

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

En la actualidad el Metro de la ciudad de México transporta en promedio a 1400 millones de personas anualmente. El sistema se compone de 175 estaciones pertenecientes a 11 líneas instaladas. El parque vehicular consta de 355 trenes, de los cuales 291 son de nueve carros y 31 de seis carros, en ambos casos de rodadura neumática. Los 33 trenes restantes son de rodadura férrea de seis o nueve carros.

2.1 Los trenes

El Sistema de Transporte Colectivo conforma sus trenes de la siguiente manera:

Cada tren, también llamado convoy, está compuesto por nueve carros. Seis de ellos son motrices; es decir, tienen tracción propia, y tres son remolques. Los carros se distribuyen como se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Conformación de un tren neumático de nueve carros.

Donde:

- **M** representa a los carros motrices equipados con cabina. Estos carros cuentan con un mando de control y sus ejes poseen tracción propia. Este carro puede operar individualmente o acoplado con otros carros.

- **N** representa a los carros motrices. Los carros motrices cuentan con tracción propia pero sin cabina de conducción, y por tanto no cuentan con controles de mando.
- **R** representa a los carros remolques. Como su nombre lo indica, es un carro sin tracción, el cual es tirado por un carro con motor.
- **PR** representa al carro remolque central que cuenta con el equipo del sistema de pilotaje automático.

Algunos trenes están compuestos de seis carros y se distribuyen como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Conformación de un tren neumático de seis carros.

Los trenes que son de rodadura de acero tipo ferroviario se denominan férreos ya que no cuentan con llantas o neumáticos y están integrados, cada uno, por seis carros, como se muestra en la Figura 2.3, de los cuales cuatro son motrices, dos son remolques y de igual forma que los trenes de rodadura neumática, uno de ellos está equipado con el sistema de pilotaje automático.



Figura 2.3 Conformación de un tren férreo de seis carros.

Recientemente se han adquirido nuevos trenes férreos de nueve carros y se han realizado ampliaciones de los existentes para que pasen de seis a nueve vagones.

Para obtener una completa operatividad, los trenes cuentan con diversas partes y equipos que realizan funciones específicas.

La caja es el cuerpo de cada vagón; es decir, donde viajan los pasajeros. Esta va montada sobre dos carretillas portadoras llamadas bogies. Cada carretilla o bogie, consta de dos ejes, en cuyos extremos se encuentran fijas ya sea dos llantas neumáticas, o dos ruedas de acero.

Los bogies incorporan los elementos de rodadura, suspensión primaria y secundaria, motores de tracción y sistema de frenado así como determinados componentes o soportes para otros equipos como es la caja de grasa, la cual incluye al captor de control antibloqueo, al captor de equipo registrador electrónico de eventos y al captor del equipo de pilotaje automático.

Las llantas de los trenes neumáticos, que se ilustran en la Figura 2.4 (a), contienen en su interior una rueda de acero que, en caso de una pinchadura, sirve de soporte del peso del carro y lo mantiene sobre las vías; aunque en condiciones normales, la rueda de seguridad no hace contacto con el riel. Adicionalmente para guiar el curso de los carros, el bogie cuenta con cuatro ruedas guías que giran en un plano perpendicular al de las llantas portadoras. Estas ruedas van fijadas a los costados del bogie y se apoyan sobre la barra guía manteniendo así al carro en el centro del carril de rodamiento.

Las ruedas de los trenes férreos están hechas de acero y ruedan directamente sobre rieles metálicos de tipo ferroviario, como se muestra en la Figura 2.4 (b). Estas ruedas soportan la carga del carro y sirven tanto para el desplazamiento (tracción y frenado) de los trenes como para el correcto guiado del tren.

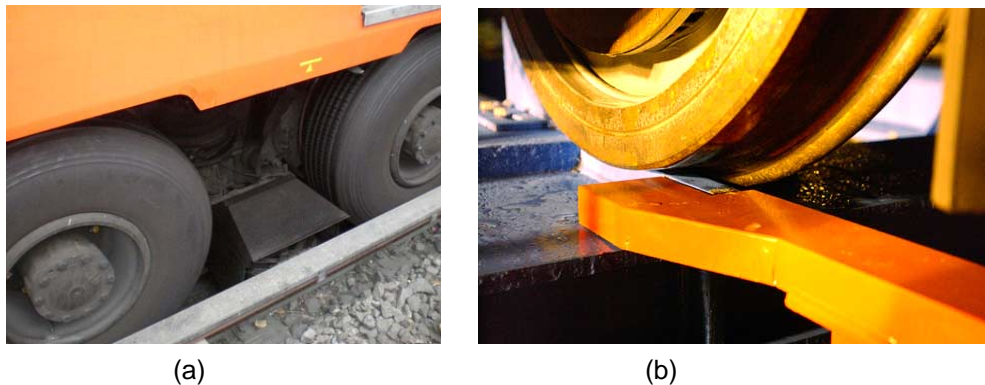


Figura 2.4 (a) Llanta neumática y (b) rueda férrea

Cada bogie de los carros motrices está equipado con dos motores de tracción. El motor de tracción es el encargado de transmitir la fuerza motriz a los ejes de los bogies motores. En los trenes neumáticos, los carros motrices toman la corriente de una barra guía de 750 V que corre a los costados de los rieles, empleando unas escobillas situadas entre las dos ruedas de cada bogie. Los motrices férreos se alimentan por medio de un pantógrafo con un patín de rozamiento de carbón montado en el techo de los carros, el cual hace contacto con una catenaria de cobre o aluminio con 750 V.

Bajo las cajas de los carros motrices, entre los bogies, se encuentra el equipamiento que permite una completa funcionalidad del tren:

- 1 Un compresor que produce aire a presión para el frenado neumático y el cierre de puertas.
- 2 Un generador que genera corriente alterna de 250 V, para la iluminación interna de los carros.

Tanto el compresor como el generador trabajan con 750 V que son proporcionados por la motriz N adyacente.

- 3 Un banco de baterías que suministran energía de baja tensión (72 V), para los circuitos de mando del tren.

Adicionalmente, en uno de los remolques va instalado el captor del pilotaje automático que se encarga de comandar los esfuerzos de tracción-frenado, controlar la marcha (velocidad, aceleración, paradas y arranques) y el espaciamiento mínimo entre trenes, y en general de la supervisión del movimiento del tren.

Los bogies de los trenes neumáticos cuentan con un sistema de freno en cada rueda, el cual consta en hacer presión sobre la banda de rodamiento de las ruedas de seguridad empleando zapatas de madera tratada. El sistema de frenado funciona con aire comprimido.

Los bogies de los trenes férreos cuentan con un sistema de frenos de disco en cada eje, en ambas caras del disco actúan los arneses de frenado de tipo metálico. El sistema de frenado funciona también a base de aire comprimido.

2.2 Las vías

El camino sobre el que corren los trenes está constituido por dos partes esenciales: la infraestructura y la superestructura.

Como infraestructura se entienden las construcciones tales como túneles, puentes, estaciones, alcantarillas, y en general, todas las obras necesarias para el establecimiento de la superficie sobre la cual se tiende la vía (Figura 2.5).



Figura 2.5 La vía.

La superestructura es la vía propiamente dicha. Ésta está constituida por los rieles, durmientes, balasto, sujeciones y demás estructuras que proporcionan el camino sobre el

cual se desplazan los trenes, así como por los sistemas que controlan la circulación, como los aparatos de vía o los equipos de señalización.

Los trenes del Metro corren sobre vías instaladas fijamente sobre el derecho de vía. Se entiende como derecho de vía la porción de vialidad o superficie de rodamiento por donde circulan las unidades de transporte, incluido el peatón.

La plataforma es la porción de terreno destinada para sostener a la superestructura. Esta superficie debe contar con cierta inclinación transversal, pudiendo ser a una o dos aguas, para el debido saneamiento, como se muestra en la Figura 2.6. Esta inclinación suele ser de 3%.



Figura 2.6 Plataforma a una y dos aguas.

La vía es el elemento que soporta al tren y cumple con la función de guiado longitudinal y vertical del vehículo. Están conformadas por un par de carriles o rieles.

Los rieles son las barras de acero sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes y constan de tres partes: cabeza, alma y pie. Éste último suele denominarse también patín, como se observa en la Figura 2.7.

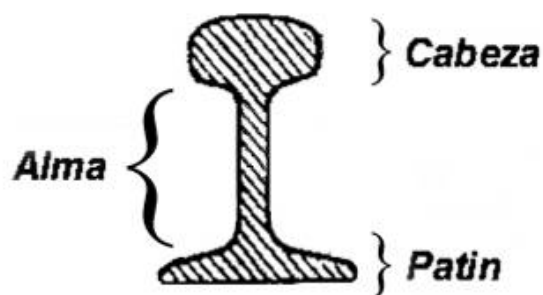


Figura 2.7 Corte transversal de riel.

La cabeza del riel tiene la forma apropiada para que sobre ella se acomoden las ruedas de los trenes de tal forma que se eviten movimientos transversales indeseados. La cara superior del riel, que es la superficie de rodadura, puede ser plana o bien ligeramente curvada, con el fin de mitigar los desgastes recíprocos entre el riel y las ruedas.

Los rieles van apoyados sobre vigas horizontales denominadas durmientes o traviesas. Los durmientes controlan la separación entre los rieles de la vía manteniéndola constante. Dicha distancia se denomina escantillón o trocha. También se encargan de absorber los esfuerzos transmitidos por el vehículo al riel y transmitir esas cargas del riel al balasto. En la Figura 2.8 se observan los rieles apoyados sobre el durmiente, y el escantillón que existe entre ellos.

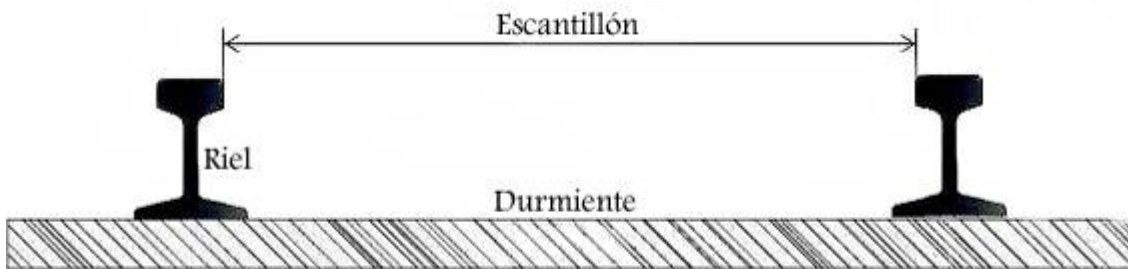


Figura 2.8 Durmiente y escantillón.

Para que la vía sea una estructura sólida funcional es necesario que cuente con sujeciones que mantengan unidos los elementos que conforman la vía. Así se asegura la invariabilidad del escantillón y se facilita la transferencia de las cargas producidas por el material rodante.

Un elemento importante de las sujeciones es la placa de asiento. La placa de asiento es una placa metálica que generalmente se coloca entre cada durmiente y el patín del riel. Esta placa aumenta la superficie de apoyo del riel con lo que se reduce la presión específica transmitida por el riel, protegiendo al durmiente y aumentando la resistencia a desplazamientos transversales.

Para mantener unida la placa de asiento tanto con los rieles como con los durmientes, son necesarios elementos de sujeción como pueden ser clavos, tornillos, grapas o clips, que se incrustan o se adhieren en el cuerpo del durmiente por un lado mientras por el otro sujetan el patín del riel. En la Figura 2.9 se observa un ejemplo de sujeciones.

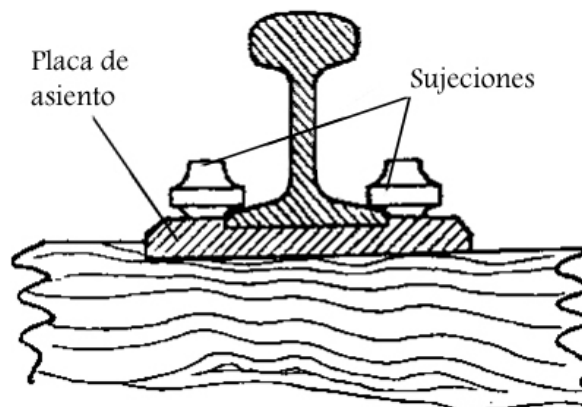


Figura 2.9 Sujeciones.

Para cubrir largas distancias es necesario conectar determinado número de rieles. A las uniones longitudinales de dos rieles consecutivos se les denomina juntas.

Las bridas son conexiones metálicas cuya función es la de unir los extremos de los rieles de manera que sus ejes longitudinales coincidan. Las juntas deben permitir la libre dilatación, por lo que deben limpiarse y lubricarse adecuadamente.

Las bridas se fijan entre sí y a los rieles por medio de tornillos que no permiten el aflojamiento, y son asegurados utilizando arandelas elásticas. Puede prescindirse de las bridas si se sueldan directamente los dos rieles.

Con los elementos descritos hasta este momento es posible tender un camino adecuado para el viaje de los trenes. Sin embargo, para proteger la superestructura, los durmientes generalmente se encuentran instalados sobre una superficie granular, como la mostrada en la Figura 2.10, llamada balasto.



Figura 2.10 Balasto.

Las funciones principales del balasto son soportar los esfuerzos a los que está sometida la vía y transferir las cargas que reciben los durmientes hacia la plataforma sobre la que se encuentra instalada la vía, de tal forma que no se supere la carga máxima admisible de cada durmiente. Igualmente, amortigua las vibraciones que se generan al paso de los trenes fungiendo como disipador de energía.

También protege la plataforma de las variaciones de humedad del ambiente, y ayuda a estabilizar vertical, longitudinal y transversalmente la vía, además de proporcionar una rodadura suave a los trenes para el confort de los pasajeros.

En las labores de mantenimiento permite la recuperación de la calidad geométrica de la vía mediante operaciones de alineación y nivelación.

Las piedras del balasto son compactadas bajo los durmientes para asegurar que el durmiente quede soportado firmemente. Este método se conoce como bateo.

Para que reparta eficientemente las cargas que recibe a lo largo de la plataforma sobre la cual corre la vía, la capa de balasto debe tener un espesor tal que forme una capa ancha que soporte el peso de los trenes. Las piedras deben ser biseladas para una mejor sujeción de los durmientes y deben ser de roca dura para evitar que se rompan. Además deben tener un tamaño de entre 3 y 6 cm para proporcionar un buen apoyo al durmiente y asegurar el drenaje y evacuación de las aguas pluviales.

2.3 Esfuerzos dinámicos en trenes

Entre la vía y los vehículos existe una interacción muy intensa. Por una parte, los vehículos ejercen esfuerzos estáticos y dinámicos sobre la vía, mientras que por la otra las imperfecciones de la vía afectan tanto a la estabilidad de los vehículos, ya que pueden provocar su descarrilamiento, como al confort de los pasajeros.

De estas interacciones, los análisis de los esfuerzos dinámicos proporcionan resultados sensiblemente diferentes de los estáticos, ya que tienen en cuenta las cargas dinámicas aleatorias ejercidas por las ruedas al circular por una vía con defectos de nivelación y de trazado, las cuales dependen a su vez de las características de la vía y del vehículo.

La vía está caracterizada por un conjunto de elementos con módulos de elasticidad y coeficientes de amortiguamiento variables que, como ya se ha mencionado, transmiten las cargas dinámicas de las ruedas a la plataforma. Como consecuencia de estas cargas sufre una deformación.

Dependiendo de las condiciones de la vía puede darse el movimiento de galope o cabeceo, que es la oscilación de la caja del carro alrededor de un eje transversal, el movimiento de balanceo cuando la oscilación ocurre alrededor de un eje longitudinal, o bien, el movimiento de lazo cuando es alrededor de un eje vertical, así como el movimiento de vaivén paralelo al plano de rodadura. Estos movimientos de la caja del tren se ilustran en la Figura 2.11.

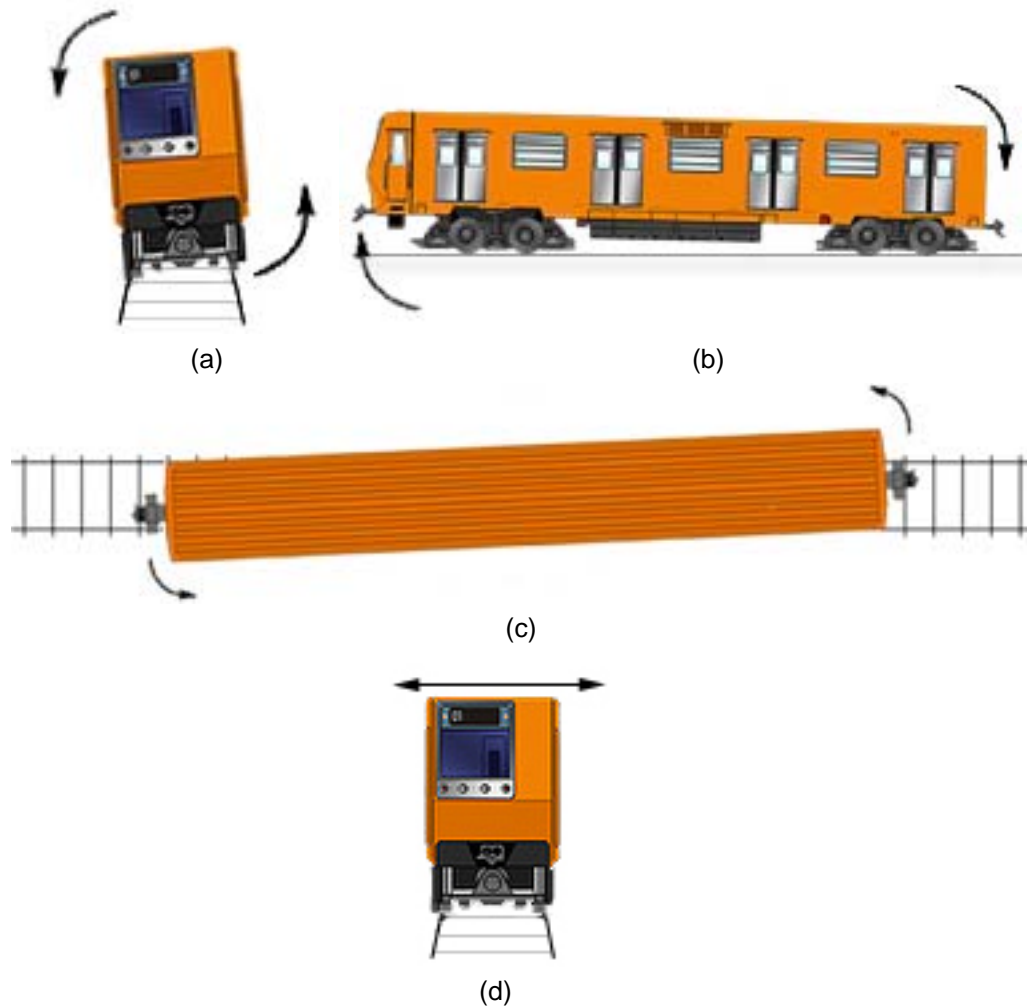


Figura 2.11 Movimientos de la caja del tren. (a) De balanceo, (b) de cabeceo, (c) de lazo y (d) de vaivén.

Los esfuerzos ejercidos por los vehículos sobre la vía ocurren en tres direcciones: longitudinal, vertical y transversal.

Los esfuerzos longitudinales, debidos fundamentalmente a las aceleraciones y frenados, representan solo una pequeña parte de las sollicitaciones a la superestructura. Los esfuerzos verticales y transversales son mucho más importantes ya que pueden generar deformaciones en la vía y conducir al tren a su descarrilamiento.

La respuesta de la vía a los esfuerzos verticales se produce en general en el campo elástico, lo que simplifica el estudio matemático de los fenómenos. La resistencia de la plataforma es suficiente para soportar los máximos esfuerzos dinámicos que recibe.

En cambio, la respuesta de la vía frente a los esfuerzos transversales, como los momentos de sujeción entre carril y durmiente, y el rozamiento durmiente-balasto, no responden a leyes

elásticas. El carril está sometido a esfuerzos secundarios de torsión debidos a la excentricidad del punto de aplicación de los esfuerzos, lo que puede conducir a deformaciones residuales importantes cuando los esfuerzos superan un cierto límite, relativamente bajo.

En la práctica, los defectos de nivelación de la vía y de los vehículos producen sobrecargas dinámicas aleatorias, por lo que el estudio de la estabilidad de un vehículo en la vía resulta complicado. Sin embargo, sus características han podido establecerse gracias a las numerosas medidas efectuadas en vías. Los resultados experimentales se interpretan y extrapolan mediante técnicas de análisis estadístico.

Las circulaciones de los trenes sobre una vía férrea provoca la emisión de vibraciones que son transmitidas al suelo a distancias relativamente grandes. Vibración es el movimiento que experimenta un cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio. El origen de estas vibraciones en los trenes es múltiple:

- La sucesión de cargas rodantes.
- Los fenómenos de deslizamiento rueda-carril.
- Las imperfecciones geométricas de las ruedas y los rieles.

Las vibraciones emitidas se pueden clasificar en tres bandas de frecuencias:

- De 0 a 15 Hz, son debidas fundamentalmente a las masas suspendidas y se transmiten bien por el suelo.
- De 15 a 150 Hz, son causadas principalmente por las oscilaciones de las masas no suspendidas. El suelo las amortigua de forma importante, pero pueden resultar muy molestas ya que pueden inducir vibraciones en otras estructuras (paredes, techos) y originar ruidos perceptibles.
- Más de 150 Hz, son debidas a los fenómenos de deslizamiento rueda-carril. Son amortiguadas muy rápidamente por el suelo, pero pueden transmitirse a través del carril y la rueda, empleándolos como superficies radiantes, y producir lo que se conoce como ruido de rodadura.

A este respecto, debe tenerse en cuenta que el nivel de vibraciones está condicionado sobre todo por las superficies de los carriles y de las ruedas.

En consecuencia, el impacto sobre el entorno es de dos naturalezas distintas: por un lado las vibraciones que afectan al confort y seguridad de las personas y a la estabilidad de las construcciones en las cercanías de la vía, y por otro, el ruido, emitido por los vehículos o inducido en las estructuras cercanas a la vía.

2.4 Equipo de instrumentación

El equipo empleado previo al desarrollo de esta tesis fue el registrador DASH 18X de Astro-Med, Inc (Figura 2.12). Este registrador permitía el monitoreo y grabación de hasta 18 señales.

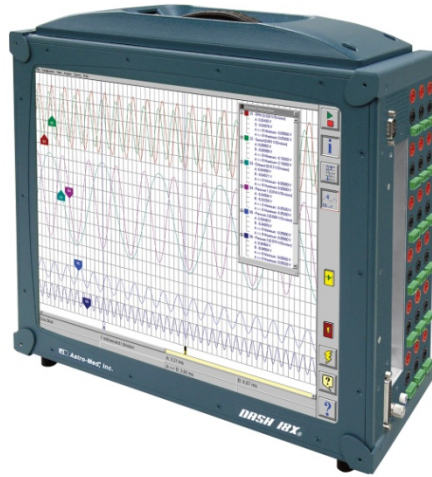


Figura 2.12 Registrador DASH 18X.

Requería ser alimentado con 127 V de CA, por lo que era necesario un inversor que convirtiera los 72 V de CD del banco de baterías del tren a la tensión necesaria.

Para realizar el sensado de las vibraciones verticales, longitudinales y transversales a la dirección de desplazamiento del convoy, eran empleados tres acelerómetros piezoresistivos, instalados sobre un fragmento de riel, orientados perpendicularmente entre sí.

Las señales adquiridas se enviaban al DASH a través de una etapa de acondicionamiento y amplificación analógica, con capacidad para cinco acelerómetros. Los registros eran almacenados en el disco duro del DASH.

Posteriormente, la información registrada se graficaba y manualmente se determinaban los puntos en los que se observaran altos niveles de vibración. Al comparar las gráficas obtenidas con la gráfica del perfil de la línea, se estimaba la ubicación donde se había presentado la vibración. Se consideraba que por encima de 1.5 m/s^2 las vibraciones podían generar problemas en la vía.

Para el desarrollo del nuevo sistema de adquisición, medición y análisis se dispuso esencialmente del siguiente equipamiento:

- *Controlador CompactRIO®*. Un controlador CompactRIO (cRIO) de *National Instruments®* (NI) es un sistema reconfigurable de control, automatización y adquisición basado en FPGA (Arreglo de compuertas lógicas programables, *Field Programmable Gate Array*), diseñado para aplicaciones que requieren alto rendimiento y fiabilidad. El equipo combina una arquitectura embebida abierta con un tamaño pequeño, extrema robustez y módulos industriales dedicados e intercambiables. El modelo del controlador con el que cuenta el laboratorio es el cRIO-9014.
- *Módulos NI de entrada/salida de la serie C*. Los módulos de entrada/salida de la serie C contienen acondicionamiento de señales integrado para rangos de voltaje extendidos o tipos de señales industriales, por lo que es posible conectar sensores y actuadores directamente a los módulos sin necesidad de un acondicionamiento adicional. Existen diversos tipos de módulos dedicados; los módulos con los que cuenta el laboratorio son:
 - *NI 9233*: cuatro módulos de entradas Analógicas IEPE (Piezoeléctrica de Electrónica Integrada, *Integrated Electronics Piezoelectric*) con cuatro canales de 24 bits y ± 5 V.
 - *NI 9219*: un módulo universal de entradas analógicas con cuatro canales de 24 bits.
 - *NI 9264*: un módulo de salidas analógicas de voltaje con 16 canales de 16 bits y ± 10 V.
 - *NI 9211*: un módulo para termopares con cuatro canales.
- *Acelerómetros piezoeléctricos IEPE DeltaTron*. DeltaTron es el nombre genérico de acelerómetros y productos de acondicionamiento de señales de la empresa *Brüel&Kjær*. Los acelerómetros DeltaTron (en específico los modelos tipo 4507 y 4508) presentan una combinación de alta sensibilidad, bajo peso y reducidas dimensiones físicas, además de estar diseñados específicamente para soportar el duro ambiente de la industria automotriz; características que los hacen ideales para mediciones de vibraciones en automóviles y trenes, así como análisis modal en aeronaves, trenes y satélites. El laboratorio cuenta con seis acelerómetros DeltaTron modelo 4507-B-004.