22

Representación gráfica de datos obtenidos durante pruebas dinámicas en condición de oscilación libre.

**Figura 4.23**

Representación gráfica de datos obtenidos durante pruebas dinámicas en condición de oscilación forzada.

En ambos casos, la señal en la porción superior corresponde a los acelerómetros capacitivos, oscilando alrededor de un valor de voltaje positivo, mientras que la señal de los acelerómetros piezoeléctricos oscila alrededor de la línea de voltaje 0.

Una vez desarrollado el proceso de pruebas, los datos fueron analizados y transformados para la determinación del ángulo de balanceo y la aceleración horizontal, lo cual se trata en el siguiente capítulo.

Esquema de instrumentación para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral en el movimiento oscilatorio de un péndulo

5 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de aceleración con el esquema de instrumentación propuesto. A partir de esas mediciones se estima el ángulo de balanceo y la aceleración tangencial. Se discute además el efecto de las capacidades de respuesta de los distintos acelerómetros sobre las mediciones y estimaciones realizadas.

5.1 Pruebas estáticas

Las mediciones de las distintas posiciones angulares, en condiciones de inmovilidad del péndulo, fueron realizadas empleando los distintos esquemas de instrumentación. El registro en voltaje se presenta gráficamente en la Figura 5.1 para posiciones de 0° , 20° y 40° con la vertical. Cabe mencionar que estas señales fueron filtradas para mantener frecuencias menores a 4 Hz, considerada esta última como la máxima frecuencia producible en las pruebas con el péndulo, eliminando las posibles frecuencias mayores a ese valor.

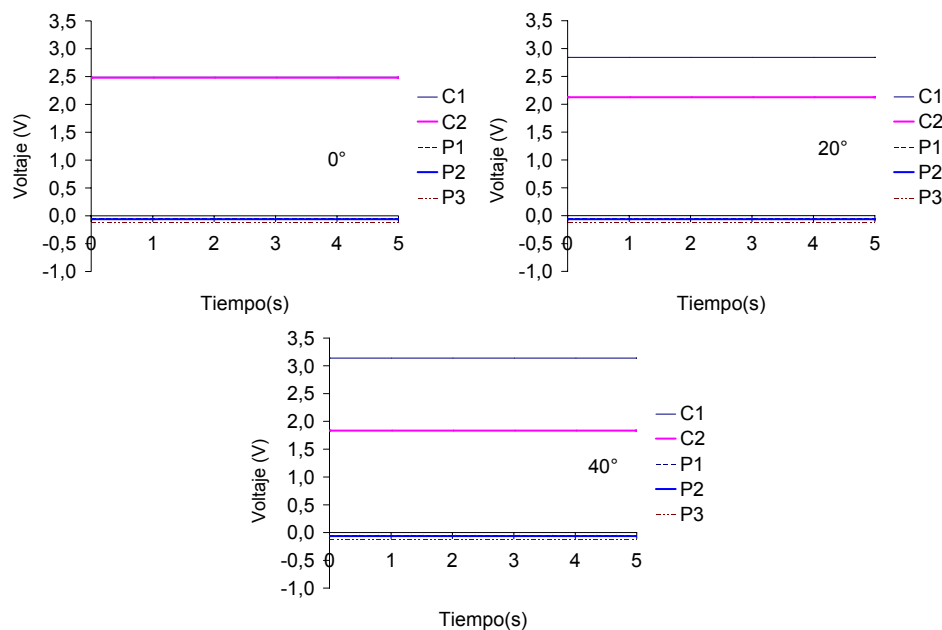


Figura 5.1

Señal de voltaje de los acelerómetros para diferentes ángulos estáticos con respecto a la vertical.

En estas gráficas, **C1** y **C2** representan las señales proporcionadas por los acelerómetros capacitivos de los esquemas 1 y 2, respectivamente. De manera similar, **P1**, **P2** y **P3** se refieren a la señal producida por los acelerómetros piezoeléctricos, de acuerdo a los esquemas de instrumentación **E1**, **E2** y **E3**, descritos. Estas gráficas tipifican el comportamiento de la señal de ambos tipos de acelerómetros en condiciones estáticas, mostrando un cambio de voltaje para los acelerómetros capacitivos, de acuerdo al ángulo de inclinación, mientras que para

los piezoeléctricos el voltaje se mantiene invariable e independiente del ángulo de inclinación.

Del procesamiento de las señales involucradas en cada esquema, se obtuvieron los valores del ángulo de inclinación con respecto a la vertical para registros de tiempo de 5 s. La Figura 5.2 muestra ejemplos del ángulo estático de inclinación del péndulo obtenido con los esquemas de instrumentación.

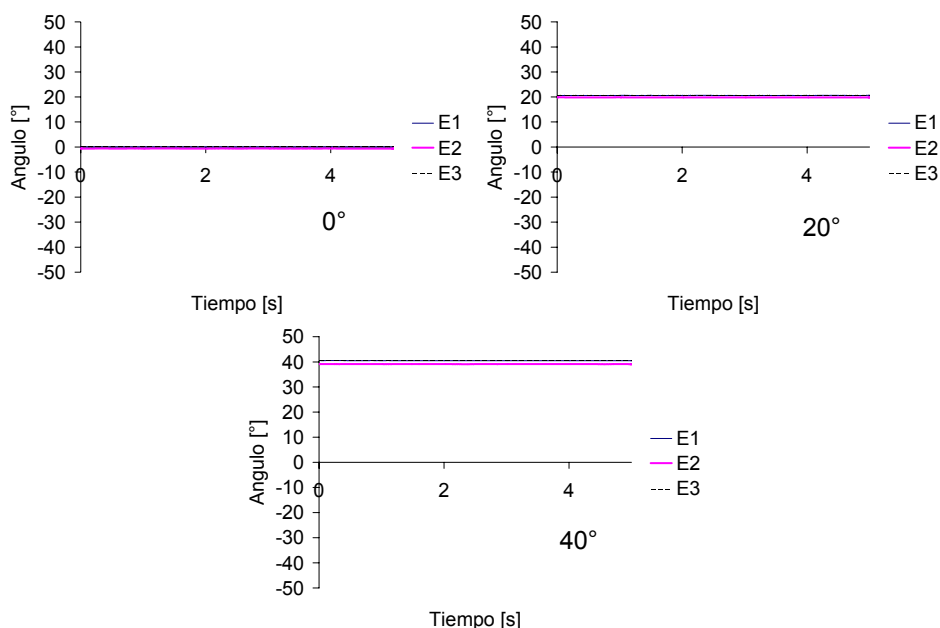


Figura 5.2

Ángulo estimado en posición estática con respecto a la vertical.

Los valores promedio de todas las mediciones estáticas realizadas se muestran en la Tabla 5.1. De esta tabla, puede observarse que el esquema **E2** presentó una mayor precisión en el valor angular, comparado con el resto de los esquemas, con excepción de la inclinación correspondiente a 90°, en la que los esquemas **E1** y **E3** tuvieron un mejor comportamiento para esta posición.

Tabla 5.1
Ángulo y desviación obtenidos para cada posición estática.

Inclinación [°]	Ángulo obtenido con cada esquema [°]						Desviación de cada esquema [%]						
	E1a	E2a	E3a	E1b	E2b	E3b	E1a	E2a	E3a	E1b	E2b	E3b	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	-	-	-	10,3	10,3	10,3	-	-	-	2,8	2,5	2,6	
20	-	-	-	20,6	20,5	20,6	-	-	-	2,9	2,3	2,8	
30	-	-	-	30,7	30,5	30,7	-	-	-	2,4	1,7	2,4	
40	-	-	-	40,3	39,9	40,4	-	-	-	0,9	0,3	0,9	
50	53,7	51	53	50,5	49,7	50,5	7,4	2	6	1,0	0,6	1,0	
75	77,1	74,5	77,4	-	-	-	2,8	0,7	3,2	-	-	-	
90	-	-	-	89,4	80,3	89,4	-	-	-	0,6	10,8	0,7	
							<i>Prom.</i>	5,1	1,4	4,6	1,8	3,0	1,7

Los resultados de las pruebas estáticas muestran que, aún con modelos similares de acelerómetros en cada combinación de instrumentación como lo son los esquemas **E1a** y **E2a**, así como los **E1b** y **E2b**, se tienen comportamientos diferentes de acuerdo a las capacidades de medición de los instrumentos. La desviación máxima se obtuvo con el esquema **E2b**, del 10,78% para el caso de inclinación a 90° , mostrando un comportamiento más uniforme en todo el intervalo de medición, los esquemas **E1b** y **E3b**.

5.2 Pruebas dinámicas

Como se mencionó en el capítulo anterior, las pruebas dinámicas requirieron del movimiento de oscilación libre y forzada del péndulo, midiéndose la aceleración en los puntos instrumentados en forma de voltaje. Este voltaje fue procesado para estimar el ángulo de oscilación en cada caso, de acuerdo con la expresión 4-2.

5.2.1 Pruebas de oscilación libre

En las pruebas de oscilación libre se permitió que el péndulo oscilara libremente, iniciando su movimiento al liberarlo de una posición angular predefinida. Un ejemplo adicional de la señal de voltaje adquirida durante estas pruebas, se presenta en la Figura 5.3.

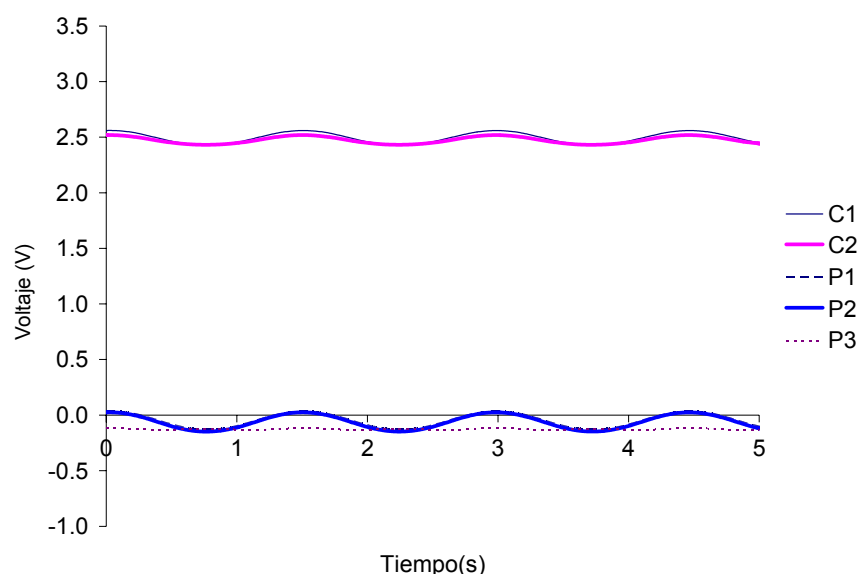


Figura 5.3

Voltaje entregado por los instrumentos para el caso de oscilación libre a 30° de amplitud.

Una vez filtrados y procesados los datos, se obtuvo el ángulo de balanceo según los datos suministrados por cada esquema de instrumentación. El ángulo obtenido se presenta gráficamente de la Figura 5.4, en la que se muestra el comportamiento en el tiempo del ángulo de balanceo para las distintas amplitudes de prueba (de 5° a 50°).

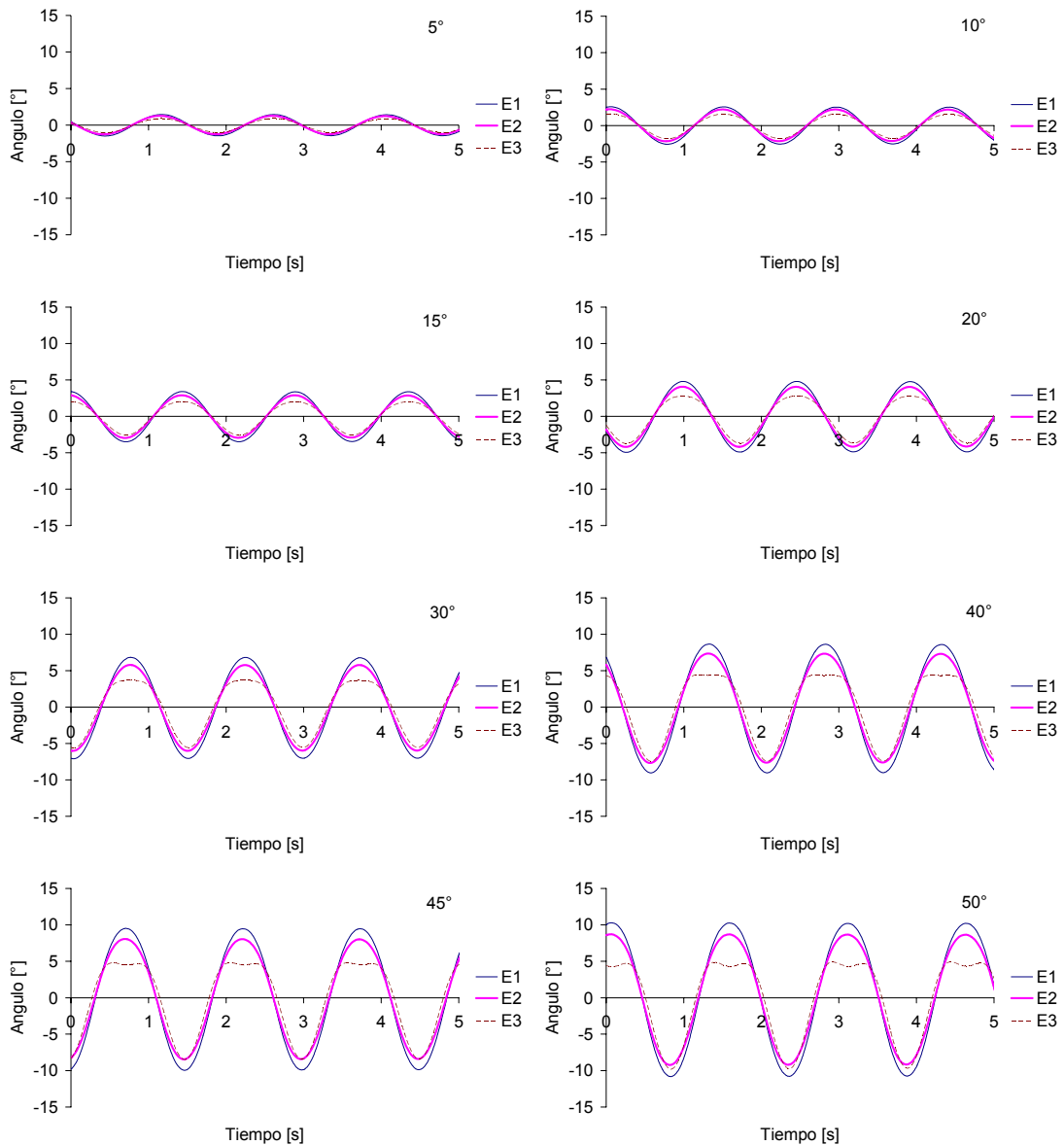


Figura 5.4
Ángulos obtenidos de los distintos esquemas de instrumentación.

Para los ángulos mostrados en esta figura, se puede apreciar que los esquemas **E1** y **E2** presentan comportamientos similares, mientras que el **E3** sugiere diferencias significativas con **E1** y **E2**. Así mismo, se aprecia que los valores estuvieron muy por debajo de los valores angulares esperados, presentándose una tendencia de incremento conforme el ángulo de inclinación original aumenta. La Tabla 5.2 contiene los resultados condensados de estas pruebas, en las que se incluye la amplitud angular pico a pico, la frecuencia medida de oscilación del péndulo para cada caso y la desviación obtenida para cada amplitud con respecto al ángulo inicial de medición en oscilación libre.

Tabla 5.2
Ángulo y desviación obtenida para cada prueba de oscilación libre.

Angulo Inicial [°]	Amplitud medida pico a pico [°]					Frecuencia de oscilación [Hz]	Desviación [%]				
	E1a	E2a	E1b	E2b	E3b		E1a	E2a	E1b	E2b	E3b
5			2,9	2,5	2	0,687			70,6	74,7	80,5
10			5,2	4,4	3,4	0,687			74,3	78,0	82,8
15	11,7	9,9	6,9	5,9	4,7	0,685	61,0	67,0	77,0	80,5	84,5
20			9,7	8,3	6,5	0,683			75,7	79,4	83,7
30			13,9	11,8	9,3	0,676			76,8	80,3	84,4
40			17,7	15,0	11,9	0,667			77,9	81,2	85,1
45			19,5	16,5	13,3	0,662			78,4	81,6	85,2
50	25,9	23,1	21,1	17,9	14,8	0,656	74,1	76,9	78,9	82,1	85,3
						Promedio	67,6	72,0	76,2	79,7	83,9

Debe notarse que la frecuencia de oscilación del péndulo es cercana a los 0,7 Hz; o sea, muy próxima al límite inferior de medición de los acelerómetros. En la Figura 5.5 se presenta el comportamiento de la desviación de los esquemas **E1b**, **E2b** y **E3b** con respecto a la amplitud del ángulo de oscilación libre.

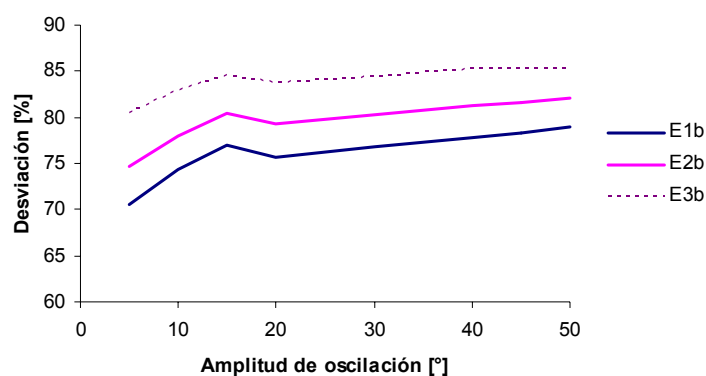


Figura 5.5
Desviación de acuerdo a la amplitud de oscilación libre.

Tanto en la tabla como en la figura anterior se observa que para los tres esquemas indicados, la desviación presenta mayor uniformidad a partir de los 15°. Esta tendencia a un valor constante sugiere la definición de un “factor” de corrección que puede ser utilizado para estimar el ángulo de balanceo. Partiendo de que la desviación, D , se obtiene a partir del ángulo real, A_r , y del ángulo medido, A_m , expresado como sigue:

$$D = \frac{A_r - A_m}{A_r} \quad (5-1)$$

De esta manera, el ángulo corregido, A_c , puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$A_c = F_c A_m \quad (5-2)$$

En la que el factor de corrección, F_c , es:

$$F_c = \frac{1}{1-D} \quad (5-3)$$

La Tabla 5.3 muestra el factor de corrección asociado para cada esquema considerado, de acuerdo con los resultados previamente presentados de oscilación libre.

Tabla 5.3
Factor de corrección para las pruebas de oscilación libre.

	E1b	E2b	E3b
D promedio [%]	76,2	79,7	83,9
F_c	4,20	4,93	6,23

Aplicando el factor de corrección, el ángulo corregido se muestra en forma gráfica a distintos intervalos de oscilación en la Figura 5.6.

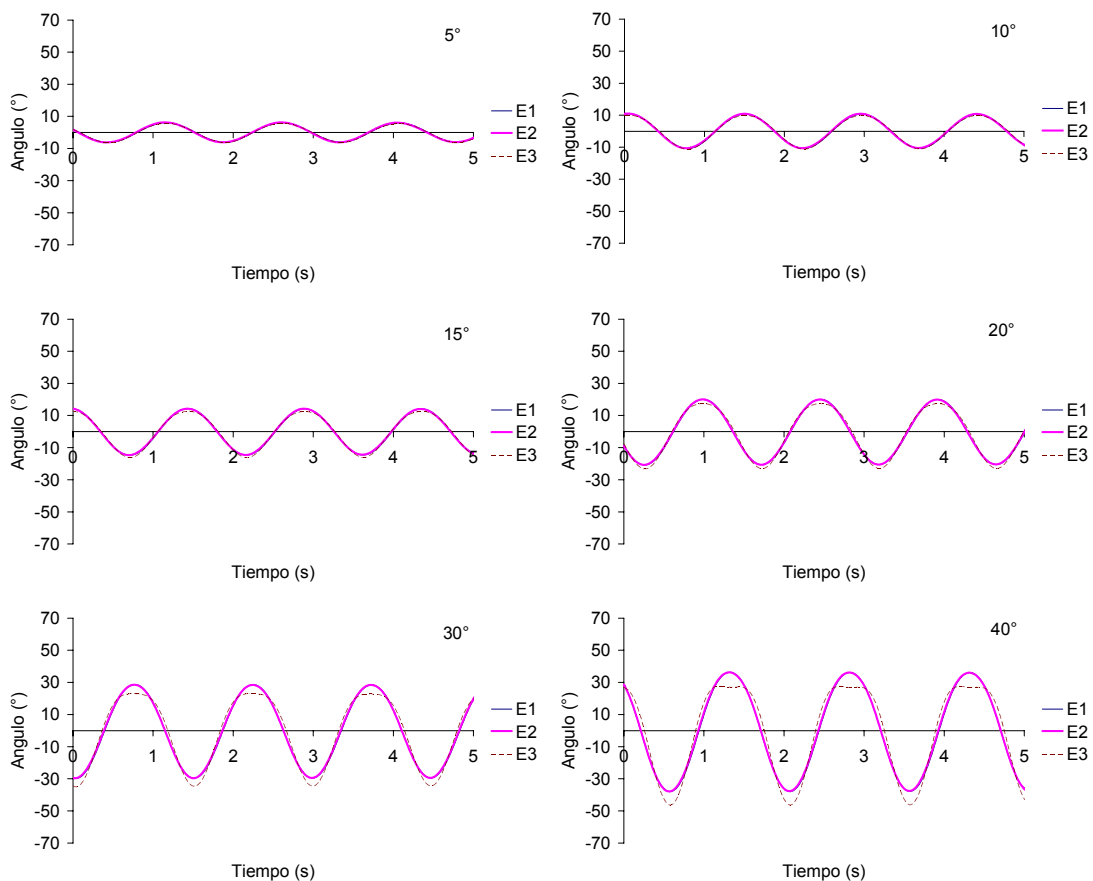


Figura 5.6
Ángulo de oscilación libre corregido. (Continúa...).

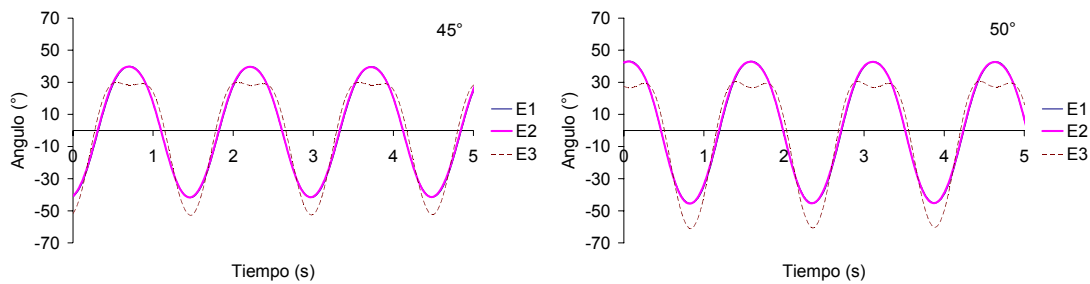


Figura 5.6
(Continuación). Ángulo de oscilación libre corregido.

Tanto de estas gráficas, como de las del ángulo sin corrección, se observa que el comportamiento del esquema **E3** muestra curvas desplazadas, así como una ondulación en la cresta superior. La explicación a este hecho puede ser debido a que la geometría del acelerómetro TEC, así como su construcción interna, no permitían ubicar el “centro” del acelerómetro para alinearlo con el plano radial central del péndulo; además de lo anterior, influyó la distinta ubicación del acelerómetro capacitivo complementario para este esquema, por lo que no se midió la aceleración en el mismo punto.

5.2.2 Pruebas de oscilación forzada

El propósito de estas pruebas fue el de identificar el efecto de los parámetros del movimiento de oscilación en los esquemas de medición, como la frecuencia y la amplitud de la aceleración. De esta manera, dadas las características físicas del cuerpo oscilador del péndulo, así como la carencia de dispositivos adicionales de excitación, se recurrió a producir el movimiento de manera manual tratando de controlar la frecuencia y la amplitud del desplazamiento angular, en un intervalo con límites alrededor de $\pm 5^\circ$.

Resultados gráficos para este conjunto de pruebas se muestra en la Figura 5.7, indicando la señal producida por cada uno de los acelerómetros y la frecuencia promedio.

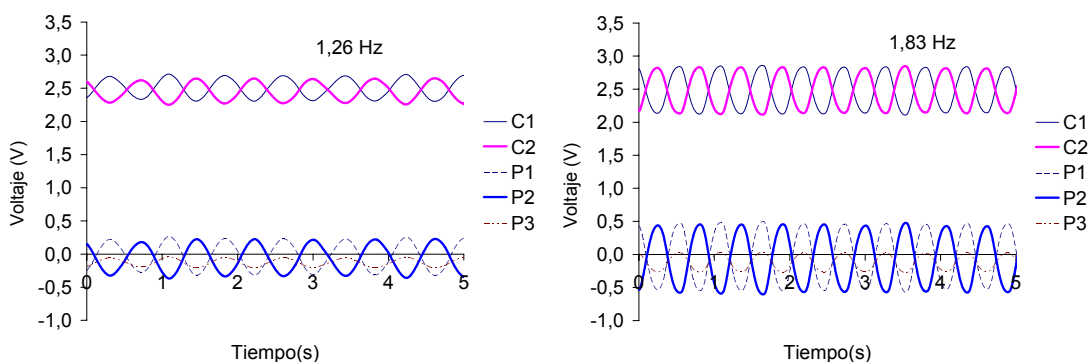


Figura 5.7
Señal producida por los acelerómetros bajo condiciones de oscilación forzada con amplitud de 5° . (Continúa...)

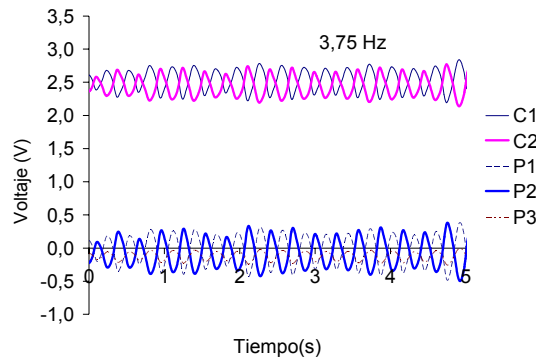


Figura 5.7

(Continuación). Señal producida por los acelerómetros bajo condiciones de oscilación forzada con amplitud de 5°.

De acuerdo con los conjuntos de datos analizados, el ángulo resultante se muestra en la Figura 5.8, de acuerdo a la frecuencia promedio de los eventos.

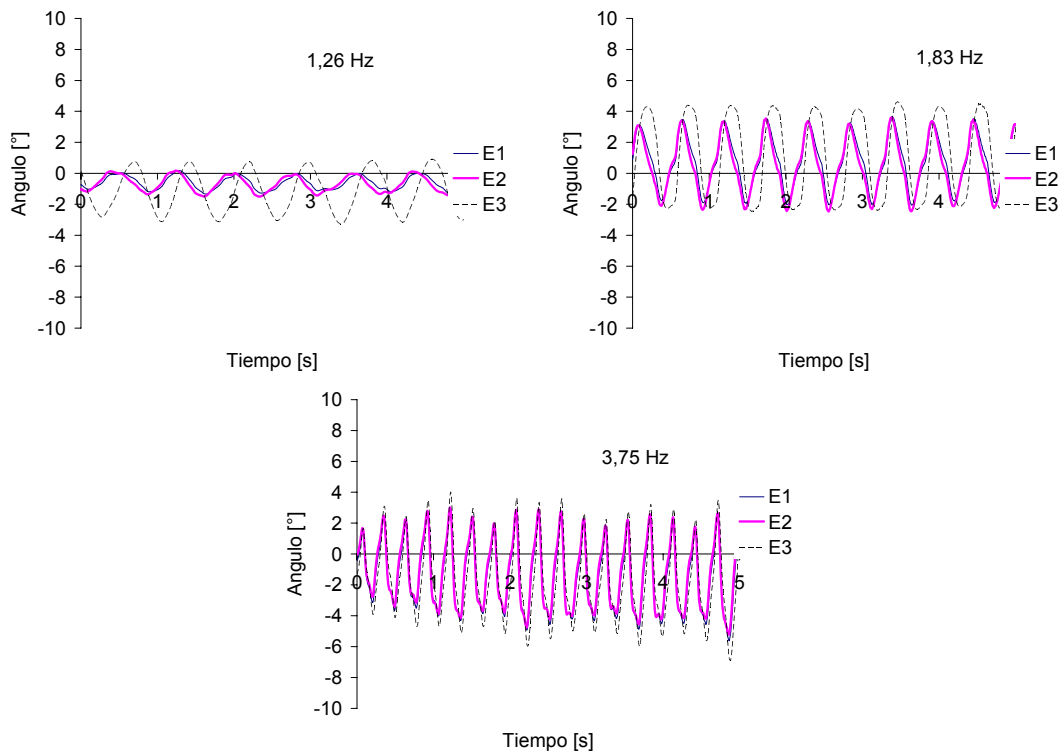


Figura 5.8

Ángulo estimado a partir de los distintos esquemas bajo condiciones de oscilación forzada con amplitud cercana a 5°.

La Tabla 5.4 resume los resultados obtenidos en función de la frecuencia, así como el error asociado para cada esquema.

Tabla 5.4
Resumen de resultados de oscilación forzada y desviación estimada para cada esquema.

Frecuencia [Hz]	Amplitud pico a pico [°]			Desviación estimada[%]		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
1,26	1,5	1,7	4,2	85,0	82,7	58,0
1,83	5,8	6,2	7,6	41,6	38,3	24,1
3,75	8,4	8,3	10,3	16,3	16,6	-3,2

De esta tabla se puede concluir que a mayor frecuencia, los esquemas muestran un mayor acercamiento a la amplitud de la oscilación, lo cual se prueba con los valores de desviación estimada.

5.3 Estimación de la aceleración tangencial en oscilación libre

5.3.1 Cálculo teórico

Igual que en el ángulo de balanceo, se estableció una comparación con la medición de la aceleración tangencial que experimenta el péndulo. Debido a que la aceleración sólo es medible por medio de estos instrumentos, la comparación se realizó con la aceleración teórica que debe experimentar el péndulo, así como sus dimensiones y su masa, ubicación del centro de masa y del momento de inercia másico.

Para facilitar la estimación de la aceleración que experimenta el péndulo en oscilación libre, se parte de la ecuación de movimiento de un grado de libertad, indicado por θ y linealizada para ángulos pequeños, la cual es:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (5-4)$$

Para el caso de un péndulo compuesto, la frecuencia circular de oscilación natural, ω , es, [26]:

$$\omega^2 = \frac{mgl}{ml^2 + I} \quad (5-5)$$

En esta expresión, m representa la masa del cuerpo oscilador del péndulo; g , la aceleración de la gravedad; l , la distancia del centro de rotación al centro de masa del cuerpo oscilador, e I , su momento de inercia másico.

Para determinar el valor del momento de inercia se parte de la relación entre la frecuencia circular, ω , y la frecuencia de oscilación, f , indicada por la expresión:

$$\omega = 2\pi f \quad (5-6)$$

De esta manera, el momento de inercia, I , podría calcularse de acuerdo a, [26]:

$$I = ml \left(\frac{g\tau^2}{4\pi^2} - l \right) \quad (5-7)$$

donde τ es el periodo de oscilación.

La solución general para la ecuación de movimiento es del tipo:

$$\theta(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \text{sen} \omega t \quad (5-8)$$

Donde C_1 y C_2 representan las condiciones iniciales del movimiento. Esta expresión se puede representar de manera condensada por:

$$\theta(t) = A \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (5-9)$$

siendo la amplitud resultante:

$$A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (5-10)$$

y ϕ es un ángulo de fase definido por:

$$\text{sen} \phi = \frac{C_1}{A} \quad \text{y} \quad \cos \phi = \frac{C_2}{A} \quad \therefore \quad \tan \phi = \frac{C_1}{C_2} \quad (5-11)$$

Para el caso de las pruebas ejecutadas, partiendo del reposo con un ángulo inicial, implica que $\theta(0) = \theta_0$ y $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 = 0$, donde θ_0 representa la amplitud inicial del movimiento. Bajo estas condiciones iniciales, una vez obtenidas las constantes C_1 y C_2 , la expresión aplicable es:

$$\ddot{\theta}(t) = -\theta_0 \omega^2 \text{sen}(\omega t + \pi/2) \quad (5-12)$$

A partir de esta expresión, la aceleración tangencial, a_t , del péndulo en el centro de gravedad es:

$$a_t = l\ddot{\theta} \quad (5-13)$$

De acuerdo con lo anterior, la amplitud de la aceleración tangencial es entonces, $l\theta_0\omega^2$, obtenida de la ecuación linealizada de movimiento del péndulo.

Como se muestra en los resultados de oscilación libre, $f = 0,69$ Hz. Por tanto, el valor de ω es 4,34 rad/s. De esta manera, la amplitud de a_t es de $18,8/l\theta_0$ m/s² (1,9/ θ_0 g's).

5.3.2 Estimación práctica

La Figura 5.9 presenta una curva típica de la aceleración tangencial producto de las mediciones en el movimiento de oscilación libre, considerando el factor de corrección de cada esquema.

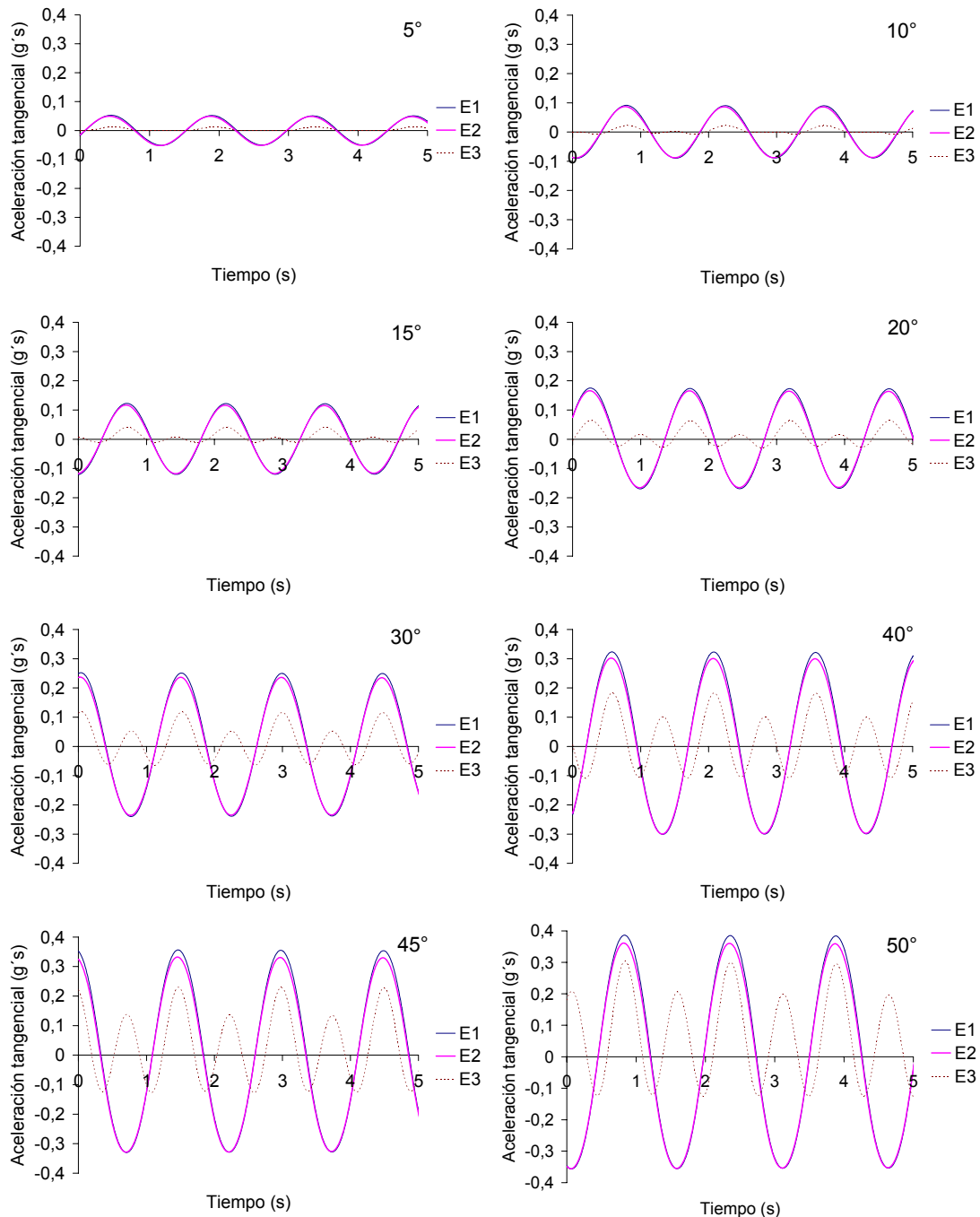


Figura 5.9
Aceleración tangencial obtenida bajo oscilación libre.

Las gráficas de esta figura reflejan las estimaciones prácticas de la aceleración tangencial, obtenidas a partir de la señal de los acelerómetros piezoeléctricos de cada esquema de instrumentación, colocados con una orientación tangencial. Los valores de la magnitud de la aceleración en las pruebas de oscilación libre, homologados a un mismo punto (centro de masa), se resumen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5
Comparación de la amplitud pico de aceleración horizontal a_h teórica y estimada.

Amplitud de oscilación, [°]	a_t teórica, [g's]	a_t estimada, [g's]		
		E1	E2	E3
5	0,075	0,052	0,051	0,006
10	0,151	0,091	0,088	0,015
15	0,226	0,122	0,117	0,027
20	0,301	0,172	0,166	0,047
30	0,452	0,246	0,236	0,092
40	0,602	0,312	0,301	0,146
45	0,677	0,343	0,330	0,179
50	0,753	0,372	0,358	0,217

En la tabla se puede apreciar diferencias entre los valores teóricos de a_t y los obtenidos a partir de los distintos esquemas de instrumentación. Tales diferencias se muestran gráficamente en la Figura 5.10.

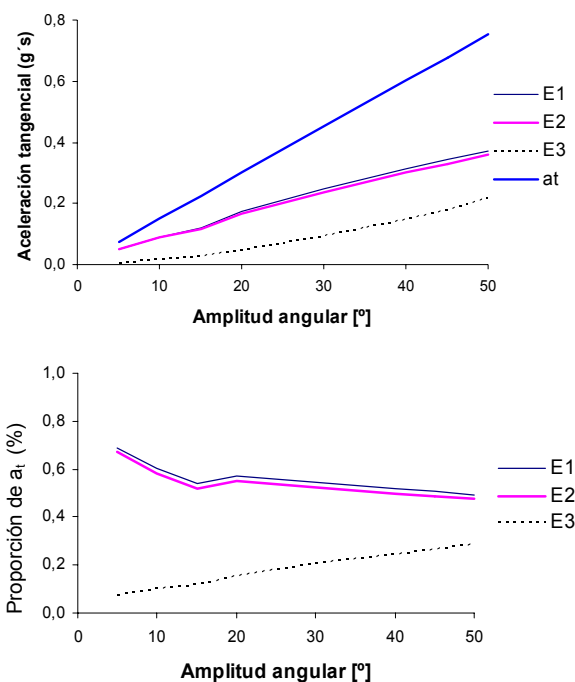


Figura 5.10

Comportamiento de la aceleración horizontal medida por los esquemas

Debe comentarse que los valores teóricos de a_t se obtuvieron a partir de la ecuación linealizada del movimiento del péndulo, por lo que la solución de la

ecuación no lineal requiere la introducción de factores de ajuste, [27], especialmente para amplitudes de oscilación mayores a 10° . Sin embargo, de la figura previa se aprecia que los valores de aceleración tangencial obtenidos con los diversos esquemas, representan del 50 al 70% del valor teórico para los esquemas **E1** y **E2**, y de tan sólo del 8% al 32% con el **E3**.

5.2.3 Discusión y comentarios

En mediciones estáticas los esquemas de instrumentación utilizados mostraron un desempeño adecuado, debido principalmente a que el ángulo de inclinación se obtuvo prácticamente de la señal de los acelerómetros capacitivos. Esto, en razón de que los acelerómetros piezoeléctricos, en concordancia con su principio de operación, no proporcionaron una señal significativa, es decir, el voltaje proporcionado se mantuvo alrededor de 0 V, independientemente del ángulo de inclinación.

Por otro lado, aún en condiciones de inmovilidad, la señal producida por los distintos acelerómetros no es una señal constante. Por tanto, las variaciones de la señal para estas condiciones se deben al ruido electrónico de los acelerómetros y de los dispositivos accesorios del sistema de adquisición. El voltaje asociado al ruido electrónico puede ser tal, que se generen pequeñas diferencias que no puedan ser manejadas matemáticamente, reflejándose en incongruencias numéricas. Un ejemplo específico son los límites de las funciones trigonométricas inversas del seno y del coseno, en las que valores numéricos ligeramente por arriba de la unidad no tengan una correspondencia angular.

Un hecho adicional corresponde al valor de voltaje entregado por los acelerómetros en posiciones de referencia, como las correspondientes a la inmovilidad para los piezoeléctricos, o de equilibrio para los capacitivos, como es el caso de posiciones horizontales y verticales. Teóricamente, estos valores deben ser de 0 V para los piezoeléctricos, y de un valor específico para los capacitivos (2,5 V para los empleados en las pruebas). Sin embargo, en la medición práctica se registraron valores distintos y con pequeñas oscilaciones, por lo que debieron ser promediados para tener valores únicos, los cuales se utilizaron en el manejo global de las señales.

Con respecto a las pruebas dinámicas, se tomó ventaja de la existencia de un péndulo ya construido, cuyas características mecánicas se reflejaron en una masa grande y con una frecuencia de oscilación muy baja. Adicionalmente, los instrumentos utilizados y sus unidades de fijación representaron poco más del 15% de la masa del péndulo, lo que modificó la respuesta propia del cuerpo oscilador. Este hecho hubiera requerido una caracterización específica para tales condiciones, la cual no se consideró en los alcances de este trabajo debido a la experimentación con distintos tipos de instrumentos y a la obligada remoción de accesorios fijos al cuerpo oscilador original.

Las pruebas de oscilación se clasificaron en dos tipos: libre y forzada. Los acelerómetros, particularmente los piezoeléctricos, requieren cierto tiempo para

estabilizarse una vez iniciado el movimiento. A bajas frecuencias, esta estabilización presenta comportamientos variables, que se reflejan en los valores de referencia del instrumento.

A pesar de tener una desviación considerable en los ángulos de oscilación libre obtenidos a partir de los esquemas de instrumentación, las tendencias del comportamiento fueron marcadamente definidas. Esto permitió establecer un factor de corrección en el proceso de estimación del ángulo real, con el cual se obtuvieron resultados aceptables. No obstante, los valores de aceleración tangencial estuvieron muy por debajo de los valores esperados. Este hecho puede deberse a las diferencias en sensibilidad para los distintos tipos de acelerómetros utilizados que, aún siendo del mismo modelo, presentaron diferencias operacionales en los valores nominales.

Adicionalmente, los valores de sensibilidad de los acelerómetros piezoeléctricos utilizados fueron tomados de sus certificados de calibración. La calibración fue realizada bajo frecuencias mayores a 2 Hz, mientras que las frecuencias de oscilación libre estuvieron por debajo de 0,7 Hz. La calibración de los acelerómetros, como se ha comentado, muestra una fuerte dependencia no lineal de la sensibilidad con la frecuencia, presentando cambios significativos a frecuencias bajas, pero no proporcionadas para valores menores a 2 Hz. Esto puede reflejarse en señales atenuadas de amplitud para estas condiciones.

Para el caso de las pruebas de movimiento de oscilación forzado, no se tuvo un control estricto de los ángulos de oscilación ni se dispuso de equipos o dispositivos que pudieran proporcionarlo. Por esta razón, se optó por realizar las pruebas produciendo el movimiento manualmente, con el propósito de extender el alcance del trabajo para identificar el efecto de la frecuencia en la estimación del ángulo. Nuevamente, se remarcan las características operativas de los acelerómetros, manifestando la dependencia de la sensibilidad y la frecuencia en los resultados de las mediciones.

Conclusiones

Del desarrollo de este trabajo y de los resultados presentados, se concluye lo siguiente:

La dirección de la aceleración de la gravedad puede ser utilizada como dirección de referencia para la determinación de ángulos de inclinación, ya sea de manera estática o de manera dinámica. Con ello, es factible utilizar instrumentos cuyo principio de operación permita detectar la magnitud y dirección de la aceleración de la gravedad.

Los acelerómetros son instrumentos para medir aceleración. Los acelerómetros piezoeléctricos registran la aceleración producida por los cambios en el movimiento, por lo que sólo son capaces de medir aceleraciones variables. Esto significa que este tipo de acelerómetros son “inmunes” a aceleraciones constantes. Por otro lado, los acelerómetros piezorresistivos y capacitivos tienen la facultad de medir, además de aceleraciones variables, aceleraciones constantes, como el efecto de la aceleración de la gravedad. De la aplicación de los esquemas presentados se infiere que, con un mayor refinamiento de los instrumentos utilizados, es factible su aplicación para medir el ángulo de balanceo a partir de la medición de la aceleración. La instrumentación debe combinar ambos tipos de acelerómetros en procesos de medición dinámicos.

Los resultados obtenidos con los esquemas de instrumentación propuestos mostraron la aplicabilidad del principio de medición para determinar el ángulo de balanceo, no obstante que la aceleración tangencial medida mostró diferencias significativas con la aceleración esperada. Estas diferencias mostraron que existe una fuerte dependencia del comportamiento de la sensibilidad de los acelerómetros piezoeléctricos con la frecuencia del movimiento. Así mismo, en la aplicación experimental influyen las características electrónicas de funcionamiento de los acelerómetros, así como los intervalos de respuesta al movimiento, tanto de frecuencia como de amplitud. La precisión del esquema de instrumentación depende de las características físicas y de funcionamiento de los instrumentos, por lo que deben utilizarse acelerómetros piezoeléctricos de menor masa y tamaño, con un menor límite inferior de respuesta en frecuencia, con un tiempo de estabilización más corto y sensibilidades de mayor uniformidad en intervalos de bajas frecuencias.

El análisis de movimiento del péndulo representa un medio simplificado para demostrar la aplicabilidad de esquemas de medición de cuerpos sujetos a oscilación en un plano vertical, como es el caso de los vehículos. La determinación de la aceleración lateral requiere de la medición del ángulo de balanceo. Debido a las diferencias en el desempeño de los acelerómetros disponibles, no se obtuvieron resultados definitivos sobre la determinación de esa aceleración.

Recomendaciones

Para obtener mayor precisión en la determinación del ángulo de balanceo y de la aceleración lateral, es necesario contar con un procedimiento de caracterización de los acelerómetros a utilizar. Esto permitiría conocer con mayor detalle el comportamiento de los acelerómetros en los intervalos de medición práctica.

Es recomendable orientar estudios posteriores a la aplicación de esquemas de instrumentación en vehículos con base en el esquema desarrollado en este trabajo. Para ello, es necesario considerar un estado de movimiento general, ya que además de la oscilación del vehículo se tienen movimientos verticales que deben tomarse en cuenta en el proceso de medición y análisis. Esto es extensible a la ubicación de los instrumentos, ya que para describir el movimiento de un vehículo se recurre al movimiento del centro de gravedad. Esto implica que el centro de gravedad no siempre está disponible para ser instrumentado, por lo que debe explorarse además el uso de puntos simultáneos de medición.

Aunque el objetivo del trabajo fue validar el esquema de instrumentación sobre un dispositivo tipo péndulo, se utilizó en este trabajo un péndulo diseñado para otros fines. Si bien los resultados mostraron un adecuado desempeño cualitativamente, cuantitativamente pudieron ser afectados por las limitantes físicas del péndulo utilizado. Por ello, se recomienda trabajar sobre el diseño de un dispositivo ad hoc para pruebas con más refinadas.

También se recomienda investigar sobre posibles adaptaciones físicas y electrónicas para sincronizar y alinear, en espacios compactos, los dos tipos de acelerómetros. Ello permitiría contar con mediciones prácticamente en el mismo punto, de acuerdo con las dimensiones del cuerpo u objeto destinado a instrumentar.

Referencias

1. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995. "Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal". Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de enero de 1997.
2. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. "Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal". Subsecretaría de Transporte. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de octubre de 2000.
3. Fabela Gallegos, Manuel J.; Vázquez Vega, David; Hernández Guzmán, Andrés; Hernández Jiménez, Ricardo; Orozco Orozco, Rodrigo P. "Aspectos generales sobre la caracterización mecánica de vehículos terrestres". Base de una publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte en proceso de edición 2004.
4. El-Gindy, M., "An overview of performance measures for heavy commercial vehicles in North America", International Journal of Vehicle Design, Vol. 16, Nos. 4/5, pp. 441-463, 1995.
5. Crolla, D. A.; Firth, G.; Horton, D. "An introduction to vehicle dynamics", Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, UK.
6. Meriam, J.I., "Dinámica", Ed. Reverte S. A, Segunda edición, 1981.
7. Tippens, Paul E. "Física", Ed. McGraw-Hill, Tercera edición, pp. 190-191, 1988.
8. Gillespie, T. D., "Fundamentals of vehicle dynamics", Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale, PA, USA. 1994.
9. Preston-Thomas, J. "Measured characteristics and dynamic performance of two configurations of western Canadian, log truck", Technical Report, Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council Canada, CSTT-HWV-TR-002. 1994.
10. Página Web <http://www.xbow.com>, Crossbow Technology, Inc. 2001.
11. SAE Standard. "Vehicle Dynamics Terminology", SAEJ670e, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA.
12. Fabela-Gallegos, Manuel; Vázquez Vega, David. "Simplified analysis to determine lateral acceleration and roll angle in a single road vehicle" SAE Paper 2004-01-2624 incluido en Truck and Bus session TB-9 Vehicle Dynamics, SAE Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition de Octubre de 2004 en Chicago, IL, USA.

13. Thomson, W. T.; Daleh D.M. "Theory of vibration with applications", Prentice-Hall, Fifth Edition, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1998.
14. Peterson, A.P.G. "Handbook of noise measurement", Copyright by Genrad, Inc. Concord Massachusetts U.S.A., Ninth edition, 1980.
15. Wilcoxon Research. "Vibration Instrumentation". 2096 Gaither Road Rockville, MD 20850, pp 2, 1989.
16. Serridge, M.; Torben R.L. "Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers handbook", Bruel & Kjaer Company, DK-2850 Naerum, Denmark, 1987.
17. Vibrametrics, Inc. "Vibration sensor user's handbook", 1014 Sherman Avenue Hamden, CT, U.S.A. 06514. 1992.
18. Centro Nacional de Metrología. "Certificado de calibración del acelerómetro CBM2000 No. 0160". El Marqués, Qro. 76241, México, 2002.
19. PCB Piezoelectronics Inc. "Capacitive accelerometers operating principle". Technical Note VIB-3700TN2-0401 and VIB-3700TN1-0301, 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043-2495 USA, 2001.
20. TEC. "Operation Manual TEC Model 1330 VLF Smart Meter", Knoxville Tennessee, CP. 22996, 1992.
21. Kistler Instrument Corporation. "Operating instructions", Piezotron Couplers Types 5118A1, 5118A2, 75 John Glenn Drive , Amherst, NY 14226-2171,.
22. Analogic Devices Inc. "ADXL50/ADXL05 Evaluation modules", P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A, 1996.
23. Crossbow Technology, Inc. "Sensor intelligent solutions. Smarter sensors in silicon". Accelerometers for General Purpose, LP Series. Catalogue 2001. San Jose, CA, USA.
24. National Instruments Corporation, "Your interactive encyclopedia of instrumentation", vol. 3, No. 1, 11500 N Mopac Expwy Austin, TX 78730-5039 USA, 1998.
25. National Instruments Corporate Headquarters, "Data acquisition basics manual LabView 5.1", 11500 North Mopac Expressway, January 1998 Edition.
26. Fabela Gallegos, Manuel de J.; Lozano Guzmán, Alejandro; Jaworski, Jacek. "Péndulo para pruebas de corte en concreto asfáltico" Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C., pp 145-149, Ciudad Juárez, Chih. 1998.

27. Beer, F.P.; Johnston E. R., "Mecánica vectorial para ingenieros, Dinámica", McGraw-Hill, Quinta Edición, pp 963,964, 1990.

Esquema de instrumentación para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral en el movimiento oscilatorio de un péndulo



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730 México, D. F.
Tel (55) 5615 3575
5598 5218
Fax (55) 5598 6457

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Querétaro – Galindo
76700 Sanfandila, Qro.
Tel (442) 216 97 77
216 96 46
Fax (442) 216 96 71

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