

# Coloquio de Investigación Multidisciplinaria



VOLÚMEN 8 Núm.1 OCTUBRE 2020

Revista Periódica



JOURNAL CIM-REVISTA DIGITAL

ISSN: 2007 - 8102

DIFUSIÓN VÍA RED DE CÓMPUTO  
<https://www.cim-tecnm.com/articulos>



EDUCACIÓN  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



# Sensores de fuerza en sistemas de rehabilitación física

J.J.A. Flores Cuautle<sup>1</sup>, O.O. Sandoval Gonzalez<sup>2</sup>, C.J. Trujillo Romero<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>CONACYT-Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Orizaba, Ver

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Orizaba, Ver

<sup>3</sup>Division de Investigación en Ingeniería Medica, Instituto Nacional de Rehabilitacion-LGII. Mexico,

<sup>4</sup>Machina Innovation Lab, S.A.P.I. de C.V., Mexico.

\*[flores\\_cuautle@hotmail.com](mailto:flores_cuautle@hotmail.com)

**Área de participación:** Ingeniería Eléctrica y Electrónica

## Resumen

La rehabilitación humana es un campo de la investigación, que en las últimas fechas de ha beneficiado enormemente del desarrollo de sistemas mecatrónicos y en particular de la electrónica. En este trabajo se hace una revisión de los sensores de fuerza más comunes aplicados en sistemas de rehabilitación particularmente de rehabilitación ortopédica. Se presenta el principio de funcionamiento de cada sensor, así como algunos sistemas de rehabilitación en los cuales son empleados.

**Palabras clave:** sensores electrónicos, rehabilitación humana

## Abstract

Human rehabilitation is a research area, which have recently been benefited by the advances in mechatronics systems, particularly from the electronics in this type of systems. This works presents a review of some of the most common force sensors applied to the rehabilitation systems, focused on orthopedic rehabilitation. The working principle of each sensor, as well as some rehabilitation systems where they are applied is explained.

**Keywords:** Electronic sensors, human rehabilitation

## Introducción.

El incremento en la expectativa de vida de las personas en los últimos años ha venido de la mano del aumento de padecimientos relacionados con el envejecimiento. El deterioro de las diversas estructuras biomecánicas del cuerpo humano hace que hoy en día sea necesario el tratamiento de estas para incrementar la calidad de vida. No sólo el envejecimiento de las personas ocasiona problemas físicos en las personas, los accidentes, así como la aparición de nuevas enfermedades hacen que cada vez sea más necesario el desarrollo de nuevas técnicas de rehabilitación para seres humanos.

La Organización Mundial de la Salud define la rehabilitación como “*un conjunto de intervenciones diseñadas para optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad de individuos*” [1]. Los principales escenarios en los cuales se utiliza la rehabilitación son para la restauración de las capacidades físicas del paciente después de alguna enfermedad o accidente. Por otro lado, la rehabilitación es útil cuando se presenta una disminución de las capacidades físicas desde el nacimiento. Si bien la rehabilitación humana no es nueva, ya que existen datos que muestran el uso de aparatos ortopédicos en forma de un bastón por parte de la cultura egipcia [2, 3], su desarrollo sigue siendo necesario, para cubrir la infinidad de discapacidades que pueden llegar a afectar al ser humano

Debido a que los resultados de la rehabilitación dependen no sólo de la rutina de rehabilitación, sino también del paciente, es necesario poner atención en diversos puntos para poder evaluar los

resultados de la rehabilitación. Estos puntos comprenden entre otros la medición específica del grado de recuperación funcional del segmento bajo tratamiento y la evaluación de las capacidades físicas [4].

En el esfuerzo por medir objetivamente los avances de las diferentes técnicas de rehabilitación, así como proporcionar parámetros confiables a los dispositivos de rehabilitación para su correcto funcionamiento, el uso de diversos sensores es fundamental. El sensor es un elemento clave para un mejor resultado en el proceso de rehabilitación. En particular, la rehabilitación física requiere de monitorear variables físicas tales como fuerza, velocidad, rango de movimiento, etc. Por lo cual, este trabajo está centrado en aquellos sensores que miden este tipo de variables.

En el sentido más amplio, un sensor puede ser definido como un dispositivo que proporciona una señal de salida como respuesta a un estímulo de entrada. En electrónica en particular, un sensor proporciona una respuesta de una variable eléctrica ante la presencia de un estímulo físico de entrada. El tipo de estímulo físico ante el cual responde preferentemente el sensor determina la categoría a la cual pertenece el sensor en cuestión. Así, por ejemplo, un sensor de temperatura puede proporcionar una variación de resistencia o voltaje ante una variación de temperatura.

En los dispositivos de rehabilitación física, las principales variables físicas que son de importancia para un correcto monitoreo de estos se reducen a fuerza, presión, rango de movimiento y velocidad de movimiento. La Tabla 1 relaciona el principio físico con el tipo de aplicación en la cual se utiliza [5-11].

**Tabla 1. Principios físicos de algunos sensores y sus aplicaciones principales**

Principio físico \ Aplicación	Fuerza	Rango de Movimiento	Velocidad de movimiento
<b>Capacitivo</b>	X	-	-
<b>Resistivo</b>	X	X	X
<b>Magnético</b>	-	X	X
<b>Efecto Hall</b>	-	X	X
<b>Piezoeléctrico</b>	X	-	-
<b>Óptico</b>	X	X	X
<b>Ultrasónico</b>	-	X	X
<b>Inercial</b>	-	X	X

### Sensores de fuerza

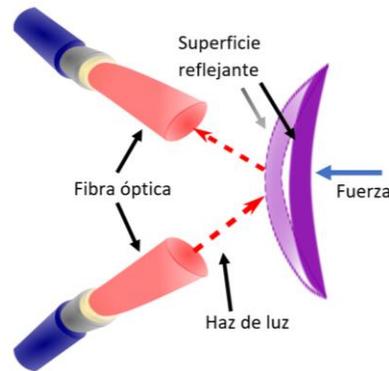
Los sensores de fuerza son utilizados generalmente para determinar, por ejemplo, el grado de presión en mano. Sin embargo, su principal uso es para determinar la fuerza producida por la interacción entre el dispositivo de rehabilitación y el usuario [12]. De acuerdo con la segunda Ley de movimiento de Newton, la fuerza se define en términos de una masa sujeta a una aceleración [13].

Las estrategias utilizadas para medir la fuerza pueden dividirse en tres, distribuir la fuerza a medir sobre un área determinada y de esta forma medir la presión resultante; convertir la fuerza a determinar en una deformación de un elemento elástico y medir la aceleración de una masa conocida [13, 14]. Los sensores de fuerza más utilizados en dispositivos de rehabilitación son del tipo óptico, capacitivo y resistivo [12, 15-17].

### Sensores ópticos

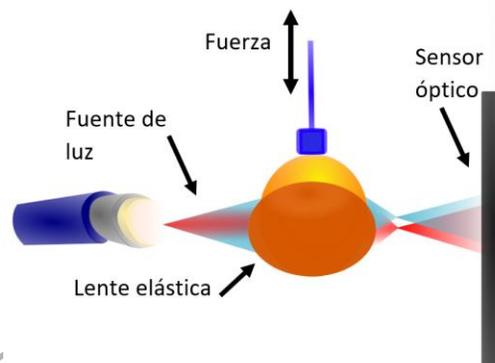
En general, para el caso de los sensores de tipo óptico, la medición de la fuerza se lleva a cabo mediante la reflexión de un haz de luz sobre una superficie curva y reflejante, tal como lo muestra la Figura 1. En dicho arreglo el radio de la curvatura es modificado por la fuerza a medir, de esta forma, el ángulo con el que incide la luz cambia en función de la curvatura del material reflejante, el cual a

su vez está relacionado con la variable a medir. La sensibilidad en este tipo de sensores depende del tipo de las propiedades elásticas del material sobre el cual se fija la superficie reflejante.



**Figura 1 Esquema de funcionamiento de un sensor de fuerza óptico**

Existen variantes de este tipo de sensores, una de estas variantes consiste en hacer pasar un haz de luz a través de una esfera hecha de material elástico y transparente. La fuerza a medir provoca una variación de la curvatura de dicha esfera, con la consecuente variación del ángulo de transmisión del haz de luz. La variación del ángulo de incidencia del haz de luz es medida por medio de un sensor de luz tal como se muestra en la Figura 2. La principal ventaja de este tipo de sensores es su bajo peso [12].



**Figura 2 Sensor de fuerza óptico basado en lente cilíndrica**

### Sensores capacitivos

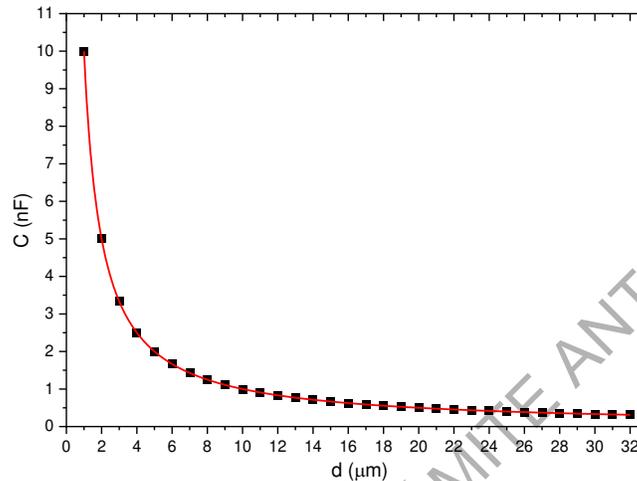
Un capacitor consiste en el arreglo de un par de placas metálicas, paralelas entre sí, separadas por un material dieléctrico. La carga que puede almacenar dicho arreglo se encuentra determinada principalmente por el área de las placas metálicas, la constante dieléctrica del material entre las placas y finalmente, por la distancia existente entre las placas metálicas, como lo describe la Ecuación 1.

La forma en la que estos dispositivos miden la fuerza es mediante la variación de la distancia existente entre las placas; una placa se mantiene fija, en tanto que la fuerza a medir es aplicada a la otra placa, la capacitancia se modificará como una función lineal de la distancia entre las placas, que a su vez está relacionada con la fuerza a medir [14].

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

donde C es la capacitancia en Faradios,  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$ , las constantes dieléctricas del vacío y del dieléctrico respectivamente, A el área de las placas y d la distancia entre las placas. La figura 3 muestra el comportamiento característico de un capacitor en función de la separación entre sus placas.

En este tipo de sensores la sensibilidad está determinada por las propiedades viscoelásticas del dieléctrico colocado entre las placas; así como de la electrónica asociada para la detección de la variación de carga eléctrica. Entre las principales ventajas que ofrecen este tipo de sensores se puede mencionar el bajo peso y costo. Así mismo, es posible fabricar este tipo de sensores en diversas geometrías o incluso en arreglos para detectar fuerzas puntuales o distribución de fuerzas. Una de las desventajas de su uso, es el hecho de que la medición de la capacitancia se lleva a cabo por medio de circuitos osciladores; por lo cual, es necesario agregar al oscilador, un circuito convertidor de voltaje a frecuencia para medir la fuerza.

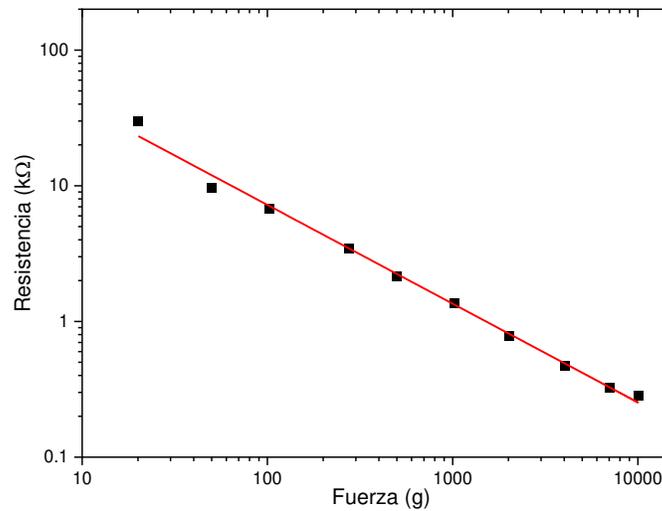


**Figura 3** Curva característica de un sensor capacitivo como función de la distancia entre sus placas.

### Sensores resistivos

Los sensores de fuerza del tipo resistivo pueden dividirse en dos grupos, el primer grupo se basa en polímeros conductores, en tanto que el segundo grupo utiliza metales conductores. Los polímeros conductores están formados por dos partes principales, una matriz polimérica, la cual tiene propiedades eléctricas aislantes y cargas eléctricas conductoras (*fillers*) [18].

La deformación de este tipo de materiales, ocasionada por una fuerza, ocasiona que las cargas eléctricas formen trayectorias conductoras a través del material, mientras mayor sea la fuerza ejercida sobre este tipo de materiales más trayectorias conductoras se formarán dentro del material. Por tanto, la resistencia de este disminuye tal como lo muestra la Figura 4. Los materiales empleados como cargas eléctricas pueden tener carácter metálico (cobre, plata, aluminio, níquel) o carbón (grafito, nanotubos, grafeno) [18].

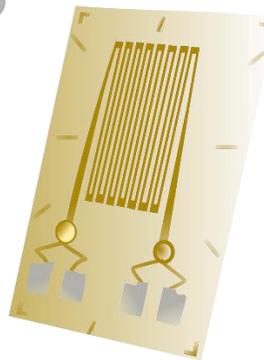


**Figura 4** Variación de resistencia en un sensor de fuerza basado en un polímero conductor como una función de la fuerza aplicada (cuadros), la línea roja es una referencia visual.

Los sensores de fuerza basados en conductores eléctricos basan su funcionamiento en el hecho de que la resistencia de un metal es una función de la longitud de este, Ecuación 2, por este motivo los sensores de fuerza se fabrican de forma tal, que al deformarse se incremente la longitud del conductor, Figura 5. Este tipo de sensores se conocen comúnmente como galgas extensiométricas; se utilizan en conjunto con un material con propiedades elásticas, al cual se unen firmemente en el eje perpendicular a la fuerza a determinar, el material al deformarse transmite la deformación a la galga cuya longitud se incrementa con lo cual se incrementa en forma proporcional su resistencia.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Donde R es la resistencia de la galga,  $\rho$  la resistividad del metal, L la longitud del metal y A el área de la sección transversal del conductor.



**Figura 5** Ejemplo de una galga extensiométrica

## Conclusiones

En la elección de un sensor de fuerza deben de tomarse en cuenta las ventajas y desventajas de los posibles sensores, sin embargo, la principal característica para tener en cuenta es la aplicación en sí misma, esto es, deben de considerarse los requisitos de la aplicación; rango de fuerza a medir, velocidad de adquisición de datos, electrónica disponible, máximo peso permisible del sensor, precisión, etc.

## Referencias

- [1] P. A. H. Organization. (2020, 12/08/2020). *Rehabilitacion*. Available: [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_topics&view=article&id=192&Itemid=40857&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_topics&view=article&id=192&Itemid=40857&lang=es)
- [2] F. Sotelo, "Historia de la rehabilitacion en Latinoamerica," Available: <https://journals.lww.com/ajpmr/Documents/Manuscript%20AJ11107%20Sotelano%20Invited%20Commentary.pdf>
- [3] M. Martinez Morillo, J. M. Pastor Vega, and F. Sendra Portero, *Manual de Medicina Fisica*. Madrid, España: Harcourt Brace, 1998.
- [4] D. O. Longmuir, "Principles and techniques in rehabilitation practice," *Australian Journal of Physiotherapy*, vol. 2, no. 1, pp. 35-48, 1956/07/01/ 1956.
- [5] "Piezo Film Sensors technical Manual," ed. Norristown, Pennsylvania: Measurement Specialities, Inc, 1999, p. 86.
- [6] A. S. Morris, "13 - Sensor technologies," in *Measurement and Instrumentation Principles (Third Edition)* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 247-270.
- [7] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [8] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*. CRC Press, 2014.
- [9] L. G. Corona Ramirez, 1, Ed. *Sensores y actuadores con arduino*. Mexico: Patria, 2015.
- [10] Y. Kojima *et al.*, "Low-Cost Soil Moisture Profile Probe Using Thin-Film Capacitors and a Capacitive Touch Sensor," *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1292, 2016.
- [11] C. O. Gonzalez-Moran, J. G. Miranda-Hernandez, J. d. J. A. Flores Cuautle, E. Suaste Gomez, and H. Herrera-Hernandez, "A PLZT Novel Sensor with Pt Implanted for Biomedical Application: Cardiac Micropulses Detection on Human Skin," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, p. 7, 2017.
- [12] J. A. Díez, A. Blanco, J. M. Catalán, F. J. Badesa, L. D. Lledó, and N. García-Aracil, "Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 2, p. 1687814017753881, 2018.
- [13] A. S. Morris, "4 - Calibration of measuring sensors and instruments," in *Measurement and Instrumentation Principles (Third Edition)* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 64-72.
- [14] A. S. Morris, "18 - Mass, force and torque measurement," in *Measurement and Instrumentation Principles (Third Edition)* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 352-364.
- [15] G. D. Pasquale, L. Mastrototaro, L. Pia, and D. Burin, "Wearable system with embedded force sensors for neurologic rehabilitation trainings," in *2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP)*, 2018, pp. 1-4.
- [16] V. Grosu, S. Grosu, B. Vanderborght, D. Lefeber, and C. Rodriguez-Guerrero, "Multi-Axis Force Sensor for Human-Robot Interaction Sensing in a Rehabilitation Robotic Device," *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1294, 2017.
- [17] F. Porciuncula *et al.*, "Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances," (in eng), *Pm r*, vol. 10, no. 9 Suppl 2, pp. S220-s232, Sep 2018.
- [18] V. Koncar, "1 - Smart textiles for monitoring and measurement applications," in *Smart Textiles for In Situ Monitoring of Composites*, V. Koncar, Ed.: Woodhead Publishing, 2019, pp. 1-151.