



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA  
PESAJE DINÁMICO A ALTA VELOCIDAD**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:**

**LUIS ROBERTO CHARGOY GÓMEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. RODOLFO PETERS LAMMEL**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. JUNIO, 2015.**



## **AGRADECIMIENTOS**

*“Felicidad no es hacer lo que uno quiere sino querer lo que uno hace”.* Jean Paul Sartre.

A mi amiga y esposa, Ale, gracias por tu amor, cariño y apoyo a lo largo del tiempo que hemos estado juntos y del que estaremos; y en especial en este año para concretar esta etapa profesional. Te amo.

A mis hijos Danny, Robertito y Naty, los amo con todo mi corazón.

Con mucho cariño quiero dedicar este trabajo a mis padres Delia y Roberto. Mami, los tiempos no se dieron para que hubieras visto concretada esta etapa de mi vida, pero se que estuviste acompañándome en cada momento. Papi, doy gracias a Dios por permitir que estés presente en este importante momento.

A mis hermanas Gis y Gabby, gracias por su amor, consejos, amistad e invaluable apoyo que me brindaron en esos días de escuela, de estudio, de diversión, de trabajo, para cumplir una de mis metas.

A mis amigos de toda la vida, gracias por su apoyo y amistad en la época estudiantil que vivimos juntos.

Al Ing. Rodolfo Peters, gracias por su asesoría, tiempo y buenas pláticas para cumplir una meta más.

*“No hay que confundir nunca el conocimiento con la sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir”.* Sorcha Carey.

Capítulo 1.	Introducción al tema.
1.1	Accidentes
1.2	Alta velocidad y exceso de carga
1.3	Efectos en infraestructura carretera
Capítulo 2.	Sistemas de pesaje: estático, cuasi-estático y dinámico.
2.1	Pesaje estático
2.2	Pesaje cuasi-estático
2.3	Pesaje dinámico
Capítulo 3.	Problemas para un pesaje dinámico.
3.1	Tiempo de respuesta
3.2	Captura de datos
Capítulo 4.	Instrumentación analógica y digital.
4.1	Ventajas y desventajas
Capítulo 5.	Desarrollo del prototipo.
Capítulo 6.	Pruebas.
Capítulo 7.	Conclusiones.
	Bibliografía.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Desde principios de la historia el hombre ha tenido la necesidad de transportar personas o materiales de un sitio a otro. En un inicio se hacía con el propio desplazamiento del hombre cargando sus objetos, posteriormente vino el descubrimiento de la rueda y revolucionó la forma de transportar.

Con la domesticación de animales, como el caballo, se comenzó a transportar las cosas en carretas que eran jaladas por los caballos, aunque existía la limitante de la fuerza del caballo. Posteriormente con la invención de la máquina de vapor, apareció el ferrocarril, facilitando el transporte de cargas pesadas y dominando el sector hasta la aparición del automóvil a finales del siglo XIX.

En la actualidad el transporte de carga vía terrestre es la opción más viable (costo-beneficio) para el traslado de productos de un punto a otro del país, pero a su vez genera también un mayor desgaste a la infraestructura carretera en comparación con el que generan los vehículos particulares.

El sobrepeso en el transporte de carga es una práctica ampliamente extendida alrededor del mundo. Dicha práctica es tan común que tiene cierta lógica, desde el punto de vista del transportista, ya que al reducir el número de viajes requeridos para mover cierta cantidad de carga, baja el costo promedio por tonelada – kilómetro, aumentando así la productividad del transportista. Los niveles de carga excesivos además de representar un mayor deterioro al pavimento, también afecta el comportamiento dinámico de los vehículos.

Si bien existe la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 que regula el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal; es sabido que algunos transportistas sobrecargan sus vehículos para realizar menos viajes, lo que se traduce en reducción de tiempo y gasto, como se mencionaba anteriormente.

Considerando lo anterior, el objetivo de esta tesis es diseñar un prototipo con el cual se pueda realizar un pesaje dinámico de vehículos de carga en cualquier punto de la carretera, para poder identificar a aquellos que tengan un exceso de carga y entonces realizar una inspección más precisa (pesaje estático) en el siguiente punto de revisión. Con esta medida se podría infraccionar a los transportistas que no respeten los niveles de carga permitidos y así contribuir en un pequeño incremento en los niveles de seguridad en las carreteras.

### **1.1 Accidentes.**

Los accidentes en autotransportes de carga son un efecto directo de la gran cantidad de transportes de carga que circulan a diario por las carreteras de nuestro país, sumado a la negligencia de sobrecargar los vehículos para reducir costos.

En el Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales (2005) elaborado por el Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, podemos encontrar que en los casi 55,258 km de la red de carreteras vigiladas por la Policía Federal ocurrieron un total de 29,468 accidentes. Las circunstancias que contribuyeron al accidente se desglosan en: atribuibles al conductor; atribuibles al vehículo; atribuibles al camino y atribuibles a agentes naturales. Los mayores porcentajes están relacionados con los conductores: por exceso de velocidad (39.4%), por invasión de carril (10.1%) y por imprudencia o intención (6.2%). Respecto a los vehículos la causa más común es por falla en los neumáticos (2.0%); mientras que para causas atribuibles al camino los mayores porcentajes los representa el pavimento mojado (7.5%) y piso resbaloso (4.9%). Por último, dentro de las causas de agentes naturales la lluvia representa el 6.9%.

De forma muy similar para las estadísticas de los años 2006 al 2009 como se observa en la figura 1, podemos encontrar que los porcentajes mantienen valores muy cercanos. Incluso en el año 2009 el porcentaje de accidentes atribuibles al conductor por exceso de velocidad llegó hasta un 44.7%.

Año	Accidentes	Causas						
		Conductor			Vehículo	Camino		Agentes Naturales
		Exceso velocidad	Invasión carril	Imprudencia	Neumáticos	Pavimento mojado	Piso resbaloso	Lluvia
2005	29,468	39.4%	10.1%	6.2%	2%	7.5%	4.9%	6.9%
2006	29,039	36.3%	9.4%	7.3%	2.1%	8.7%	6.5%	7.3%
2007	29,640	39%	9.4%	5.9%	2.1%	8.6%	6.5%	7.1%
2008	30,379	43.4%	10.1%	5.7%	2.4%	6.2%	4.8%	5.4%
2009	29,587	44.7%	9.6%	5.7%	2.5%	6%	4.7%	5%

Figura 1. Tabla de estadísticas de accidentes de los años 2005 al 2009.

Si bien el factor principal es el exceso de velocidad, debemos tomar en cuenta aquellos casos en el que los conductores de vehículos de carga también circulan con exceso de carga, lo cual como ya habíamos comentado anteriormente afecta el comportamiento dinámico de los vehículos.

## 1.2 Alta velocidad y exceso de carga

Como sabemos la velocidad está definida como una magnitud física que relaciona la distancia recorrida por un cuerpo en movimiento y el tiempo que necesita para realizar dicho recorrido. En el tema de circulación será la distancia recorrida dividida por el tiempo que el vehículo tarda en recorrerla y suele expresarse en kilómetros por hora (km/h).

Una vez definida la velocidad su trascendencia es fácilmente comprensible: todo vehículo en movimiento acumula una energía llamada energía cinética que es proporcional a la masa del vehículo y a su velocidad elevada al cuadrado.

Energía cinética

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p}{g}v^2$$

m = masa del vehículo, v = velocidad, p = peso del vehículo, g = gravedad

Detener un vehículo se puede conseguir de múltiples formas:

- Dejando de acelerar.
- Reduciendo las velocidades (freno de motor).

- Frenando.
- Parando contra un obstáculo.

Por lo tanto cuanto mayor sea la velocidad en el momento de algún impacto, mayor será la cantidad de energía cinética que habrá de absorberse. El problema es el tiempo que se tarda en eliminar esa energía cinética.

Si esta se elimina en un tiempo amplio, por ejemplo frenando suavemente, no se producirá ningún efecto sobre la seguridad, pero si en lugar de eso se frena bruscamente o el vehículo choca contra un obstáculo fijo o móvil (un muro, un árbol, otro coche, etc.), esa energía se elimina de forma repentina y el choque será violento agravando las lesiones y los daños ocasionados dependerán fundamentalmente de la velocidad.

Una velocidad inadecuada a las circunstancias de la carretera, del conductor o del vehículo se manifiesta como un claro factor de riesgo ya que incrementa la probabilidad de cometer algún error humano durante el manejo.

No debe olvidarse que cuanto más rápido se conduce, mayor es el recorrido antes de detener el vehículo. La distancia total que recorre el vehículo hasta ser detenido es igual a la suma de la distancia de reacción más la distancia de frenado (figura 2).

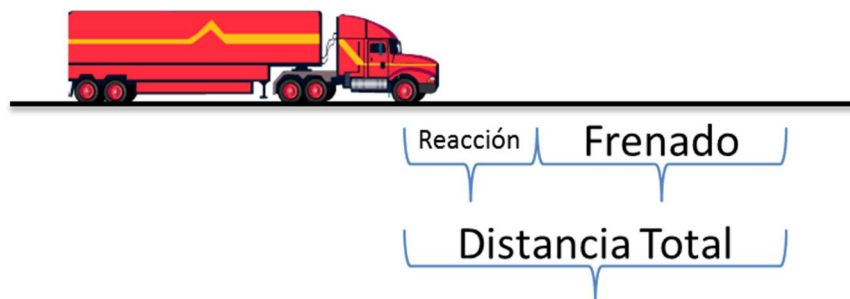


Figura 2. Distancia total de frenado de un vehículo.

Así desde que se percibe un peligro hasta que se acciona el pedal del freno transcurre un lapso de tiempo (entre  $\frac{1}{2}$  segundo y 1 segundo para un conductor promedio), durante el

cual se recorre un espacio que se denomina “distancia de reacción” y cuya longitud estará en función de la velocidad a la que se circula.

Por ello un exceso de velocidad incrementa la distancia recorrida desde el momento en el que un conductor detecta el peligro hasta que pisa el pedal de freno, dificultando la rectificación de la trayectoria y permitiendo un menor control del vehículo y además repercute negativamente en la anticipación, factor que es fundamental para evitar el accidente, restando milésimas de segundo, que a veces son tan necesarias para eludir un obstáculo y evitar algún accidente.

Por ejemplo, durante el segundo de tiempo que transcurre desde que el conductor advierte la situación de peligro hasta que pisa el pedal del freno, un vehículo que circule a 120 km/h recorrerá una distancia de más de 33 metros sin poder evitarlo.

La distancia de frenado es aquella que recorre el vehículo desde que se acciona el pedal del freno hasta que se detiene el vehículo y viene determinada principalmente por la velocidad, pudiendo verse alterada por factores como el peso del vehículo (debiendo considerar la carga que pueda transportar y la disposición de la misma), el estado de los frenos y llantas, las condiciones de la carretera (mojada, seca, resbalosa, con grava, etc.), y condiciones del clima (lluvia, nieve, hielo, etc.).

El exceso de velocidad implica mayor:

- Riesgo de accidente.
- Gravedad de las lesiones que puedan producirse.
- Posibilidad de ser sancionado.
- Nivel de estrés.
- Consumo de combustible.
- Nivel de emisiones contaminantes.
- Desgaste mecánico del vehículo.



Por ello, la velocidad es una variable a tener muy en cuenta como causa de un accidente. Por otro lado, se sabe que por lo general el establecimiento de un límite de velocidad produce una disminución considerable en el número de accidentes mortales.

### **1.3 Efectos en infraestructura carretera.**

Desde un punto de vista mecánico, la carga aplicada al pavimento de las carreteras está directamente relacionada con el peso y las dimensiones de los vehículos que transitan sobre éstas. Esta carga se traduce como una distribución de esfuerzos que conjugados con las condiciones estructurales de las diversas capas de la carretera, provocan un estado de desgaste o deterioro del pavimento, con la consecuente disminución de la capacidad de carga de la estructura, aumento en el mantenimiento y reducción de los niveles de seguridad y comodidad en el manejo.

Mayores niveles de carga conducen a una mayor probabilidad de daños en carreteras y puentes. Además de lo anterior, el incremento en carga lleva consigo un efecto considerable en el comportamiento dinámico del vehículo que sumado a las condiciones superficiales de la carretera, repercute sobre su estabilidad.

Debido a la creciente necesidad de movimiento de mayores cantidades de productos de un lugar a otro, se ha demandado cada vez una mayor capacidad de carga de los vehículos pesados para minimizar el costo por tonelada-kilómetro. La importancia de establecer y controlar el peso de los vehículos se deriva, entre otros aspectos, del efecto que éste tiene sobre el deterioro del pavimento y los niveles de seguridad de las carreteras.

Es generalmente reconocido que el tránsito de los vehículos pesados causa daños estructurales a las carreteras, los que varían exponencialmente de acuerdo con el peso por eje de los vehículos. El valor del exponente varía según las circunstancias entre 2.4 y 6.6; se considera que normalmente el valor se aproxima a 4.5 (Rolt, 1981). El valor de respaldo en el modelo para el diseño y mantenimiento de carreteras del Banco Mundial (modelo HDM “Highway Design and Maintenance Standards Study) es de 4.0. En éste se identifica

un eje equivalente (EE) como el poder destructivo de un eje cargado con un peso de 18,000 libras (8,165 toneladas), siendo éste la unidad básica de análisis.

Por ejemplo, un camión de dos ejes, cargados con 5.0 y 6.0 toneladas, respectivamente, suponiendo que el valor del exponente es de 4.5, tiene un valor en ejes equivalentes de 0.36. El mismo camión cargado con 7.5 toneladas sobre el eje delantero y 15.0 sobre el trasero, tiene una equivalencia de 16.1, y si se cargan 2.5 toneladas adicionales al eje trasero, la equivalencia sube a 31.6.

La equivalencia en ejes fluctúa un poco según la calidad del pavimento, en general un camión con un valor determinado en ejes equivalentes causa más daños en carreteras de calidad inferior que en otras de mejor calidad.

A pesar de que en México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal; un estudio llevado a cabo en diez estaciones en México, reporta que aproximadamente un 30% de vehículos operan con mayores cargas por eje que el nivel recomendado, sobrepasando algunos vehículos en casi un 100% los límites de carga.

## **2. SISTEMAS DE PESAJE: ESTÁTICO, CUASIESTÁTICO Y DINÁMICO**

En física clásica, el peso es una medida de la fuerza que ejerce un cuerpo sobre un punto de apoyo originada por la acción del campo gravitacional local sobre la masa de dicho cuerpo, por lo tanto el peso de un cuerpo puede ser calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$P = m * g$$

P = peso; m = masa y g = gravedad.

En la vida diaria es posible determinar el peso de muchas cosas a través de básculas, pero la situación se torna compleja cuando queremos determinar el peso de objetos muy grandes o muy pesados, como autos, vehículos, aviones, ferrocarriles, etc. Para poder realizar estas

mediciones, se hace uso de las propiedades de algunos materiales que pueden ser mecánicas, eléctricas, químicas, ópticas, etc.

A través del uso de transductores que son dispositivos capaces de convertir un determinado tipo de energía de entrada en otra diferente a la salida, podemos realizar algunas mediciones que de manera directa no podrían hacerse. Debido a la facilidad con la que se transmite y amplifica la energía eléctrica, los transductores más utilizados son los que convierten otras formas de energía, como mecánica, térmica, óptica o sonora en energía eléctrica.

Por mencionar algunos tipos de transductores, podemos encontrar las galgas extensiométricas, cristales piezoeléctricos, medidores de fuerza a través de presión como células de carga hidráulica o neumática.

Para realizar el pesaje existen diferentes métodos: estático, cuasiestático y dinámico. El estático y cuasiestático si bien son los que cuentan con una mayor precisión, presentan la desventaja de ser poco eficaces en la medición de grandes volúmenes de vehículos. El dinámico aunque cuenta con una precisión menor, presenta la ventaja de poder realizar el pesaje en cualquier punto de la carretera a la velocidad de crucero (80 a 120 km/h) que circule el vehículo, en cuestión de segundos.

## **2.1 Pesaje Estático**

El método más utilizado para el pesaje estático de vehículos consiste en la utilización de grandes básculas (figura 3), con la desventaja de que en este tipo de maniobras se necesita detener por completo el vehículo para realizar la medición.

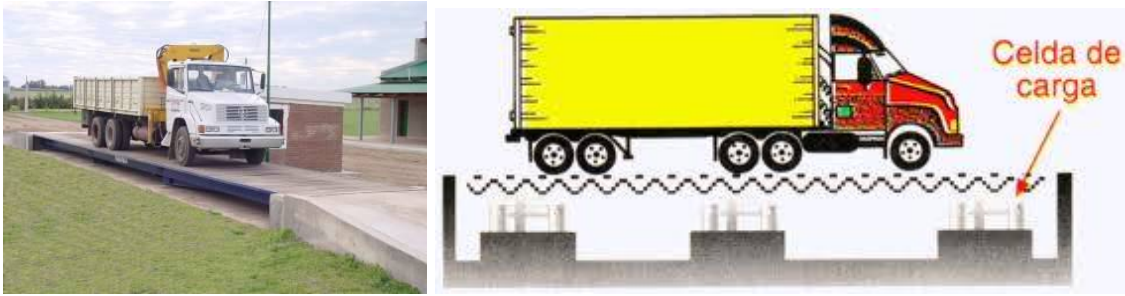


Figura 3a. Báscula estática para pesaje de camiones.

3b. Gráfico de ubicación de celdas de carga en una báscula.

Estas básculas están compuestas por celdas de carga, que son el tipo más común de transductor de fuerza, que a su vez tienen adheridas varias galgas extensiométricas de resistencia eléctrica. Una galga extensiométrica o “strain gage” es un elemento que actúa como transductor, transformando la variación de una magnitud mecánica como la deformación en la variación de una magnitud eléctrica como el voltaje.

La técnica de la extensimetría consiste básicamente en adherir una resistencia eléctrica deformable (galga extensiométrica) a un elemento estructural que permita determinar las fuerzas actuantes en función de los esfuerzos presentes, de manera que la resistencia está sujeta a la misma deformación que el elemento estructural (figura 4). Esta deformación producirá un cambio en la geometría y por tanto un cambio en el valor de la resistencia que a su vez se relaciona con las fuerzas actuantes.

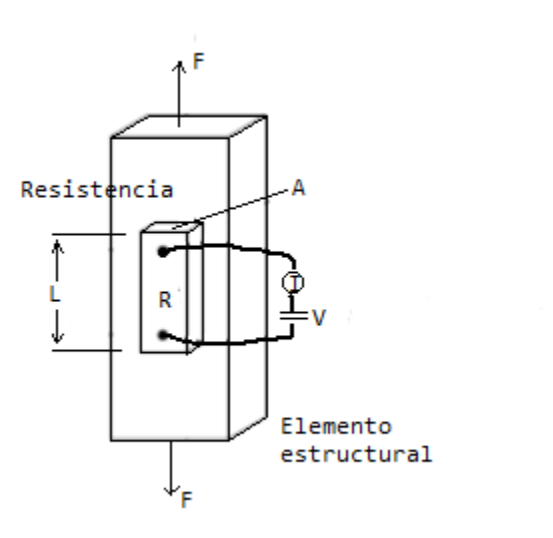


Figura 4. Principio de extensimetría eléctrica.

Se entiende por “strain” o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. En términos matemáticos podemos definir strain ( $\epsilon$ ) como la fracción de cambio en longitud, como se muestra en la figura 5.

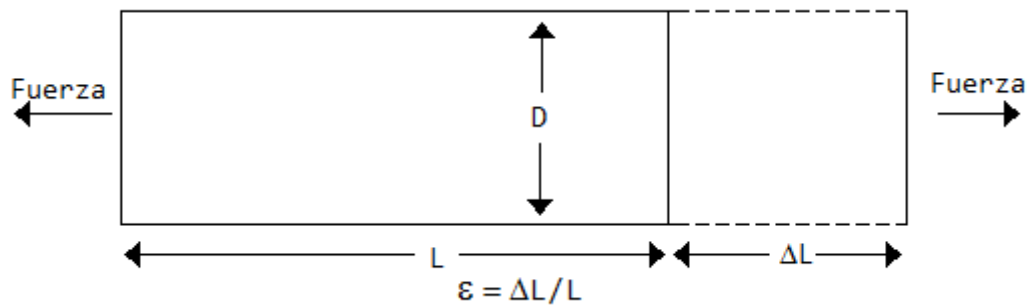


Figura 5. Definición de “strain”.

El parámetro “strain” puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión). Si bien es adimensional, en muchos casos se suele expresar en unidades de mm/mm. En la práctica, la magnitud de medida de “strain” es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain ( $\mu\epsilon$ ), que es  $\epsilon \times 10^{-6}$ .

Cuando una barra es tensionada por una fuerza uniaxial como se muestra en la figura anterior, un fenómeno conocido como esfuerzo de Poisson causa que la circunferencia de la barra se contraiga en la dirección transversal o perpendicular. La magnitud de esta contracción transversal es una propiedad del material indicado por su coeficiente de Poisson.

La relación de Poisson  $\nu$  del material es definido como el radio negativo del esfuerzo en la dirección transversal (perpendicular a la fuerza) al esfuerzo en la dirección axial (paralelo a la fuerza) o  $\nu = \epsilon_T / \epsilon$ . Por ejemplo, el radio de Poisson para el acero varía de 0.25 a 0.3.

Los materiales más usados para la manufactura de las galgas son las aleaciones de Cobre – Niquel, Niquel – Cromo, Niquel – Cromo – Molibdeno y Platino – Tungsteno. Las capacidades de carga de estos extensómetros varían de 5 N a 50 MN.

El tipo de “strain gage” más utilizado es el confinado en papel metálico, que consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de rejilla, lo que maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo en la dirección paralela, figura 6. La rejilla está pegada a un fino respaldo llamado “carrier”, el cual está sujeto directamente a la pieza bajo medida, por lo tanto, el esfuerzo experimentado por la pieza es transferido directamente al “strain gage”, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica.

Los “strain gages” se encuentran en el mercado con valores nominales de resistencia de 30 a 3000 $\Omega$ , los valores más comunes son 120, 350 y 1000 $\Omega$ .

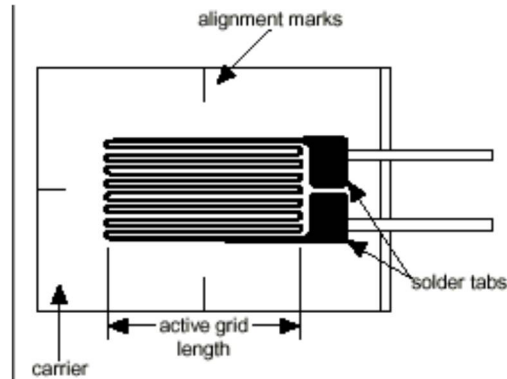


Figura 6. Strain gage metálico.

## 2.2 Pesaje cuasiestático

Para el pesaje cuasiestático existen otro tipo de básculas como se muestran en la figura 7, que tienen la característica de poder ser instaladas de manera fija o temporal y permiten realizar la medición a una velocidad baja, usualmente del orden de unos 8 km/h.

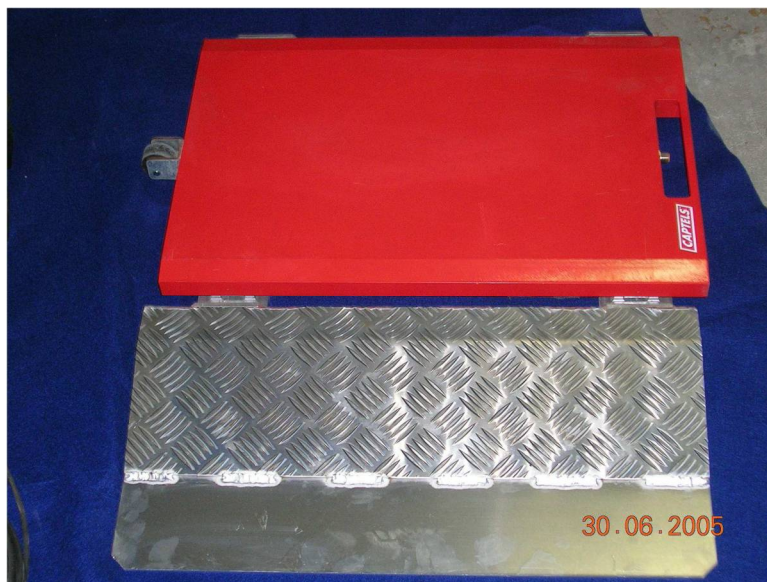


Figura 7a. Instalación fija de báscula para pesaje cuasiestático.

7b. Vehículo sobre báscula de instalación temporal.

7c. Báscula.

Aunque este tipo de pesaje también se puede considerar dinámico ya que el vehículo no se encuentra en alto total, diversas pruebas han demostrado que no resultan eficientes para mediciones a altas velocidades como las que normalmente se observan en carreteras.

### 2.3 Pesaje Dinámico

Como se cita en la Publicación Técnica No. 247 (Año 2004) del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

*“La historia del desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico ha mostrado los diversos intentos realizados para conocer el peso de los vehículos, sin recurrir a básculas estáticas. Los dispositivos han variado con respecto a los principios de medición utilizados, a la forma de los instrumentos y a las adaptaciones y adecuaciones de estructuras existentes en las carreteras. Estos desarrollos responden a las necesidades de los respectivos departamentos de transporte para establecer una armonía entre los vehículos y las carreteras y puentes.”*

En el año de 1973 se desarrolló en la República Federal Alemana un proceso sistemático de pesaje de vehículos en movimiento, el proyecto *Long-Term Observations at Selected Road Sections*<sup>1</sup> llevado a cabo por el *Federal Highway Research Institute (FHRI)* tomó como base los resultados obtenidos en pruebas realizadas en Estados Unidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. Después de varios años de manufactura y prueba de prototipos se prepararon tres diferentes detectores de carga por eje: pesadoras hidráulicas, pesadoras con base en una placa sujeta a flexión y el uso de un cable coaxial piezocerámico.

Actualmente el pesaje dinámico o “weigh in motion” (WIM), se realiza mediante la utilización de sensores piezo-eléctricos, diversas empresas en Europa utilizan los sensores de tipo linguini (6,6 mm ancho x 1,6 mm espesor), ideales para instalaciones temporales o fijas, su flexibilidad le permite ajustarse al perfil de la carretera y por sus dimensiones sólo se necesita un pequeño corte para su instalación minimizando así el daño sobre la carretera. Este tipo de sensores proporcionan una precisión del pesaje de  $\pm 15\%$  para peso por eje y  $\pm 10\%$  para peso total del vehículo.

---

<sup>1</sup> Hernández, J.R. y Fabela, M. Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento. Instituto Mexicano del Transporte. 2004, p. 5.



Para pesar vehículos circulando en carretera a alta velocidad, la tecnología disponible consiste en colocar sobre la carretera unos sensores piezoeléctricos, utilizando también un lazo inductivo para separar unos vehículos de otros. Existen varias configuraciones que pueden utilizarse, todas ellas pesan y clasifican, además de detectar la velocidad con una buena precisión.

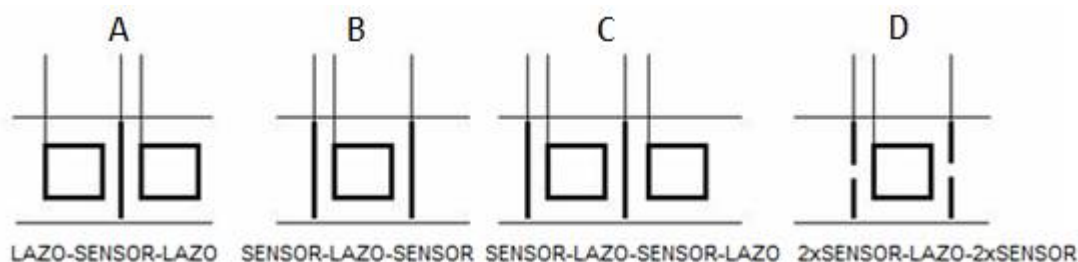


Figura 8. Distintas configuraciones utilizando sensores de tipo linguini.

La configuración más utilizada es “sensor-lazo-sensor” (figura 8B), que además de pesar y clasificar según el número de ejes es redundante. La configuración “2xSensor-lazo-2xSensor” (figura 8D), es utilizada cuando se desea conocer además el peso por rueda.

En la figura 9 se puede observar una instalación utilizando 2 sensores piezoeléctricos y 1 lazo inductivo, y en la figura 10 se presenta el esquema de instalación para una instrumentación en una carretera de doble sentido de 6 carriles. Los sensores piezoeléctricos miden la velocidad de los ejes y el espacio entre ellos, el lazo inductivo informa de la presencia del vehículo y mide la longitud del mismo, además si se emplean sensores de Clase I, también se puede obtener los datos de pesaje de cada eje.



Figura 9. Instalación en una carretera.

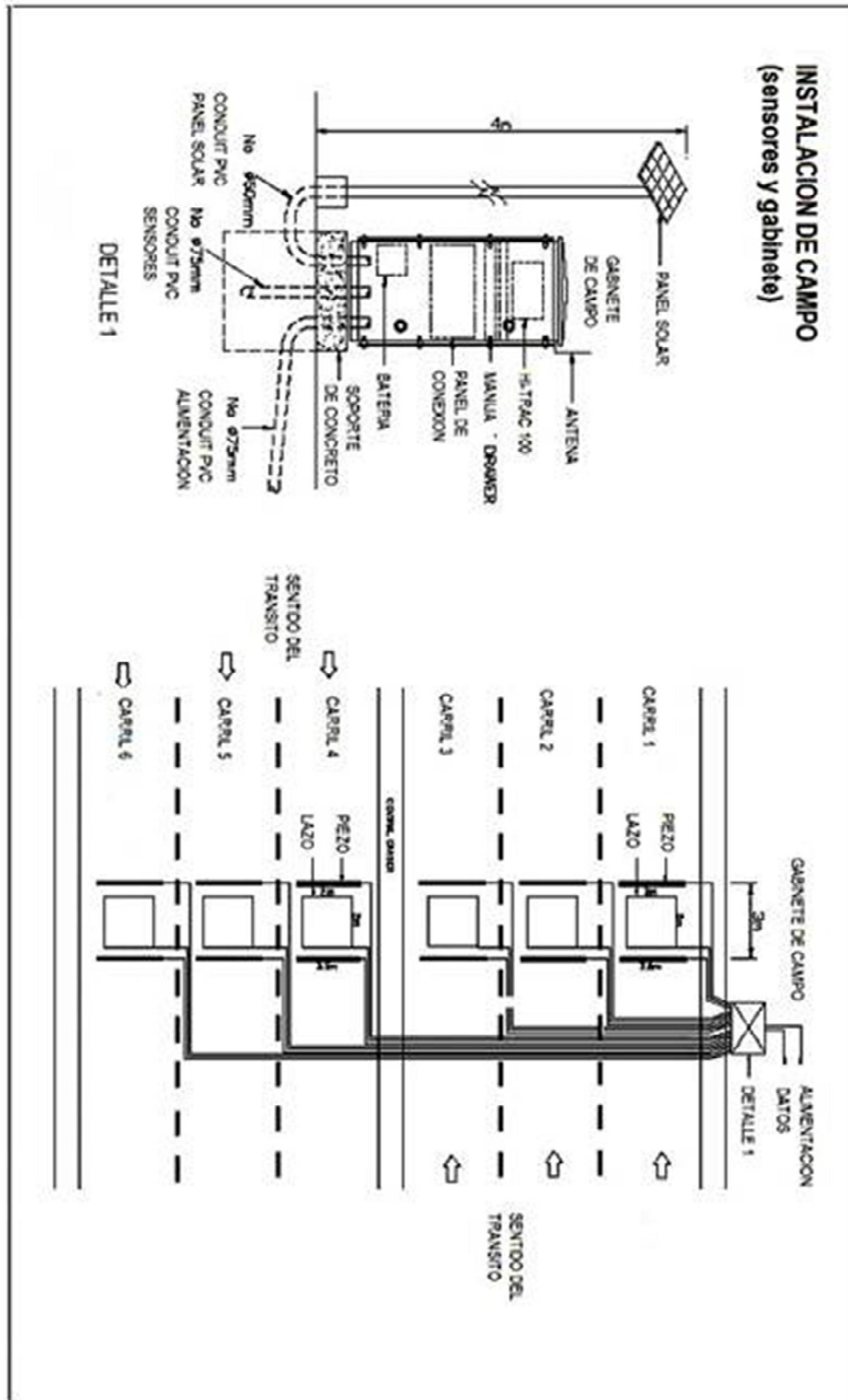


Figura 10. Esquema de instalación en una carretera de doble sentido de 6 carriles.

### **3. PROBLEMAS PARA EL PESAJE DINÁMICO**

#### **3.1 Tiempo de respuesta.**

Naturalmente uno de los principales retos será la propia velocidad a la que estarán circulando los vehículos de carga, la cual podrá variar entre 80 y 120 km/h. Partiendo de la característica del presente documento que señala que se trata de alta velocidad, tomaremos como base 120 km/h.

Con base en una instalación sensor-lazo-sensor como en la figura 11 y tomando en cuenta la velocidad de 120 km/h para el camión de carga, tendríamos que la frecuencia de muestreo del sensor sería del orden de 10 Hz.

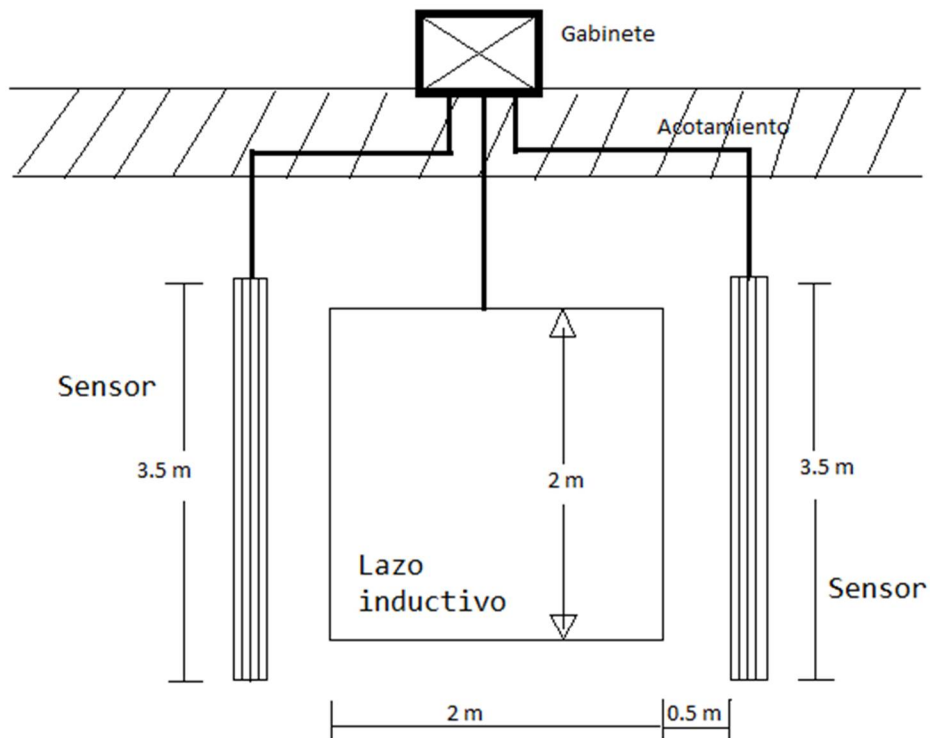


Figura 11. Diagrama de una instalación tipo sensor-lazo-sensor.

Primero convertimos la velocidad de km/h a m/s, posteriormente calculamos el tiempo que tardaría en pasar el segundo eje después del primer eje (tomando una distancia promedio entre ejes de 3.5 metros) y obtenemos el inverso para obtener la frecuencia de muestreo del sensor piezoeléctrico.

$$velocidad = \frac{120 \text{ km}}{h} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 33.3 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{3.5 \text{ m}}{33.3 \text{ m/s}} = 0.105 \text{ s} \approx 105 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{0.105 \text{ s}} = 9.51 \text{ Hz}$$

Adicionalmente a la velocidad otro factor a considerar son las condiciones del camino y las vibraciones que generan los propios vehículos, por ello las condiciones del pavimento son muy importantes para la reducción del rebote de los vehículos.

El criterio utilizado es el que fija la norma estadounidense ASTM E1318-94<sup>2</sup> *Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method*, elaborada por la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, que establece que en una distancia de 46 metros antes y después del sistema de medida la superficie deberá mantener una condición tal que un disco de 150 mm de diámetro y 3 mm de espesor no pueda pasar por debajo de una regla de 6 m apoyada en la superficie del camino, perpendicular y paralelamente a la dirección del tránsito en el carril.

La normativa del Departamento de Transporte del Estado de California (CALTRANS<sup>3</sup>) indica que todos los sistemas WIM deben ser instalados en Cemento Concreto Portland (PCC) para darle al pavimento estabilidad y durabilidad durante los años de vida útil esperada.

### 3.2 Captura de datos.

La adquisición automática de datos consiste en el empleo de una computadora para la lectura de los valores que adquieren distintas variables físicas provenientes de una variedad

---

<sup>2</sup> American Society for Testing and Materials. "Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method" (ASTM E1318-94). 1994.

<sup>3</sup> California Department of Transportation.

de procesos. Esto es muy útil para diversas aplicaciones tales como el control de procesos y maquinarias, el trabajo en los laboratorios de medición y pruebas, el control de calidad de productos o la detección o prevención de fallas en una línea de producción.

Para la adquisición de datos con la PC existen diversos esquemas. El más común es conectar la PC a una interfaz, este periférico contiene los dispositivos necesarios para comunicar la computadora con el mundo real. La PC es un procesador de señales digitales, las cuales consisten en niveles de voltaje discretos (bajo=0, alto=1, sí o no). Por otra parte, en el mundo real, la gran mayoría de las señales son analógicas, es decir, pueden tomar cualquier valor dentro de un rango dado.

¿Cómo funciona la interfaz entonces? Las distintas mediciones se realizan mediante componentes llamados sensores. Estos son dispositivos capaces de transformar el valor de una magnitud física en una señal eléctrica. Existen dos clases de sensores: los analógicos y los digitales. **Sensores analógicos:** Miden variables de recorrido continuo tales como temperatura, presión, nivel, posición. Poseen un transductor que convierte el valor de la variable en una señal eléctrica: voltaje o corriente. **Sensores digitales:** estos, frente a un estímulo, pueden cambiar de estado, ya sea de cero a uno o de uno a cero, en este caso no existen estados intermedios y los valores de tensión que se obtienen son únicamente dos, por ejemplo, 5V y 0V.

La salida de cualquiera de los dos tipos de sensores se conecta a la interfaz, la que tiene circuitos que constituyen una etapa de acondicionamiento de la señal, que adecuan la señal (reducción de ruido, cambio de rango, etc.) a los niveles compatibles con la capacidad de manejo de la PC. La interfaz puede manejar simultáneamente un cierto número de sensores y va a introducir en la PC una muestra digital de las señales de entrada. Cada cierto tiempo, que en algunos casos podemos elegir, barre todos los canales e introduce los valores en la memoria. La cantidad máxima de veces que puede hacer esta operación en un segundo (frecuencia máxima de muestreo) es un parámetro importante puesto debe tener un valor acorde con el tipo de señal. A mayor variabilidad de la señal, mayor frecuencia.

#### **4. INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA Y DIGITAL**

La instrumentación es la parte de la electrónica, principalmente analógica, que se encarga del diseño y operación de aparatos electrónicos y eléctricos, para el sensado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales se realiza el monitoreo y control de procesos.

##### **SISTEMA ANALÓGICO:**

Un sistema analógico es cualquier dispositivo que tiene la capacidad de generar, transmitir, procesar o almacenar señales analógicas. Las señales analógicas son aquellas cuyas magnitudes se representan mediante variables continuas, análogas a las magnitudes que dan lugar a la generación de esta señal.

Refiriéndonos a un instrumento de medición, decimos que es analógico cuando el resultado de la medida se representa mediante variables continuas, análogas a las magnitudes que estamos midiendo. Algunos ejemplos de instrumentos analógicos son: amperímetros, voltímetros, velocímetros.

La instrumentación analógica se utiliza muchas veces porque siempre es más visual, para la interpretación de los parámetros que se están midiendo, una determinada posición de una aguja sobre una escala, que la interpretación de una cifra numérica en un equipo digital.

##### **SISTEMA DIGITAL:**

Un sistema digital es cualquier dispositivo destinado a la generación, transmisión, procesamiento o almacenamiento de señales digitales. Una señal digital corresponde a magnitudes físicas limitadas a tomar sólo unos determinados valores discretos. Por ejemplo: 0 (señal de resistencia eléctrica, muy pequeña) ó 1 (señal de resistencia eléctrica, muy grande). Las computadoras digitales utilizan la lógica de dos estados: la corriente pasa o no pasa por los componentes electrónicos de la computadora.

Para el análisis y la síntesis de los sistemas digitales binarios se utiliza como herramienta el álgebra de Boole, formada por compuertas lógicas que siguen el comportamiento de

algunas funciones booleanas. La palabra digital proviene de la misma fuente que la palabra dígito: La palabra en latín para "dedo" (contar con los dedos), por el uso para contar en valores discretos y no continuos como en los sistemas analógicos. Algunos ejemplos son: Amperímetros, voltímetros, tacómetros, cronómetros, cuenta impulsos, indicadores de proceso, etc.

#### 4.1 Ventajas y desventajas.

<b>SISTEMAS ANALÓGICOS</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
1) Tiene una resolución mayor que los sistemas digitales	1) El error de paralaje limita la exactitud
2) Presentan con facilidad las variaciones de los parámetros para visualizar rápidamente si el valor aumenta o disminuye	2) Las lecturas por parte del usuario pueden prestarse a errores cuando el instrumento tiene varias escalas
3) En algunos casos no requieren de energía de alimentación	
4) No requieren gran sofisticación para su implementación	
5) Son de bajo costo	

<b>SISTEMAS DIGITALES</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
1) No están sujetos a error de paralaje	1) En todos los casos requieren de una fuente de alimentación
2) Pueden eliminar la posibilidad de errores por confusión de escalas	
3) La lectura por parte del usuario es más rápida	
4) Pueden entregar información digital para procesamiento inmediato en	



computadora	
-------------	--

Los instrumentos digitales tienden a dar la impresión de ser exactos por su indicación concreta y sin ambigüedades, pero no hay que olvidar que si su calibración es deficiente, su exactitud puede ser tan o más mala que la de un instrumento analógico.

El desarrollo de la tecnología electrónica ha sido notable. Al final de los años setenta, el arribo de nuevos tipos de instrumentos digitales de medición que no requerían cables, fue favorecido por el rápido progreso de la tecnología de integración en gran escala (Large Scale Integration), junto con el desarrollo de pantallas digitales como las de cristal líquido (Liquid Crystal Display), y la miniaturización de las baterías. En 1980 y 1981 se introdujeron al mercado una serie de medidores electrodigitales de altura, micrómetros e indicadores. En 1982 entró al mercado el calibrador electrodigital que fue un instrumento difícil de digitalizar debido a su pequeño tamaño. El precio, inevitablemente se incrementó, pero la mejor funcionalidad justifica el aumento. Las herramientas de medición con funciones múltiples también han estado disponibles debido a la aplicación de microprocesadores.

Los requerimientos para mediciones más exactas han intensificado el cumplimiento de estándares elevados en las técnicas de fabricación. Los instrumentos electrodigitales dan valores de medición sólo hasta un cierto lugar decimal y no indican los valores de los datos a media graduación que permiten los tipos analógicos por estimación visual. Debido a esta limitación y con el objeto de minimizar errores que surgen del truncamiento de fracciones que se acumulan en procesamientos complejos de datos como cálculos estadísticos, los requerimientos se han incrementado para lograr una resolución mayor y así proporcionar un lugar decimal adicional.

## 5. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Para el desarrollo del prototipo se buscaron objetos que utilizaran materiales piezoeléctricos, en primera instancia se intentó utilizar el mecanismo con que cuentan los encendedores electrónicos para crear una carga eléctrica a través del golpe a un cristal piezoeléctrico. La dificultad que se presentó fue el obtener dichos cristales de los encendedores ya que tienen aproximadamente unas medidas de 5 mm de altura por 2.5 mm de diámetro, aunado a que vienen pegados con una resina al mecanismo de golpe.

Continuando con la búsqueda de materiales piezoeléctricos, se analizó la posibilidad de utilizar el componente con el que están armados los “buzzer”. Se buscó en una tienda de electrónica y encontramos uno económico y fácil de desarmar. En la figura 12, podemos observar el sensor mencionado, que es de un mayor tamaño (2.7 cm aproximadamente) y ya cuenta con sus correspondientes cables.

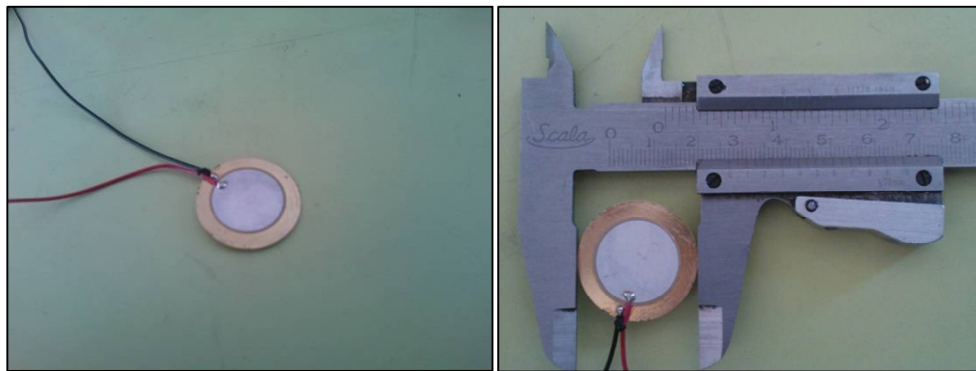
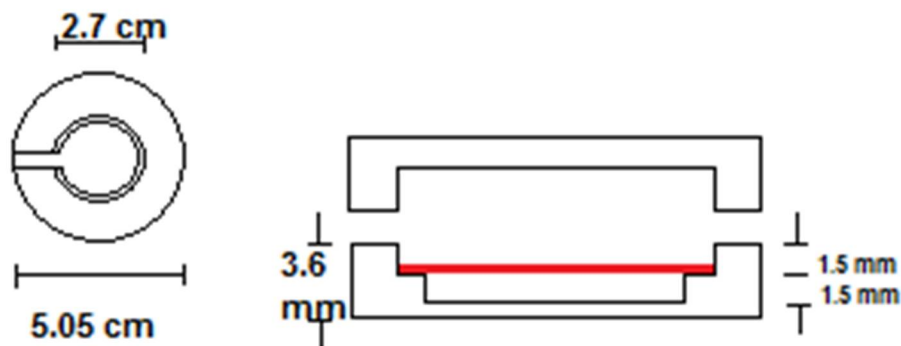


Figura 12a. Sensor con cables. 12b. Medición del tamaño del sensor con un vernier.

Para poder utilizar los sensores se diseñaron unas tapas de aluminio, cuyo esquema se muestra a continuación:



Las tapas se obtuvieron de una lámina de aluminio con ayuda de la fresadora y una broca cortadora, después con el torno se moldearon los bordes y las medidas internas de la caja para empotrar los sensores en las tapas (figura 14).



Figura 14. Diferentes etapas del proceso de fabricación de las tapas para los sensores.

Para el armado final de la celda de carga, se colocó un cuadrado de material suave como una goma justo en el centro de las tapas, posteriormente se sellaron las tapas con unas gotas de silicón para permitir la deformación en el sensor. Finalmente las celdas quedaron armadas como se muestra en la figura 15, probándose con el osciloscopio y obteniendo una señal de 3 volts con una leve presión ejercida con la mano.

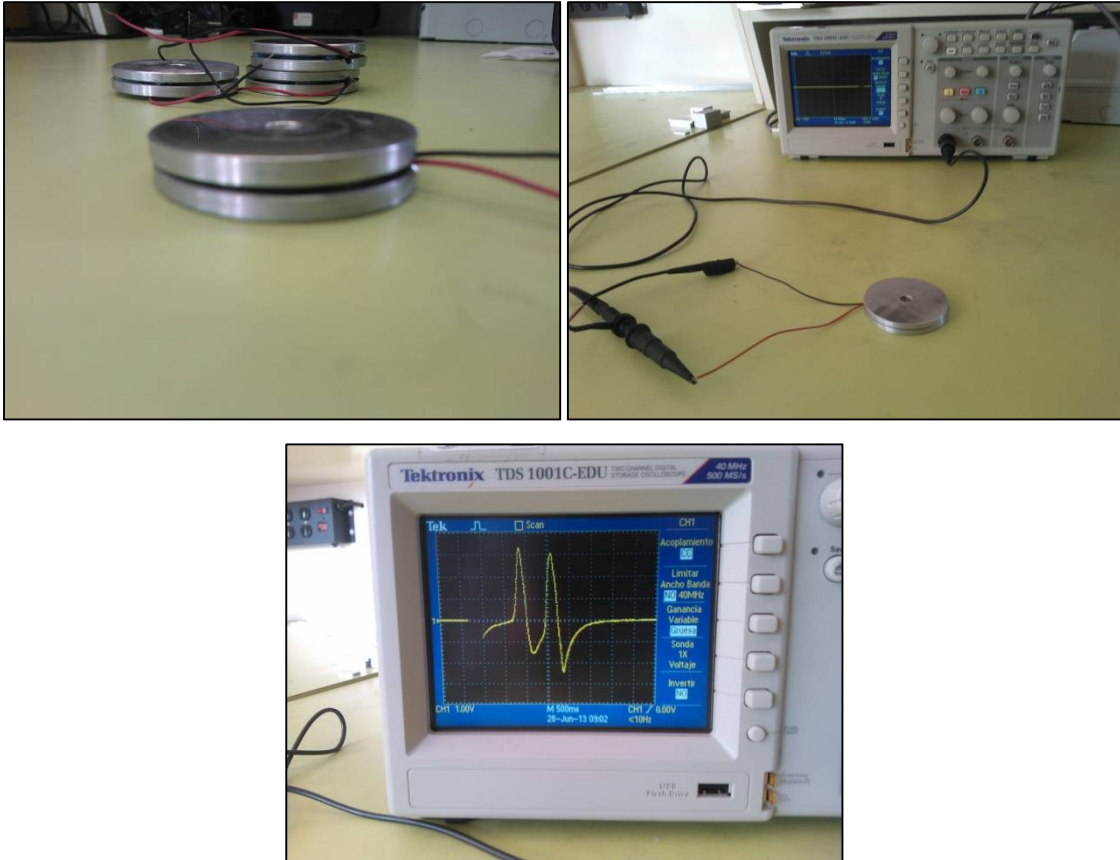


Figura 15. Celdas de carga armadas y probadas en laboratorio con ayuda de un osciloscopio.

Después de armar las celdas de carga, se alambro un circuito sumador no inversor para poder añadir la señal de 2 o más celdas de carga, en el caso particular se diseñó el circuito para 2 entradas. Se utilizó un circuito integrado LM324N de propósito general, con una configuración de 4 amplificadores operacionales, para colocar un acoplador de impedancia a la entrada de cada señal y posteriormente la salida del sumador no inversor entra a un circuito detector de pico. En la figura 16 se muestra la configuración del LM324N y el esquema del circuito completo.

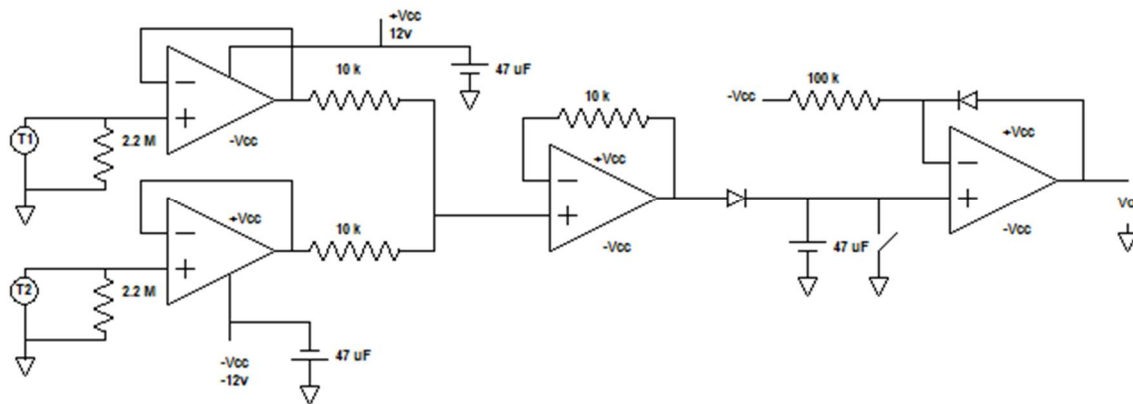
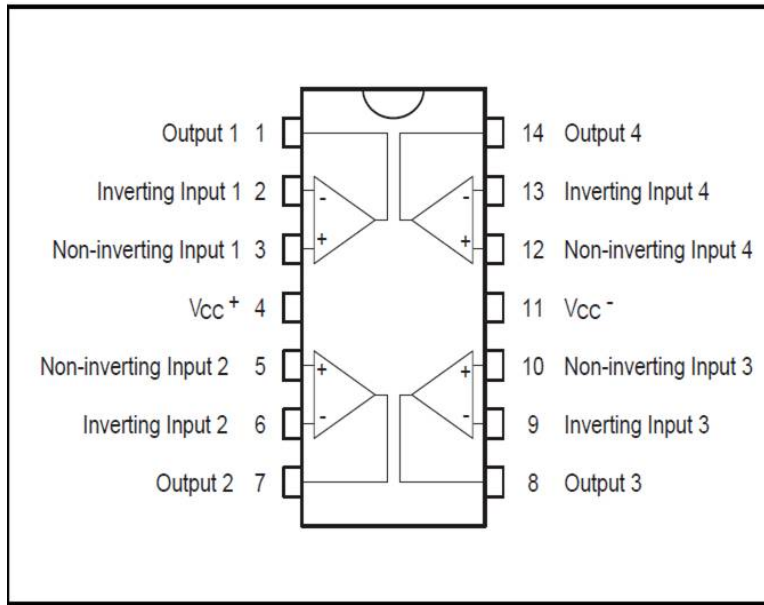


Figura 16a. Diagrama de conexiones del amplificador LM324N.

16b. Diagrama del circuito completo.

Como se muestra en la figura 17, se analizó con el osciloscopio el funcionamiento del circuito teniendo como señal de entrada la generada por 2 celdas de carga, en el canal 1 del osciloscopio se veía la señal a la salida del circuito sumador no inversor y en el canal 2 la señal después del circuito detector de pico, para este caso el canal 1 es la señal azul y el canal 2 la señal amarilla.

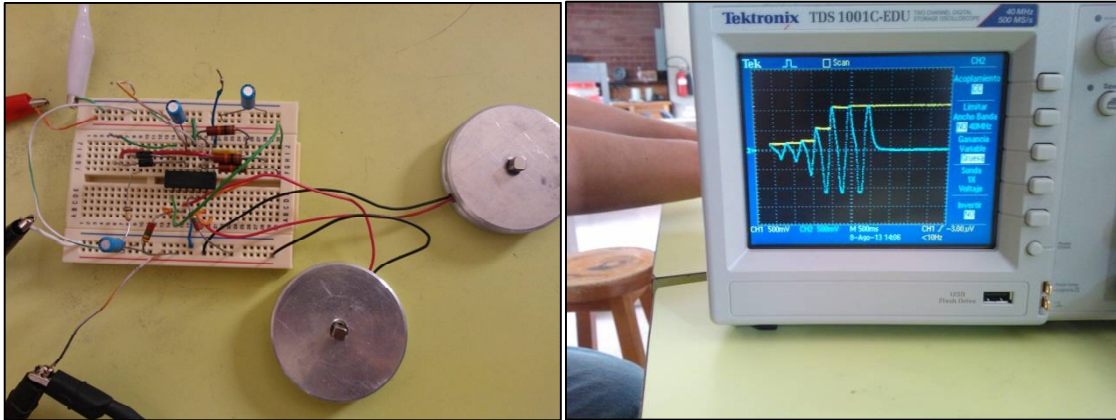


Figura 17. Pruebas de laboratorio con las celdas de carga y el circuito completo.

Con la finalidad de poder utilizar las celdas de carga que proporcionarían una información muy aproximada entre sí, se diseñó un calibrador dinámico que ejerciera una presión uniforme a cada una de las celdas, para poder escoger aquellas que proporcionarían valores similares. Utilizando el sistema de biela-manivela y con la ayuda de un resorte del cual es posible conocer su factor de compresión, se realizó el diseño y posteriormente se maquinaron las piezas con ayuda de las diferentes herramientas con las que cuenta la Coordinación de Electrónica del Instituto de Ingeniería.

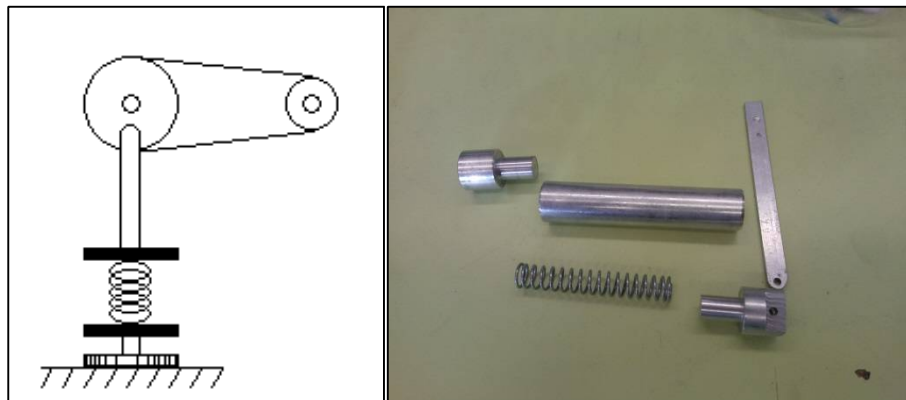


Figura 18. Piezas fabricadas de un sistema biela-manivela.

En la figura 19 se podrá observar la secuencia de fotografías que da cuenta de la fabricación del calibrador dinámico, el cual consistió en montar sobre una base de aluminio de 13.6 cm x 27.9 cm, un soporte para un pequeño motor de bajas revoluciones, al cual se le integró un disco para el sistema biela-manivela.



Figura 19. Diferentes etapas de la fabricación de un calibrador dinámico para probar las celdas de carga.

También se montaron dos soportes para un cilindro que servirá como eje para el resorte y posteriormente se elaboró una base para colocar las celdas de carga y someterlas a la presión ejercida por el calibrador.

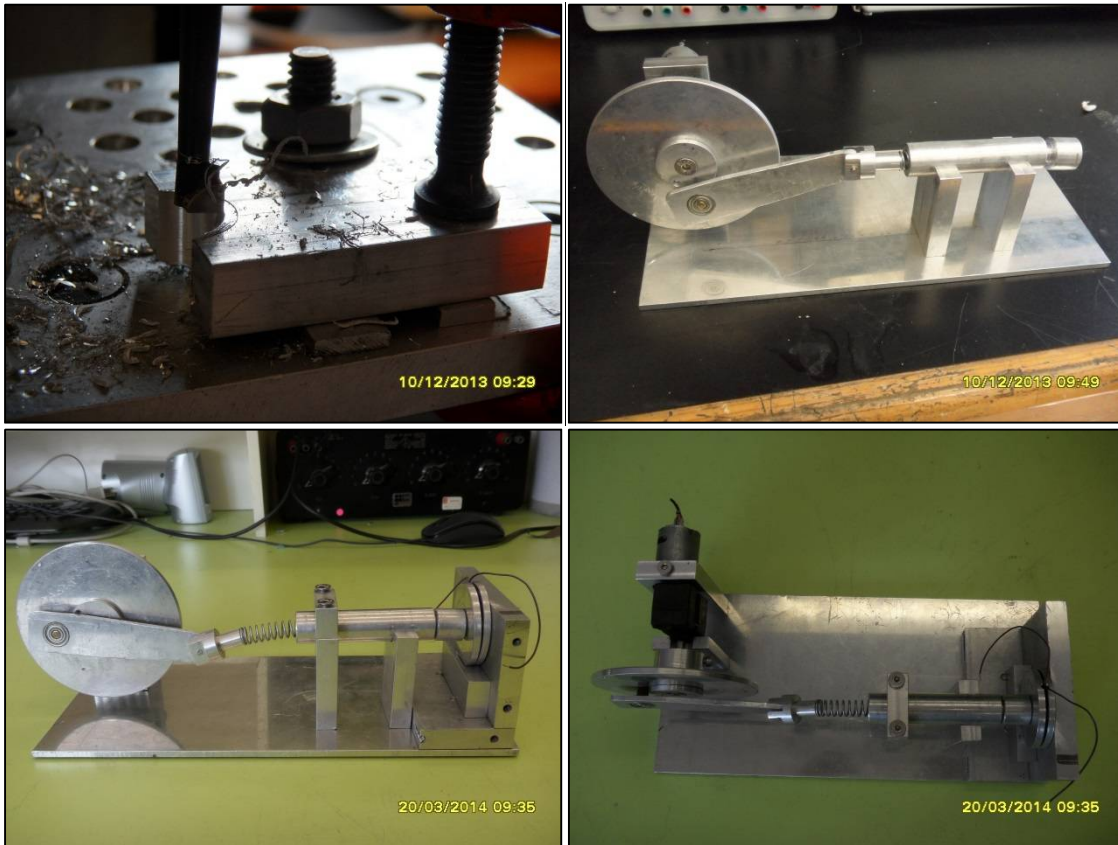


Figura 20. Armado del calibrador dinámico.

Tomando como base la Ley de Hooke y con la ayuda de un dinamómetro se determinó la constante  $k$  de nuestro resorte. Para calcular ésta, se realizaron 4 mediciones conforme a la siguiente tabla:

$$F = -kX$$

$$X_0 = 6.72 \text{ cm}$$

<b>m (kg)</b>	<b>X<sub>1</sub> (cm)</b>	<b>ΔX (cm)</b>
2	7.63	0.91
3	7.98	1.26
4	8.66	1.94
5	8.9	2.18

$$F = mg$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$k = \frac{F}{\Delta X}$$

<b>F (N)</b>	<b>K</b>
$F_1 = (2 \cdot 9.81) = 19.62$	$k_1 = (19.62/0.0091) = 2,156.04$
$F_2 = (3 \cdot 9.81) = 29.43$	$k_2 = (29.43/0.0126) = 2,335.71$



$F_3 = (4 \cdot 9.81) = 39.24$	$k_3 = (39.24 / 0.0194) = 2,022.68$
$F_4 = (5 \cdot 9.81) = 49.05$	$k_4 = (49.05 / 0.0218) = 2,250$

Finalmente sacando el promedio, obtenemos el valor  $k$  para nuestro resorte  $k = 2,191.1$

Una vez que conocemos la constante  $k$  de nuestro resorte, podemos conocer la fuerza que ejerce el calibrador dinámico a las celdas de carga.

$$F = -kX$$

$$mg = -(2,191.1) \cdot (0.014m)$$

$$m = \frac{-(2,191.1) \cdot (0.014m)}{9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$m = 3.126 \text{ kg}$$

De las 9 celdas fabricadas se seleccionaron seis, identificadas con los números 1, 2, 4, 5, 6, y 8, y se probaron en el calibrador dinámico obteniendo los siguientes resultados (figura 21).

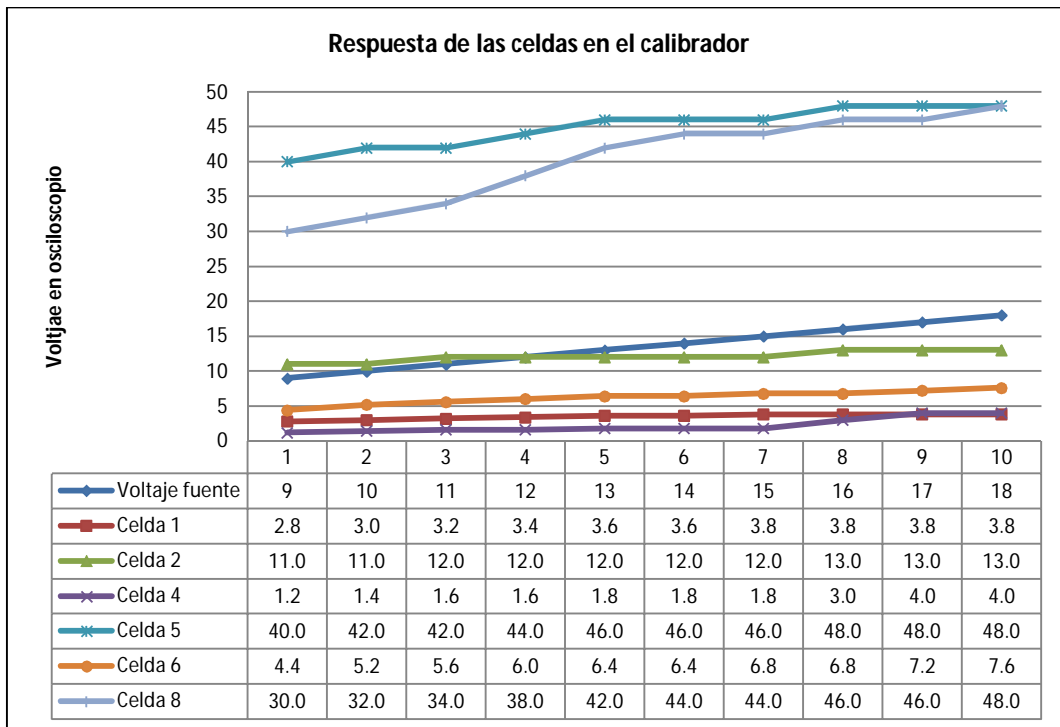


Figura 21. Respuestas de las celdas en el calibrador dinámico.

Posteriormente se dispuso un arreglo de 3 celdas en una barra de aluminio de 34.86 cm (figura 22) para realizar la prueba con un vehículo. El Grupo 1 incluía las celdas 1, 2 y 8, y el Grupo2 las celdas 4, 5 y 6.

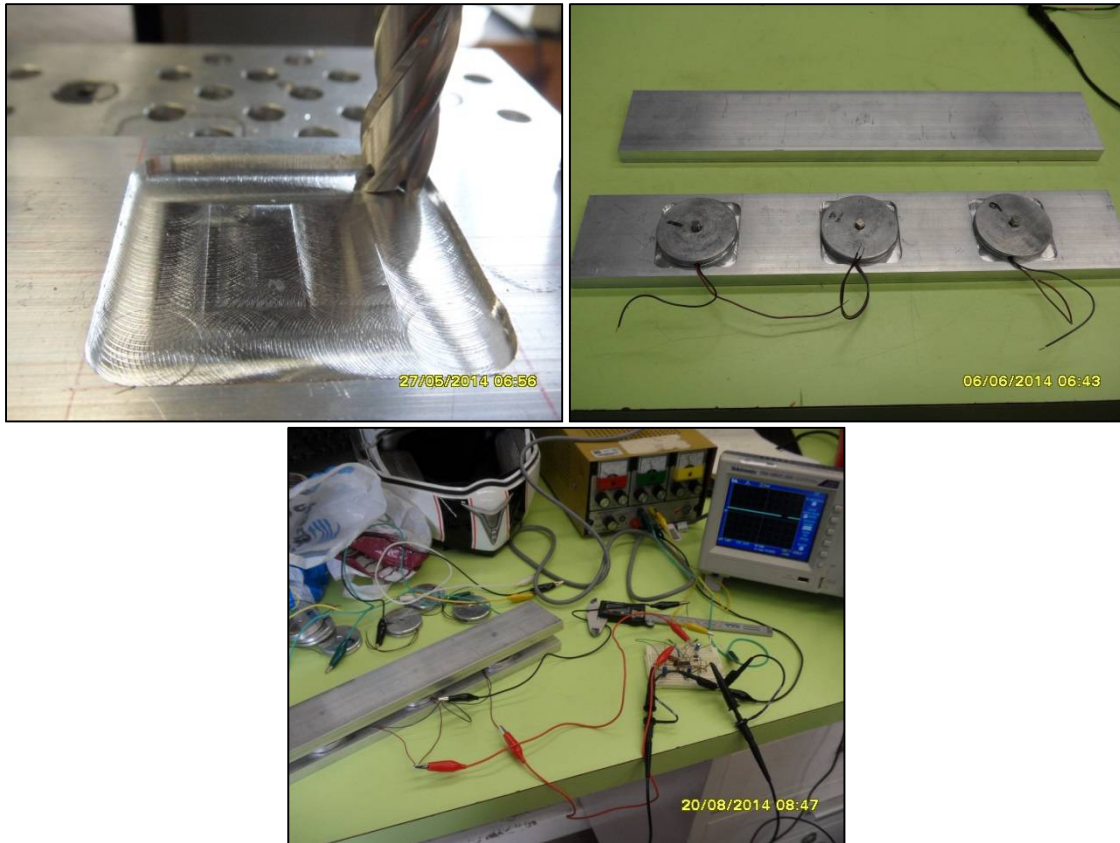


Figura 22. Arreglo de celdas para probar con vehículo.

## 6. PRUEBAS

Se colocó el dispositivo en medio de 2 tablas de madera de 30 cm x 250 cm x 4 cm, unidas con una pequeña tabla por la parte inferior (figura 23).





Figura 23. Montaje del arreglo de celdas de carga para prueba de campo.

Por practicidad, para probar el prototipo utilizamos una motocicleta cuyo peso es de 146 kilogramos, según la hoja de datos técnicos. Para tener la referencia del peso repartido en cada una de las llantas, se obtuvo el peso en una báscula fija obteniendo los siguientes resultados.

	<b>PESO</b>	
Motocicleta	146 kg	
Conductor	70 kg	
Llanta 1	76 kg	162 kg aproximado
Llanta 2	86 kg	
Llanta 1 con conductor	95 kg	210 kg aproximado
Llanta 2 con conductor	115 kg	

Previo a las pruebas dinámicas, se realizó un pesaje cuasi estático, empujando la motocicleta muy lentamente y deteniéndola justo en la vertical del eje delantero respecto del dispositivo. En este pesaje se obtuvieron los siguientes datos:

PESAJE	VALOR
Cuasi estático sin conductor (76 kg)	2.1 V; 2.4 V y 2.6 V
<b>Promedio</b>	<b>2.37 V</b>
Cuasi estático con conductor (95 kg)	4.3 V; 4.1 V y 4.25 V
<b>Promedio</b>	<b>4.22 V</b>

Se tomaron los 2 grupos de celdas de carga para realizar las mediciones como se muestra en la figura 24, adicionalmente se consideró poner un divisor de voltaje a la entrada del circuito sumador, de ser el caso de que el peso de la moto saturara la señal de salida (figura 25). Por cada uno se hicieron 5 mediciones y se obtuvieron los siguientes resultados:

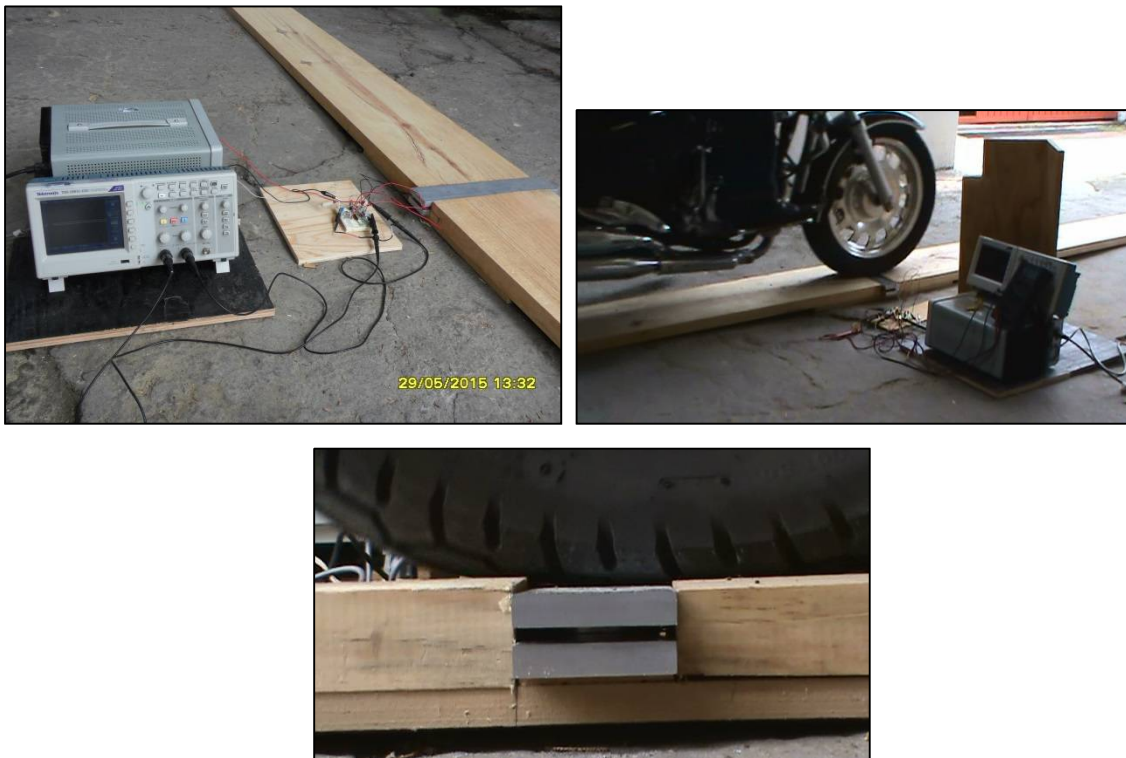


Figura 24. Prueba de campo.

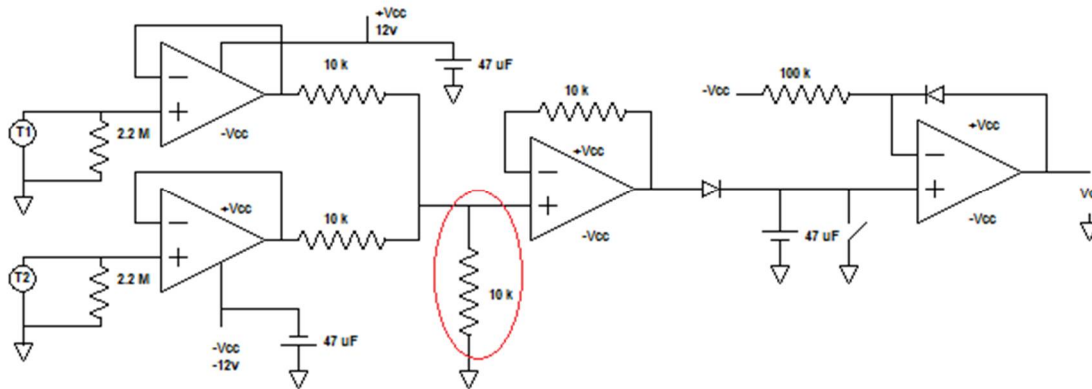












Figura 25. Diagrama del circuito completo con un divisor de voltaje.




Grupo 1, circuito sin divisor		
No. de Cruce	Voltaje	
1	7.59 V	
2	6.66 V	
3	6.84 V	
4	6.44 V	
5	6.60 V	



<b>PROMEDIO</b>	<b>6.83 V</b>	
-----------------	---------------	--

<b>Grupo 2, circuito sin divisor</b>		
<b>No. de Cruce</b>	<b>Voltaje</b>	
1	11.70 V	
2	11.75 V	
3	11.85 V	
4	11.87 V	
5	11.85 V	
<b>PROMEDIO</b>	<b>11.81 V</b>	

<b>Grupo 1, circuito con divisor</b>		
<b>No. de Cruce</b>	<b>Voltaje</b>	
1	4.12 V	

2	4.32 V	
3	4.33 V	
4	4.38 V	
5	4.51 V	
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.33 V</b>	

<b>Grupo 2, circuito con divisor</b>		
<b>No. de Cruce</b>	<b>Voltaje</b>	
1	7.90 V	
2	7.91 V	
3	7.88 V	

4	7.90 V	
5	7.91 V	
<b>PROMEDIO</b>	<b>7.9 V</b>	

Vale la pena comentar que en un principio las pruebas se pensaban realizar en la pista circular del Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería, pero por cuestiones administrativas ya no se pudo realizar ahí, sin embargo, sería interesante probar el comportamiento del prototipo con el eje vehicular de la pista, que consiste en 2 llantas de rin de 22.5 pulgadas y cuyo peso es similar al de un vehículo de carga real (figura 26).



Figura 26. Pista circular del Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería.

## 7. CONCLUSIONES

Después de haber analizado los resultados obtenidos con los dos grupos de celdas y haciendo una recapitulación del proceso completo para la elaboración del prototipo, podemos enlistar las siguientes conclusiones:



- 1) La respuesta de los sensores es satisfactoria, ya que a la menor deformación del material se obtiene una buena respuesta eléctrica.
- 2) El proceso para la elaboración de las celdas de carga debe ser automatizado o realizado en serie, para tratar de garantizar que cada una de ellas tengan las mismas medidas y proporcionen mismas lecturas.
- 3) El material suave utilizado en las celdas, en este caso la goma, de igual manera debe de tener las mismas medidas y debe de ser del mismo material para que tenga igual densidad.

Estás conclusiones estarían garantizando que la respuesta de las celdas de carga fuera uniforme, es decir, con la misma fuerza ejercida a cada una obtendríamos el mismo voltaje.

- 4) Si bien el carril de prueba hecho con madera facilitó la realización de las pruebas, se observó pequeñas vibraciones al momento en que la moto subía a la madera y de igual manera al momento que bajaba, por lo que considero que al realizar una prueba en asfalto el dispositivo se comportaría de una manera estable, tomando en cuenta que la instalación tendría que realizarse de manera tal, que el dispositivo quede aislado del asfalto.
- 5) También es importante considerar el ancho del dispositivo de medición, de manera ideal el ancho del dispositivo debería ser igual a la máxima huella que imprimiría una llanta sobre el camino. Esto con el fin de que todo el peso que ejerza la llanta sea detectado por el dispositivo.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- CUEVAS COLUNGA, A.C.; F.A. RIVERA GUERRA; A.G. CENTENO SAAD; E.F. MAYORAL GRAJEDA; A. MENDOZA DÍAZ, 2005. Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales. Ed. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro. Publicación Técnica No. 36. 102 p.
- HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, J.R.; M.J. FABELA GALLEGOS, 2004. Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento. Ed. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro. Publicación Técnica No. 247. 83 p.
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, 2008. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. 35 p.