

## **CAPÍTULO 5**

# **PRUEBAS, ANÁLISIS Y RESULTADOS**

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición, adquisición y análisis se realizaron dos tipos de pruebas:

- Las de calibración, realizadas en el laboratorio, y
- Las efectuadas con el equipo montado directamente sobre uno de los trenes.

Las pruebas en el laboratorio permitieron verificar la calibración y la validez del análisis en tiempo real, ya que se realizaron bajo condiciones controladas. También se verificó la comunicación del CompactRIO con el dispositivo de monitoreo.

Por otra parte, las pruebas en campo permitieron verificar el funcionamiento en general del sistema y se consiguieron señales de vibración reales. Con estas pruebas se logró establecer un procedimiento para la correcta instrumentación del tren, y para el análisis de los resultados obtenidos.

### 5.1 Pruebas de calibración

Las pruebas realizadas en el laboratorio consistieron en la adquisición y análisis de señales de calibración que simulan señales de vibraciones. Para ello se emplearon tres instrumentos: un calibrador de acelerómetros, un generador de funciones y una fuente de tensión. Estos instrumentos se muestran en la Figura 5.1.



Figura 5.1 Generador de funciones, calibrador de acelerómetros y fuente de tensión.

Para verificar que el intervalo de frecuencias que el sistema es capaz de muestrear corresponde con el asignado en la programación, se empleó un generador de funciones. En éste se hizo variar tanto la frecuencia como la forma de onda para comprobar la capacidad de adquisición del sistema.

Sin embargo, no es posible utilizar el generador de funciones para verificar la calibración de las señales adquiridas, ya que el módulo NI-9233 es especial para sensores IEPE. Por tanto, para verificar la magnitud de las señales se colocó uno de los acelerómetros en el calibrador. Este dispositivo hace vibrar al acelerómetro a una frecuencia de 80 Hz y con una aceleración de 1 g.

Para realizar las pruebas de calibración, se emplearon paralelamente el generador de funciones y el calibrador de acelerómetros. Con el generador de funciones se introdujo una señal sinusoidal de 150 Hz en el primer canal de vibraciones. En el quinto canal se introdujo la señal de 80 Hz a 1 g proveniente del calibrador de acelerómetros. El monitoreo de las señales se observa en la Figura 5.2. En la ventana se muestran 62.5 ms.

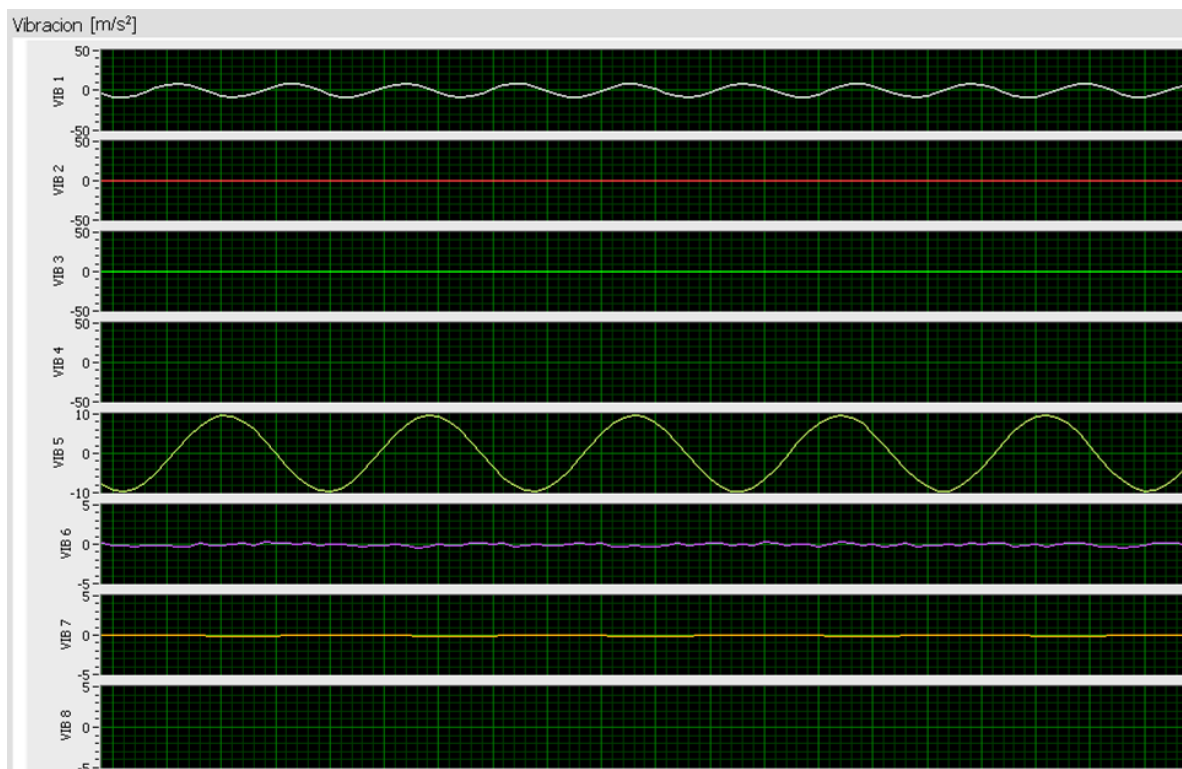


Figura 5.2 Vibraciones proporcionadas por el generador de funciones a 150 Hz y 10 m/s<sup>2</sup> de amplitud, y por el calibrador a 80 Hz y 1 g de amplitud.

Dado que la tasa de muestreo de los módulos NI-9233 se fijó en 1500 muestras/s, al introducir una señal a 150Hz en el canal 1 fue posible reconstruirla en su totalidad. Se comprueba así que el sistema garantiza el registro de las vibraciones comprendidas en el rango de interés de 0 a 150Hz.

Al introducir una frecuencia de 80 Hz a 1 g en el canal cinco, se verificó que el sistema se encuentra calibrado, pues se visualiza la señal sinusoidal de 80 Hz y de 9.8 m/s<sup>2</sup> de amplitud.

La fuente de tensión se empleó para realizar la calibración de las entradas analógicas.

Con base en las pruebas realizadas, el valor de tensión obtenido por el módulo tuvo que ser multiplicado por un factor de 0.7163 para que se igualara al valor de tensión entregado por la fuente.

La Figura 5.3 muestra el monitoreo obtenido después del ajuste. La fuente de tensión se fijó en un valor de 5 V de CD y se midió con el canal 1 del módulo NI-9219.

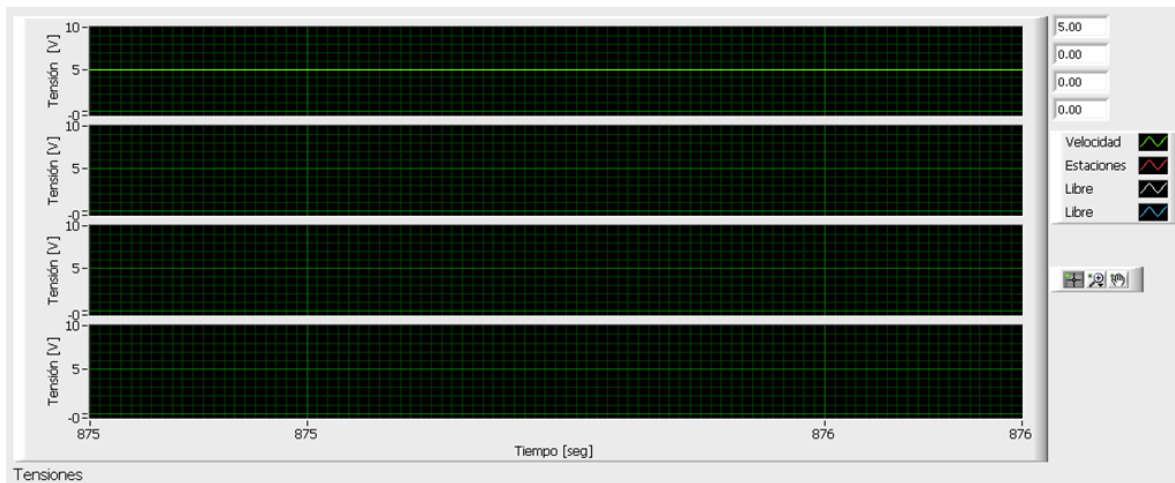


Figura 5.3 Entradas de tensión al ser aplicados 5 V<sub>DC</sub> después del ajuste.

Con la calibración de las entradas analógicas, fue posible proporcionar una velocidad simulada de calibración para conseguir ajustar el valor de la distancia recorrida que se observa en el monitoreo.

Para realizar el ajuste se colocó la fuente en 3.6 V. Dado que 3.6 km/h representan 10 m/s, cada segundo el contador de distancia recorrida debe aumentar en diez metros. Con base en los resultados de las pruebas, fue necesario aplicar un factor de 3.7 para que la distancia recorrida mostrara un incremento de 10 m/s.

En la Figura 5.4 se muestra el resultado del indicador *Recorrido* de la pantalla del monitoreo, luego de haberse dejado registrando durante 30 segundos.



Figura 5.4 Indicador de distancia recorrida luego de 30 s de registro.

De esta manera se asegura que a medida que el tren vaya avanzando, el controlador determinará con precisión la distancia que ha recorrido, y podrá identificarse en tiempo real los puntos donde se detecten desplazamientos considerables.

El monitoreo también incluye los espectros de frecuencia para cada uno de los canales de adquisición. Para este análisis en frecuencia, el sistema recolecta un segundo de información y aplica la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*).

Para probar la efectividad del análisis de Fourier, se conectaron los seis acelerómetros a los primeros tres canales de cada módulo NI-9233, y se realizó una prueba manual moviendo verticalmente los acelerómetros a baja frecuencia.

Para evaluar altas frecuencias, se introdujo una señal sinusoidal de 100 Hz con ayuda del generador de funciones en el último canal de cada módulo NI-9233.

Los espectros desplegados en el monitoreo se ilustran en la Figura 5.5.

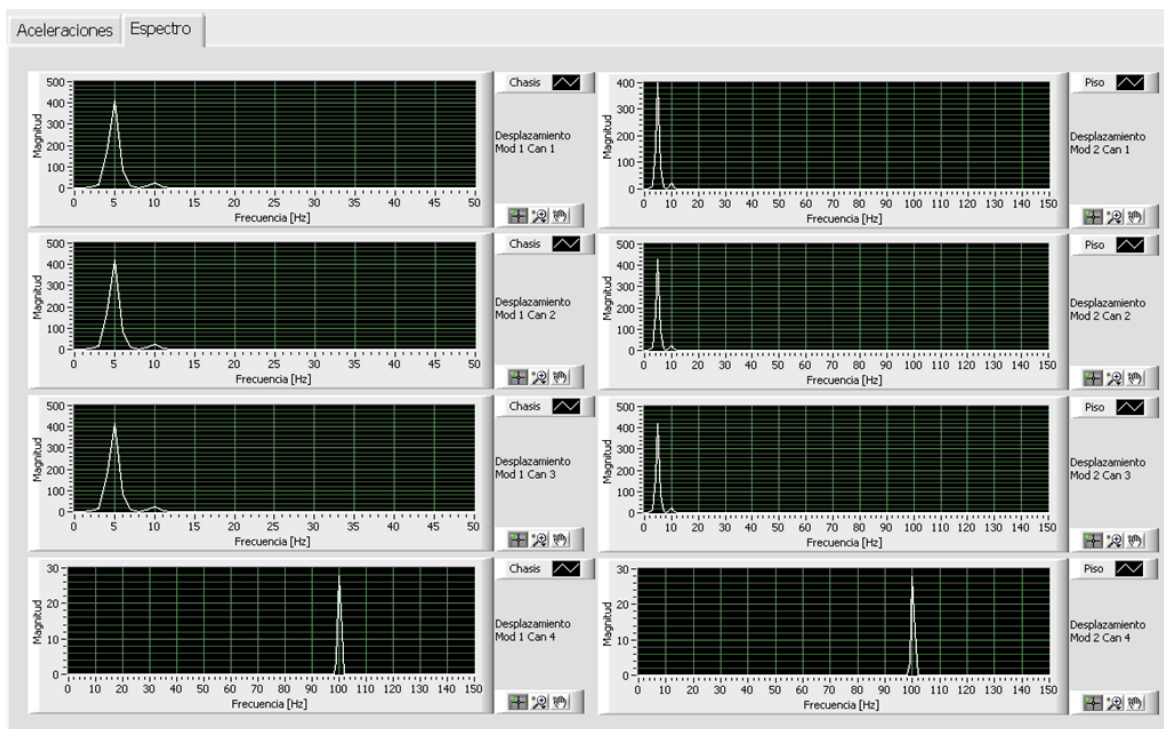


Figura 5.5 Espectros de frecuencia de los ocho canales.

Con esta prueba, se verificó que el monitoreo muestra correctamente los espectros de frecuencia.

Los resultados de las pruebas de calibración se resumen en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Resultados de las pruebas de calibración.

Instrumento	Características de la señal	Resultado	Conclusión
Generador de funciones	Forma: Sinusoidal Frecuencia: 150Hz Amplitud: no considerada	9.3 ciclos mostrados en 62.5 ms, lo que implica una frecuencia de 150 Hz	Se verifica el rango de adquisición de frecuencias de 0 a 150Hz
Calibrador de acelerómetros	Forma: Senoidal Frecuencia: 80 Hz Amplitud: 1 g	5 ciclos mostrados en 62.5 ms, lo que implica una frecuencia de 80 Hz  Amplitud de la señal de 9.8 m/s <sup>2</sup>	Se verifica la calibración del sistema en frecuencia y amplitud
Fuente de tensión	Tensión aplicada: 10 V de CD Factor de ajuste: sin ajuste	13.96 V de CD, 39.6% por encima del valor real	Es necesario un factor de 0.71632836 para obtener la tensión real suministrada
	Tensión aplicada: 5 V de CD Factor de ajuste: sin ajuste	6.98 V de CD, 39.6% por encima del valor real	
	Tensión aplicada: 5 V de CD Factor de ajuste: 0.71632836	5 V de CD	Se valida el ajuste realizado
	Tensión aplicada: 3.6 V de CD Tiempo de aplicación: 30 s	81.1 m de recorrido en 30 s	Es necesario un factor de 3.7 para obtener el desplazamiento real
Generador de funciones	Altas frecuencias: 100 Hz	Espiga en 100 Hz para altas frecuencias	Se verifica la veracidad de los espectros del análisis de Fourier
	Bajas frecuencias: 5 Hz (manualmente)	Espiga en 5 Hz para bajas frecuencias	

## 5.2 Pruebas en campo

Las pruebas de calibración en el laboratorio se realizaron bajo condiciones controladas, por lo que el equipo debió ser probado en campo posteriormente. Las pruebas en campo entregaron resultados de la práctica real y posteriormente se pudo concluir, con base en los registros existentes en el archivo del laboratorio, si la información entregada se encontraba dentro de un rango de valores creíbles.

### 5.2.1 Instrumentación empleada

La instrumentación de un tren para realizar las pruebas a bordo, requirió del siguiente equipo:

*a) El controlador, el dispositivo de monitoreo, un cable Ethernet y una batería*

El instrumento esencial para realizar las pruebas fue, evidentemente, el controlador cRIO. Para alimentarse se usó una batería recargable de 12 V de CD.

El dispositivo de monitoreo fue una computadora portátil (laptop) con el software LabVIEW y los módulos Real-Time y FPGA correctamente instalados y con su licencia correspondiente. La laptop se conectó con el controlador a través de un cable Ethernet cruzado.

*b) Los seis acelerómetros con sus respectivos cables*

Para la medición de las vibraciones en los ejes transversal, vertical y longitudinal fueron necesarios dos juegos de tres acelerómetros. Un juego fue montado a nivel de piso y el otro a nivel de suspensión.

*c) Un fragmento de riel y un bloque metálico con tornillo*

El juego de acelerómetros que se colocó a nivel de piso se montó sobre un fragmento de riel. Los acelerómetros que realizaron la medición a nivel de suspensión fueron montados sobre un pequeño bloque metálico con tornillo.

*d) Un botón pulsador y una pila*

Al conectar una pila de 9 V de CD a un canal del módulo NI-9219 y colocar el botón a manera de interruptor se tuvo la posibilidad de indicar manualmente el paso por una

estación. El laboratorio cuenta ya con un ensamblaje que se compone de un botón pulsador y una terminal para conectar la pila.

*e) Cables caimán-caimán para conexiones*

Se requirió de un par de cables caimán-caimán para conectar la señal de velocidad del bloque detector de velocidad (BDV), que se encuentra al interior del armario de conexiones del tren, con el módulo NI-9219. Para realizar la conexión del botón pulsador con el mismo módulo se empleó otro par de cables caimán-caimán. El primer par fue de una longitud aproximada de 2 m; el segundo par bastó con 30 cm de longitud.

*f) Cinta metálica, pegamento, bases para acelerómetros y cera de abeja*

El riel se fijó firmemente al piso con la cinta metálica. Los acelerómetros se montaron sobre sus bases y se adhirieron con pegamento tanto al fragmento de riel como al bloque metálico. En los casos en que las bases se despegaron o se rompieron, los acelerómetros se pudieron fijar directamente sobre el riel empleando cera de abeja. Para los acelerómetros montados a nivel de suspensión, además de la cera de abeja, fueron asegurados con cinta metálica para mayor seguridad.

Otro material que resultó de gran utilidad fue una llave inglesa ajustable (perico) para apretar el tornillo del bloque metálico y fijarlo al chasis del bogie. Además, resultó conveniente disponer de cinturones (cinchos) para sujetar los cables, estopa para limpiar y un multímetro con el cual se pudo verificar continuidad y valores de tensión.

### **5.2.2 Instrumentación del tren**

La instrumentación del tren se realizó en alguno de los carros motrices como se describe a continuación.

Primero se conectaron los cables a los acelerómetros que van montados sobre el chasis del bogie y se marcaron con los números del 1 al 3; posteriormente se insertaron en sus bases y se fijaron, como se muestra en la Figura 5.6, en el bloque metálico:

- El número 1 se colocó en posición transversal a la marcha del tren,
- El número 2 se colocó en posición vertical, y
- El número 3 lo hizo en posición longitudinal.



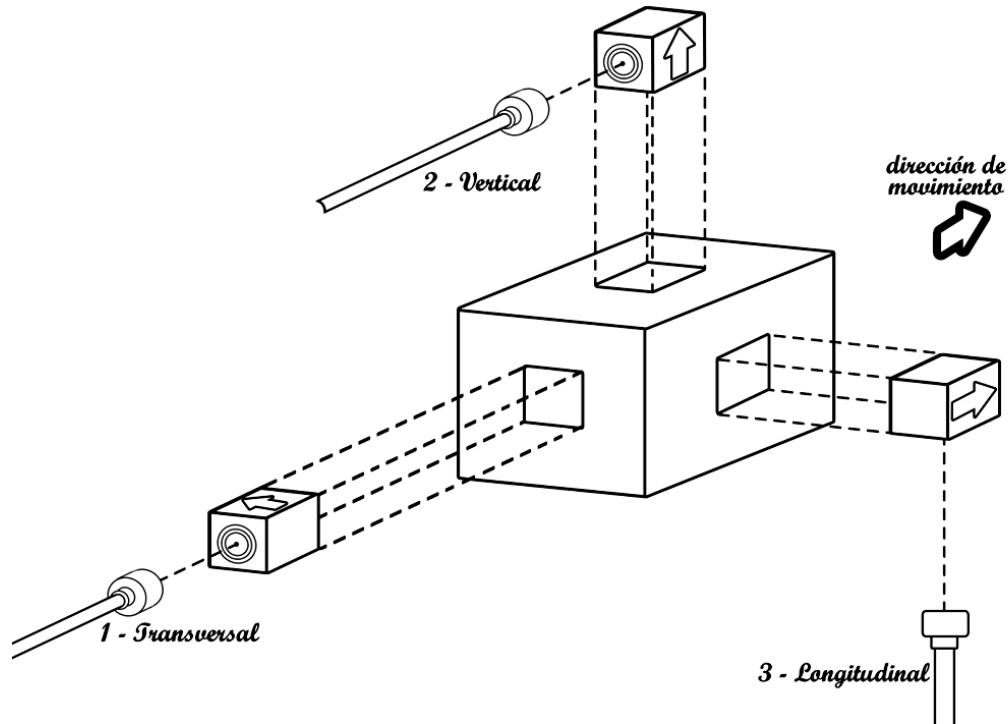


Figura 5.6 Diagrama de conexiones de los acelerómetros en el bloque.

El bloque metálico se instaló sobre el chasis del bogie, cuidando que la dirección de la flecha de los acelerómetros correspondiera con la asignada. Para que los cables no quedaran sueltos y evitar que pudieran engancharse con alguna otra parte del chasis y provocar que se soltaran los acelerómetros, se emplearon cinchos para sujetar los cables.

En la Figura 5.7 se muestra el primer juego de acelerómetros montados en el chasis del bogie, lo más cercanos posible a la rueda.

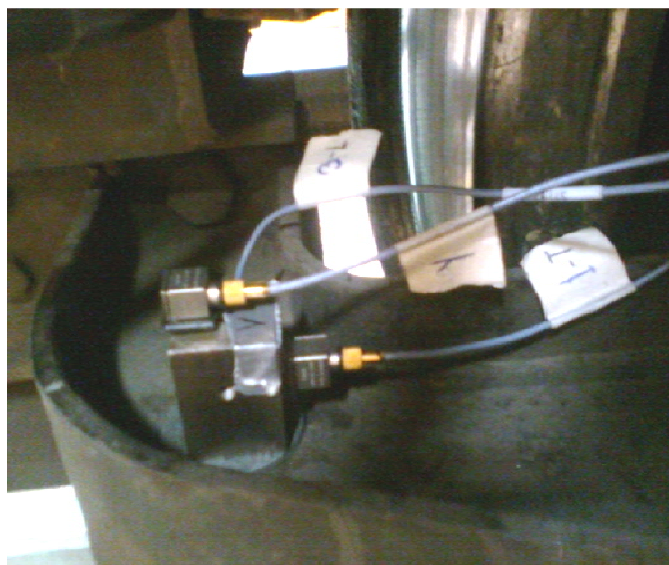


Figura 5.7 Bloque metálico montado en el chasis.

En el interior del vagón, se limpió la superficie donde se fijó el fragmento de riel. Éste se fijó firmemente con cinta metálica a la altura del centroide del eje de las ruedas.

Similarmente al arreglo anterior, los tres acelerómetros restantes se conectaron con sus cables, se marcaron con los números del 4 al 6, se insertaron en sus bases y se fijaron, como se observa en la Figura 5.8, en el fragmento de riel.

- El número 4 se colocó en posición transversal,
- El número 5 se colocó en posición vertical, y
- El número 6 lo hizo en posición longitudinal.

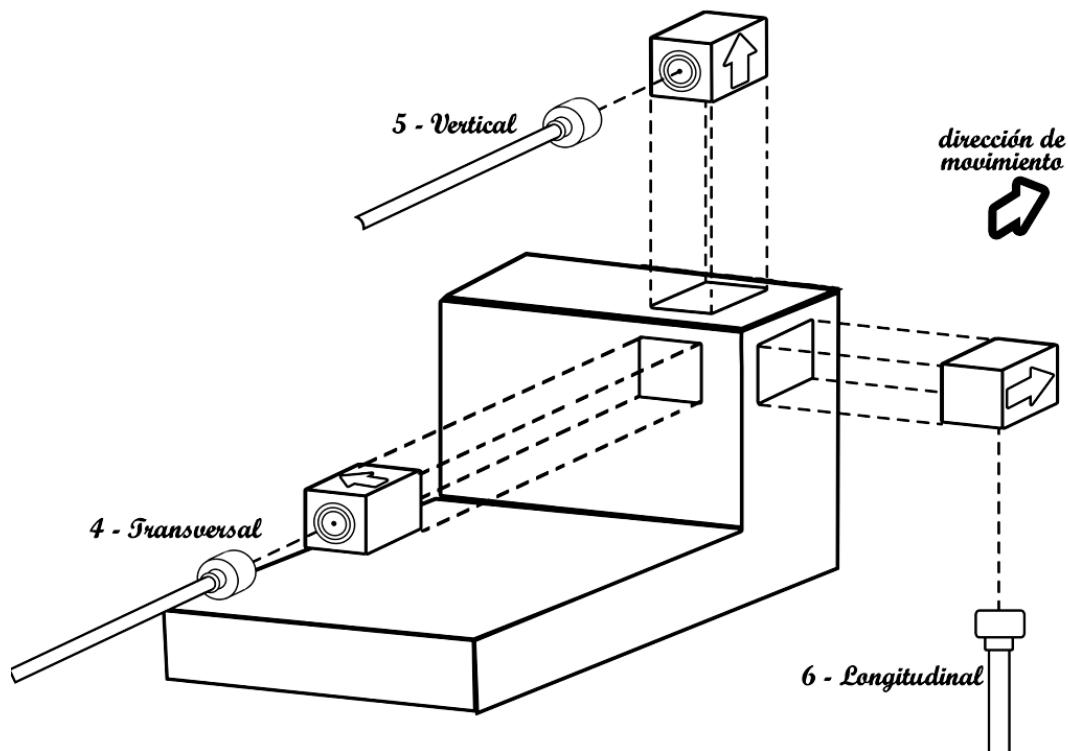


Figura 5.8 Diagrama de conexiones de los acelerómetros en el fragmento de riel.

Los cables de los 6 acelerómetros deben conectarse a los módulos NI-9233 del CompactRIO de la siguiente manera:

- El acelerómetro 1 con el canal 0 del primer módulo
- El acelerómetro 2 con el canal 1 del primer módulo
- El acelerómetro 3 con el canal 2 del primer módulo
- El acelerómetro 4 con el canal 0 del segundo módulo
- El acelerómetro 5 con el canal 1 del segundo módulo
- El acelerómetro 6 con el canal 2 del segundo módulo.

En la Figura 5.9 se muestra el diagrama esquemático de conexiones correspondiente.

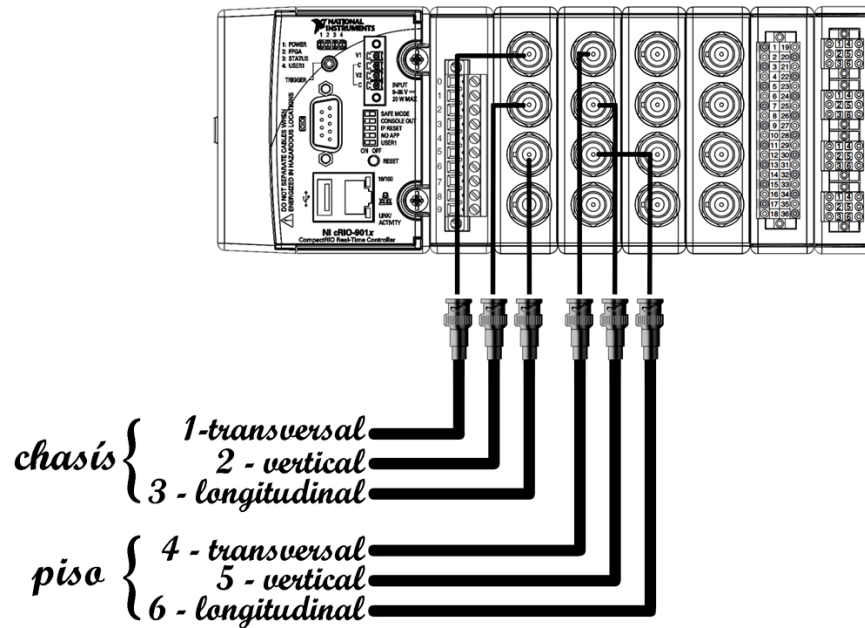


Figura 5.9 Diagrama de conexión de los acelerómetros con los módulos NI-9233.

Este orden fue arbitrario, por lo que puede modificarse en cualquier momento; sin embargo, se recomienda mantener esta asignación para que sea un procedimiento sistematizado.

El tendido de los cables que van de los acelerómetros al CompactRIO también tuvo que ser asegurado con cinta metálica al piso o paredes del tren.

Al módulo NI-9219 se conectó la señal de velocidad y la identificación de estaciones.

Para obtener la velocidad se localizó el BDV en uno de los armarios de conexiones del tren, y se identificaron los nodos CH04 y 15C. El primero, que es la terminal positiva, se conectó con la terminal 4 del canal 0 del NI-9219; el segundo, la terminal negativa, se conectó con la terminal 5 del canal 0 del mismo módulo, como se observa en la Figura 5.10.

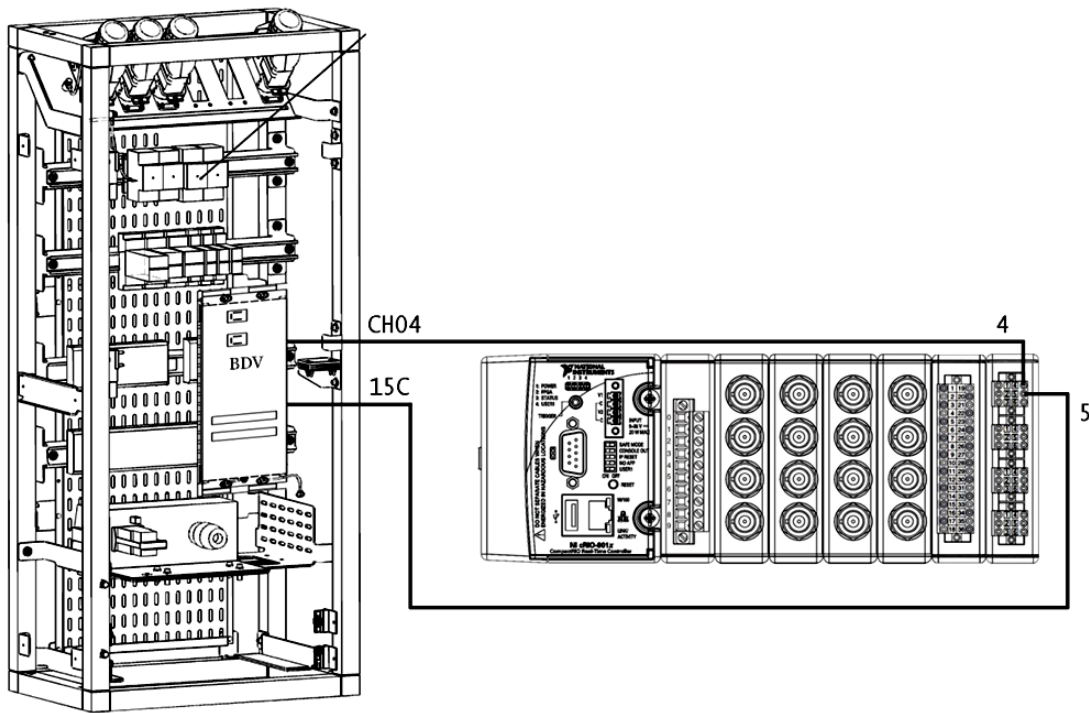


Figura 5.10 Diagrama de conexión del BDV con el módulo NI-9219.

En las terminales 4 y 5 del canal 1 se conectaron las terminales del ensamblaje del botón pulsador, como se muestra en la Figura 5.11. A la terminal destinada para la pila se le conectó la pila de 9 V de CD.

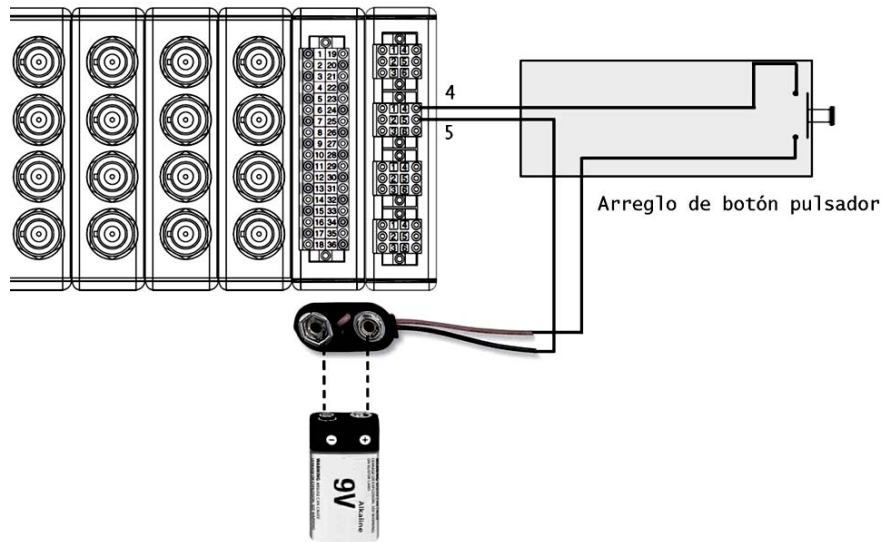


Figura 5.11 Conexión del botón pulsador con el módulo NI-9219.

Por último se alimentó el CompactRIO con la batería de 12 V de CD, como se observa en la Figura 5.12.

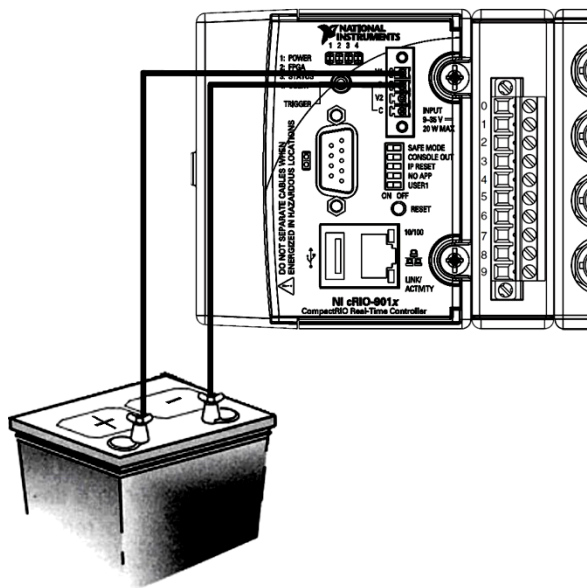


Figura 5.12 Alimentación del CompactRIO.

Para evitar movimientos indeseados que pudieran ocasionar que se desconectara la batería del controlador, esta se fijó con cinta metálica a una estructura sólida como lo fue uno de los tubos del vagón. El sistema de adquisición montado puede observarse en la Figura 5.13.

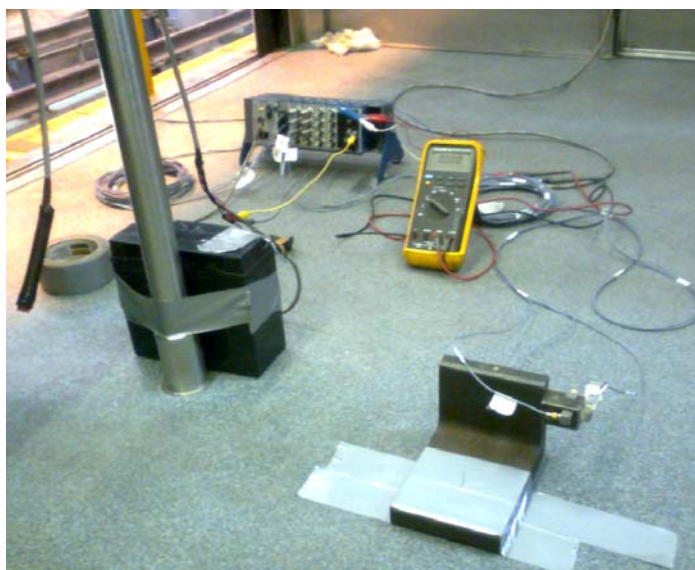


Figura 5.13 Sistema montado para pruebas.

Dependiendo de la modalidad de funcionamiento se requiere la conexión del dispositivo de monitoreo. En este caso, para verificar que se estaba realizando la adquisición de manera correcta, y que el análisis en tiempo real era confiable, sí fue necesario conectar la laptop al controlador por medio del cable Ethernet cruzado.

Para mayor comodidad, y realizar la instrumentación del tren más rápidamente en futuras mediciones, se dejaron fijas las bases de los acelerómetros tanto en el riel como en el bloque metálico, así como las marcas de identificación en los cables de los acelerómetros, una vez que se terminaron las pruebas.

### 5.2.3 Pruebas

Las pruebas se realizaron en trenes en vacío; es decir sin pasajeros, para evitar que el tren se detuviera en las estaciones.

Se hizo el recorrido por ambas vías; primero la vía 2 que corre de la estación La Paz a la estación Pantitlán y posteriormente la vía 1 que corre de Pantitlán a La Paz. En todo momento el tren circuló a una velocidad normal de recorrido.

El programa de monitoreo que se realizó lleva por nombre *STC-MONITOR-VITE.exe*. El ícono de acceso al programa desde la PC que sirve de monitoreo es el que se muestra en la Figura 5.14.

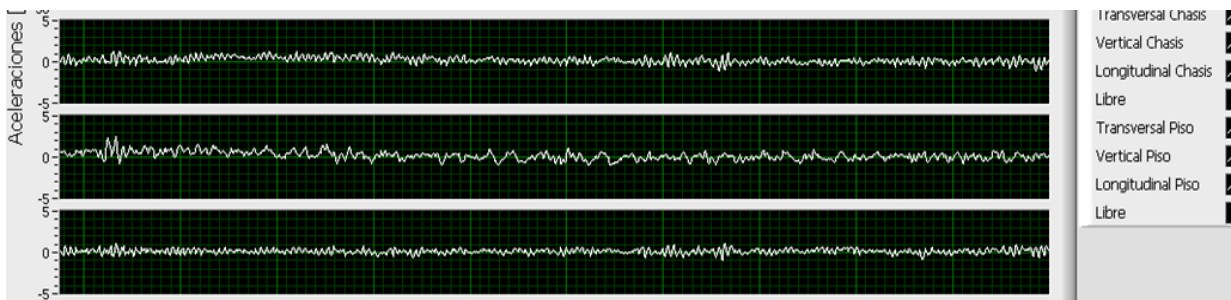


Figura 5.14 Ícono *STC-MONITOR-VITE.exe*.

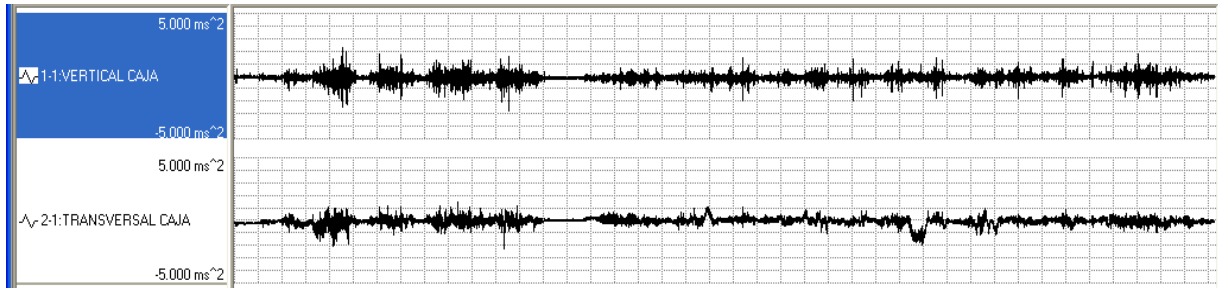
La operación del CompactRIO depende de su modalidad de funcionamiento. Las pruebas se realizaron bajo la modalidad de CompactRIO con monitoreo. Las diferentes modalidades de funcionamiento se describieron en el Capítulo 4, en la sección 4.3.

La información desplegada durante las pruebas por el monitoreo en tiempo real fue interpretada *in situ* por el personal para detectar las zonas en las que se registraron desplazamientos importantes.

Al comparar el rango de valores dentro del que se encontraron los resultados entregados por el monitoreo con el rango de valores dentro del que se encuentran los registros existentes en el archivo del laboratorio, se pudo demostrar que el sistema funciona apropiadamente, como se muestra en la Figura 5.15.



(a)



(b)

Figura 5.15 (a) Resultados del monitoreo y (b) registros anteriores.

Para determinar con precisión la magnitud de las aceleraciones y las zonas donde ocurrieron, así como la determinación de la calidad de la marcha del tren y con ello el confort del viaje de los pasajeros, se realizó un análisis profundo de las vibraciones empleando la información almacenada por el CompactRIO.

### 5.3 Conversión de datos

Como se mencionó en el Capítulo 4, la información recogida por el CompactRIO se almacena en los archivos *Calibración.bin*, *Vibraciones.bin*, *Voltajes.bin* y *Tiempo.bin*. Dado que los archivos *.bin* comúnmente no son reconocidos por la mayoría del software en el mercado, se transformaron para que pudieran serlo.

Para esta tarea, se realizó la programación de un convertidor de datos. Éste realiza la conversión de los archivos *.bin* a archivos de valores separados por comas (*.csv*).

Para acceder al convertidor, debe abrirse la ubicación de la carpeta donde está contenido el proyecto *STC-VITE* y dar doble clic sobre el ícono llamado *CoDa+.exe*, como se ve en la Figura 5.16.



Figura 5.16 Ícono *CoDa+.exe*.



La ventana de conversión que se despliega es la que se observa en la Figura 5.17.

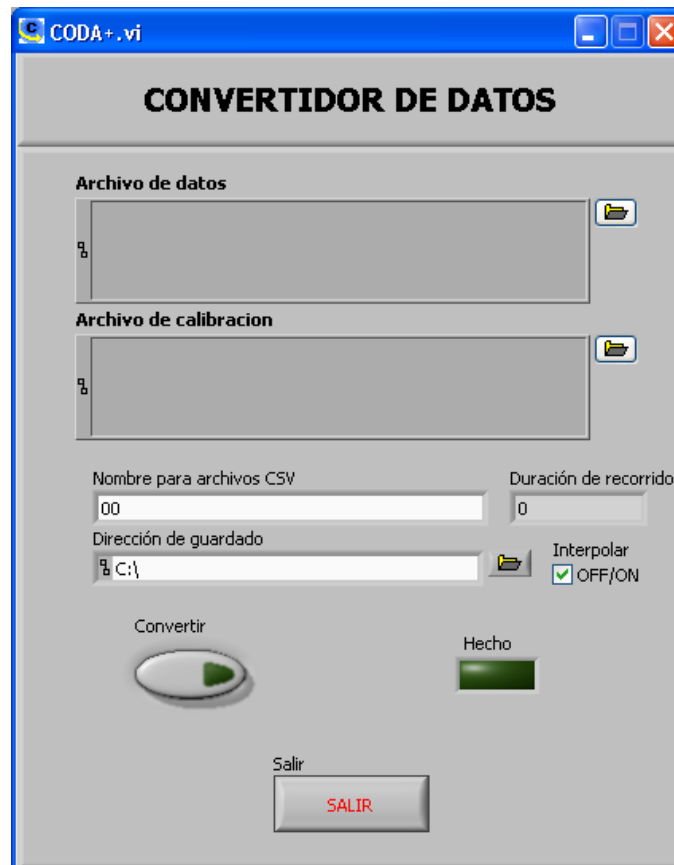


Figura 5.17 Ventana de conversión.

Para realizar la conversión de los archivos *.bin*, deben rellenarse los campos como sigue:

- En el recuadro *Archivo de datos* debe seleccionarse alguno de los archivos de datos registrados: *Vibraciones.bin*, *Tensiones.bin* o *Tiempos.bin*. Seleccionando uno de ellos el convertidor enlaza directamente los dos restantes.
- En el recuadro *Archivo de calibración* debe seleccionarse el archivo de calibración: *Calibración.bin*.
- En el recuadro *Nombre para Archivos CSV* se debe colocar el nombre base con el que se desea reconocer los archivos creados. El nombre de los archivos *.csv* estará conformado por fecha de conversión, nombre base, tipo de archivo (ya sea vibraciones o tensiones) y número de identificación en caso de que los archivos *.bin* sean demasiado grandes y el convertidor genere varios archivos *.csv*, todo separado por guiones cortos. Por ejemplo: *12-04-2011-RecorridoLaPazaPantitlán-Vib-2*.
- En la *Dirección de guardado* se ha de colocar la ruta donde se desea que se guarden los archivos *\*.csv*.



- El recuadro *Interpolar* debe activarse en caso de que las tasas de muestreo de los módulos NI-9233 y NI-9219 sea diferente. Dado que el sistema está configurado para que el primero realice la adquisición a 1500 muestras por segundo y el segundo lo haga a 100 muestras por segundo, esta casilla debe estar habilitada.

Al presionar el botón convertir, el recuadro *Duración de recorrido* muestra el tiempo que tardó el tren en realizar el recorrido.

Durante el proceso de conversión, las ventanas *Interpolate VI* y *Progress VI* muestran el avance de la conversión, como se observa en la Figura 5.18. En la primera se visualiza el proceso de interpolación de datos y en la segunda se visualiza el porcentaje de conversión realizado. Durante el proceso, no pueden realizarse cambios en ninguna de las ventanas.

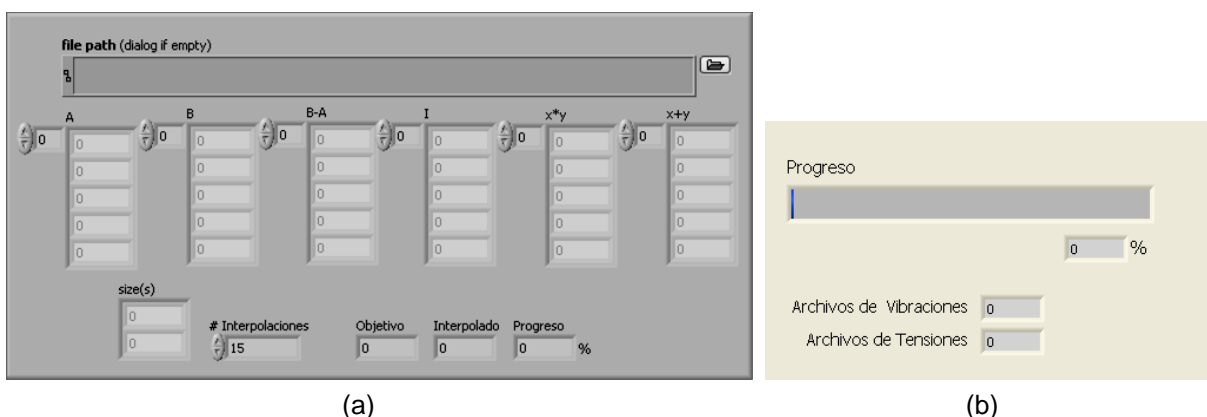


Figura 5.18 Ventanas (a) *Interpolate VI* y (b) *Progress VI*.

Cuando la tarea ha finalizado, se enciende el indicador *Hecho* en la ventana de conversión, y se habilitan los controles para llevar a cabo una nueva conversión. Para salir del programa se debe presionar el botón *SALIR*.

### 5.4 Análisis y resultados

La información contenida en los archivos \*.csv creados por el convertidor ya puede ser leída por software comercial como es *Excel*, *Access*, o el Bloc de notas entre otros. Para garantizar que la cantidad de información almacenada por el sistema desarrollado pueda ser analizada total y eficazmente, el software que se utilizó para la lectura y análisis de los datos registrados fue el *NI DIAdem*. La versión utilizada de este software fue la del año 2010, como se puede observar en la Figura 5.19.

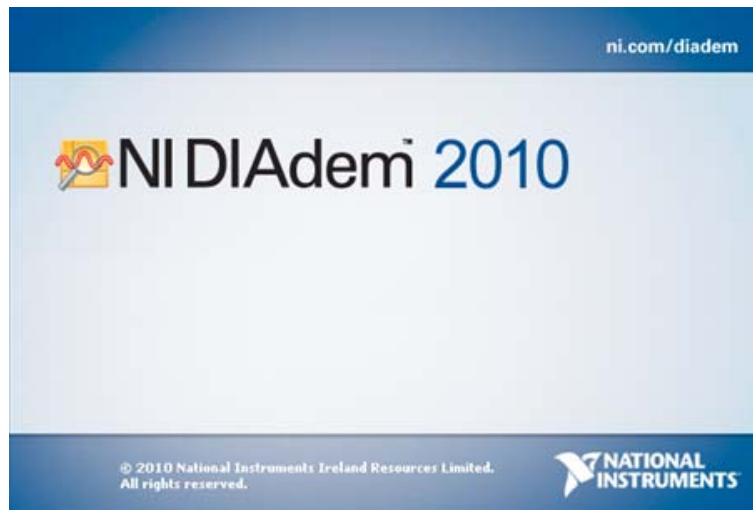


Figura 5.19 DIAdem 2010

DIAdem es una herramienta de *National Instruments* con la cual se puede visualizar y analizar fácilmente la información obtenida durante un proceso de adquisición de datos, así como la rápida generación de reportes. Está optimizado para cargar y manipular una gran cantidad de información de manera fácil y rápida; además de que no requiere tener instalado otro software de *National Instruments*.

El DIAdem permite realizar un análisis completo de los registros obtenidos en las mediciones. En la Figura 5.20 se muestra la información recabada en uno de los recorridos efectuados por el tren FM07-FM08 de la estación La Paz a la estación Pantitlán.

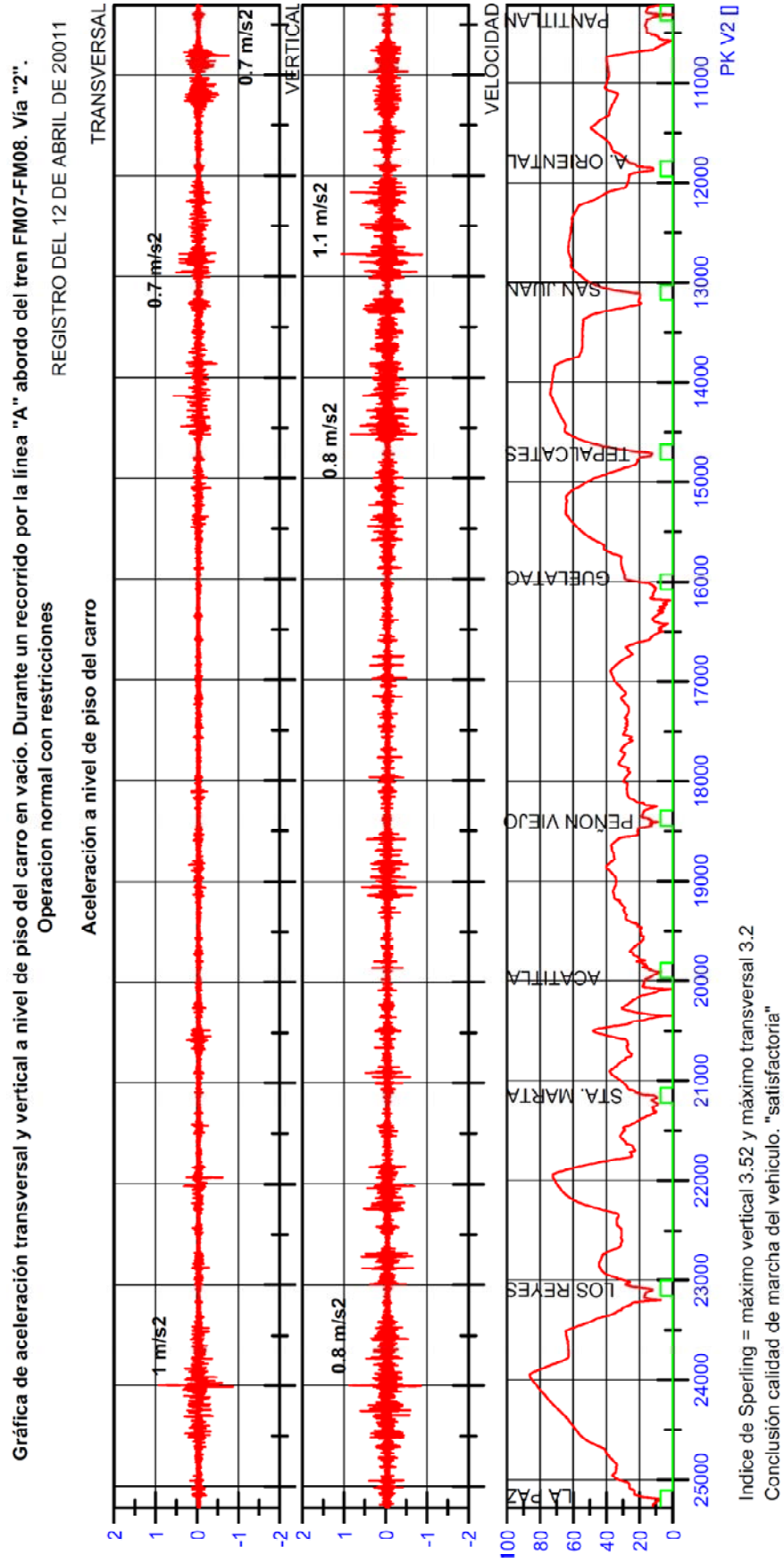


Figura 5.20 Gráfica de aceleraciones contra punto kilométrico de La Paz a Pantitlán del tren FM07-FM08, efectuado el día 12 de abril de 2011.

En el caso de la Figura 5.20 se observa un pico de aceleración transversal máxima de  $1 \text{ m/s}^2$  en el punto kilométrico 24000 y un pico de aceleración vertical máxima de  $1.1 \text{ m/s}^2$  en el punto kilométrico 12700.

Con las herramientas del DIAdem se determinó que las frecuencias a las que ocurrieron dichas vibraciones son de 3 Hz para la máxima aceleración transversal, y 1.5 Hz para la máxima aceleración vertical.

Debido a que las frecuencias se encuentran dentro del rango de las vibraciones asociadas a las masas suspendidas (entre 1 y 15 Hz), la calidad de la marcha pudo determinarse por medio del criterio o método de Sperling.

El método de Sperling se basa en la formulación de un índice  $W_z$  para la evaluación de dos aspectos: índice de confort del pasajero e índice de la calidad de la marcha del vehículo.

Este índice permite determinar la calidad de la marcha conforme a la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Índice  $W_z$  para confort y calidad de marcha.

$W_z$ Confort del pasajero		$W_z$ Calidad de la marcha del vehículo	
$W_z = 0,896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f} F(f)}$		$W_z = 0,896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f}}$	
Donde: a: valor máximo de la aceleración medida en la dirección considerada, en el suelo de la caja del vehículo [ $\text{cm/s}^2$ ] f: frecuencia de oscilación [Hz] F(f): función de ponderación en frecuencia de las aceleraciones.			
$W_z$	Confort	$W_z$	Calidad marcha
1	Ligeramente perceptible	1	Muy buena
2	Netamente perceptible	2	Buena
2,5	Soportable y todavía no desagradable	3	Satisfactoria
3	Fuertemente perceptible, poco agradable, pero todavía soportable	4	Aceptable para circular
3,25	Fuertemente incómodo	4,5	Inadecuada para circulación
3,5	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo	5	Peligrosa para servicio
4	Extremadamente desagradable y perjudicial en caso de exposición prolongada		

Conforme a la Tabla 5.2 y los datos de aceleración máxima y frecuencia de oscilación obtenidos en este caso, los índices para las direcciones transversal y vertical fueron:

$$W_z [trans] = 0.896^{10} \sqrt{\frac{(100 \text{ cm/s}^2)^3}{3 \text{ Hz}}}$$

$$W_z = 3.195$$

$$W_z [vert] = 0.896^{10} \sqrt{\frac{(110 \text{ cm/s}^2)^3}{1.5 \text{ Hz}}}$$

$$W_z = 3.524$$

Con ellos se determinó de manera cualitativa que la marcha del tren en los puntos de máximo desplazamiento fue satisfactoria.

Este análisis se realiza quincenalmente, o en ocasiones semanalmente, para llevar un seguimiento constante de la situación de la línea y del comportamiento de los trenes en ella.

Cabe mencionar que la obtención de los índices de Sperling y su consecuente determinación de la calidad de la marcha, considera las mediciones efectuadas en el piso del vagón.

En las Figuras 5.21 y 5.22 se muestran respectivamente las vibraciones y los espectros de frecuencias desplegados por el monitoreo en tiempo real para una misma señal.

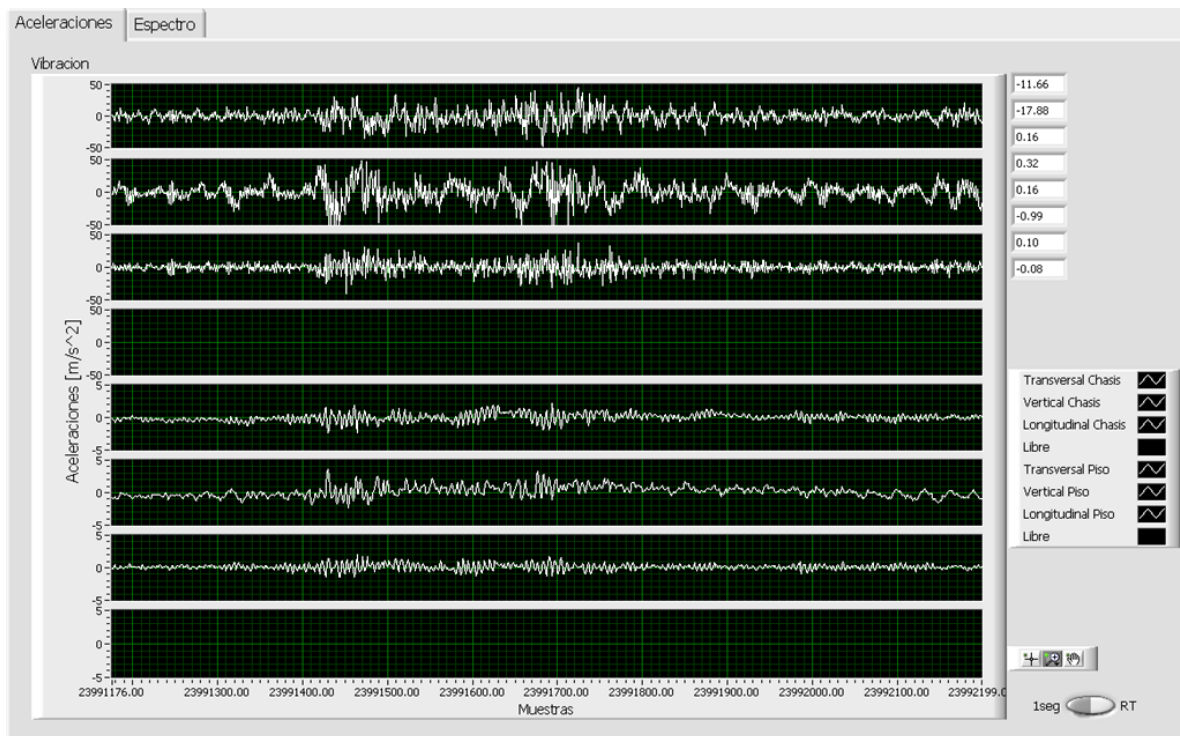


Figura 5.21 Vibraciones monitoreadas en tiempo real.

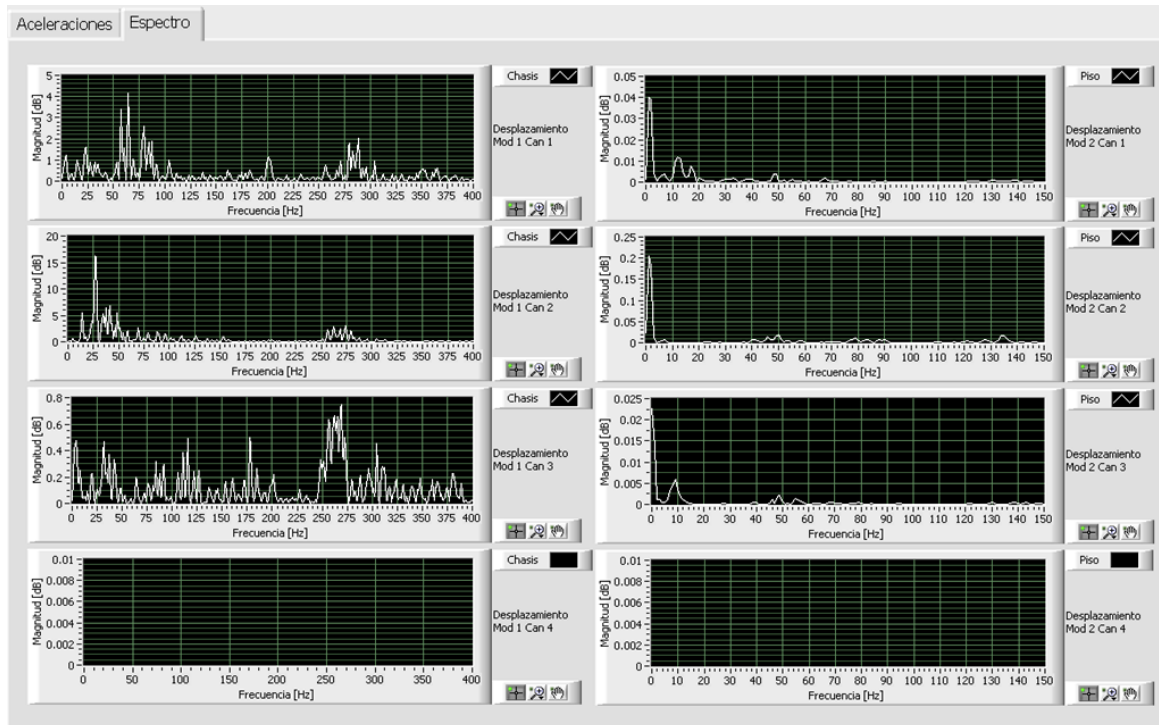


Figura 5.22 Espectros monitoreados en tiempo real.

Como se observa en la Figura 5.21 los niveles de vibración presentes en el chasis fueron de mayor magnitud que las ocurridas a nivel de piso, debido a la doble suspensión de los trenes.

En la Figura 5.22 se muestra que el rango de frecuencias adquiridas por los acelerómetros montados en el chasis del bogie fue mucho mayor que el rango de frecuencias presentes en el piso del vagón.

Desafortunadamente, no existen estudios, normativas, ni metodologías establecidas que permitan obtener una confiable interpretación de las señales adquiridas en el chasis del bogie para determinar la calidad de la marcha, por lo cual el método de Sperling es el procedimiento más sencillo y rápido para la estimación de la calidad de la marcha.

Los resultados de las pruebas en campo se resumen en la Tabla 5.3

Tabla 5.3 Resultados de las pruebas en campo.

Ubicación de sensores	Resultado	Conclusión
A nivel de piso	Aceleración transversal: $1 \text{ m/s}^2$ Frecuencia: 3 Hz Velocidad: 88 km/h Punto kilométrico: 24+000 Interestación: La Paz – Los Reyes	Rango de frecuencias involucradas: 0 – 15 Hz Índice de Sperling: 3.195 Calidad de marcha en punto de máxima amplitud: satisfactoria
	Aceleración vertical: $1.1 \text{ m/s}^2$ Frecuencia: 1.5 Hz Velocidad: 65 km/h Punto kilométrico: 12+700 Interestación: Canal de San Juan – Agrícola Oriental	Rango de frecuencias involucradas: 0 – 15 Hz Índice de Sperling: 3.524 Calidad de marcha en punto de máxima amplitud: satisfactoria
A nivel de chasis	Aceleraciones transversales: $\pm 50 \text{ m/s}^2$ Frecuencia de mayor amplitud, transversal: 65 Hz Aceleraciones verticales: $\pm 50 \text{ m/s}^2$ Frecuencia de mayor amplitud, vertical: 25 Hz	Vibraciones 10 veces mayores en amplitud a las detectadas a nivel de piso Rango de frecuencias involucradas: 0 - más de 150Hz Método de Sperling: no aplica

