



TRANSDUCTORES Y SENSORES 2021

Ing. Biomédica
Ing. Electrónica

Unidad IX : ACCELERACIÓN



FCEFN - UNC - Ing. Gabriel Gómez (ggomez@unc.edu.ar)



Temario

Conceptos físicos. Definiciones

Unidades y escalas

Principales tecnologías

Comparación de tecnologías

Criterios de selección

Aplicaciones

Criterios de selección

Bibliografía



CONCEPTOS FÍSICOS Y DEFINICIONES

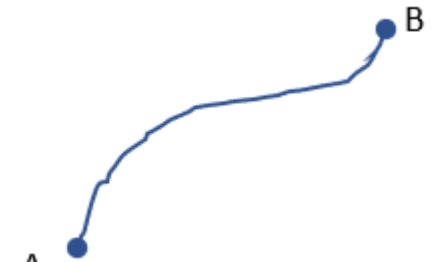


Conceptos básicos, definiciones

¿Que entendemos por aceleración ?

Lo clásico, incremento velocidad por unidad de tiempo. I
diferenciales $a = dv/dt$

Si nos desplazamos de A a B, habrá una trayectoria cuya
v (velocidad).



- La velocidad v es un vector, puede cambiar su módulo o su dirección, en ambos casos originará una aceleración que cualquiera ha experimentado al tomar una curva aún si el velocímetro registra la misma velocidad.
- Espacio \rightarrow Velocidad \rightarrow Aceleración: $x \rightarrow v = dx/dt \rightarrow a = d^2x/dt^2$
- Las ecuaciones son “reversibles” a menos de una constante:
- Aceleración \rightarrow Velocidad \rightarrow Espacio: $v = \int a \cdot dt + v_0$ y $e = \int v \cdot dt + e_0$
- Por ello a menudo los sensores de desplazamiento pueden usarse para sensar velocidad y aceleración y, al revés, un acelerómetro puede utilizarse para deducir velocidad y trayectoria



Algunas preguntas...

¿Cuáles son las consecuencias de que la aceleración sea un vector ?

¿En qué se diferencian las piernas de los jugadores de fútbol de las de los corredores ?

¿Como se comparan con las piernas de las bailarinas ?

¿Sabía que decir $F=m*a$ es lo mismo que decir que la Fuerza es proporcional a la derivada de la cantidad de movimiento?

¿Sabía que las aceleraciones más altas son las generadas durante un impacto ?

¿Cuanto es la aceleración de un objeto que cae desde una altura de 1 m ?

¿Cuántos g implica una caída de unos pocos cm en un bache ?



UNIDADES Y ESCALAS



Unidades

Aceleración lineal

- En el SI se usa el metro por segundo al cuadrado, m/seg^2
- También se usa “g”, fuerza del campo gravitatorio de la tierra que varía con latitud, longitud y la composición del terreno en el punto de medición, pero ha sido acordada internacionalmente como:
- $1\text{ g} = 9.80665\text{ m/seg}^2$ habitualmente “redondeado” a 9.81 m/seg^2
- Unidades inglesas: $1\text{ g} = 386.087\text{ in/seg}^2 = 32.1739\text{ ft/seg}^2$ habitualmente redondeado a $386\text{ in/seg}^2 = 32.2\text{ ft/seg}^2$

Aceleración angular

- Radian/seg²

Importante:

- Velocidad angular $\omega = d\theta/dt$ Aceleración angular: $\alpha = d^2\theta/dt^2$
- En un círculo de radio r : $v = \omega.r$ y $a = \omega^2.r$



Algunos valores “comunes” de aceleración

Aceleración de la gravedad en la tierra: 1 g

Luna: 0,17 g

Marte: 0,38 g

Júpiter: 2.53 g

Aceleración que produce desmayo: 8 g

Montaña “rusa” récord es japonesa: llega a 4.3 g

<https://www.pa-community.com/articulos/la-montana-rusa-con-la-mayor-aceleracion-del-mundo>

Despegue de avión comercial de pasajeros: 0.1 a 0.3 g

Despegue F18 en portaaviones por sus medios: 4 g

Despegue F18 con catapulta electromagnética: 6 a 8 g

|| ¿Y la fuerza centrífuga?

Si hacemos girar un hilo con un peso en un extremo experimentaremos una fuerza que tensa el hilo y que denominamos centrífuga, porque pareciera querer “fugarse” del centro de giro.

Si hay una fuerza centrífuga y $F = m \cdot a$, debe haber una aceleración.

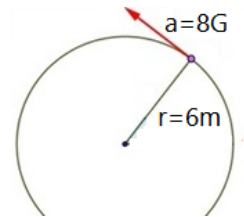
En una rotación $\omega = 2\pi f$ y $a = \omega^2 r$

Probemos algunos números.

¿Y la fuerza centrífuga?

Calcular la velocidad de un brazo robótico de entrenamiento para astronautas de 6m de longitud cuya máxima aceleración sea 8g

- $a = \omega^2 r = \omega = \sqrt{\frac{a}{r}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{6\text{m}}} = 3,61 \text{ rad/s}$
- $v = \omega \cdot r = 3,61 \text{ rad/s} \cdot 6\text{m} = 22\text{m/s}$



- Siempre que haya una rotación (o al menos una curvatura en la trayectoria) habrá una aceleración angular y una fuerza “centrífuga”
- ¿En cuánto afectará la aceleración de la gravedad la fuerza centrífuga originada en la rotación de la tierra en el ecuador? ¿En los polos?



¿Cuánto es mucho, cuanto es poco?

La aceleración, si bien es una magnitud mecánica, no es del todo intuitiva. Convivimos con grandes aceleraciones en nuestro entorno sin darnos cuenta. Vaya otro ejemplo de cálculo.

Calcular las velocidades, aceleraciones y fuerzas a las que estará sometido un plomito de 100 g ubicado en la llanta de una rueda de automóvil 225/50ZR16 para velocidades de 72 y 144 km/h

Diámetros:

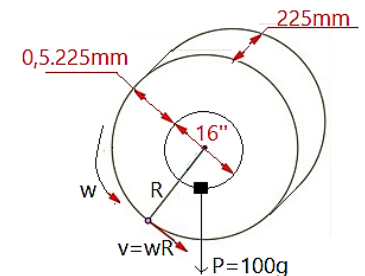
- $\varnothing_{\text{int}} = 16'' = 16 \cdot 2,54 \text{ cm} = 40.64 \text{ cm}$
- $\varnothing_{\text{ext}} = \text{talón} \cdot 2 + \varnothing_{\text{int}} = 63,14 \text{ cm}$

Talón: $0,5 \cdot 225 \text{ mm} = 112,5 \text{ mm} = 11,25 \text{ cm}$

Velocidades:

- $V_1 = 72 \text{ km/h} = 20 \text{ m/s} = 1200 \text{ m/min}$
- $V_2 = 144 \text{ km/h} = 40 \text{ m/s} = 2400 \text{ m/min}$

pisada (mm) diámetro (in)
RODADO 225 / 50 ZR16
talón
(% de la pisada)

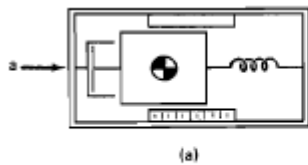


Mas sobre la rueda...

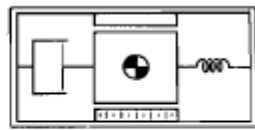
- $\text{rpm} = \frac{v \text{ (m/min)}}{\text{perímetro (m)}} = \frac{v}{\pi \phi_{\text{ext}}} = \text{rpm}_1 = \frac{1200 \text{ m/min}}{1,98 \text{ m}} = 606,06 \text{ rpm}$
- Frecuencia: $f = \frac{\text{rpm}}{60} \left[\frac{1}{s} = \text{Hz} \right] = f_1 = \frac{606,06}{60s} = 10,1 \text{ Hz}$
- Velocidad angular: $\omega = V/R = \omega_1 = \frac{V_1}{R_{\text{ext}}} = \frac{20 \text{ m/s}}{\frac{0,63 \text{ m}}{2}} = 63,5 \text{ rad/s}$
- Aceleración: $a_1 = \omega^2 R_{\text{int}} = V^2/R_{\text{int}} = (63,5 \text{ rad/s})^2 \cdot \frac{0,41 \text{ m}}{2} = 826,61 \text{ m/s}^2$
- Peso aparente: $P_a = \frac{a}{g} P = P_{a_1} = \frac{a_1}{g} P = \frac{826 \text{ m/s}^2}{9,8 \text{ m/s}^2} 0,1 \text{ kgf} = 8,43 \text{ kgf}$
- Si **duplicamos** la velocidad (de 72 a 144 km/h), resultará:
- $\omega_2 = 2\omega_1 = 127 \text{ rad/seg}$, $f_2 = 2f_1 = 20,2 \text{ Hz}$
- Pero: $a_2 = 4 a_1 = 3306,45 \text{ m/s}^2$ y $P_{a_2} = 4 P_{a_1} = 33,74 \text{ kgf}!!!!$

Principio físico de los acelerómetros

Todo acelerómetro consiste de 3 elementos alojados en una carcasa (housing): una masa inercial (seismic mass), un resorte (spring) y un amortiguador (damper)

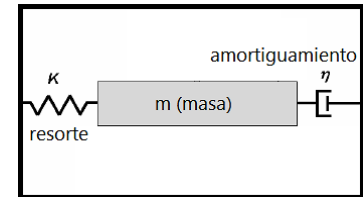
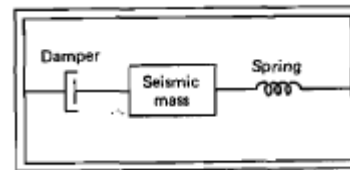


(a)



(b)

FIGURE 7-2. Displacement of seismic mass: (a) acceleration applied; (b) acceleration removed.



- Cuando se aplica una aceleración, la masa inercial se "retrasa" respecto de la carcasa. Al cesar la aceleración, el resorte retorna la masa a su posición de reposo. $F = m \cdot a = k \cdot x \rightarrow a = \frac{k \cdot x}{m}$
- El amortiguamiento evita las oscilaciones, es proporcional a la velocidad y define las características dinámicas del transductor
- El diseño básico permite un solo grado de libertad, es decir que mide el movimiento en una sola dirección, identificada en el housing



PRINCIPALES TECNOLOGÍAS



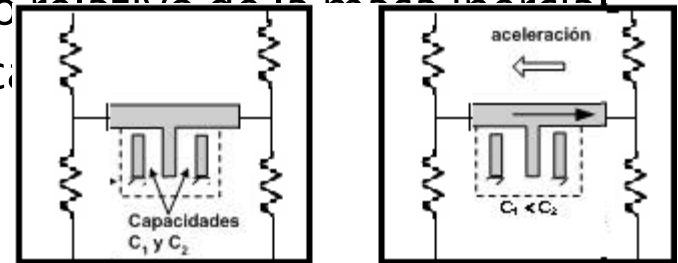
Tecnologías de acelerómetros

1. Capacitivo
2. Piezoeléctrico
3. Potenciométrico
4. Reluctivo – LVDT
5. Servoacelerómetros
6. Strain Gage



1. Acelerómetro capacitivo

Al someterse a una aceleración el movimiento relativo de la masa inercial altera la posición relativa de las placas de un capacitor.



- En el diseño de la figura, con dos juegos de placas, cuando la separación de una crece, la otra disminuye. Esto puede ser aprovechado en un divisor de impedancias o como dos brazos de un puente.
- Otra forma de acondicionamiento de señal es utilizar las capacidades como parte de un oscilador y así se tendrá una salida en pulsos proporcional a la aceleración

2. Acelerómetro piezoeléctrico

Se basan en el efecto piezoeléctrico: al deformar ciertos materiales, el cambio en su estructura cristalina provoca un cambio en la distribución de las cargas que se manifiesta como una polarización.

- Se coloca un cristal de cuarzo entre la masa inercial y la carcasa; esta última se halla unida al objeto a medir. Al producirse una aceleración, la masa ejercerá una fuerza sobre el cristal y se producirá una corriente proporcional a la aceleración

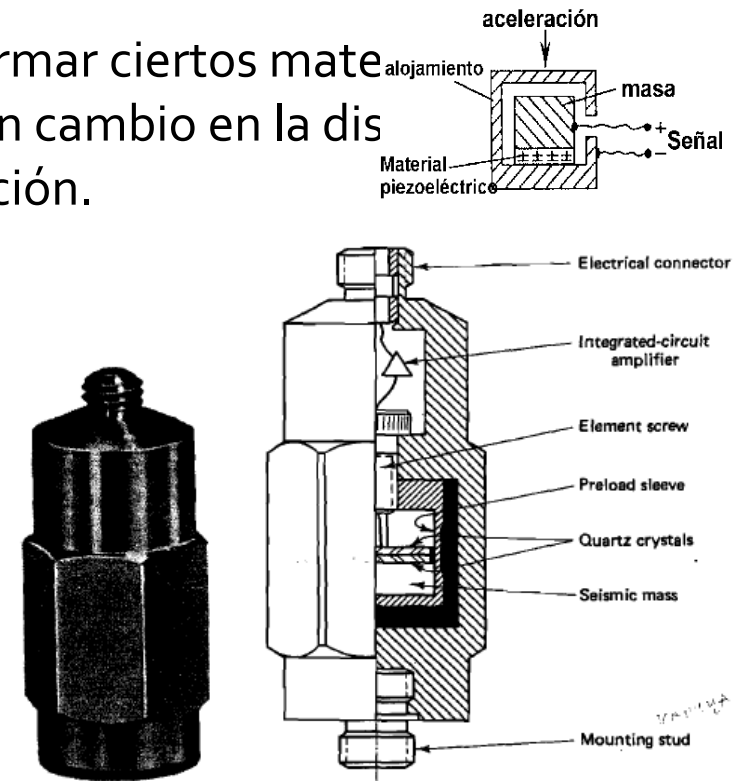


FIGURE 7-3. Piezoelectric accelerometer (general-purpose, with built-in integrated-circuit amplifier). (Courtesy of PCB Piezotronics, Inc.)

Si bien se puede considerar un sensor generador pues el cristal piezoeléctrico acumula cargas, estas no son libres de desplazarse ergo no pueden producir corriente y la impedancia de salida es muy alta.

Por ambas razones, se debe implementar un amplificador de carga o convertidor de impedancia que debe estar incorporado al sensor pues no toleraría la desadaptación con la baja impedancia de un cable.

- Los piezoeléctricos son muy resistentes al no tener partes móviles los que los hace aptos para rangos de 1 a 100.000 g (shock)
- También tienen una amplia gama de respuesta en frecuencias de 0,25 a 10.000 Hz

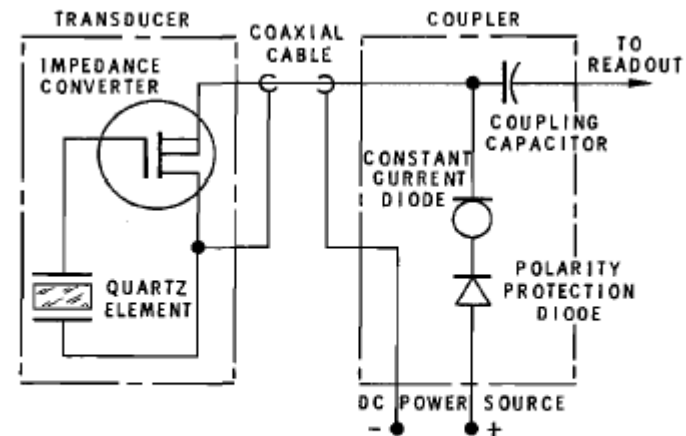


FIGURE 7-5. System diagram for piezoelectric transducer with built-in amplifier/impedance converter. (Courtesy of Sundstrand Data Control, Inc.)

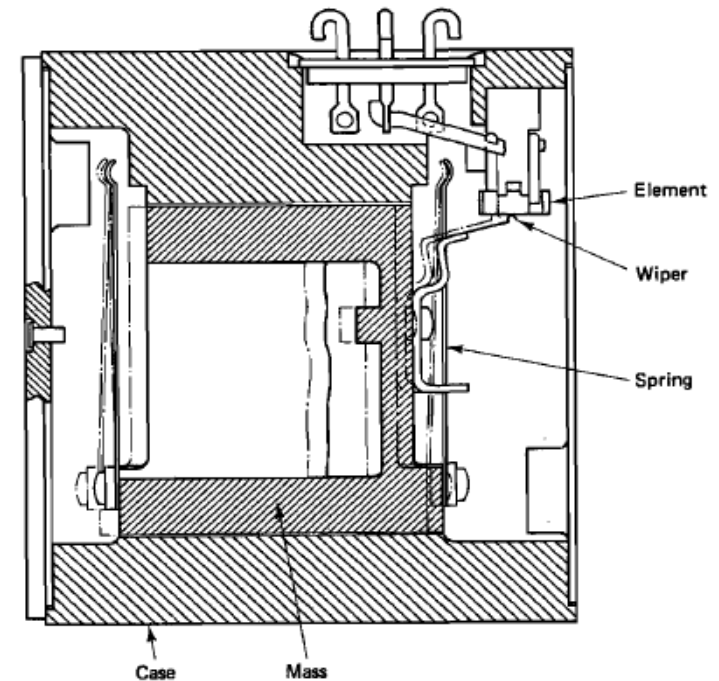


3. Acelerómetro potenciométrico

El desplazamiento del conjunto resorte-masa inercial está vinculado mecánicamente a un curso (wiper) que se desliza sobre el elemento potenciométrico.

La amortiguación puede ser a gas, aceite (más afectada por la T°) o magnética, prefiriéndose la primera.

- Los acelerómetros de este tipo se distinguen por tener una salida analógica en alto nivel y por medir desde prácticamente 0 Hz hasta frecuencias moderadamente bajas del orden de decenas de Hz



4. Acelerómetro reluctivo - LVDT

The spring-mass system is constituted by the transform core which is the seismic mass suspended inside the windings by parallel cantilever springs. The displacement of the ferromagnetic core, due to applied acceleration, results in output voltage changes in the two secondary windings when an AC voltage is applied in the primary winding

- The frequency of the excitation voltage must be substantially higher than the upper limit of the Accelerator frequency range

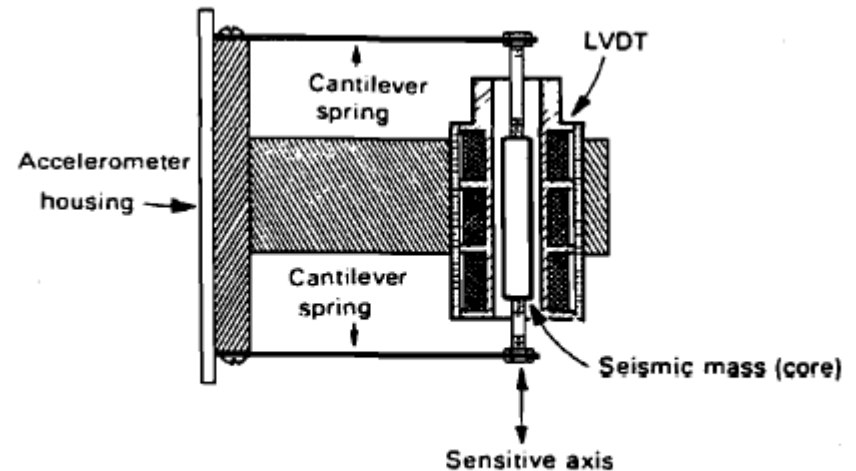


FIGURE 7-7. Reluctive (LVDT) accelerometer. (Courtesy of Schae-vitz Engineering.)

5. Servoacelerómetro

Cuando la aceleración trata de mover la masa del tipo Eddy current, detecta el movimiento es amplificada y usada para accionar un moto péndulo a su posición de reposo.

Es usado para medir magnitudes angulares. Cerrado de balance cero, tiene muy buena precisión a costa de una mayor fragilidad y a un costo alternativo.

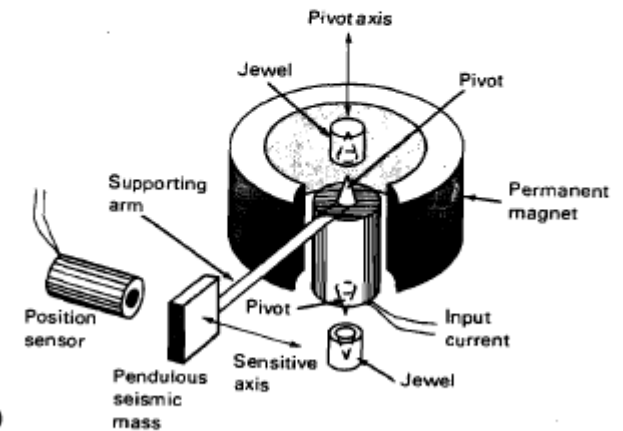
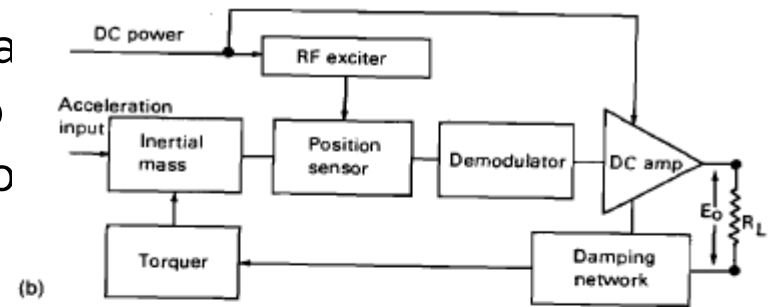


FIGURE 7-8. Servo accelerometer with pendulous mass and reductive displacement sensor: (a) accelerometer; (b) block diagram (R_L , load resistor); (c) simplified mechanism. (Courtesy of Schaevitz Engineering.)

6. Acelerómetro mecánico o de strain gages

En este tipo una o mas strain gages se instalan en las uniones entre la masa inercial y la carcasa del sensor. Se prestan especialm

- Se prestan especialmente para los MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) que, al hacerse integralmente en silicio, pueden incorporar toda la electrónica y resultan a la vez muy pequeños y livianos y con buena sensibilidad
- Por la misma razón, resulta sencillo construir tres acelerómetros para los tres ejes XYZ en una misma pieza
- La fabricación con la tecnología de los semiconductores permite la fabricación en masa a bajo precio.

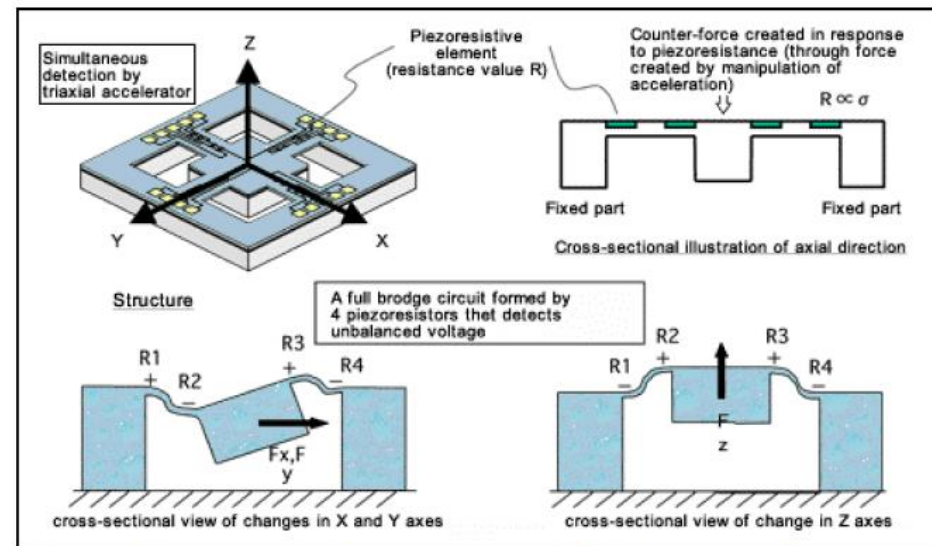
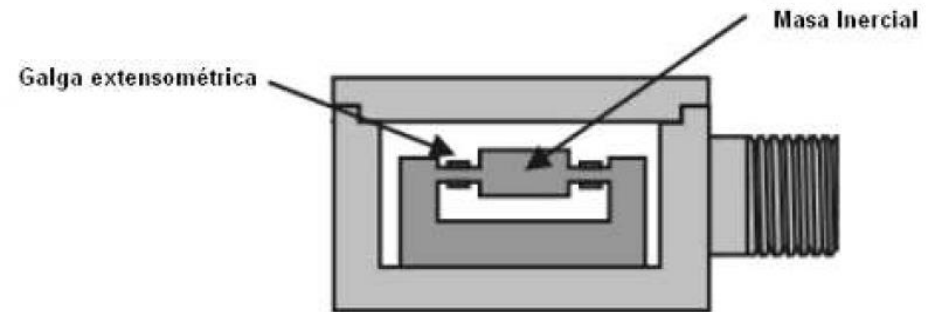
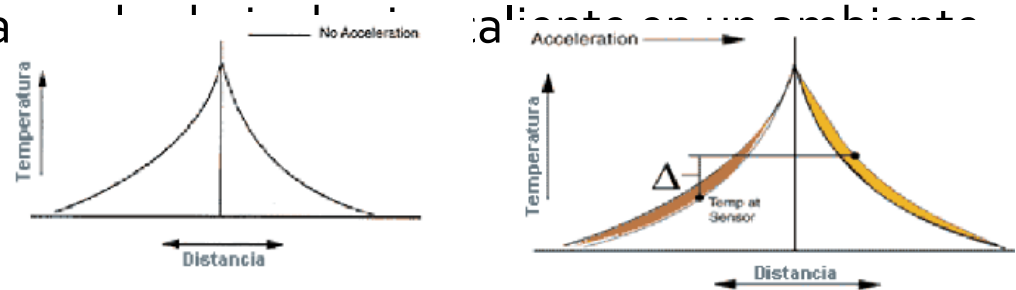
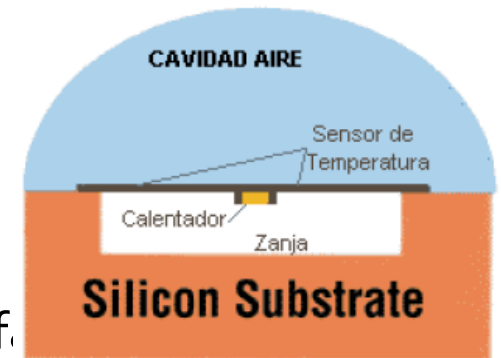


Fig. 25 Esquemático funcionamiento Acelerómetro Hitachi

Acelerómetro térmico

En un sustrato de silicio se inserta una resistencia calefactora a cada lado. La calefacción crea un ambiente sellado.



- En reposo, se crea un gradiente de T° con un máximo centrado y decayendo por igual hacia ambos lados

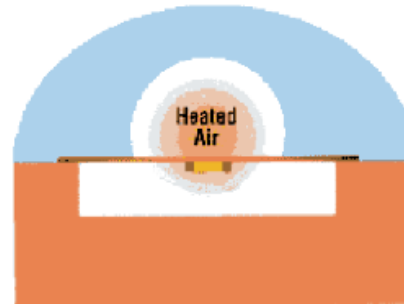


Fig. 16 Acelerómetro en reposo alimentado.

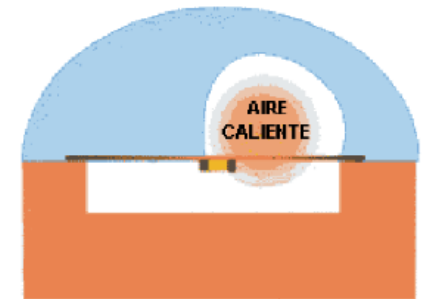


Fig. 17 Efecto de Aceleración

- Cuando ocurre una aceleración, por convección, el aire frío desplaza al caliente y el núcleo de aire caliente se mueve en la misma dirección que aceleración creando un diferencial de T° entre los termopares



COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Comparación de tecnologías

Tipo	Margen de Medida	Ancho de Banda	Ventajas e Inconvenientes	Aplicaciones
MENS	1.5g – 250g	0.1 – 1500	<ul style="list-style-type: none">-Alta Sensibilidad-Coste Medio-Uso sencillo-Bajas Temperaturas	<ul style="list-style-type: none">-Impacto-ABS-Airbag-Uso en automoción
Piezoeléctricos	0g – 2000g	10 – 20000	<ul style="list-style-type: none">-Sensibilidad media-Uso complejo-Bajas temperaturas-No funcionan en continua	<ul style="list-style-type: none">-Vibración-Impacto-Uso Industrial
Piezoresistivos	0g – 2000g	0 – 10000	<ul style="list-style-type: none">-Respuesta en continua y alterna-prestaciones medias-Bajo coste-Tamaño y peso mínimos-Alta Sensibilidad	<ul style="list-style-type: none">-Vibración-impacto-Automoción-Biodinámica-Ensayos en vuelo-Test de túneles de viento
Capacitivos	0g – 1000g	0 – 2000	<ul style="list-style-type: none">-Funciona en continua-Bajo ruido-Baja Potencia-Bajo coste	<ul style="list-style-type: none">-Uso general-Uso industrial-Sistemas de Alarma-Mediciones Sísmicas
Mecánicos	0g – 200g	0 – 1000	<ul style="list-style-type: none">-Alta precisión en continua-Lentos-Alto coste	<ul style="list-style-type: none">-Navegación inercial-Guía de misiles-Herramientas-Nivelación

Algunos ejemplos de acelerómetros comerciales

ADXL: Analog Devices

MXA o MXR: MEMSIC - <https://www.memsic.com/>

LIS: STMicroelectronics

Modelo	Fabricante	Rango de Aceleración	Tensión de Alimentación	Sensibilidad	Ancho de Banda	Package
ADXL 320	ANALOG	± 5 g	2,4 V - 6 V	174 mV/g	2,5kHz	CP-16
ADXL210	ANALOG	± 10 g	3 V - 6 V	40% /g	6kHz	E-8
ADXL 323	ANALOG	± 3 g	1,8 V - 3,6V	300 mV/g	1,6 kHz	LFCSP
MXA2300J/K	MEMSIC	± 1.5 g	2,7 - 5,25 V	300 mV/g	30Hz	LCC8
MXR2312G/M	MEMSIC	± 2.0 g	3,00 V - 5,25 V	312 mV/g	17Hz	LCC8
LIS2L06AL	ST	$\pm 2g/\pm 6g$	2,4 V - 5,25 V	2g=Vdd/5 V/g 6g=Vdd/15 V/g	100Hz	LGA8
LIS2L02AS4	ST	$\pm 2g/\pm 6g$	2,4 - 5,25 V	2g=Vdd/5 V/g 6g=Vdd/15 V/g	100Hz	SO24

Fig. 27 Tabla de características de distintos acelerómetros.



CRITERIOS DE SELECCIÓN



Selección de acelerómetros

Rango de aceleraciones esperado

Rango de frecuencia

Sensibilidad transversal

Tamaño

Montaje

Tipo de salida, acondicionamiento de señal

Limitaciones de ambiente como temperatura y compatibilidad química

Costo





APLICACIONES



Mercado de acelerómetros por aplicación

- Automotriz
- Industrial
- Electrónica de consumo
- Aeroespacial y Defensa
- Otros





Segmento de mercado por tipo:

- Acelerómetro MEMS de 1 eje
- Acelerómetro MEMS de 2 ejes
- Acelerómetro MEMS de 3 ejes
- 6 ejes: giroscopio de 3 ejes y acelerómetro de 3 ejes
- 9 ejes: giroscopio de 3 ejes, acelerómetro de 3 ejes y brújula de 3 ejes



■ Recientes lanzamientos

Abril de 2019: el iXal A5 de iXblue se presentó como el primer acelerómetro de grado de navegación dedicado a aplicaciones de alto rendimiento. El iXal A5 se puede utilizar en varias aplicaciones civiles y de defensa de alto rendimiento, que incluyen navegación terrestre, aérea, de superficie y submarina, orientación, monitoreo de puentes y estabilidad, así como monitoreo de plataformas de perforación en alta mar.

■ Recientes lanzamientos

Abril de 2019: STMicroelectronics lanzó STM32GO para aplicaciones industriales más inteligentes. STM32 tiene un microcontrolador, un acelerómetro, un micrófono MEMS en el kit de desarrollo de IoT industrial. Este kit de desarrollo es útil para el mantenimiento proactivo de equipos de fabricación, ya que detecta cambios leves en las primeras etapas de la falla, antes de que se produzcan daños o gastos graves.



Algunas aplicaciones de acelerómetros

Aplicaciones como sensor de movimiento o actividad humana – El podómetro

Inclinómetro

Prospección sísmica





Sensado movimiento humano

Hay múltiples razones por las que interesa medir y registrar el movimiento humano que normalmente describimos como biomecánica, tanto para personas sanas, como especiales (tanto discapacidad como deportistas)

Un instrumento típico, comercialmente masivo por su uso y aajo precio, es el podómetro.

Como su nombre lo indica (podos – pie o pata), mide los pasos en base a un acelerómetro, grlmte. de al menos dos ejes, más un DSP que asegura registrar solo los movimientos repetitivos (pasos).

Para convertir el movimiento a otras magnitudes, se debe calibrar el paso promedio, así podremos expresar resultados en distancia recorrida y si se agrega altura y peso se puede hacer un cálculo estimativo de calorías consumidas por el esfuerzo.



Sensado movimiento humano



- ¿Alguien se anima a colocar un acelerómetro 3D en una montura en el festival de la doma en Jesús María para medir a , v y $x, y, z(t)$?



Inclinómetro

Inclinómetro es un instrumento usado para medir la inclinación del plano con respecto de la horizontal

En términos navales el inclinómetro permite medir el grado de escora de un buque respecto a su eje radial o el grado de inclinación longitudinal o axial

En topografía pueden medir el ángulo de inclinación del terreno respecto del plano horizontal terrestre usando un inclinómetro de terreno, para de este modo modelar el terreno estudiado

En la industria aeronáutica, el inclinómetro permite al piloto conocer la posición de las alas respecto del falso horizonte del instrumento.

Se puede implementar con un simple péndulo, el conocido nivel de burbuja, o con un acelerómetro que, al estar vertical medirá g (o $-g$)

¿Como sabemos los humanos donde es arriba y donde abajo? ¿Tenemos un acelerómetro incorporado? ¿Como funciona?

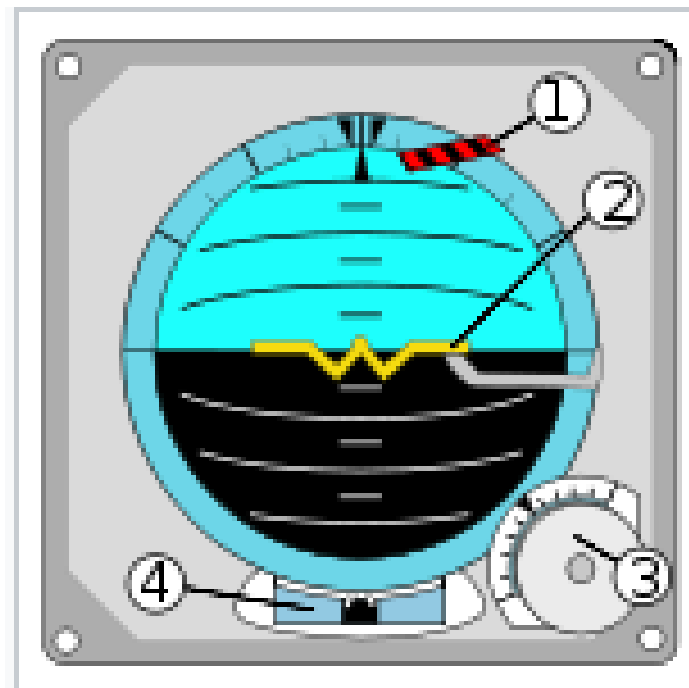




Inclinómetro



Inclinómetro de gravedad instalado en la línea de crujía de un buque



Horizonte artificial de aviación





Prospección sísmica

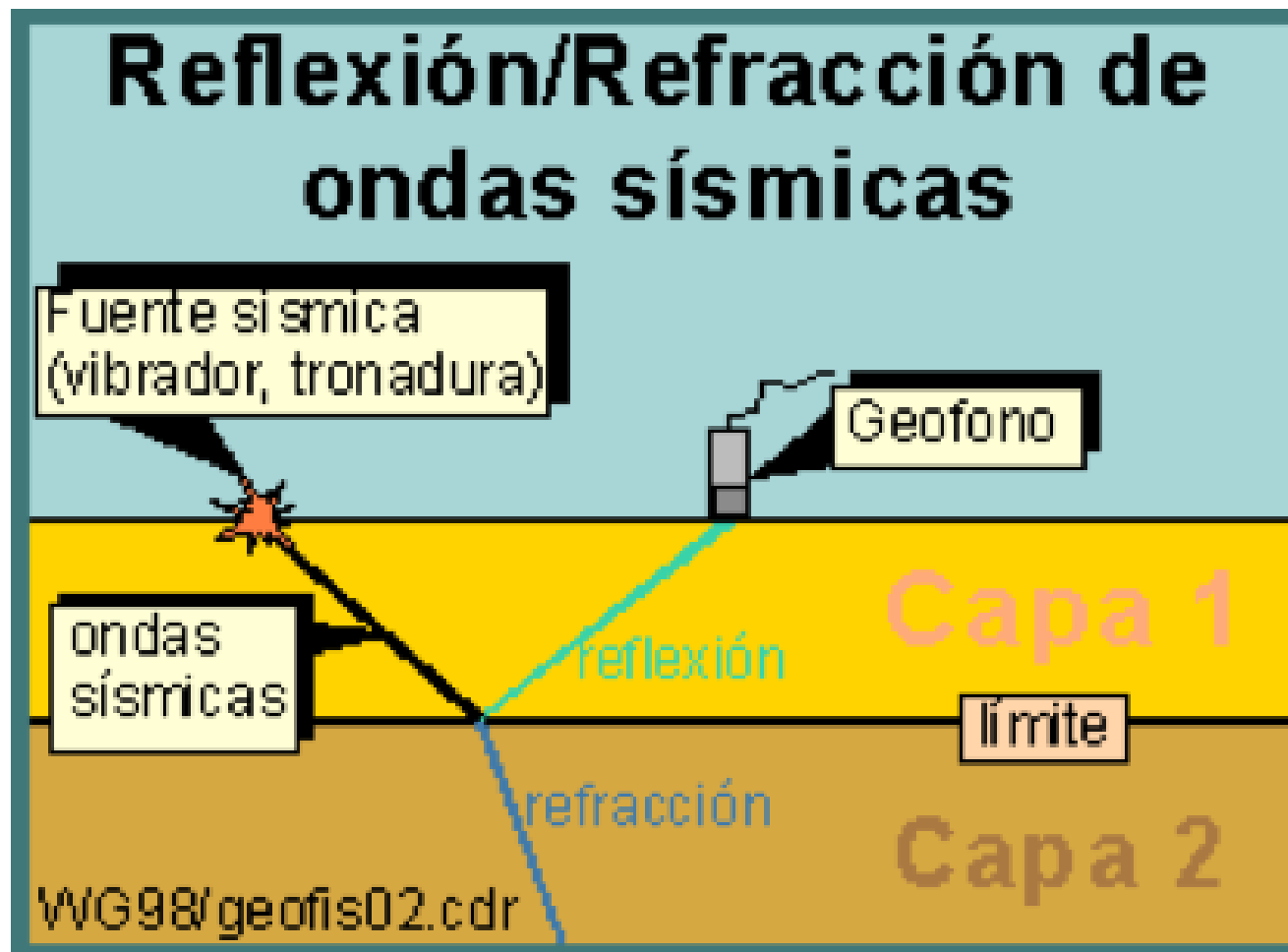
Es un antiguo sueño del hombre “adivinar” que hay de valioso en las profundidades de la tierra sin tener que cavar para saberlo...

La prospección sísmica usa una combinación de fuente de sonido (explosiones, cañón de aire, vibrador) y de receptores (hidrófonos en agua y geófonos, en tierra aunados a software muy sofisticado de procesamiento de señales.

Dado que las señales sísmicas son de baja frecuencia, es posible diseñar instrumentos basados en acelerómetros para pey evaluar el efecto de las vibraciones del tráfico en un edificio histórico.

Es posible pey midiendo en un lab de la fcefy definir qué tipo de vehículo está pasando por la Av. Vélez Sarsfield







Principales fabricantes:

Analog Devices

Robert Bosch

Honeywell Honeywell2

TDK

Rockwell Automation



STMicroelectronics

NXP Semiconductors

Northrop Grumman



Principales fabricantes:

Meggitt

Murata Manufacturing

Safran Colibrys

Kearfott

Al Cielo





BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

Cap 7 – Handbook of transducers, Norton

Catálogo Omega on-line - Acelerómetros:

<https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>

Biblioteca de ingeniería, Univrsidad. de Sevilla

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

Analog Devices Sensors <https://www.analog.com/en/products/sensors-mems.html>

Información de fabricantes en material del aula virtual de este módulo dedicado a sensores de aceleración