



Bruno Bellini
brubelm@gmail.com

Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía.

"Monografía vinculada a la conferencia del Dr. Hamlet Suárez (MedicaA S.A.) sobre "Evaluación del equilibrio: conceptos, desarrollo de equipos y normativa internacional para su comercialización" el 28 de abril de 2009"

Resumen

Se muestran los distintos tipos de sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía, principalmente de las celdas de carga. Se muestran los distintos tipos de celdas de carga que existen (de compresión, flexión de viga, tensión y compresión, y viga en "S"), así como también se explica el funcionamiento de éstas. Finalmente se elige la celda de carga más conveniente respecto a sus especificaciones y se diseña una plataforma.

Introducción

Las plataformas de equilibrio o plataformas de fuerza (force platforms) son utilizadas para medir el peso estático de una persona parada sobre ella, o la fuerza dinámica vertical involucrada en el movimiento o en los saltos, cuantificando el balance, el andar y otros parámetros de la Biomecánica.[1]

Existen diversos tipos de plataformas de equilibrio que varían según la cantidad de sensores, el tipo de éstos, y el tipo de medida que efectúan, diferenciándose así en calidad y costo. Las plataformas de fuerza más simples miden solo la componente vertical de la fuerza en el centro geométrico de la plataforma. Algunas más avanzadas miden las componentes tridimensionales de la fuerza aplicada a la superficie y su punto de aplicación, generalmente llamado centro de presión¹ (COP- Center of pressure), así como también el momento de fuerza vertical.

Sensores de presión: Existen distintos tipos de sensores, tales como las galgas extensiométricas, sensores piezoeléctricos, galgas capacitivas, entre otros. A continuación se explica el funcionamiento de alguno de estos sensores, principalmente

¹ COP: Corresponde al punto de localización del vector de las fuerzas verticales de reacción del suelo. Representa el promedio de todo el peso que está en contacto con la superficie del piso. Este es totalmente independiente del COM. La localización del COP bajo cada pie es el reflejo directo del control neural de los músculos de tobillo (Winter y cols., 1995)

el de las galgas extensiométricas y las celdas de carga por razones que se verán más adelante.

Galgas extensiométricas: [2] Son básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga.

Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada.

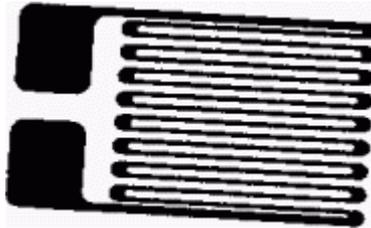


Figura 1. Galga extensiométrica.

Existen dos tipos de galgas básicos:

(1) De hilo conductor o lámina conductora. El sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino. Las terminaciones del hilo acaban en dos terminales a los cuales se conecta el transductor.

(2) Semiconductor. Las galgas semiconductoras son similares a las anteriores. En este tipo de galgas se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estas galgas respecto a las anteriores se encuentra en el tamaño; las galgas semiconductoras tienen un tamaño más reducido.

Para tratar la variación se utilizará un puente de Wheatstone. Éste está formado por cuatro resistencias unidas en un círculo cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. De esta manera podremos medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente.

Las principales ventajas de las galgas extensiométricas son:

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia
- Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas
- Compensación de temperatura relativamente fácil
- No son influidas por los campos magnéticos

Mientras que las desventajas encontradas son las siguientes:

- Señal de salida débil
- Alta sensibilidad a las vibraciones
- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico
- Se necesita una buena adhesión al objeto, para que la medida de la deformación sea correcta.
- Un incremento en la temperatura tiene como consecuencia una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.

Sensores piezoeléctricos: [3][7] Basan su funcionamiento en la fuerza o presión aplicada a una sustancia compuesta por cristales polarizados (piezo significa presión en griego). Al ejercer presión sobre el cristal, éste se deforma produciendo una descarga eléctrica.

Aquí se listan las principales ventajas y desventajas de este tipo de sensor:

Ventajas:

- Alta sensibilidad y bajo coste.
- Alta rigidez mecánica (deformaciones experimentadas < 1 microm), apta para medir esfuerzos variables (fuerza - presión).

Desventajas:

- No poseen respuesta en c.c.
- Deben trabajar por debajo de la frecuencia de resonancia del material.
- Los coeficientes piezoeléctricos son sensibles a la temperatura. (Cuarzo hasta 260°C y la turmalita 700°C).
- La impedancia de salida de los materiales piezoeléctricos es muy baja

Sensores capacitivos: [4] Se basan en la modificación de la capacidad de un condensador por presencia de objetos sólidos. El elemento capacitivo es parte de un circuito que es excitado de manera continua por una forma de onda sinusoidal de referencia. Un cambio en la capacidad, produce un desplazamiento de fase entre la señal de referencia y una señal obtenida a partir del elemento capacitivo.

En general se puede establecer que los sensores capacitivos tienen un pequeño tamaño, construcción robusta y un pequeño desplazamiento volumétrico. La señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Además son sensibles a variaciones de temperatura.

Celdas de carga: [5][6] Las celdas de carga son sensores de peso electrónicos cuya finalidad es recibir la excitación eléctrica provocada por un peso determinado aplicado a la plataforma y transmitirlo hacia un indicador de peso en forma de una salida eléctrica.

Existe en mercado una muy amplia variedad de celdas de carga, las cuáles varían en forma, tamaño, material, entre otras cosas. Los fabricantes de celdas de carga para medir la presión se vuelcan preferentemente al uso de las galgas extensiométricas en sus diseños.

A continuación se mostrarán algunas de los distintos tipos de celdas de carga disponibles, y luego se profundizará algo más en las celdas de carga basadas en galgas extensiométricas por su popular uso mencionado anteriormente.

Hidráulicas:

Son dispositivos de fuerza-balance, que miden el peso como un cambio en la presión del líquido con el cual esta relleno internamente. En las celdas de carga hidráulicas del tipo de diafragma rotante, la fuerza actuante sobre un cabezal de carga es transferida a un pistón que, a su vez comprime el fluido confinado en una cámara de diafragma de elastómero. A medida que la fuerza aumenta, la presión del fluido hidráulico crece. Esta presión puede ser localmente indicada o transmitida para realizar una indicación remota o control. La salida es lineal y es relativamente poco afectada por la cantidad del fluido de relleno o por su temperatura. Si las celdas de carga han sido correctamente instaladas

y calibradas, la precisión puede estar dentro del 0,25% del fondo de escala o mejor, lo cual es aceptable para la mayoría de las aplicaciones del proceso de pesaje. Debido a que este sensor no tiene componentes eléctricos, es ideal para el uso en zonas peligrosas. Para la máxima precisión, el peso debe ser obtenido por la localización de una celda de carga en cada punto de apoyo y resumir sus resultados. [6][8]

Neumáticas:

También operan bajo el principio de fuerza-balance. Estos dispositivos utilizan múltiples cámaras de amortiguación para proporcionar mayor precisión que un dispositivo hidráulico. Las celdas de carga neumáticas se utilizan a menudo para medir pesos relativamente pequeños en las industrias donde la limpieza y seguridad son de interés primordial. Las ventajas de este tipo de celda de carga incluyen el ser intrínsecamente a prueba de explosiones e insensible a las variaciones de temperatura. Además, no contienen líquidos que puedan contaminar el proceso si se rompe el diafragma. Las desventajas incluyen la relativamente baja velocidad de respuesta y la necesidad de aire o nitrógeno limpio y seco. [8]

Basadas en galgas extensiométricas:

Convierten la fuerza actuante sobre ellas en señales eléctricas medibles. Las galgas están unidas a una viga o miembro estructural que se deforma cuando el peso se aplica. En la mayoría de los casos, cuatro galgas se utilizan para obtener la máxima sensibilidad y la compensación de temperatura. Dos de las galgas suelen estar en tensión, y dos en compresión, y están conectados (mediante cables) con los ajustes de compensación. Cuando se aplica el peso, la tensión cambia la resistencia eléctrica de las galgas en proporción a la carga. [8]

Dentro de las celdas de carga basadas en las galgas extensiométricas también existen distintos tipos, diferenciándose en forma, tamaño y en la forma en que se realiza la medida. Algunos de estos tipos se ven a continuación².

➤ *Celdas de carga de compresión*

Como lo dice su nombre, son celdas de carga que miden según su compresión con una excelente estabilidad a largo plazo. En su mayoría, son construídas en acero inoxidable para asegurar la fiabilidad en entornos industriales. Están diseñadas para operar montadas a una superficie plana, y tienen un botón de carga mecanizado como parte integrante de la celda de carga básica.

Sus precios van desde unos 460 dólares a 700 dólares, dependiendo de la carga máxima soportada (rango de 11 Kg a 23000 Kg). En la Figura 2 puede observarse el aspecto de una de estas celdas. [8]

² No se explican todos los tipos disponibles debido a su gran variedad



Figura 2. Celda de carga de compresión. En su parte superior tiene un botón de carga para efectuar la medición de presión. [8]

➤ *Celdas de carga de tensión y compresión*

Estas celdas permiten medir tanto la tensión como la compresión de las cargas. Están hechas de acero inoxidable, son de tamaño pequeño y son capaces de ofrecer lecturas de alta precisión. En la Figura 3 se observa el tamaño de una de estas celdas comparada con una moneda, y también una rosca macho que poseen para adjuntarse a la carga. El precio de estas celdas ronda en los 750 dólares y soportan un rango de carga de entre 1 Kg y 450 Kg. [8]



Figura 3. Celda de carga de tensión y compresión. Se compara su tamaño con una moneda y se muestra la rosca que permite una buena fijación a la carga. [8]

➤ *Celdas de carga con viga en forma de S*

Estas celdas obtienen su nombre de su forma de S. Pueden proporcionar una salida de acuerdo con la tensión o la compresión y ofrecen rechazo de carga lateral superior. Las capacidades máximas de carga van desde los 11 Kg a los 18200 Kg, variando su costo entre 300 y 875 dólares. [8]



Figura 4. Celda de carga con viga en forma de S. Proporciona salida de acuerdo a la compresión y a la tensión. [8]

➤ *Celdas de carga de flexión de viga*

Son utilizadas en múltiples aplicaciones de celdas de carga, tanques de pesaje y control de procesos industriales. Estas celdas tienen un amplio margen de medida máximo, el cual va desde los 45 Kg a 45500 Kg, variando así de unos 340 a unos 800 dólares en el mercado. [8]



Figura 5. Celda de carga de flexión de viga. Tiene 2 puntos para la fijación a la carga y mide la flexión a la que se somete en el otro extremo. [8]

➤ *Celdas de carga de un solo punto*

Este tipo de celdas se usan en sistemas de pesaje comerciales e industriales. Proporcionan lecturas precisas, independientemente de la posición de la carga en la plataforma. Esta última característica las hace un poco más costosas que las anteriores, variando en un rango de 760 dólares a 1100 dólares, y con máximos de carga de entre 2.3 Kg a 230000 Kg.



Figura 6. Celda de carga de un solo punto.

Todas las celdas de carga mostradas anteriormente funcionan con voltajes de excitación continuos de entre 5 Vdc y 15 Vdc, y proporcionan a la salida unos pocos miliVolts (alrededor de 3 mV).

Diseño de la plataforma:

La plataforma de fuerza se utiliza para realizar la evaluación funcional del paciente diagnosticando que familia de estímulos le son más conflictivos en el mecanismo de control postural, estableciendo límites de estabilidad estática que corresponde al área dentro de la cuál el centro de gravedad se desplaza sin cambiar la base de sustentación (sin mover los pies), y riesgos de caída. Mediante software se muestrean las posiciones sucesivas enmarcadas del centro de presión (CoP) en relación con una referencia cuyo origen se sitúa en el baricentro del polígono de sustentación (Figura 7).

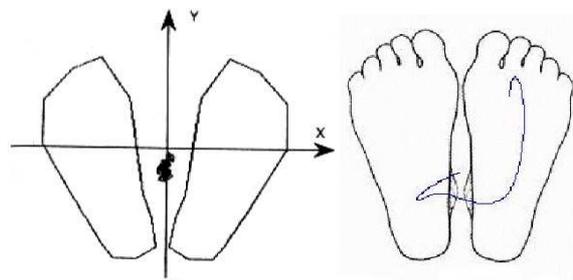


Figura 7. Estatocinesiograma: El origen O está situado en el baricentro del polígono de sustentación. Los movimientos de derecha-izquierda se representan en el eje X, y los movimientos de ante-post en el eje Y, formándose una serie de posiciones sucesivas del centro de presión en el

En la figura 8 puede verse el aspecto de la plataforma.

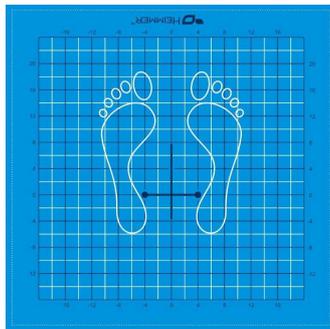


Figura 8. Plataforma de fuerza empleada por MedicaA S.A. Sus medidas son 50 cm x 50 cm. [9]

En el lado inferior de la plataforma se colocarán cuatro celdas de carga. A partir de todos los modelos de celdas de carga mostrados en el apartado anterior, comparamos sus especificaciones (voltaje de excitación, voltaje a las salida, precisión, capacidad de carga, tamaño, precio, etc.) y se eligió la que mejor se adecúa para la aplicación de la plataforma (Tabla 1).

Tipo de celda	Rango de salida	Voltaje de excitación	Rango de sobrecarga	Resistencia del puente	Balaceo de cero	Repetibilidad	Deflexión a máxima capacidad	Histéresis
Flexión de viga	3.0 ± 0.09 mV/V	10 Vdc	150% de la capacidad	350 Ω	< 2.0% del rango de salida	< 0.01% del rango de capacidad	0.014''	< 0.03% del rango de capacidad
Viga en S	3 ± 0.0075 mV/V	10 Vdc	150% de la capacidad	350 ± 10 Ω	$\pm 1\%$ del rango de salida	< 0.01% del rango de capacidad	0.020''	$\pm 0.02\%$ del rango de capacidad
Compresión	2 mV/V	10 Vdc	150% de la capacidad	350 Ω	$\pm 2\%$ del rango de salida	< 0.10% del rango de capacidad	0.003''	$\pm 0.20\%$ del rango de capacidad
Tensión y compresión	2 mV/M	10 Vdc	150% de la capacidad	350 Ω	$\pm 2\%$ del rango de salida	$\pm 0.20\%$ del rango de capacidad	-----	$\pm 0.20\%$ del rango de capacidad

Tabla 1. Tabla comparativa de distintos tipos de celdas de carga. Se opta por la celda de flexión de viga por razones de practicidad para la colocación y por su precio, ya que las especificaciones para cada una son muy similares. [10][11]

Se utilizan cuatro celdas de carga de flexión de viga de Negri, Quarantino & Ferraro basadas en strain gages. Estos sensores se conectan a una placa electrónica para amplificar las salidas analógicas. Así, a la salida de la plataforma se obtiene un voltaje proporcional a la suma de las cuatro fuerzas, que es leído por una interface y trasladado a una medida de presión, calculando así el centro de presión (COP – Center of pressure). Una vista de cómo se montarían las celdas de carga y la placa en la plataforma puede verse en la siguiente figura (Figura 3).

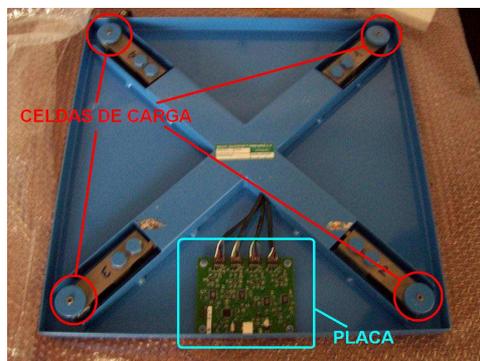


Figura 3. Lado inferior de la placa donde se ven las cuatro celdas de carga y la placa. [9]

Cada celda de carga tiene una salida con cinco cables:

- *Rojo:* + Excitación
- *Negro:* – Excitación
- *Verde:* + Señal
- *Blanco:* - Señal
- *Negro grande:* Malla

los cuáles se conectan a la placa y se procesan mediante el siguiente circuito:

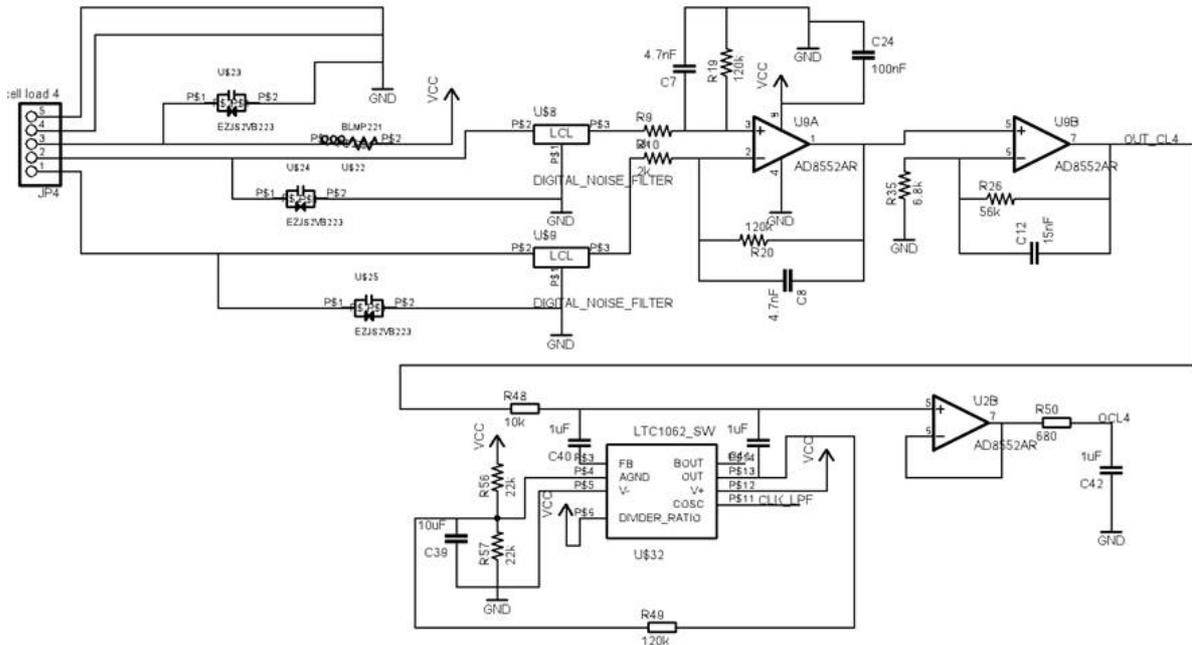
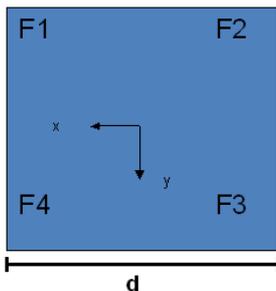


Figura 4. Circuito esquemático de la placa para una celda de carga. [9]

Las entradas de la placa consisten en cuatro conectores (uno por celda), cada uno con las cinco entradas para los cinco cables a la salida de cada celda. La entrada 5 (Figura 4) corresponde a tierra. Las entradas 4 y 3 corresponden a las salidas de las celdas – Excitación y +Excitación, que están conectadas a tierra y a V_{CC} respectivamente. La señal conectada a V_{CC} tiene un filtro LR para disminuir ruidos. Por último, las entradas 2 y 1 corresponden a +Señal y –Señal. Estas dos últimas señales pasan ambas por filtros de ruido digitales LCL, y entran a un amplificador diferencial. Los filtros LCL son esencialmente filtros pasivos a base de una combinación serie-paralelo de inductancias y condensadores que están especialmente diseñados para eliminar los armónicos de la corriente absorbida. Luego del amplificador diferencial hay una etapa de ganancia, y después se utiliza un filtro LTC1062_SW, el cual es un filtro de capacitores conmutados que filtra todas las frecuencias que no son de interés. Por último hay un buffer seguidor que proporciona una alta impedancia a la salida del circuito. La señal a la salida del buffer es la que representa la fuerza medida por la celda de carga y con la cual se calcula el CoP.

Con las medidas de fuerza obtenidas en la placa, mediante el software, se calcula el COP de la siguiente forma:



$$COP_x = \frac{(F_1 + F_4) \frac{d}{2} - (F_2 + F_3) \frac{d}{2}}{\sum F_i}$$

$$COP_y = \frac{(F_4 + F_3) \frac{d}{2} - (F_2 + F_1) \frac{d}{2}}{\sum F_i}$$

Figura 5. Coordenadas para cálculo del CoP y ecuaciones. [9]

Conclusiones

Se vieron los distintos tipos de sensores de presión existentes, principalmente las celdas de carga. Dentro de este último tipo, se vieron los distintos tipos y modelos de celdas de carga. Si bien existen celdas de carga basadas en distintos tipos de sensores, las más utilizadas a nivel mundial son las que utilizan strain gages, los otros tipos de celdas de carga están desapareciendo en la oscuridad, ya que las celdas de carga basadas en galgas extensiométricas continúan aumentando su precisión y reduciendo sus costos.

Se aplicó un modelo particular de celdas de carga para la realización de una plataforma de equilibrio utilizada en el estudio de la posturografía explicando su funcionamiento.

Las celdas de carga tienen muy variadas aplicaciones en el campo del pesaje y la medición de presión, que van desde el pesaje de camiones hasta el diagnóstico en la saltabilidad de deportistas.

Agradecimientos

A Darío Geisinger por prestar su tiempo para reunirse y contestar a mis preguntas.

Referencias

- [1] Pasco Force Platform - <ftp://ftp.pasco.com/Support/Documents/English/CI/CI-6461/012-09493A.pdf> visto en junio del 2009
- [2] Galgas extensiométricas - <http://www.forosdeelectronica.com/about35.html> visto en junio del 2009
- [3] Sensores piezoeléctricos - http://www.maginvent.org/articles/sensorarht/Sensores_Piezo_Electricos.html visto en junio del 2009
- [4] Sensores capacitivos - <http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf> visto en junio del 2009
- [5] Celdas de carga - <http://www.wim-systems.com/celdas-de-carga.html> visto en junio del 2009
- [6] Tecnología- Celdas de carga - http://camiones.fralib.com/documentospdf/tecnologias_celdas_de_carga.pdf visto en junio del 2009
- [7] Sensores y tratamiento de señal - <http://www.dte.upct.es/personal/jsuardiaz/docencia/Sensores/Downloads/Transparencias/Tema%205.pdf> visto en junio del 2009
- [8] OMEGA load cells - <http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html> visto en junio del 2009
- [9] Material brindado por Darío Geisinger de MedicaA S.A. junio del 2009
- [10] Catálogo de celdas de carga - <http://www.alibaba.com/> visto en junio del 2009
- [11] Hoja de especificaciones de las celdas de carga de Negri Quarantino & Ferraro S.A.