



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

## “DISEÑO DE UN ACELERÓMETRO UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE NAVEGACIÓN ÓPTICA A PARTIR DE UN MOUSE PARA COMPUTADOR”

Tesis para optar al título de:  
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:  
Sr. Adolfo R. Castro Bustamante.  
Ingeniero Civil. M.Sc. en Ingeniería.  
Civil.  
Especialidad Estructuras.

CARLOS ALBERTO MONCADA DELGADO  
VALDIVIA -CHILE  
2008

## **Agradecimientos**

Quiero mencionar a algunas personas que hicieron posible que este trabajo haya tenido el rumbo y el resultado esperado. Al director del instituto de Obras Civiles Sr: Luis Collarte quien confió en el proyecto y canalizo apoyo económico para su realización, a Carlos Stange Ingeniero Civil Informático de la Universidad Austral quien desarrollo el software que complementa esta investigación y compartió conocimientos.

# Índice

	Contenido	Pág.
Resumen		
Resumen Técnico		
Summary		
<b>Capítulo I</b>		
<b>Metodología</b>		
1.1	Introducción	1
1.2	Estado de la técnica	2
1.3	Planteamiento del problema	3
1.4	Hipótesis	3
1.5	Objetivos	3
1.6	Variables e indicadores	4
<b>Capítulo II</b>		
<b>Vibraciones</b>		
2.1	Vibraciones Mecánicas	5
2.1.1	Vibraciones Libres	6
2.1.2	Vibraciones Forzadas	7
2.2	Análisis Dinámico	8
2.2.1	Características esenciales de las solicitaciones dinámicas	8
2.2.2	Tipos de solicitaciones	8
2.2.2.1	Solicitaciones para acelerómetros de baja frecuencia	10
2.2.2.2	Solicitaciones para acelerómetros de alta frecuencia	11
2.2.3	Vibradores de un grado de libertad	12
2.2.4	Periodo propio de vibración	12
2.2.4.1	Método de Rayleigh	13
2.2.5	Efecto de la aceleración gravitacional	14

2.2.6 Vibración amortiguada	15
2.2.6.1 Tipos de amortiguamiento	15
2.2.6.2 Tipos de amortiguadores	16
2.2.7 Ecuación de movimiento del vibrador libre amortiguado	17
2.2.7.1 Amortiguamiento crítico	17
2.2.7.2 Sistema Sobreamortiguado	19
2.2.7.3 Sistema Sub Amortiguado	19
2.2.7.4 Decremento Logarítmico	21
2.2.8 Vibración forzada	22

## Capítulo III

### Transductores de Vibración

3.1 Introducción	26
3.2 Transductores de vibración	27
3.3 Características fundamentales de un acelerómetro	28
3.3.1 Sensibilidad	28
3.3.2 Resolución	28
3.3.3 Sensibilidad Transversal	29
3.3.4 Linealidad de la amplitud	29
3.3.5 Linealidad de la frecuencia	30
3.3.6 Limite de baja frecuencia	31
3.3.7 Limite de alta frecuencia	31
3.3.8 Efectos ambientales	32
3.3.9 Propiedades físicas	34
3.4 Funcionamiento de mouse como transductor	35
3.4.1 Características del transductor	36
3.4.2 Teoría de la operación	37
3.4.3 Funcionamiento de los chips CMOS y CCD	44
3.4.4 El transductor HDNS-2000 como odómetro	45
3.4.5 El transductor ADNS-2610 como cámara digital y scanner	45

## **Capítulo IV**

### **Diseño del acelerómetro**

4.1 Introducción	47
4.2 Sensor	48
4.2.1 Características de los sensores	48
4.2.2 Sensor de viga en volado	48
4.2.3 Sistema de amplificación de desplazamientos	50
4.2.4 Características del modelo experimental	55
4.3 Software controlador de dispositivo	59
4.3.1 Elaboración del software	59
4.3.2 Operación del software	60

## **Capítulo V**

### **Ensayos y resultados**

5.1 Ensayo de determinación de error	64
5.2 Ensayo de determinación de frecuencia propia	66
5.3 Ensayo de determinación de amortiguamiento	67
5.4 Ensayo de determinación de sensibilidad	67
5.4.1 Ensayo de sensibilidad transversal	69
5.5 Ensayo de determinación de resolución	72

## **Capítulo VI**

### **Conclusiones**

6.1 Introducción	78
6.2 Conclusiones	81
6.3 Trabajo futuro	84
6.4 Aplicaciones	85
Bibliografía	86
Anexos	88

# Índice de figuras y tablas

Contenido	Pág.
Figura N°1 Sismógrafo analógico	6
Figura N°2 Acelerómetro experimental	6
Figura N°3 Sismógrafo de Zhang Heng	7
Figura N°4 Acelerograma del terremoto de Kermadec	10
Figura N°5 Sensor en donde se aprecia la acción de la gravedad	14
Figura N°6 Amortiguamiento Critico	18
Figura N°7 Sistema Sub amortiguado	20
Figura N°8 Decremento logarítmico	21
Figura N°9 Diagrama vectorial rotatorio	22
Figura N°10 Amplificación dinámica	24
Figura N°11 Angulo de desfase	25
Figura N°12 Secuencia de funcionamiento del acelerómetro óptico propuesto	27
Figura N°13 Sensibilidad transversal	29
Figura N°14 Linealidad de la amplitud	30
Figura N°15 Limites de trabajo de un transductor	32
Figura N°16 Mouse Apple	35
Figura N°17 Mouse Genius utilizado en el modelo experimental	35
Figura N°18 Funcionamiento del Mouse, Imágenes continuas.	37
Figura N°19 Transductor Genius, Elevación	37
Figura N°20 Especificaciones principales del transductor	38
Figura N°21 Especificaciones generales del transductor	39
Figura N°22 Diagrama de bloque	40
Figura N°23 Tiempo de encendido	41
Figura N°24 Error lineal del transductor @1500fps	41
Figura N°25 Resolución v/s z	41
Figura N°26 Resolución v/s velocidad	42
Figura N°27 Mouse Agilent	42

Contenido	Pág.
Figura N°28 Registro SQUAL (Surface Quality)	43
Figura N°29 Chip CCD	44
Figura N°30 Chip CMOS	44
Figura N°31 Chip CMOS, Vista microscópica	45
Figura N°32 Función Scanner	46
Figura N°33 Función Cámara	46
Figura N°34 Sensor de viga empotrada con amortiguamiento viscoso	49
Figura N°35 Rotula libre	50
Figura N°36 Rotula fija	51
Figura N°37 Diagrama sistema de amplificación	52
Figura N°38 Elevación acelerómetro (sin escala)	53
Figura N°39 Cortes acelerómetro (sin escala)	54
Figura N°40 Modelo acelerómetro 3D	55
Figura N°41 Foto de viga durante su fabricación	57
Figura N°42 Configuración de Windows	62
Figura N°43 Dispersión de la tabla N°3	64
Figura N°44 Dispersión de la tabla N° 4	65
Figura N°45 Acelerograma equipo experimental para obtener la sensibilidad transversal en X	70
Figura N°46 Acelerograma equipo experimental para obtener la sensibilidad transversal en Y	71
Figura N°47 Acelerograma equipo experimental para obtener el periodo propio y el grado de Amortiguamiento 1	72
Figura N°48 Acelerograma equipo experimental para obtener el periodo propio y el grado de Amortiguamiento 2	73
Figura N°49 Acelerograma equipo experimental para obtener el periodo propio y el grado de Amortiguamiento 3	74
Figura N°50 Acelerograma equipo experimental para obtener el periodo propio y el grado de Amortiguamiento 4	75
Figura N°51 Grafica de amplificación dinámica del acelerómetro	76
Figura N°52 Grafica de ángulo de desfase FI del acelerómetro	77

Contenido	Pág.
Tabla N°1 Clasificación extraída del catalogo de acelerómetros Wilcoxon	9
Tabla N°2 Registro de aceleraciones	61
Tabla N°3 Desviación y error del sensor en X	64
Tabla N°4 Desviación y error del sensor en Y	64
Tabla N°5 Periodo propio Criterio 1	66
Tabla N°6 Periodo propio criterio 2	66
Tabla N°7 Grado de amortiguamiento	67
Tabla N°8 Sensibilidad con el método de inclinación @1600dpi	67
Tabla N°9 Sensibilidad con el método de la evaluación de la gravedad @1600dpi	68
Tabla N°10 Sensibilidad con el método de inclinación @800dpi	68
Tabla N°11 Sensibilidad con el método de la evaluación de la gravedad @800dpi	69
Tabla N°12 Sensibilidad transversal en X	69
Tabla N°13 Sensibilidad transversal en Y	71
Tabla N°14 Especificaciones del acelerómetro	80
Tabla N°15 Tabla de comparación	82

## Índice de anexos

	Contenido	Pág.
Anexo 1	Especificaciones de acelerómetros Wilcoxon	88
Anexo 2	Especificaciones generales acelerómetro Wilcoxon 993B	89
Anexo 3	Planilla para tratamiento de datos de aceleraciones	90
Anexo 4	Archivo estándar de aceleración	91
Anexo 5	Código Software Acelerómetro V1	93

## Resumen

Se ha desarrollado un acelerómetro que opera en dos ejes de manera simultánea (vector aceleración) utilizando como elemento transductor el sensor óptico CMOS de un mouse para ordenador con un error lineal de lectura de 0.4% y una velocidad de muestreo de 1/10000seg. El equipo consiste en un sensor de viga en volado con un plomo en su extremo, la lectura se realiza sobre una cartulina reciclada solidaria a la viga, el sistema de amortiguamiento es de tipo viscoso.

En la actualidad el mercado de acelerómetros se compone principalmente de transductores piezoeléctricos, piezorresistivos, ópticos, interferómetros de fibra óptica y capacitivos. Los equipos piezorresistivos y piezoeléctricos sufren de sensibilidad a la temperatura, debiendo incorporar compensadores y reguladores de esta. Los acelerómetros capacitivos no son dependientes de la temperatura sin embargo tienen muchos problemas con interferencia magnética. Los acelerómetros que operan con sensor óptico son inmunes a la temperatura y al calor. Los sensores de navegación óptica desarrollado por Agilent incorporados en los mouse operan entre -15 y 55°C sin experimentar interferencias magnéticas.

Dentro de las ventajas de utilizar este transductor se encuentra el bajo costo, la conectividad y lo avanzado de la técnica utilizada, debido a la importancia y crecimiento del mercado para el cual se ha desarrollado. El equipo se complementa con un Software controlador, y tiene el mismo soporte Plug & Play de los mouse convencionales.

Una vez evaluadas las características del acelerómetro experimental es posible afirmar que el equipo posee algunas características superiores a los equipos con los que se comparó, destacan la velocidad de muestreo y la conectividad, en otras características importantes es muy inferior como por ejemplo sensibilidad, tamaño y rango de operación reducido.

El equipo experimental puede ser optimizado mediante manufactura profesional y un nuevo diseño evolucionado del modelo experimental, esto le conferirá condiciones para ser utilizado y comercializado.

## Summary

### **“Design of an accelerometer using optical navigation technology from a computer mouse to”**

It has developed an accelerometer that operates on two axes simultaneously (vector acceleration) used as the sensor element transducer CMOS optical mouse to a computer with an error linear reading of 0.4% and a sampling rate of 1/10000seg. The team consists of a sensor beam flown in with a lead at the end, the reading is done on a recycled cardboard solidarity to the beam, the system is a viscous damping.

At present the market for accelerometers consists mainly of piezoelectric transducers, piezorresistivos, optical, fiber optic interferometers and capacitive. The teams piezorresistivos and piezoelectric suffer sensitivity to temperature, and must incorporate this compensators and regulators. The capacitive accelerometers are not dependent on temperature, however, have many problems with magnetic interference. The accelerometers that operate with optical sensor is immune to temperature and heat. The optical navigation sensors developed by Agilent embedded in the mouse operate between -15 and 55 ° C with no magnetic interference.

Among the advantages of using this transducer is the low cost, connectivity and the lateness of the technique used, because of the importance and growth of the market for which has been developed. The team is complemented with a software driver, and has the same support Plug & Play of the conventional mouse.

Once evaluated the characteristics of accelerometer pilot it can be said that the team has some characteristics superior to the teams with which they compared, highlighting the speed sampling and connectivity, in other very important features such as lower sensitivity, size and reduced operating range.

The experimental equipment can be optimized through professional and manufacturing a new design evolved from experimental model, it does confer conditions to be used and marketed.

## Resumen Técnico

El resumen técnico se utiliza como apoyo al resumen y presenta las características del equipo algo más detalladas, con datos técnicos que posibilitan una visión resumida del desarrollo del instrumento y su fundamentación.

(Este resumen ha sido elaborado con la finalidad de conseguir aportes de empresas de la zona para financiar la ampliación del proyecto)

Un mouse para computador, se puede considerar como una herramienta con tecnología de punta, estos equipos periféricos han desarrollado sus cualidades explosivamente con la finalidad de satisfacer mercados cada vez más amplios y exigentes a precios muy competitivos. La electrónica incorporada con microprocesador ofrece un transductor flexible con una variedad de prestaciones (Palacín. et al., 2005). El mouse envía al computador información precisa sobre la velocidad del desplazamiento de su base con una frecuencia de 10.000 datos en un segundo<sup>1</sup>. Esta precisión junto a un diseño adecuado y un software le podrían permitir convertirse en un sistema de bajo costo.

En la actualidad existen una variada gama de acelerómetros ópticos basados en foto sensores de gran precisión. Podemos encontrar publicaciones sobre diseño de acelerómetros biaxiales de fibra óptica, utilizando como elemento sensible una viga en voladizo (Dinev p., 1996).

Basados en el mismo principio elaboramos un acelerómetro que detecta el desplazamiento de una masa en el extremo de una viga en voladizo utilizando una fotografía del reflejo de un LED (light-emitting diode) sobre una superficie reflejada en un sensor CMOS (complimentary metal-oxide semiconductor) el cual envía las imágenes a un DSP (digital signal processor) o microprocesador para un análisis de 18 millones de instrucciones por segundo. El proceso descrito corresponde al funcionamiento de un mouse óptico y la tecnología involucrada se denomina “Navegación Óptica”.

Un software toma los datos enviados por el microprocesador y lo identifica como un acelerómetro, posteriormente entrega los datos de la velocidad instantánea en una hoja de excel, posteriormente mediante un proceso matemático se deduce el valor del desplazamiento de la masa:

$$\sum_t^{t+1} V_{Inst.} = D_{(t,t+1)}$$

con  $V_{Inst.}$  = velocidad instantánea y  $D_{(t,t+1)}$  el desplazamiento en (t,t+1).

---

<sup>1</sup> Valores entregados por el software diseñado para este estudio

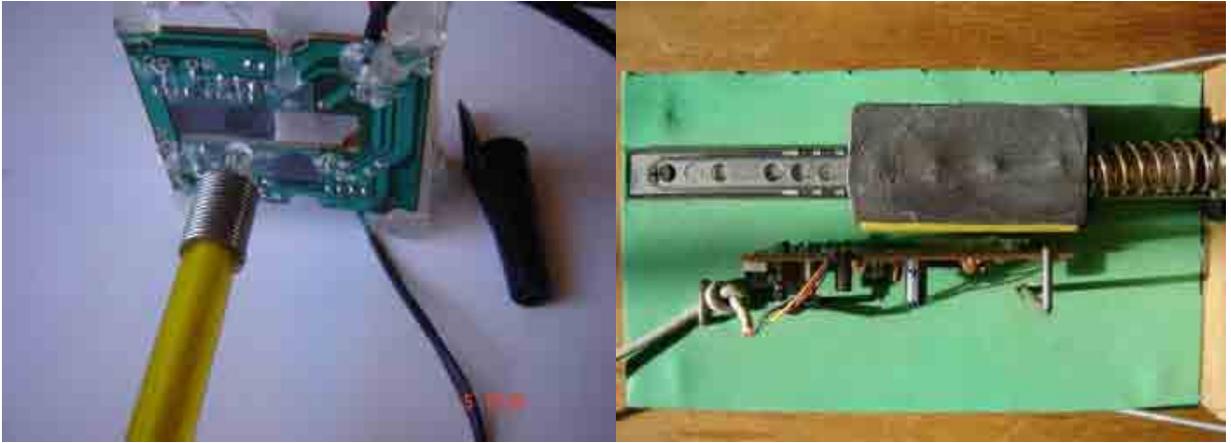


Fig. 1: Acelerómetro biaxial laser 1600DPI elaborado con una viga en voladizo

Fig. 2: Acelerómetro mono axial de 800DPI

## Consideraciones Teóricas

El sensor del mouse graba el desplazamiento de la masa que vibra por efecto de las excitaciones recibidas desde su base. El sensor es capaz de registrar la velocidad en 2 dimensiones simultáneamente. Las ecuaciones dinámicas que rigen el movimiento de la masa sísmica son dependientes de la masa ( $m$ ), la rigidez ( $k$ ) y el amortiguamiento ( $c$ ) del sistema vibratorio, teniendo el vector  $D=(x,y)$  como desplazamientos y  $\ddot{v}_0 = \left( \frac{F_x(t)}{m_x}, \frac{F_y(t)}{m_y} \right)$  como la aceleración que se desea medir.

(1)

$$m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_x(t)$$

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = F_y(t)$$

El valor de la aceleración se obtiene del análisis de dos variables: La amplificación dinámica  $AD(r)$ , y el desfase en el tiempo de respuesta del vibrador.

(2)

$$D(x(t), y(t)) = -\frac{m}{k} \ddot{v}_0 AD(r) \sin\left(t - \frac{2\xi}{\omega}\right)$$

En la ecuación 2 se aprecia que la aceleración es igual al desplazamiento de la masa por un factor de escala  $-\frac{m}{k}$ , una función no lineal  $AD(r)$  y un retraso en el tiempo  $\frac{2\xi}{\omega}$ . La no linealidad de  $D(r)$  se transforma

en el problema y la solución consiste en hacerla lineal por partes. Por ejemplo para amortiguamientos de 68% del crítico la ecuación es cuasi lineal e igual a 1 para  $0 < r < 0.6$  según Paz M, (1991) y Clough R., (1995).

## Software

Se ha diseñado un software para Windows, que toma los datos justo después de que el OS (Operative System) reconoce el dispositivo como un mouse. Esto significa que podemos conectar un mouse Bluetooth, por ejemplo, y convertirlo en un dispositivo inalámbrico.

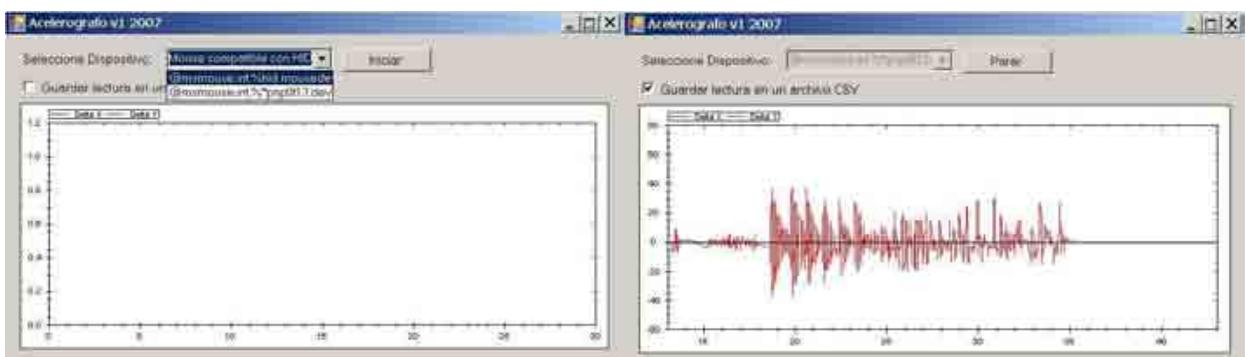
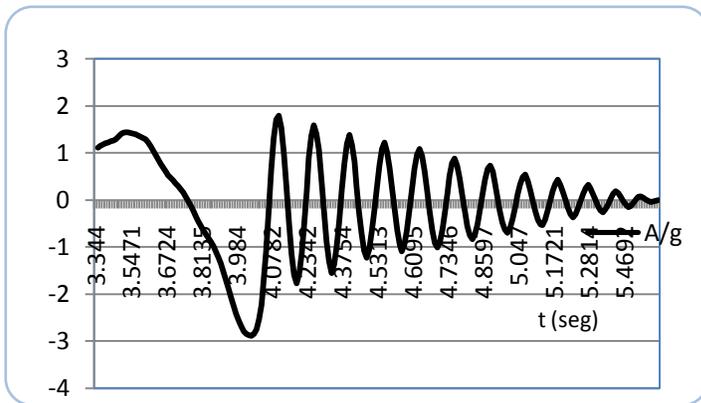


Fig. 3 (izquierda): Pantalla de selección de mouse para ser reconocido como acelerómetro

Fig. 4: Acelerograma arbitrario registrado por el equipo de la Figura 2

El software entrega una grafica en tiempo real y guarda en un archivo CSV (Formato compatible con Excel) los datos de la fecha, hora, segundos,  $v_x$  y  $v_y$  (velocidad en los ejes de lectura). Luego se integra numéricamente y se obtiene el acelerograma definitivo.



Veloc. De lectura	V	30.72	Cm./Seg.
Sensibilidad de lectura	X0	0.003	Cm.
Periodo Propio	T0	+/-0.088	Seg.
Sensibilidad	S	+/-0.0072	g.
Aceleración de lectura	A	0.8	g.
Respuesta de frecuencias	(R)	0 a +/-0.7	Hz.
Grado de Amortiguamiento	C	+/-5	%

Fig. 5(izquierda): Acelerograma de la vibración libre del acelerómetro de la figura 2 después de una excitación inicial.

Fig. 6: Rango de trabajo de equipo experimental.

De este grafico obtenemos los rangos de frecuencia de trabajo del instrumento. También es posible medir la sensibilidad de lectura.

# Capítulo I

*“Metodología”*

## 1.1 Introducción

Los acelerómetros en la actualidad, son utilizados en variadas disciplinas, la diferenciación principal entre uno y otro tiene que ver con el rango de operación de frecuencias del instrumento, la que esta condicionada por su periodo propio. Otras diferenciaciones importantes son la sensibilidad, la susceptibilidad a la temperatura y a campos magnéticos.

La tecnología utilizada en la gran mayoría de los instrumentos comercializados en la actualidad corresponde a acelerómetros de transductor piezoeléctrico y cuerpo a cizallamiento (Eller. et al., 1995). Estos acelerómetros requieren un preamplificador PCI (de circuito integrado) y un amplificador externo que envía señales digitales a un computador.

Cabe destacar las diferencias de costo de estos equipos dependiendo de la tecnología involucrada y la demanda implicada en su fabricación. Podemos decir que los acelerómetros de alta frecuencia, usados mayormente en maquinas para prevenir desperfectos (aeronáutica, industria en general), tienen un valor comercial bajo en comparación a los equipos sísmicos de gran sensibilidad.

Consideraré como motivación de desarrollo de este tema: **“La generación de tecnología a partir de elementos cotidianos como el mouse”**.

## 1.2 Estado de la técnica

El campo de aplicaciones de los acelerómetros es muy amplio. Este hecho ha motivado la necesidad de hacer dispositivos con prestaciones elevadas a un bajo coste, originando un gran auge e incremento de los acelerómetros comerciales basados en tecnologías de micro mecanización del silicio. El primer acelerómetro de silicio fue desarrollado por Roylance en (1979). Los principales tipos de acelerómetros de silicio según sus elementos sensores son: Los piezorresistivos.

Los acelerómetros piezorresistivos sufren de una gran dependencia con la temperatura lo cual hace necesaria la implementación de un sistema de compensación en temperatura. Por otra parte, los acelerómetros capacitivos no dependen de la temperatura pero, debido a los pequeños valores de las capacidades que se pueden obtener en los sensores capacitivos micro electrónicos, tienen muchos problemas con las interferencias electromagnéticas. En algunas aplicaciones es necesario que los acelerómetros sean insensibles a las radiaciones electromagnéticas a las que pueden estar sujetos, los acelerómetros ópticos tienen la ventaja de ser inmunes a las radiaciones electromagnéticas y los efectos de la temperatura el control del amortiguamiento de la estructura y los sistemas de protección de choques dotan a los acelerómetros de mejores prestaciones.

Como ejemplo un control del amortiguamiento y un sistema de protección de choques fue diseñado por NOVASENSORS utilizando una tecnología basada en la soldadura directa silicio-silicio para definir el sistema de protección de choques y soldadura silicio-vidrio para controlar el amortiguamiento. Los sistemas de testeo automático dotan a los dispositivos de la posibilidad de determinar su correcto funcionamiento. El desarrollo de sistemas de testeo automático es de gran interés en el caso de los acelerómetros.

## **1.3 Planteamiento del problema**

Existe un tipo de sensor desarrollado para los mouse comerciales que puede ser adaptado y usado como transductor en distintos tipos de aplicaciones. Existen investigaciones acerca de su incorporación como odómetro en robots automatizados, visores con funcionalidad ocular para robots y scanner. La velocidad de crecimiento del mercado de ordenadores y periféricos ha permitido que estos transductores sean lo suficientemente ágiles para ser el corazón de sistemas de medición cada vez mas precisos.

## **1.4 Hipótesis**

Dada las características de los transductores utilizados en los mouse comerciales, es posible diseñar acelerómetros de prestaciones similares a las de los equipos convencionales.

## **1.5 Objetivos**

### **Objetivo General**

- Se intenta desarrollar un acelerómetro utilizando un mouse como transductor

### **Objetivos Específicos**

- Generar la tecnología involucrada en un acelerómetro digital.
- Construir evolutivamente diferentes modelos experimentales de acelerómetros digitales.

### **Objetivos Transversales**

- Contribuir al desarrollo de instrumentación de menor costo que la utilizada actualmente.
- Abrir un campo de investigación sobre desarrollo de acelerómetros digitales.
- Contribuir al desarrollo de futuras producciones comerciales de acelerómetros.

## 1.6 Variables e indicadores

### 1 Características del transductor

- Sensibilidad
- Resolución
- Velocidad de lectura
- Rango de operación dependiente de variables físicas (temperatura , humedad)

### 2 Características del sensor

- Cualidades físicas (m, c, k)
- Frecuencias de operación lineal
- Rango de operación dependiente de variables físicas (temperatura, humedad)

### 3 Funcionalidad del sistema transductor

- Conectividad
- Software
- Velocidad de muestreo
- Interfaz usuario ordenador
- Rango de operación del sistema transductor dentro del sistema Operativo

Se recopila la información necesaria para evaluar las características del acelerómetro y así compararlo directamente con un catalogo de acelerómetros comerciales.

# Capítulo II

*” Vibraciones”*

## 2.1 Vibraciones Mecánicas

El estudio de las vibraciones se refiere a los movimientos oscilatorios de los cuerpos o medios y a las fuerzas asociadas con ellos.

Las características de las vibraciones son dependientes de factores intrínsecos del vibrador como su masa ( $m$ ), rigidez ( $k$ ) y amortiguamiento ( $c$ ), además de la forma o tipo de excitación solicitante.

La cuantificación de vibraciones se efectúa mediante instrumentos que miden aceleración (Acelerómetros) y otros que miden directamente el desplazamiento del suelo o del lugar donde están instalados (sismómetros). También existen sensores de velocidad. En la **Figura N°1 y 2** se aprecia un sismómetro de lectura análoga y un acelerómetro de lectura digital.

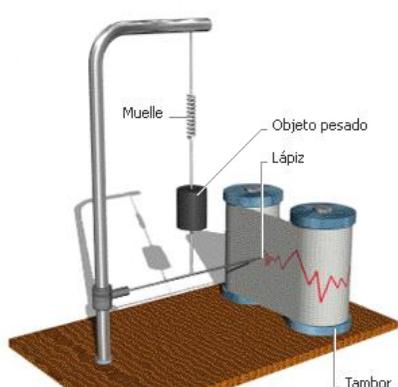


Figura N° 1 y 2: Instrumentos de medición de vibraciones: a la izquierda representación de un sismógrafo analógico que registra sobre un rollo de papel, a la derecha un acelerómetro óptico captura el desplazamiento de la masa con un dispositivo extraído de un mouse óptico.

## 2.1.1 Vibraciones Libres

Las vibraciones libres ocurren cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al mismo y cuando las fuerzas externas aplicadas son inexistentes. El sistema bajo vibración libre vibrará a una o más de sus frecuencias naturales o modos de vibrar que son propiedades del sistema dinámico dependientes de su distribución de masa y rigidez.

Es conveniente detallar las propiedades de un oscilador libre en un sistema conservativo para determinar las características propias del vibrador independientes de la fuerza excitadora y el amortiguamiento. De la ecuación 1 se desprende el diagrama de cuerpo libre.

$$m\ddot{x} + kx = F(t) = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

La solución general para esta ecuación corresponde a una vibración sinusoidal del tipo:

$$x(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$x(t) = A \sin (\omega t + \varphi) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$x(t) = x_0 \cos \omega t + \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin \omega t \quad \text{Ecuación 1.3}$$

## 2.1.2 Vibraciones Forzadas

Las vibraciones que tienen lugar bajo la excitación de fuerzas externas son vibraciones forzadas; cuando la excitación es oscilatoria, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de la excitación, y si ésta coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se produce una situación de resonancia pudiendo generar oscilaciones peligrosamente grandes.



**Fig. Nº 3 Sismografo de Zhang Heng. Construido en china el año 130dc. Es considerado el primer instrumento de detección de vibraciones moderno.**

## **2.2 Análisis Dinámico**

El análisis dinámico ofrece distintos métodos para modelar y predecir el comportamiento de un acelerómetro o una estructura sometida a cargas que varían en el tiempo. Esto permite considerar fenómenos como la resonancia, además de modelar casi cualquier vibración mediante series de Fourier.

Actualmente existen registros y control permanente de aceleraciones sísmicas, lo que permite analizar la naturaleza de las vibraciones para elegir correctamente el diseño de nuestras estructuras como edificios y viviendas.

El análisis dinámico de un vibrador, asociado a un sistema de captura de datos, ofrece las herramientas necesarias para modelar matemáticamente un acelerómetro o un sismómetro.

### **2.2.1 Características Esenciales de las Solicitaciones Dinámicas**

Se deben considerar dos características esenciales para comprender las sollicitaciones dinámicas:

- a) La variación de la intensidad en el tiempo, lo que requiere de análisis especial para determinar cuál es la situación más desfavorable para el oscilador o instrumento de medición.
- b) La aparición de fuerzas inerciales debido a la deformabilidad dan origen al problema vibratorio.

### **2.2.2 Tipos de Solicitaciones**

Las sollicitaciones corresponden a las fuerzas externas que generan algún tipo de excitación medible por el acelerómetro, por lo tanto es importante definir las aceleraciones que nos interesa medir, y las que podemos medir.

Los acelerómetros generalmente se caracterizan por el rango de respuestas frecuenciales y la sensibilidad de lectura, desde esta perspectiva existen acelerómetros de alta frecuencia (utilizados mayormente para medir vibraciones en maquinas) y acelerómetros de baja frecuencia que se ajustan a rangos de excitación más bajos como un sismo llegando lo más cerca posible del cero.

Modelo	Sensibilidad mV/(m/s <sup>2</sup> )	Tolerancia %	Respuesta @3dB T(Hz)		Resonancia Kcpm      Khz		
Acelerómetros Sísmicos							
731A	1020	10	0,05	500	49	0,815	
731-207	1020	10	0,2	1300	144	2,4	
Acelerómetros de Baja Frecuencia							
793L	51	5	0,2	2300	900	15	
799LF	51	5	0,1	2500	1080	18	
799M	102	5	0,2	2500	1080	18	
Acelerómetros para Propósitos Generales							Alta Frecuencia
793	10,2	5	0,5	15000	1500	25	
797	10,2	5	1	12000	1560	26	
784A	10,2	20	2	10000	1500	25	
786A	10,2	5	0,5	14000	1800	30	
777 / 777B	10,2	10	0,5	12000	1800	30	
Acelerómetros de Alta Frecuencia							
712F	10,2	10	3	25000	2700	>45	
732A/732AT	1,02	10	0,5	25000	3600	60	
736/736T	1,02	10	2	25000	3600	60	

Tabla N° 1: Clasificación extraída del catalogo de acelerómetros Piezoeléctricos Wilcoxon. En fila clasificación comercial, en columna clasificación general.

### 2.2.2.1 Solicitaciones Para Acelerómetros de Baja Frecuencia

Este tipo de acelerómetros es utilizado mayormente en campos como la Ingeniería Civil, Geología, Medicina y Automatización, ajustan su banda de diseño a frecuencias bajas muy cercanas al cero (Tabla N°1)

Podemos describir los siguientes tipos:

#### a) Cargas Sísmicas:

El desplazamiento del suelo generador por el paso de ondas sísmicas pone a las estructuras en movimiento, esto genera fuerzas de inercia que actúan de manera conjunta a la excitación del suelo. Esta interacción da lugar a un comportamiento complejo que es necesario analizar en profundidad para predecir las condiciones más desfavorables.

En el caso de la geología es muy importante medir las aceleraciones tan cercanas a cero como sea posible, de esta manera se puede (Mediante doble integración) medir desplazamientos casi imperceptibles del suelo.

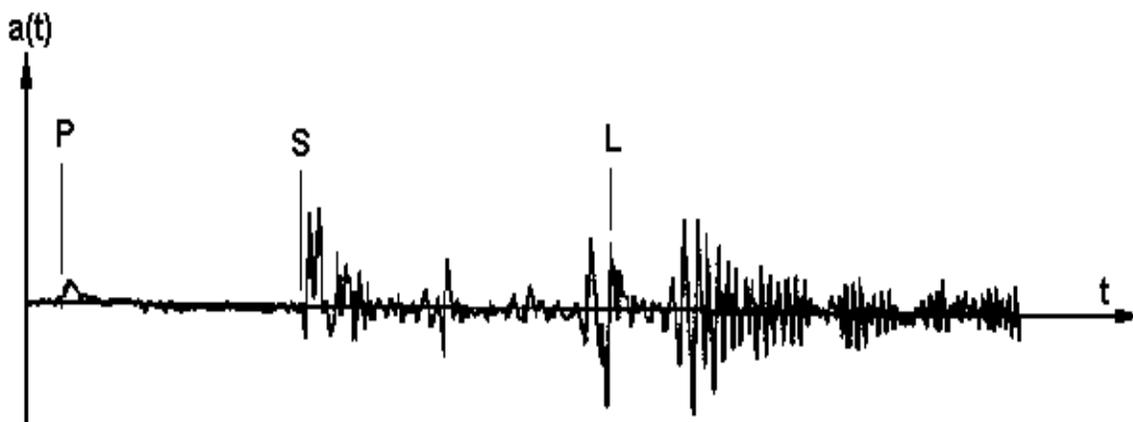


Figura N°4: Acelerograma del terremoto de Kermadec, 11 de Junio de 1957.

## **b) Efecto del Viento:**

En la práctica, para el diseño en ingeniería, el viento se evalúa como una carga estática, sin embargo, dado sus condiciones de variación en el tiempo para elementos esbeltos tales como edificios de gran altura, chimeneas industriales, antenas, es necesario considerarlo como una carga dinámica.

Para el caso de los edificios de altura se han diseñado sistemas de contrapeso que contrarrestan la respuesta vibratoria de las estructuras generada por el viento. Estos edificios son monitoreados con sistemas automatizados de acelerómetros y contrapesos. Para este caso el acelerómetro no mide directamente la carga solicitante sino la respuesta del vibrador.

## **c) Monitoreo del movimiento de un cuerpo:**

Este tipo de sollicitación corresponde a las aceleraciones descritas por un cuerpo del cual se quiera conocer su movimiento (aceleración, velocidad y desplazamiento) como un auto, un misil teledirigido o incluso una persona. La utilización de acelerómetros para estos fines requiere alta sensibilidad en la lectura y respuestas a frecuencias lo más cercanas a cero posibles.

Para el caso de monitoreo de personas existe una aplicación que intenta medir la energía liberada en niños con el fin de determinar parámetros de conducta sedentarismo y tendencia a algunas enfermedades a largo plazo.

### **2.2.2.2 Solicitaciones Para Acelerómetros de alta Frecuencia**

Este tipo de acelerómetro responde a una banda frecuencia alejada del cero, lo que le impide medir aceleraciones estáticas como la gravedad. Se utiliza masivamente en motores y sistemas mecánicos para percibir desbalance de piezas por ejemplo. Muy común en la industria aeronáutica

#### **a) Vibraciones causadas por maquinas**

Estas vibraciones afectan principalmente a estructuras soportantes; Fundaciones, acoples, elementos de sujeción además de cualquier elemento o estructura que se encuentre cerca o se vea perturbado por la vibración.

Su utilización se encuentra masificada para equipos industriales con el fin de prevenir desgaste y des balanceo de piezas.

También se utilizan masivamente en sistemas que requieren de un alto nivel de seguridad como aviones y helicópteros, permitiendo predecir tempranamente una falla.

### 2.2.3 Vibradores de un grado de libertad

Existen variados tipos de acelerómetros; de 1, 2 y hasta 6 Grados de Libertad (DOF), considerando desplazamiento y giro en 3 ejes, sin embargo, en su estructura intrínseca los aparatos se pueden modelar de 1 DOF a la vez y se supondrá un acelerómetro de 3 DOF como 3 sensores de 2 DOF montados en sus respectivos ejes. Como veremos más adelante todo el movimiento de los acelerómetros propuestos puede analizarse de esta manera.

Primero definiremos un eje sobre el cual se desplazara el vibrador, veremos como las características más relevantes para nuestro análisis se analizan sobre este eje.

A continuación definiremos distintas estructuras que pueden ser modeladas separando la masa, la rigidez y el amortiguamiento presente en el sistema.

### 2.2.4 Periodo Propio de Vibración

El periodo propio  $\omega$  es un parámetro muy importante para determinar las cualidades de un vibrador, dependiente de las características de rigidez y distribución de masa, es el parámetro central en el análisis dinámico y en el diseño de instrumentación sísmica definiendo entre otras cosas el rango de trabajo del acelerómetro.

Mediante el método de la energía, considerando un sistema conservativo y un movimiento armónico sinusoidal se obtiene la **Ecuación 2**.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para diversas configuraciones y distribuciones de masa y rigidez no es posible aplicar directamente la **Ecuación 2**, que se encuentra idealizada para el modelo de vibrador libre de la **Figura 3** donde la masa y la rigidez se encuentran aisladas y representadas de manera separada.

A continuación estudiaremos métodos que nos permitan modelar de buena manera el periodo propio de los vibradores utilizados en los acelerómetros, esto será enfrentado con los valores obtenidos de manera empírica.

### 2.2.4.1 Método de Rayleigh

Este método nos será de utilidad para determinar el periodo propio del vibrador a partir de las ecuaciones de rigidez y configuración deformada del vibrador elegido como acelerómetro.

En condiciones de masa y rigidez distribuidas podemos utilizar el método de Rayleigh para modelarlas como estructuras de un grado de libertad. Para esto es necesario suponer una configuración deformada que se ajuste lo más posible a la forma que tendrá el vibrador al deformarse producto de su distribución de masa. Con esta hipótesis se calculan los valores de energía potencial y cinética máximos como se describe en las **Ecuaciones 3 y 4**.

$$EP = \frac{1}{2} \int EI(x)[v''(x, t)]^2 dx \quad \text{Ecuación 3}$$

$$EC = \frac{1}{2} \int u(x)[\dot{v}(x, t)]^2 dx \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $EI(x)$  es la rigidez a flexión,  $u(x)$  es la masa por unidad de longitud y  $v(x, t)$  es la deformación transversal.

Si suponemos que la deformación transversal tomara la forma de la función  $\phi(x)$ , y que la variación se da en la coordenada  $Y(t)$ , que define la amplitud de manera sinusoidal durante la vibración libre se tiene:

$$v(x, t) = \phi(x)Y(t) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$EP_{max} = \frac{1}{2} \int EI(x)[\phi''(x)]^2 dx Y_{max}^2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$EC_{max} = \frac{1}{2} \int u(x)[\phi(x)]^2 dx \omega^2 Y_{max}^2 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\int EI(\phi'')^2 dx}{\int u(\phi)^2 dx}} \quad \text{Ecuación 6}$$

## 2.2.5 Efecto de la Aceleración Gravitacional

El efecto de la aceleración gravitacional en un vibrador actuando axialmente a las coordenadas estudiadas, como en el caso de la viga en volado utilizada en el diseño de acelerógrafos que veremos más adelante tiene un efecto desestabilizante como se muestra a continuación:

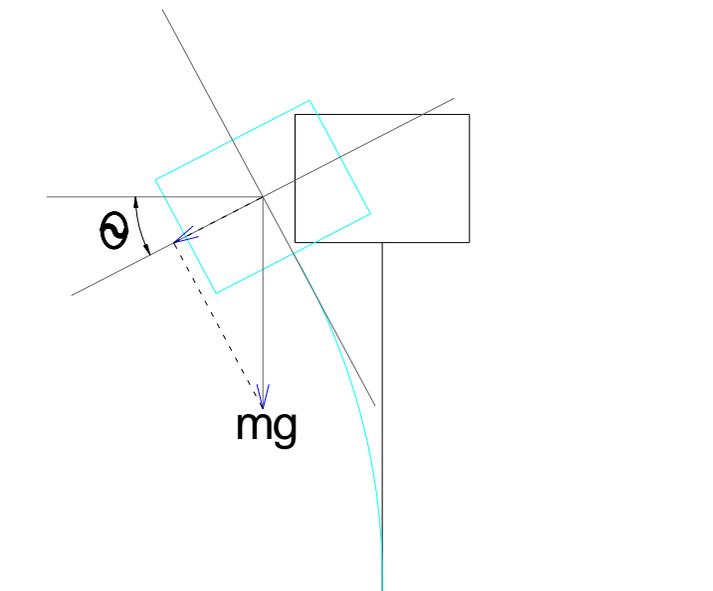


Figura N°5: modelo de sensor donde se aprecia la distorsión en la medición debido a la gravedad.

## 2.2.6 Vibración Amortiguada

El amortiguamiento de un sistema vibratorio es su capacidad de disipar energía durante la vibración.

Amortiguadores existen de diversas clases y diseñados para diversos usos, como los amortiguadores de los vehículos diseñados para evitar que siga vibrando después de una excitación vertical. Así mismo las edificaciones modernas poseen configuraciones en sus estructuras que favorecen un alto porcentaje de disipación, procurando controlar la energía desatada sobre la estructura durante un sismo y canalizarla como deformaciones plásticas y calor.

El tipo y grado de amortiguación es de vital importancia en el diseño del acelerómetro siendo un elemento clave en la sensibilidad del sistema.

### 2.2.6.1 Tipos de amortiguamiento

Analizaremos principalmente tres tipos de amortiguamiento como los más comunes, estos explican el comportamiento de los acelerómetros que estudiaremos mas adelante. Podemos clasificarlos en:

**a) Amortiguamiento Viscoso o de Fluido:** Este tipo de amortiguamiento representa la resistencia que opone un fluido a un cuerpo que lo traspasa, esta resistencia varía dependiendo de la viscosidad del fluido y es proporcional a la velocidad del desplazamiento. Este tipo de amortiguamiento es mayoritariamente utilizado en modelos matemáticos de vibradores por la simplicidad que representa el tratamiento de la ecuación, así será más sencillo realizar una transformación equivalente del amortiguamiento general del vibrador (compuesto por varios tipos de amortiguamiento) a amortiguamiento viscoso.

Actualmente existe un uso masivo uso de amortiguadores que funcionan con este principio, en la industria automotriz y de bicicletas, motos, amortiguadores para puertas y diversos sistemas que requieren disipar energía.

En la ecuación del vibrador se incorpora el término  $c\dot{x}$  para describir la constante de amortiguamiento  $c$  proporcional a la velocidad del desplazamiento.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

**b) Amortiguamiento de Fricción:** Este tipo de amortiguamiento representa la resistencia al movimiento ofrecida por la fuerza de roce ya sea estático o cinético y es constante en el movimiento lo que lo hace muy relevante al principio y al final de la vibración. Se puede representar matemáticamente como “Amortiguamiento de Coulomb o por fricción en seco”. Este modelo entrega una ecuación no lineal, porque la característica del amortiguamiento es lineal por partes. Esta propiedad de linealidad por partes se puede utilizar para determinar la solución del sistema.

Para el estudio y posterior diseño de un acelerómetro este tipo de amortiguamiento es especialmente indeseable por varias razones:

*El roce estático disminuye la sensibilidad al inicio de la lectura:* Cada vez que el vibrador se detenga y vuelva a ponerse en movimiento la sensibilidad inicial del instrumento se verá condicionada por el roce estático, esto aporta ruido a la lectura incorporando una zona de registro en blanco por lo que el diseño debe apuntar a evitarlo lo más posible.

*El roce cinético incorpora ruido principalmente en situaciones de lectura sensible:* El roce al ser constante afecta principalmente las lecturas de baja intensidad, este tipo de amortiguamiento es indeseable y incorpora ruido a la lectura.

**c) Amortiguamiento Estructural:** Este amortiguamiento se produce por el roce interno de las partículas de un material sometido a ciclos de deformación sumado a la plastificación (rotura interna de enlaces) y se representa proporcional a la deformación.

Algunos metales como el plomo son ideales ya que disipan gran cantidad de energía al deformarse.

En todos los tipos de amortiguamiento antes mencionados la componente disipativa se opone a la velocidad del movimiento.

## 2.2.6.2 Tipos de Amortiguadores

En la práctica existe una variada gama de elementos que pueden operar como amortiguadores, siendo los más populares los amortiguadores viscosos utilizados por los vehículos. Estos se diseñan de acuerdo al peso y rigidez de los resortes que soportan el vehículo para ofrecer un amortiguamiento casi crítico. Con esto se evita el rebote y posterior oscilación al ser expuesto a una excitación vertical.

Este tipo de amortiguadores y algunas variaciones de los anteriormente mencionados ofrecen varias ventajas para ser utilizados en un acelerómetro ya que presentan un amortiguamiento proporcional a la velocidad por lo que no afectan la lectura en el inicio como el caso del amortiguamiento por roce.

## 2.2.7 Ecuación de Movimiento del Vibrador Libre Amortiguado

Para representar el amortiguamiento utilizaremos la **Ecuación 7** que considera el amortiguamiento proporcional a la velocidad, es decir amortiguamiento viscoso.

La solución que satisface la **Ecuación 7** es  $x = C e^{pt}$ , sustituyendo:

$$mCp^2 e^{pt} + cCp e^{pt} + kC e^{pt} = 0 \quad \text{Ecuación 7.1}$$

$$mp^2 + cp + k = 0 \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Las raíces de la **Ecuación 7.2** son el vector  $\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix}$  de la **Ecuación 8**:

$$\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix} = -\frac{c}{2m} \mp \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad \text{Ecuación 8}$$

La solución general de la **Ecuación 7** es la superposición de dos posibles soluciones:

$$x(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad \text{Ecuación 9}$$

Con  $C_1$  y  $C_2$  constantes de integración determinadas por las condiciones de contorno.

### 2.2.7.1 Amortiguamiento Crítico

Las soluciones de la **Ecuación 9** son dependientes del signo del radical de la **Expresión 8** existiendo tres posibilidades:

$$c = c_{cr} , \left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0$$

$$c > c_{cr} , \left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} > 0 \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$c < c_{cr} , \left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} < 0$$

Para la **Ecuación 8.1** tenemos amortiguamiento crítico  $c = c_{cr}$ .

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} = 2m\omega = \frac{2k}{\omega} \quad \text{Ecuación 8.4}$$

La solución de la **Ecuación 9** para el caso de amortiguamiento crítico:

$$p_1 = p_2 = -\frac{c_{cr}}{2m} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Como ambas raíces son iguales la solución general está dada por la **Ecuación 9.2** la cual entrega solo una constante de integración y una solución independiente:

$$x_1(t) = C_1 e^{-(c_{cr}/2m)t} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Otra solución independiente puede ser encontrada utilizando:

$$x_2(t) = C_2 t x_1(t) = C_2 t e^{-(c_{cr}/2m)t} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

La solución para el sistema críticamente amortiguado esta dada por la superposición del las dos soluciones vistas anteriormente.

$$x(t) = (C_1 + C_2 t) e^{-(c_{cr}/2m)t} \quad \text{Ecuación 10}$$

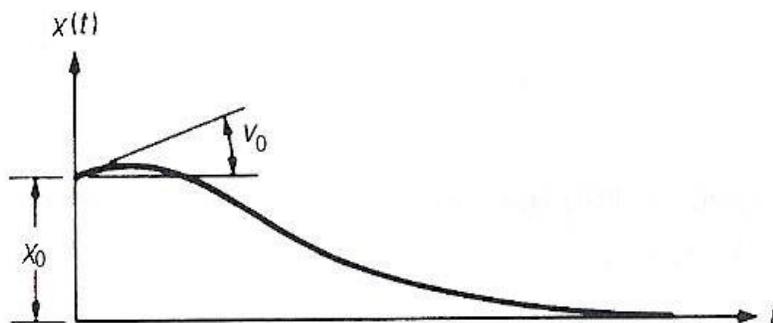


Figura N°6: Respuesta del oscilador libre para amortiguamiento crítico

### 2.2.7.2 Sistema sobreamortiguado

Para sistemas sobreamortiguados donde  $c > c_{cr}$ , **Ecuación 8.2**, las soluciones de la **Ecuación 8** son reales y distintas por lo que la solución está dada directamente por la **Ecuación 9**.

### 2.2.7.3 Sistema Sub Amortiguado

Cuando el valor del amortiguamiento es menor al crítico  $c < c_{cr}$  la expresión de la **Ecuación 8.2** es negativa, por lo que las soluciones de la **Ecuación 8** son complejas y conjugadas.

$$\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix} = -\frac{c}{2m} \mp i \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Para este caso es conveniente utilizar las ecuaciones trigonométricas exponenciales de Euler:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad \text{Ecuación 11.1}$$

$$e^{-ix} = \cos x - i \sin x$$

La sustitución de las raíces  $\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix}$  de la **Ecuación 11** en la **Ecuación 9** utilizando las soluciones de Euler entregan un resultado conveniente para el sistema sub amortiguado.

$$x(t) = e^{-(c/2m)t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde **A** y **B** son constantes de integración y  $\omega_D$  la frecuencia amortiguada del sistema.

$$\omega_D = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad \text{Ecuación 13.1}$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Finalmente sustituyendo las condiciones iniciales de velocidad y desplazamiento  $v_0$  y  $x_0$ , sustituimos en la **Ecuación 12** tenemos:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left( x_0 \cos \omega_D t + \frac{v_0 + x_0 \xi \omega}{\omega_D} \sin \omega_D t \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

En la **Figura 6** se muestra la grabación del desplazamiento de una vibración con  $v_0 = 0$  y con un periodo amortiguado calculado con la **Ecuación 16**.

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} \quad \text{Ecuación 16}$$

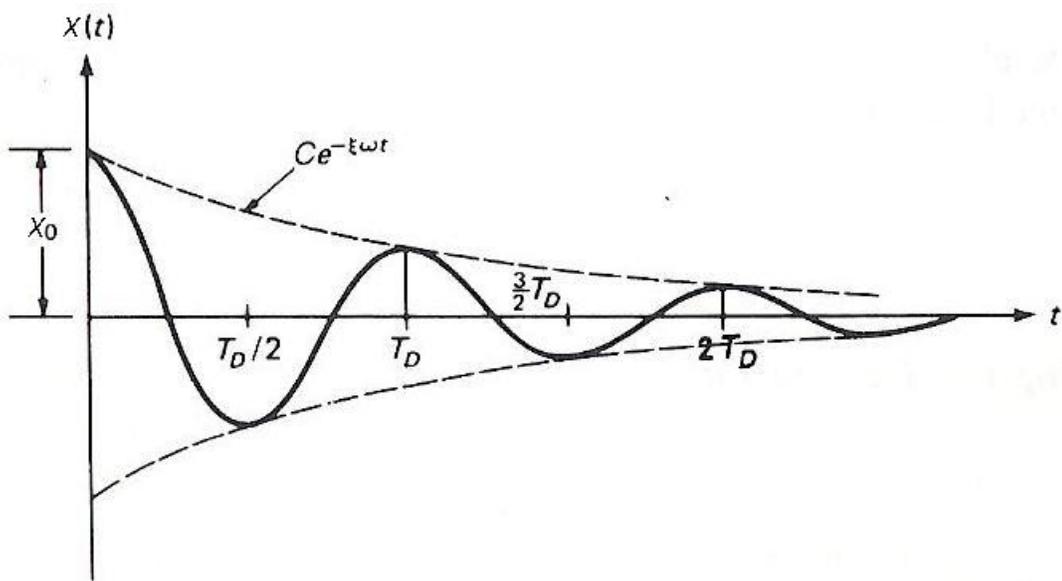


Figura N°7: Respuesta de un oscilador libre para un sistema Sub Amortiguado

### 2.2.7.4 Decremento Logarítmico

Este método permite determinar el grado de amortiguamiento  $\xi$ , nos será de utilidad más adelante, ya que con la grabación de la vibración obtenida por el acelerómetro se podrá determinar el amortiguamiento del mismo. Este procedimiento permite una *auto calibración* del instrumento.

Primero definimos el decremento logarítmico  $\delta$  como el logaritmo natural de dos amplitudes máximas o peak sucesivos.

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} \quad \text{Ecuación 17}$$

Una manera simplificada de la Ecuación 12:

$$x(t) = Ce^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t + \alpha) \quad \text{Ecuación 12.1}$$

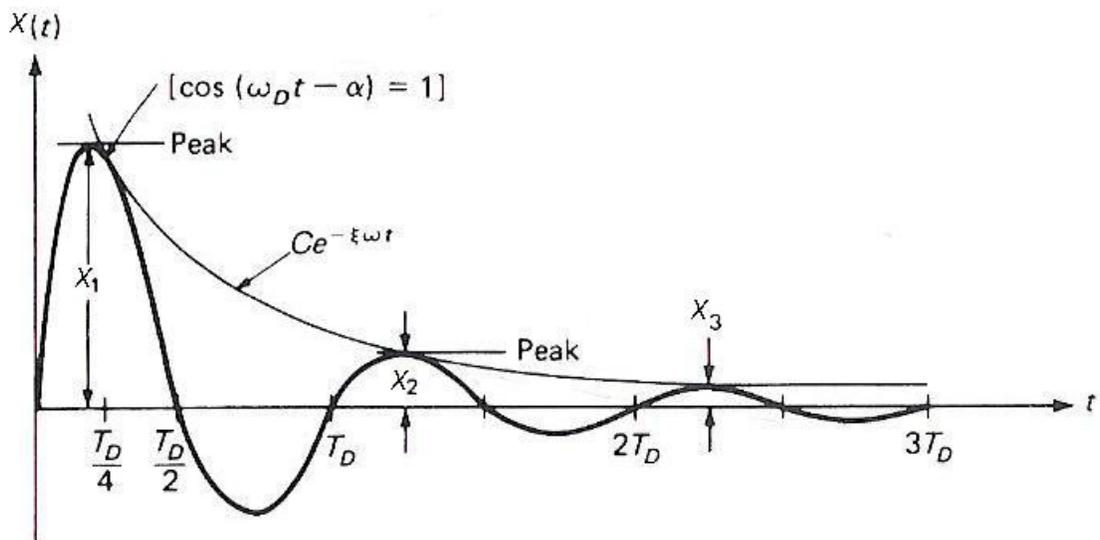


Figura N°8: Amplitudes máximas o peak  $X_1$ ,  $X_2$ , y  $X_3$ .

Para el cálculo podemos suponer dos peak consecutivos en  $t_1$  y  $(t_1 + T_D)$

$$x_1 = Ce^{-\xi\omega t_1} \quad \text{Ecuación 12.2}$$

$$x_2 = Ce^{-\xi\omega(t_1 + T_D)} \quad \text{Ecuación 12.3}$$

Finalmente tenemos el valor del decremento logarítmico.

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \xi\omega T_D = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad \text{Ecuación 18}$$

## 2.2.8 Vibración Forzada

La teoría de los movimientos armónicos forzados nos permitirá dilucidar las características más importantes del acelerómetro. Su desarrollo nos será de utilidad para medir cualquier tipo de carga.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$P(t) = P_0 \sin pt \quad \text{Ecuación 19.1}$$

Un oscilador amortiguado por sí solo dejará de oscilar en algún momento debido al roce, pero podemos mantener una amplitud constante aplicando una fuerza que varíe con el tiempo de una forma periódica a una frecuencia definida. Si la fuerza impulsora se aplica con una frecuencia cercana a la natural, la amplitud de oscilación es máxima. Este fenómeno se denomina resonancia.

$$r = \frac{p}{\omega} \quad \text{Ecuación 20}$$

La **Ecuación 19** representa la relación entre la frecuencia excitadora y la frecuencia propia del sistema.

La Respuesta en estado de régimen para la carga armónica es de la forma:

$$x(t) = X \sin (pt - \phi) \quad \text{Ecuación 21}$$

La relación entre la fuerza excitadora y la respuesta del vibrador nos permite graficarlas en un diagrama vectorial rotatorio.

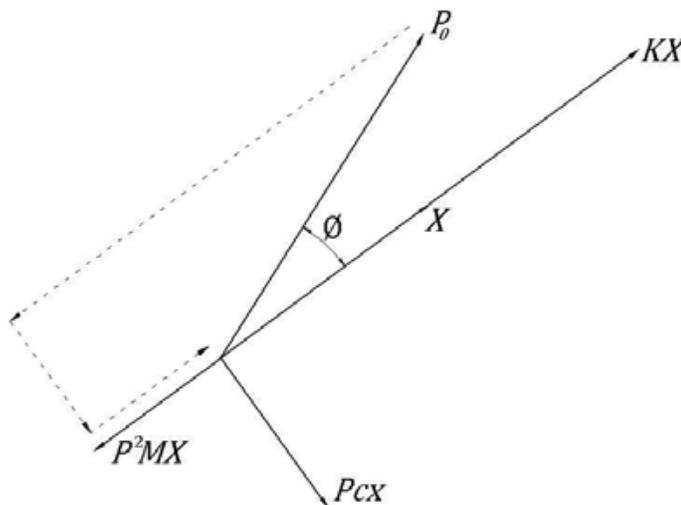


Figura N°9: Diagrama vectorial rotatorio

Las fuerzas involucradas en el diagrama de la **Figura N° 9** se describen a continuación:

$$F_I = -m\ddot{x} = p^2mX\sin(pt - \emptyset) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$F_D = -c\dot{x} = pcX\sin(pt - \emptyset - \pi/2) \quad \text{Ecuación 23}$$

$$F_E = -kx = -kX\sin(pt - \emptyset) \quad \text{Ecuación 24}$$

Del análisis vectorial podemos deducir las siguientes relaciones:

$$(kX - p^2mX)^2 + (pcX)^2 = P_0^2 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\tan\emptyset = \frac{pcX}{kX - p^2mX} \quad \text{Ecuación 26}$$

Definimos la deformación estática del sistema aplicando la sollicitación de manera cuasiestática:

$$X_{est} = \frac{P_0}{k} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\frac{X}{X_{est}} = D(r) = \frac{r}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\tan\emptyset = \frac{2\xi r}{1-r^2} \quad \text{Ecuación 29}$$

De la **Ecuación 28** “Amplificación Dinámica” y la **Ecuación 29** “Angulo de desfase” se efectúa el análisis de las características esenciales de la respuesta dinámica.

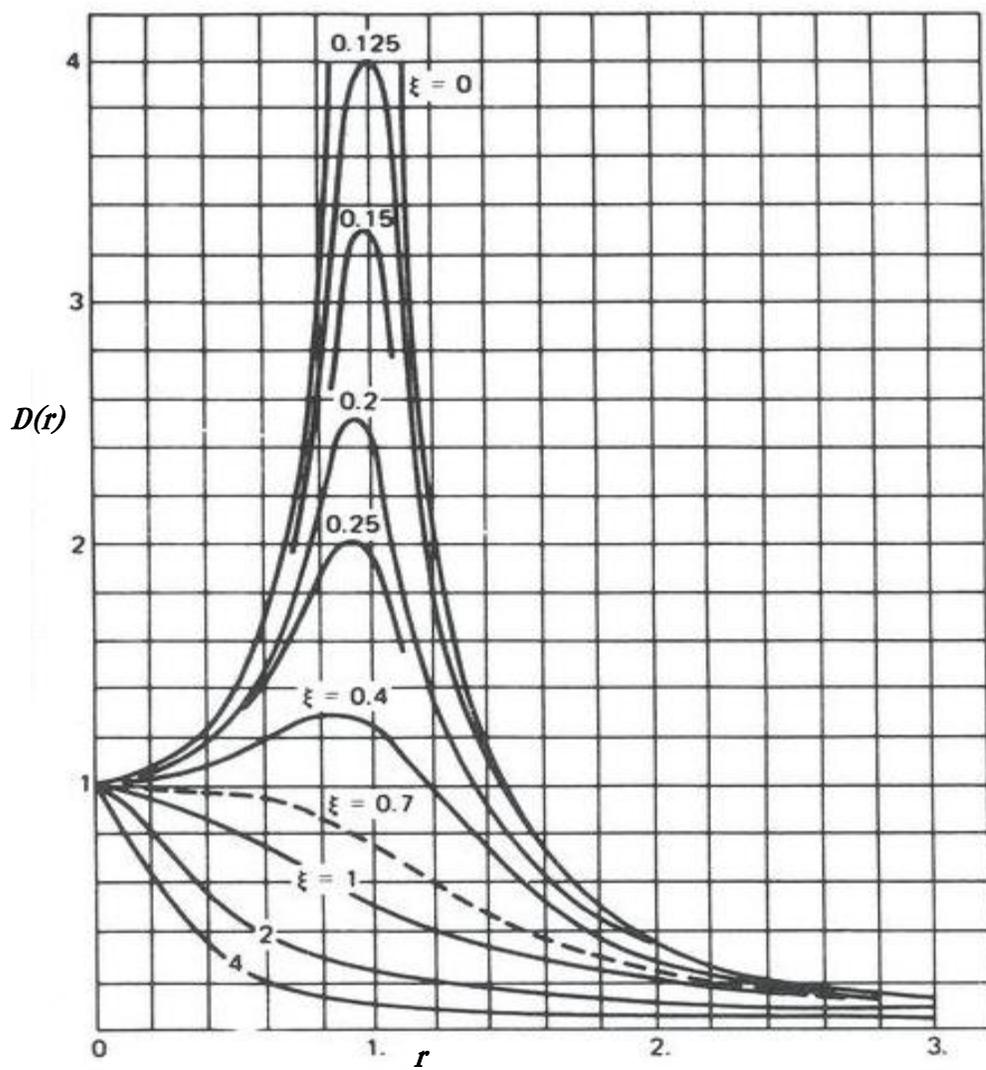


Figura N°10: Amplificación dinámica. Cuando  $r = 1$ , el valor de la amplificación dinámica es máxima.

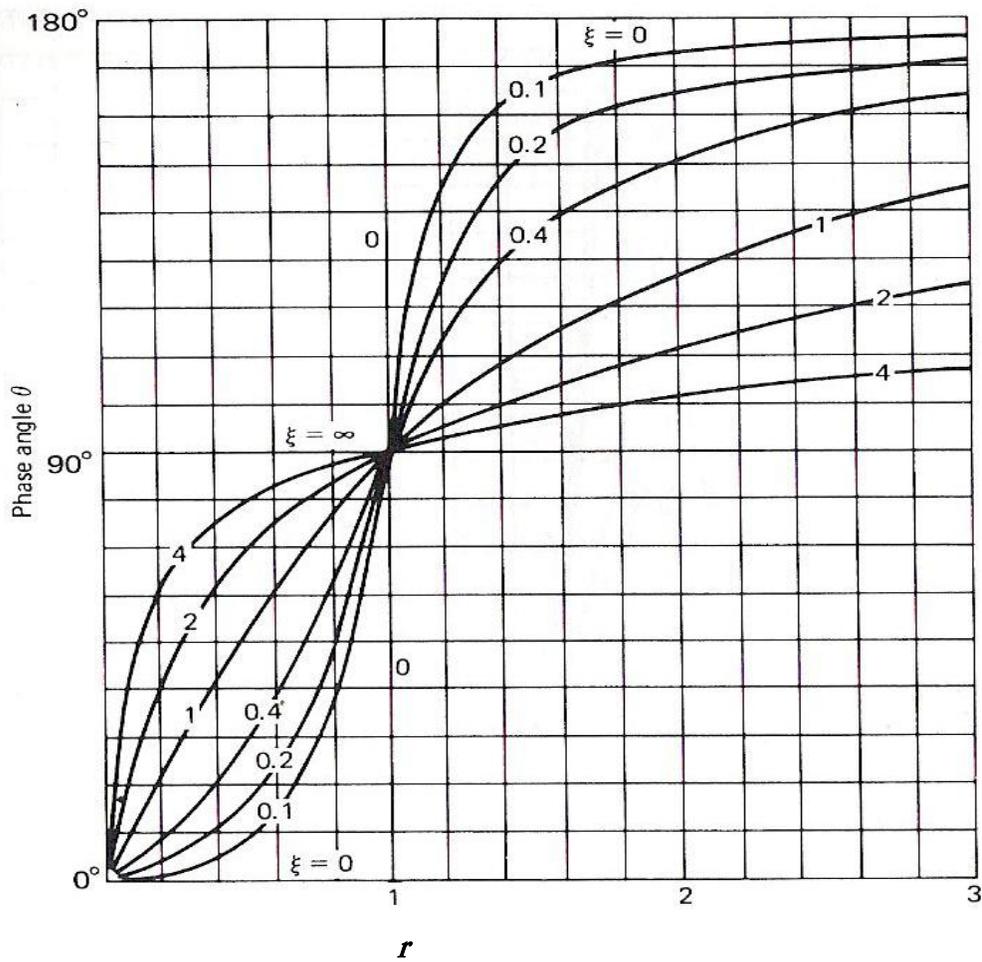


Figura N°18: Angulo de Desfase  $\phi$ . Cuando  $r = 1$ , el valor del ángulo de desfase es  $\pi/2$ .

Finalmente la lectura del acelerómetro  $x(t)$  se puede representar como la siguiente función:

$$x(t) = -\frac{m}{k} \ddot{v}_0 D(r) \sin\left(t - \frac{2\xi}{\omega}\right) \quad \text{Ecuación 30}$$

Podemos decir que para  $0 < r < 0.5$  y  $\xi = 0.68$ ,  $D(r) = \text{cte} = 1.00$  y  $\phi$  es proporcional a  $r$ .

Este rango de trabajo es el comúnmente utilizado para el diseño de acelerómetros y controla el rango de trabajo, y la fidelidad de la representación grafica de las mediciones.

## Capítulo III

*“Transductores de vibración”*

### 3.1 Introducción

Un transductor es un dispositivo o elemento al que se aplica una energía de entrada y devuelve una energía de salida; esta energía de salida suele ser diferente al tipo de energía de entrada. Por ejemplo, en un medidor de temperatura una espiral metálica convierte la energía térmica aplicada, en el movimiento mecánico de la aguja del marcador. 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 calor, luz o sonido, en energía eléctrica. Algunos ejemplos son los micrófonos, que convierten la energía sonora en energía eléctrica; los materiales fotoeléctricos, que convierten la luz en electricidad, y los cristales piroeléctricos, que convierten calor en energía eléctrica.

## 3.2 Transductores de Vibración

Algunos materiales en estado sólido responden eléctricamente a la fuerza mecánica. Estos elementos son los más comúnmente utilizados en la elaboración de transductores de vibración. Generalmente estos materiales exhiben una rigidez altamente elástica y se dividen principalmente en dos categorías: el tipo *autogenerador*, en que la carga eléctrica es resultado directo de la fuerza aplicada, y del tipo *circuito pasivo*, en el que la fuerza aplicada produce un cambio en las características eléctricas del material.

Entonces un material *piezoeléctrico* como el usado comúnmente en acelerómetros es aquel que produce una carga eléctrica proporcional a la tensión aplicada sobre él, dentro de su rango elástico lineal. Un material *piezorresistente* es aquel cuya resistencia eléctrica depende de la fuerza aplicada. Los transductores piezorresistente son del tipo circuito pasivo.

Un transductor de vibraciones, también denominado captador o sensor es un dispositivo que convierte el impacto o la vibración en una señal óptica, mecánica o mas habitualmente en eléctrica que es proporcional a un parámetro del movimiento experimentado.

La parte del transductor que logra la conversión del movimiento en señal se denomina elemento transductor.

Un instrumento de medida o un sistema de medida convierte el movimiento del impacto o la vibración en un formato observable que es directamente proporcional a un parámetro del movimiento experimentado. Puede consistir en un transductor con un elemento transductor, un equipamiento acondicionador de la señal y un aparato para mostrar la señal. Un instrumento contiene todos estos elementos en un paquete, en tanto que un sistema utiliza varios paquetes.

Un acelerómetro es un transductor cuya salida es proporcional a la aceleración de entrada.<sup>1</sup>

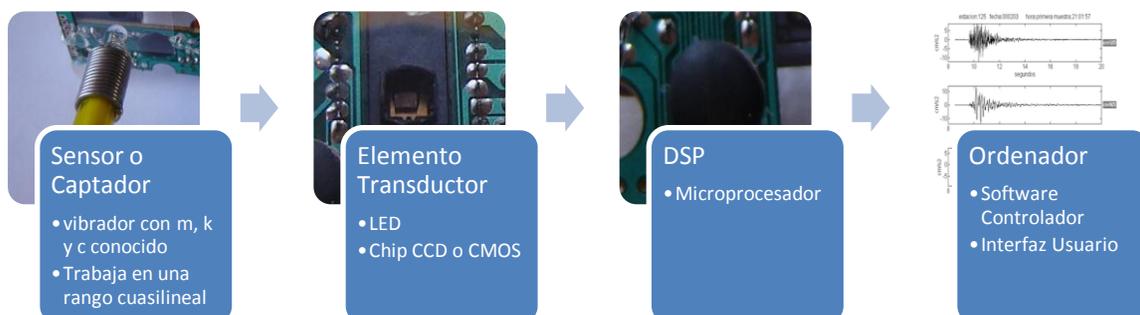


Figura Nº12: Secuencia de funcionamiento del acelerómetro óptico propuesto

<sup>1</sup> Definición de transductor y acelerómetro de *Manual de medidas acústicas y control de ruido, C. 7 Transductores de Vibración. E. E. Eller. R. M. Whittier.*

La secuencia descrita en la figura 1 muestra el funcionamiento básico de los modelos de acelerómetros propuestos en este trabajo.

Denominamos intérprete primario al microprocesador ya que este mediante un proceso de interpretación de imágenes consecutivas completa el trabajo del elemento transductor. Sin embargo es confuso definir si forma parte del elemento transductor o es un proceso posterior como se muestra en el diagrama.

### 3.3 Características fundamentales de un Acelerómetro

#### 3.3.1 Sensibilidad:

La sensibilidad de un acelerómetro es la relación entre su salida eléctrica y su entrada mecánica. Como se aprecia en el Capítulo II, Tabla I, los acelerómetros piezoeléctricos Wilcoxon<sup>2</sup> indican su sensibilidad en mV/g, (mili volt/g), para otros instrumentos será análogo, voltaje por unidad de desplazamiento o velocidad.

Esta especificación de sensibilidad es suficiente para elementos *autogeneradores*, este el caso de sensores piezoeléctricos.

Para el caso de equipos activos en los cuales el sensor no es autogenerador como sensores piezorresistentes, es necesario incluir el parámetro de energía aportada al instrumento, entonces nuestra relación se transforma en energía eléctrica ingresada por energía eléctrica de salida por aceleración. En general la sensibilidad hace referencia a la capacidad de captar energía y transformarla adecuadamente. Para nuestro caso de acelerómetro algunas consideraciones útiles para otros instrumentos no lo son tanto ya que por ejemplo el voltaje de entrada y de salida en un mouse es una constante en el tiempo por lo que no sería representativo como sensibilidad para este tipo de instrumento con un proceso más complejo dentro del transductor. Para efectos prácticos haremos referencia a la sensibilidad odométrica del mouse indicada en DPI o PPP (Puntos por pulgada) a una determinada velocidad máxima de lectura.

#### 3.3.2 Resolución:

La resolución como definición para transductores convencionales es el cambio más pequeño en la entrada mecánica para la que es discernible e interpretable un cambio en la salida eléctrica. La resolución de un acelerómetro es una función del elemento transductor y del diseño mecánico.

El sistema de registro de aceleraciones será fundamental para determinar la resolución del instrumento y el sistema de medida. Esta se determinara en variadas pruebas consecutivas como la menor variación de aceleración detectada en los datos antes mencionados. La resolución puede verse limitada por los diferentes niveles de ruido en el instrumento, ya sea por roce de algún tipo o interferencia eléctrica o campos magnéticos para el caso de transductores piezoeléctricos o piezorresistentes.

En términos generales, cualquier señal que se encuentre por debajo del nivel de ruido será enmascarada por este, de esta manera el ruido muchas veces determina la resolución de los sistemas de medida.

---

<sup>2</sup> Ver catalogo de acelerómetros en anexo

### 3.3.3 Sensibilidad transversal

Un transductor cuando es sometido a uno de sus ejes de sensibilidad puede experimentar una respuesta pequeña en otro eje, esto se conoce como sensibilidad transversal.

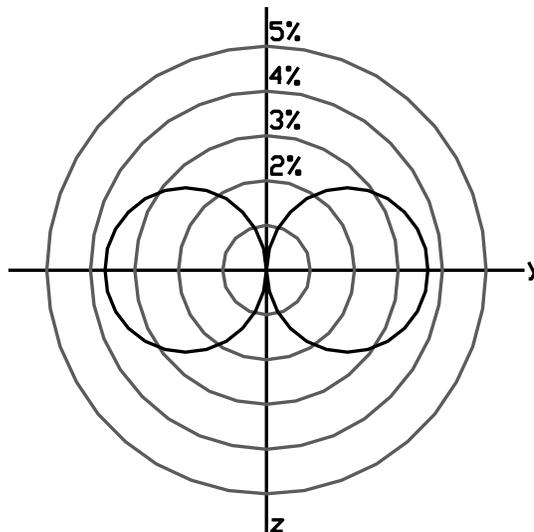


Figura N°13: Representación de la sensibilidad transversal típica en un transductor de vibraciones

### 3.3.4 Linealidad de la amplitud

La relación entre la entrada mecánica y la señal de salida de un transductor (sensibilidad) debe ser lineal en un rango definido con un error estimado, entonces podemos decir que la respuesta del transductor jamás es perfectamente lineal con respecto a la excitación que mide, sino que se acomoda convenientemente un sector de la banda de frecuencias de lectura, de manera de hacerla lineal mediante una tolerancia o error en esta banda de trabajo.

La linealidad por partes antes descrita es una función que depende de varias variables propias del acelerómetro: Del diseño mecánico del sensor, del transductor y de la interpretación e integración numérica posterior.

La variable incidente más importante es la Amplificación Dinámica que es función de las características propias del vibrador ( $c$ ,  $m$ ,  $k$ ) y de las frecuencias solicitantes. Digo que esta variable es la más importante porque es la que condiciona más fuertemente en el diseño del sensor y por tanto del acelerómetro.

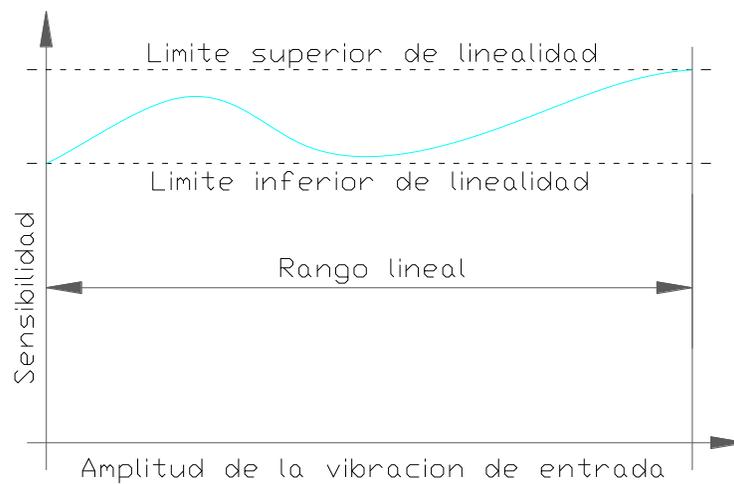


Figura N°14: Representación de la cuasi linealidad en un rango de sensibilidad definido

### 3.3.5 Linealidad de la frecuencia

Al igual que el caso de la amplitud el instrumento debe trabajar en un rango que asegure la linealidad de la frecuencia para la cual está trabajando. La linealidad de la frecuencia y la amplitud están íntimamente ligadas ya que la amplificación dinámica es una función de las frecuencias propias y excitadoras del instrumento.

La linealidad de la frecuencia se puede traducir en la linealidad del desfase en el tiempo del registro del instrumento, este desfase es también función de  $r$  y del grado de amortiguamiento del instrumento. El retraso en el tiempo se genera como una respuesta natural del vibrador y el diseño contempla encontrar un rango que dentro de márgenes establecidos previamente tenga un comportamiento lineal<sup>3</sup>. Lógicamente todo el proceso informático asociado al registro desde la captura hasta su interpretación asociada a una variable tiempo tiene también un desfase propio de su funcionamiento, este desfase corresponde al tiempo en que el microprocesador demora en discernir acerca de la información entregada por el chip fotográfico y asociarla a una variable tiempo. Podemos decir que este tiempo es inferior o igual  $1/10000$ seg que es a su vez la velocidad de entrega de datos máxima  $10000$ datos por segundo. Esto nos indica que la posible no linealidad del microprocesador en la velocidad de entrega de datos debido a una mayor o menor carga de información no es relevante a la hora de establecer parámetros de linealidad. Sin embargo será considerada en los análisis posteriores.

<sup>3</sup> Ver capítulo II Figura 11 "Angulo de desfase"

### **3.3.6 Limite de baja frecuencia**

Los límites frecuenciales del transductor dependen de los rangos de linealidad de amplitud y frecuencia para los cuales haya sido diseñado, además de la sensibilidad del instrumento. Si los límites de linealidad de la amplitud y la frecuencia se han escogido desde cero, entonces la sensibilidad y el ruido tienen la palabra. Si el transductor se ha diseñado con rangos lineales que contemplan como inicio de la linealidad un valor mayor a cero entonces ese valor, evaluado sobre la sensibilidad del instrumento determina el rango inferior de frecuencias de trabajo para el equipo. Para el caso de acelerómetros que contemplan su rango lineal desde cero el límite inferior lo establece su sensibilidad. Estas problemáticas en los acelerómetros capacitivos dificultan enormemente su diseño para el tipo de equipos sísmicos que requiere por defecto operar en rangos frecuenciales lo más cercano a cero como sea posible.

Los equipos activos y mecánicos evitan varios de los problemas mencionados en los acelerómetros piezoeléctricos, como su potencia de salida es constante no existen problemas de amplificación de señal, tampoco se considera como importante el ruido electromagnético, entonces será la sensibilidad y la resolución, que está determinada por la amplificación del desplazamiento de la masa o amplificación mecánica, las que determinaran que tan cerca del cero se pueden medir las aceleraciones.

### **3.3.7 Limite de alta frecuencia**

El límite de alta frecuencia como en el caso de baja frecuencia, depende de los límites de linealidad de la amplitud y frecuencia que a su vez es función de  $r$ . las características determinadas por la resonancia estableciendo el límite superior dependen de la amortiguación del sistema. Acelerómetros con bajo amortiguamiento o no amortiguados tenderán a exagerar armónicos incluidos en frecuencias más bajas, este fenómeno puede incorporar un ruido importante a la medición y es una problemática de diseño de los acelerómetros de este tipo ya que si bien el hecho de no utilizar amortiguamiento puede ser muy beneficioso el rango de frecuencias útil es un tanto incierto ya que es muy difícil predecir la magnitud de armónicos más agudos que vienen incorporados en armónicos más graves y que terminan por amplificarlos. De esto podemos aprender que es importante al momento de especificar el rango de frecuencias de respuestas de el equipo que regularmente durante los acontecimientos sísmicos existen frecuencia altas solapadas que terminaran por distorsionar y amplificar la lectura por lo que hay que tomar rangos de seguridad apropiados y convenientes para evitar este tipo de problemáticas al momento de la medición.

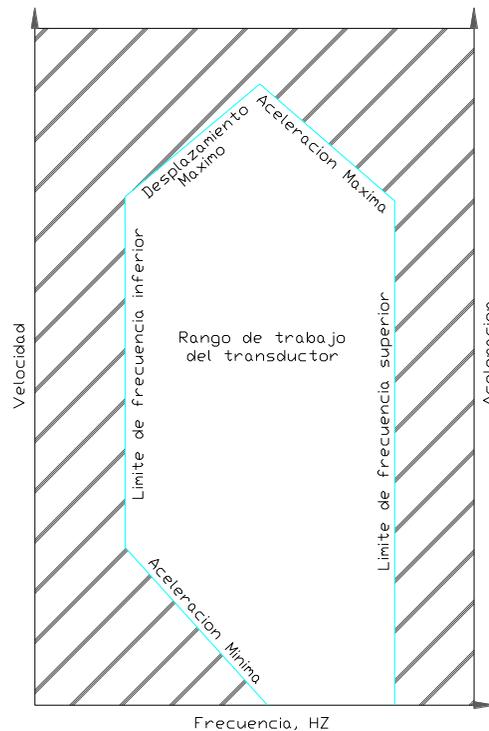


Figura N°15: Representación de los límites de trabajo de un transductor de vibraciones

### 3.3.8 Efectos Ambientales

a) **Temperatura:** La temperatura es un valor típicamente estudiado y mencionado en acelerómetros comerciales, especialmente aquellos que cuentan con elementos piezorresistivos o piezoeléctricos. La temperatura puede afectar la sensibilidad, la frecuencia natural, la amortiguación y el correcto funcionamiento de microprocesadores y equipos electrónicos. Los efectos y el grado de incidencia dependerán del tipo de transductor o de equipo transductor a utilizarse y de ahí también puede derivar su uso.

La sensibilidad puede aumentar o reducirse con la temperatura, o en algunos casos permanecer constante. Existen dos mecanismos conocidos para compensar los efectos de la temperatura.

- 1-. La temperatura de captación puede mantenerse constante mediante captación o enfriamiento local.
- 2-. Puede medirse en función a la temperatura, de esta manera se realiza una corrección de las características del instrumento dependiente de la temperatura de operación en función del tiempo.

En equipos cuyo sensor este conformado por materiales sensibles al calor las características de rigidez y amortiguamiento variaran introduciendo ruido en el sistema. Para efectos de utilización de amortiguamiento viscoso el fluido amortiguador variara sus características de viscosidad en función a la temperatura de operación, esta problemática ha sido abordada con el desarrollo de aceites multigrado, que adecuan su viscosidad en función a la temperatura contrarrestando el efecto.

Para el caso de transductores piezoeléctricos la temperatura además de afectar las cualidades mecánicas afecta sus cualidades piezoeléctricas o piezorresistentes, existe una temperatura en que los materiales piezoeléctricos pierden sus cualidades llamada "Punto de Curie" fenómeno descubierto por Pierre Curie durante sus estudios acerca de la piezoelectricidad.

b) **Humedad:** Esta puede afectar las características de algunos instrumentos de medida de vibraciones, en términos generales un transductor que opera bajo una impedancia eléctrica alta se ve más afectado por la humedad que aquel que opera a baja impedancia. Habitualmente no resulta práctico corregir los efectos generados por la humedad, sin embargo los instrumentos que de otra forma se vean afectados son sellados herméticamente para protegerlos de ella.

Para el caso de los transductores ópticos de nuestro interés la humedad en condiciones normales no debería afectar el buen funcionamiento del elemento transductor obtenido del mouse ya que estos están diseñados para operar en estas mismas condiciones sin presentar problemas aparentes. Como manera de obtener información asociada al tema no se aislara el acelerómetro mayormente para ser utilizado en interiores, para uso en exteriores se proveerá de una aislación suficiente para conservar las características similares al interior de una vivienda.

c) **Ruido Acústico:** Algunas veces las aceleraciones que deseamos medir vienen acompañadas de fuertes vibraciones acústicas o ruidos, estos pueden estar en rangos de frecuencia de ultrasonido, audibles o de infrasonido. También es importante la presión sonora. Estas vibraciones consideradas de un rango de frecuencia más alto al que comúnmente deseamos medir se enmascaran en las ondas mas grandes amplificándolas en diferentes magnitudes, contra más baja sea la frecuencia, o para decirlo de otra manera contra más cerca de la resonancia para valores de  $r > 1$ , mayor será la amplificación y el error de lectura o ruido incorporado a nuestra medición.

Es importante también diferencia que es lo que queremos medir, si la vibración acústica es capaz de hacer vibrar el instrumento en ese caso se inducirán errores graves en la vibración. En algunos casos la vibración que se desea medir es la fuente de la energía acústica, en otros casos la energía acústica genera la vibración, solo en este último caso la relación entre la energía acústica y la energía de vibración podrá inducir a errores graves en a medición.

Como dato general un acelerómetro para medidas de vibración de alta frecuencia produce una salida eléctrica equivalente a 1g hasta que el nivel de presión sonora de ruido acústico supera los 150 dB según Eller. Et al., 1995.

Para medir una aceleración pequeña en un campo de presión sonora alta es conveniente verificar primero la respuesta de acelerómetro al campo de presión sonora y determinar el efecto del ruido acústico en la lectura.

Se propone como parte de esta investigación y entendiendo que el foco de diseño es un acelerómetro de baja frecuencia se recomienda realizar una aislación de las vibraciones que puedan interferir en las mediciones acústicas del acelerómetro. Esta aislación puede ser una de base que filtre las frecuencias no deseadas impidiendo o amortiguando el camino hacia el sensor.

*“El aislador de base transforma el periodo propio de la estructura del acelerómetro en un conjunto algo más flexible quedando menos expuesto a las aceleraciones de frecuencias más altas que incorporaran ruido”.*

### 3.3.9 Propiedades Físicas

El tamaño y peso son variables muy importantes en algunos casos, si el diseño del acelerómetro contempla un equipo de un tamaño grande puede requerir una estructura de montaje que altere las propiedades físicas locales del lugar en donde se desea medir la vibración. De la misma manera la masa añadida del transductor puede producir cambios en la respuesta vibratoria de la estructura, en general la frecuencia de una estructura se altera al añadirle masa.

$$\frac{f_n - \Delta f_n}{f_n} = \sqrt{\frac{m}{m + \Delta m}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:  $f_n$  = Frecuencia natural de la estructura.

$\Delta f_n$  = Cambio en la frecuencia natural.

$m$  = Masa de la estructura.

$\Delta m$  = Aumento de masa de la estructura.

Finalmente podemos decir que distintos tipos de acelerómetros como los de masa muelle suelen tener altas sensibilidad, se dice que un sensor de transducción de vibraciones es más sensible a medida que aumenta su masa, sin embargo un sensor piezoeléctrico de bajo peso será mucho más conveniente al momento de montarlo en un avión o un misil por ejemplo.

### 3.4 Funcionamiento del mouse como transductor

El mouse óptico es un odómetro de precisión que ha sido creado para reemplazar al antiguo mouse de bola, este último utiliza un transductor que consiste en una bola de acero forrada de una capa de goma que al girar sobre una superficie desplaza dos rodillos dispuestos en dos ejes perpendiculares. Los rodillos poseen unas paletas que interrumpen una señal eléctrica varias veces en un giro. Un software interpreta los pulsos como desplazamientos de largo fijo y los asocia a una variable tiempo  $t$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ .

El mouse óptico llegó para reemplazar definitivamente al ratón de bola, con una tecnología distinta es un transductor que evita el funcionamiento mecánico interno, aumenta considerablemente la velocidad de lectura, la sensibilidad y la resolución.

Finalmente ha aparecido un nuevo tipo de mouse que reemplaza el LED tradicional por uno laser de bajo consumo, acompañado de un chip más sensibles ha vuelto a aumentar la resolución y sensibilidad de los mouse comerciales.

Desarrollado por Agilent Technologies la nueva generación de mouse ópticos entro al mercado en 1999.



Figura N°16 y 17: A la izquierda mouse Apple de última generación, a la derecha mouse Genius inalámbrico con tecnología laser de 1600DPI

El funcionamiento consiste en un chip CMOS (Complimentary metal-oxide semiconductor); fotosensor que captura imágenes a una velocidad de 10.000 por segundo, un LED (Ligth emitting diode) que se encarga de iluminar la superficie fotografiada y finalmente un microprocesador integrado de 18 millones de instrucciones por segundo toma patrones de las fotografías y calcula los desplazamientos de los patrones en las imágenes consecutivas.

### 3.4.1 Características del transductor

Características del Mouse

Mouse Genius Traveler 9151 Laser de la Figura 24

**Características generales:**

- mini ratón delgado para ordenador
- Tecnología laser de mayor rendimiento y precisión
- Sensor de resolución regulable entre 1600/800 DPI
- tecnología anti interferencia de 2.4GHz, rango de trabajo 10 mts.
- Bajo consumo, baterías duran hasta 6 meses.
- indicador de baja potencia
- puerto: USB 12309985-0

**Requisitos de sistema:**

- Pentium 233MHZ o superior
- Windows Vista/XP x64/2003/XP/2000/Me/98SE
- Macintosh con MAC-OS X o más adelante
- Linux Ubuntu 7.04
- puerto disponible USB

**Especificaciones:**

- Interfaz: USB
- Frecuencia de RF: 2.4GHz
- resolución: motor laser de 1600dpi (por defecto) /800dpi
- baterías: 2 baterías del AAA

**Soporte de sistema:**

- Windows Vista/XPx64/2003/XP/2000/Me/98SE
- Macintosh con OS X o más adelante
- Linux Ubuntu 7.04
- peso corporal: 95g
- dimensiones: 94x56x24m m

El sensor desarrollado por Agilent, ha sido pensado para ser utilizado en sensores odométricos periféricos digitales de alto rendimiento para ordenadores.

Su tamaño permite diseños de ratones de altas prestaciones pequeños y livianos.

La tecnología involucrada se denomina “*Navegación Óptica*”, que consiste en la adquisición continua de imágenes de una superficie (Frames). Simultáneamente se determina matemáticamente la dirección y magnitud del vector desplazamiento.

### 3.4.2 Teoría de la Operación

El sensor opera con la tecnología de navegación Óptica. Esta consiste en un sistema de adquisición de imágenes IAS (Image Acquisition System), un microprocesador DSP (Digital Signal Processor) y un puerto serial de dos canales.

El IAS captura repetidas imágenes de la superficie y el DSP mediante operaciones matemáticas identifica patrones en la superficie calculando posteriormente un valor  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  que corresponden al vector desplazamiento.

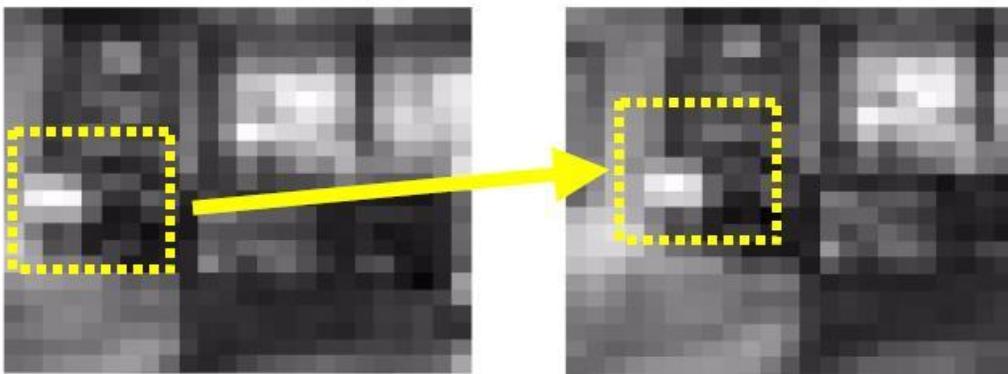


Figura N°18: Imágenes continuas utilizadas por el sistema transductor para calcular el vector desplazamiento

Es muy importante considerar que los lentes y la iluminación del sistema óptico han sido elaborados de manera que operen eficientemente bajo un rango de distancia de la superficie que denominaremos Z.

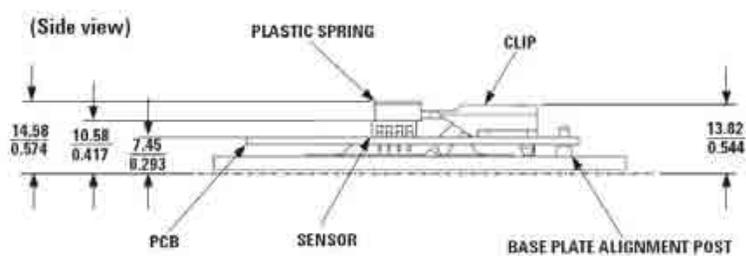


Figura N° 19: Elevación del transductor indicando las distancias recomendadas para operación óptima

A continuación se describen las características generales entregadas por el fabricante:

**ADNS-6030 Key Specifications**

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Notes
Operating Temperature	$T_A$	0		40	°C	
Power supply voltage	$V_{DD}$	2.7	2.8	3.6	Volts	Including noise.
DC Supply Current in various modes	$I_{DC\_RUN}$ $I_{DC\_REST1}$ $I_{DC\_REST2}$ $I_{DC\_REST3}$		4.0 0.5 0.15 0.05	10 1.8 0.4 0.15	mA	Average current, including LASER current. No load on MISO, MOTION.
Shutdown Supply Current	$I_{DC\_STDOWN}$		1	12	$\mu$ A	NCS, SCLK = VDD, MOSI = GND, MISO = Hi-Z
Distance from lens reference plane to surface	Z	2.18	2.40	2.62	mm	Results in +/- 0.2 mm minimum DOF.
Speed	S			20	in/sec	
Acceleration	A			8	G	

**Optical Mouse Design References**

Datasheet Agilent ADNB-6031 and ADNB-6032 Low Power Laser Mouse Bundles

Application Note 5230, Agilent ADNB-6031 and ADNB-6032 Laser Mouse Sensor Eye Safety Calculations

**Figura N°20: Especificaciones principales del transductor**

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Minimum	Maximum	Units	Notes
Storage Temperature	$T_S$	-40	85	°C	
Operating Temperature	$T_A$	-15	55	°C	
Lead Solder Temp			260	°C	For 10 seconds, 1.6 mm below seating plane
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.5	5.5	V	
ESD			2	KV	All pins, human body model MIL 883 Method 3015
Input Voltage	$V_{IN}$	-0.5	$V_{DD} + 0.5$	V	SDIO, CLK, LED_CNTL
Input Voltage	$V_{IN}$	-0.5	3.6	V	OSC_IN, OSC_OUT, REFA

### Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Minimum	Typical	Maximum	Units	Notes
Operating Temperature	$T_A$	0		40	°C	
Power Supply Voltage	$V_{DD}$	4.1	5.0	5.5	Volts	Register values retained for voltage transients below 4.10V but greater than 3.9V
Power Supply Rise Time	$V_{RT}$			100	ms	
Supply Noise	$V_N$			100	mV	Peak to peak within 0-100 MHz bandwidth
Clock Frequency	$f_{CLK}$	23.0	24.0	25.0	MHz	Set by ceramic resonator
Serial Port Clock Frequency	SCLK			$f_{CLK}/12$	MHz	
Resonator Impedance	$X_{RES}$			55	$\Omega$	
Distance from Lens Reference Plane to Surface	Z	2.3	2.4	2.5	mm	Results in $\pm 0.2$ mm DOF (See Figure 9)
Speed	S	0		12	in/sec	@ frame rate = 1500 fps
Acceleration	A			0.25	g	@ frame rate = 1500 fps
Light Level onto IC	IRRINC	80 100		25,000 30,000	$mW/m^2$	$\lambda = 639$ nm $\lambda = 875$ nm
SDIO Read Hold Time	$t_{HOLD}$	100			$\mu s$	Hold time for valid data (Refer to Figure 22)
SDIO Serial Write-write Time	$t_{Sww}$	100			$\mu s$	Time between two write commands (Refer to Figure 25)
SDIO Serial Write-read Time	$t_{SWR}$	100			$\mu s$	Time between write and read operation (Refer to Figure 26)
SDIO Serial Read-write Time	$t_{SRW}$	250			ns	Time between read and write operation (Refer to Figure 27)
SDIO Serial Read-read Time	$t_{SRR}$	250			ns	Time between two read commands (Refer to Figure 26)
Data Delay after PD deactivated	$t_{COMPUTE}$	3.1			ms	After $t_{COMPUTE}$ , all registers contain data from first image after wakeup from Power-Down mode. Note that an additional 75 frames for AGC stabilization may be required if mouse movement occurred while Power Down. (Refer to Figure 10)
SDIO Write Setup Time	$t_{SETUP}$	60			ns	Data valid time before the rising of SCLK (Refer to Figure 20)
Frame Rate	FR			1500	frames/s	

Figura N°21: Especificaciones generales del transductor

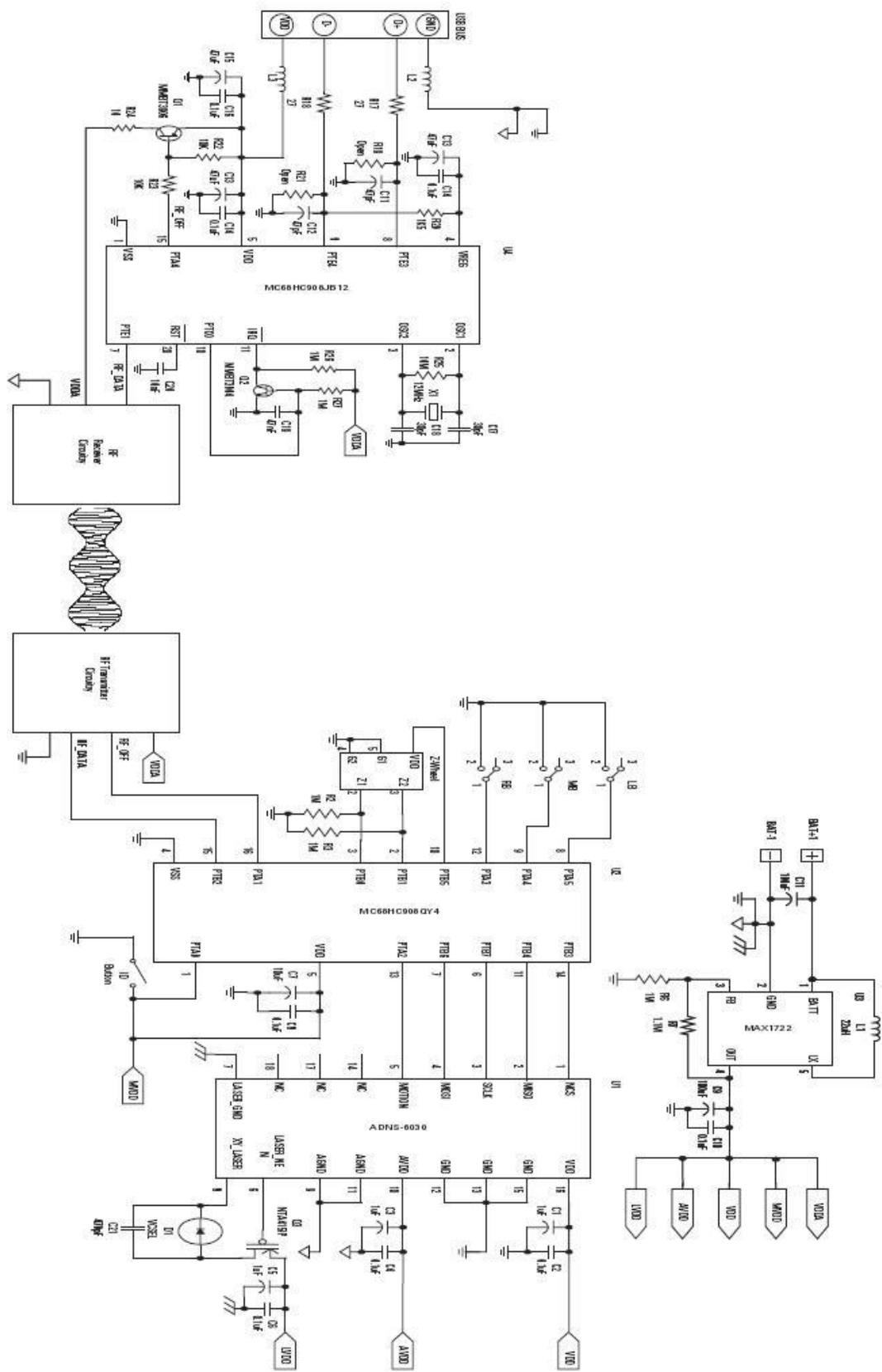


Figura N° 22: Diagrama de bloque recomendado por el fabricante para el montaje del sensor

El sensor se toma 3020µs o 0.00302seg en realizar la primera interpretación de imágenes luego de ser encendido.

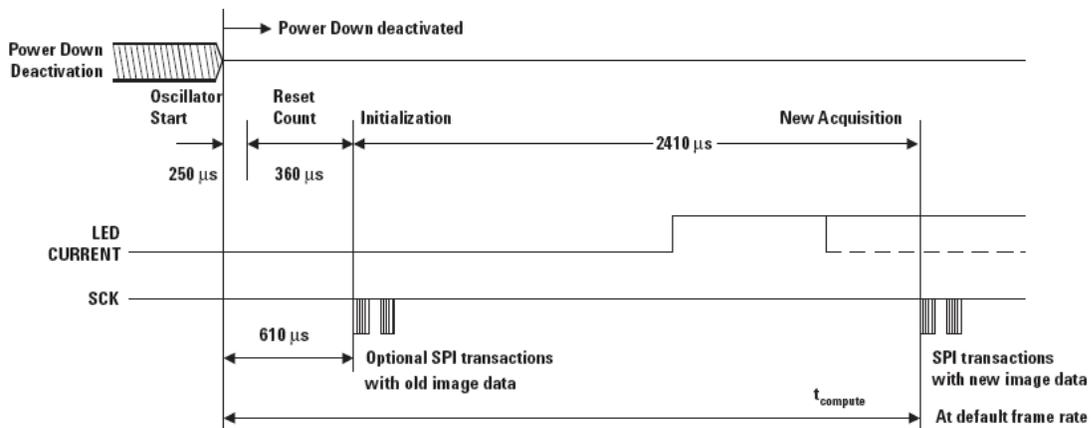


Figura N°23: Diagrama de tiempo de encendido del transductor

**Typical Performance Characteristics**

Performance characteristics over recommended operating conditions. Typical values at 25°C, V<sub>DD</sub> = 5 V, 24 MHz, 1500 fps.

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Path Error (Deviation)	P <sub>Error</sub>		0.5		%	Path Error (Deviation) is the error from the ideal cursor path. It is expressed as a percentage of total travel and is measured over standard surfaces.

Figura N°24: Error lineal del transductor @1500fps

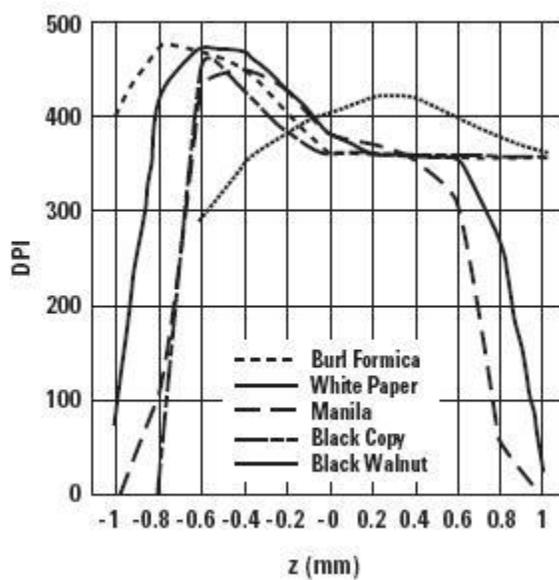


Figura N° 25: Resolución v/s z típica de un transductor de 400DPI v/s Z en diferentes superficies

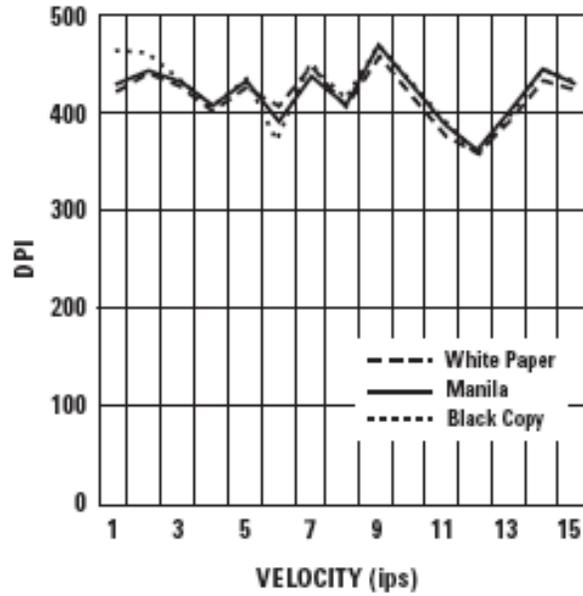


Figura N° 26: Resolución v/s velocidad típica de un transductor de 400DPI v/s velocidad @1500fps en diferentes superficies

Se ha escogido “Manila Folder”, que en traducción corresponde a papel café reciclado, utilizado para la fabricación de carpetas como superficie de lectura para el acelerómetro diseñado más adelante.

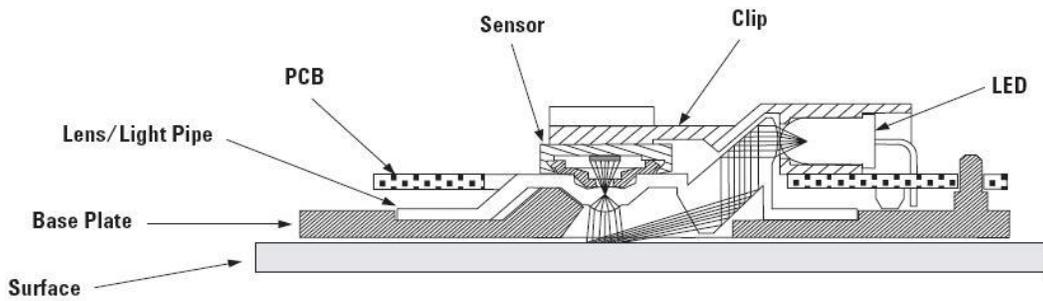


Figura N°27: Sección transversal de un mouse Óptico Agilent

El transductor se puede utilizar de diferentes maneras, de ahí su versatilidad, estas se pueden separar en 4 características que le dan las distintas funcionalidades:

**A. Trayectoria del Mouse.** Se realiza una lectura continua a los registros Delta X y Delta Y que se va añadiendo a la posición absoluta del mouse para mostrar un dibujo con la trayectoria espacial seguida por el mouse.

**B. Seguimiento de Rasgos Visibles.** Esta característica del sensor es utilizada en un mouse para detectar el desplazamiento. A mayor número de rasgos visibles, mayor precisión en la medición del desplazamiento. Para implementar la función, se ha realizado una lectura continua al registro SQUAL (surface QUALITY). Esta característica es relevante ya que la calidad de la superficie y la distancia del sensor a la misma producen variaciones en la calidad de la lectura (Figura N°28)

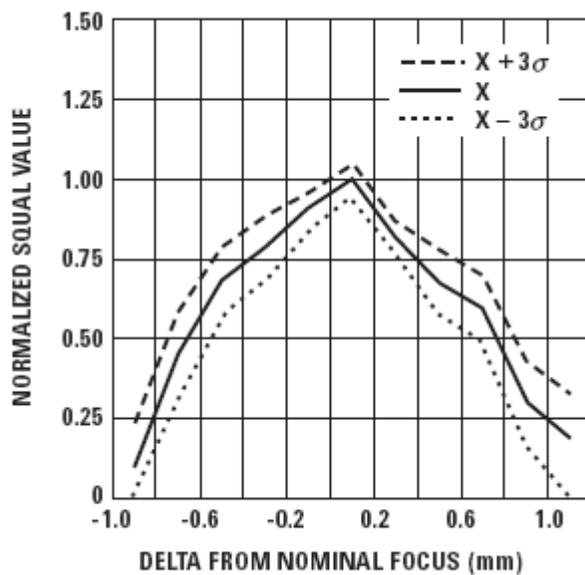


Figura N° 28: Grafico de registro SQUAL v/s Z

**C. Seguimiento de la media de Píxeles.** Aporta información sobre la luminosidad de la superficie sobre la que se encuentra el mouse. Para implementar la función, es necesaria una lectura continua del registro Pixel Zum.

**D. Captura de Imágenes.** Esta función obtiene la imagen capturada por la cámara CMOS del mouse. Para ello, se necesita acceder al registro Pixel Dato 324 veces, dado que a cada lectura se obtiene un píxel y la imagen es de 18x18 píxeles. Este acceso tiene el problema de que el sensor está continuamente obteniendo nuevas imágenes, lo que provoca la aparición de píxeles en una imagen de distintas capturas.

### 3.4.3 Funcionamiento de los chips CMOS y CCD:

El chip CMOS es el corazón del transductor del mouse, y fue introducido por Agilent. Este chip de fotosensor cumple la misma función que un chip CCD pero con distinta tecnología. Las diferencias han hecho posible la diversificación de los chips CMOS ya que tiene un costo de manufactura hasta 100 veces menor. Esto explica también que se esté utilizando actualmente en cámaras digitales de menor costo, a continuación se describe una comparación entre los dos transductores:

- Los sensores del CCD, crean imágenes de alta calidad, de poco ruido. Los sensores del CMOS, son tradicionalmente más susceptibles al ruido.
- Cada pixel en un sensor CMOS tiene varios transistores situados al lado de él, la sensibilidad de un fotosensor CMOS tiende a ser más baja ya que muchos de los fotones golpean los transistores en vez del fotodiodo.
- El uso de un chip CCD es un proceso que consume gran cantidad de energía. Un sensor CCD consume 100 veces más energía que un sensor equivalente CMOS.
- Los sensores del chip CMOS se pueden fabricar en cualquier cadena de producción estándar del silicio, así que tienden a ser extremadamente baratos en comparación a los sensores del chip CCD.
- Los sensores del chip CCD se han producido en masa por un período largo de tiempo, por cuanto la técnica se encuentra más desarrollada.

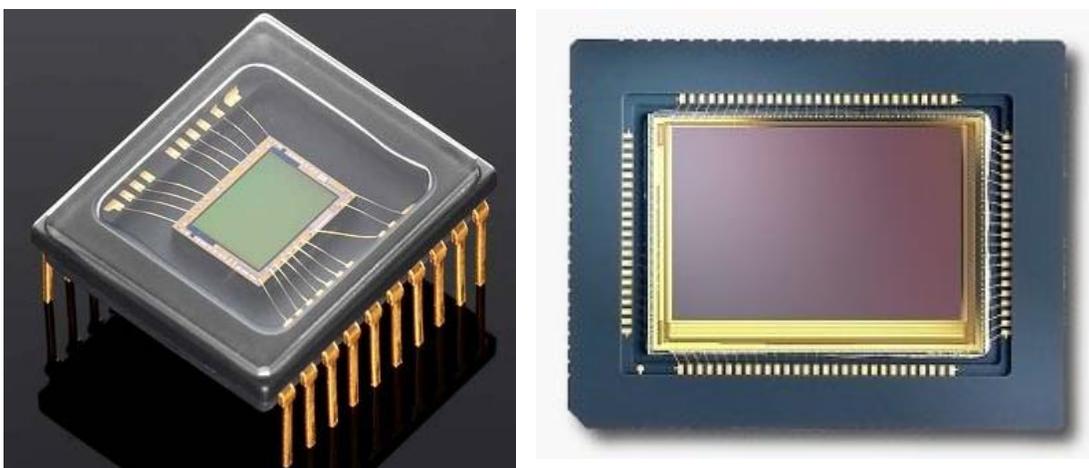


Figura N° 29 y 30: A la izquierda chip CCD de una cámara digital moderna, a la derecha chip CMOS Sony de bajo consumo.

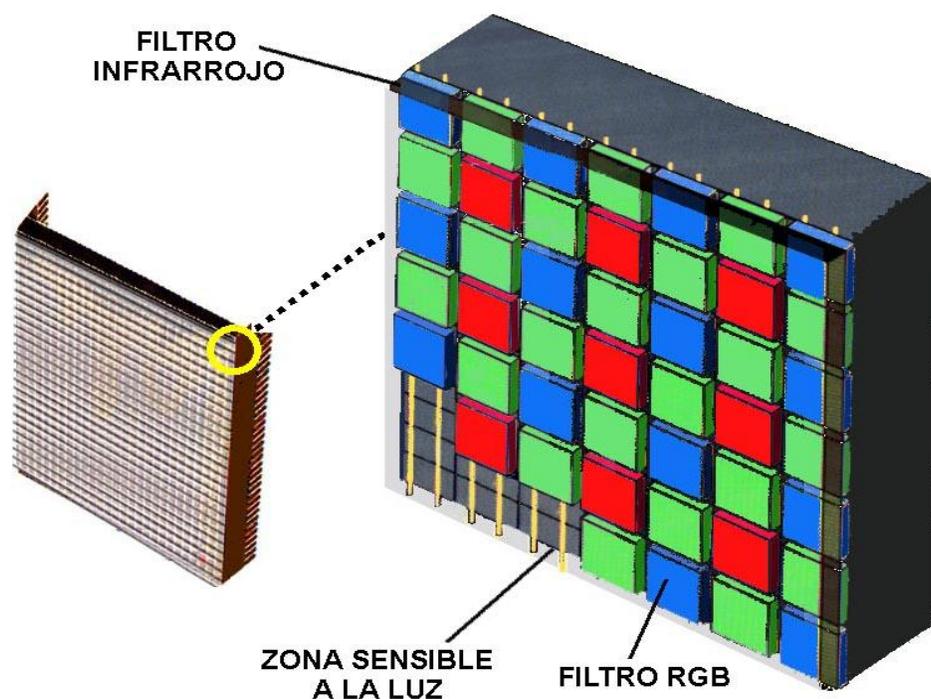


Figura Nº31: Vista microscópica de un chip CMOS a color

La versatilidad del chip es muy amplia pudiendo ser utilizado para distintos fines como odómetro, scanner y cámara digital.

### 3.4.4 El transductor HDNS-2000 como odómetro

Según Palacín. Et al. (2005) un sensor Agilent ADNS-200 ha sido sometido a pruebas de laboratorio sobre una guía y se ha desplazado repetidas veces 1, 2, 3, 4 y 5 centímetros para estimar una desviación estándar  $S=0.6325$  pulsos/cm. Esto nos indica, considerando que este sensor tiene una resolución de 400DPI, que puede ser utilizado como odómetro debido a la baja desviación y a la repetitividad.

### 3.4.5 El transductor ADNS-2610 como cámara digital y scanner

En este caso se ha utilizado un sensor ADNS-2610 mediante el puerto paralelo de un ordenador para acceder a la información de sus registros y a la imagen capturada por su cámara.

**1 Utilización como Scanner:** Esta función es una combinación de la información de la trayectoria del mouse y la captura de imágenes. La idea consiste en obtener una imagen y colocarla en su posición espacial correspondiente.



Figura N°32: Resultado de la función scanner.

**2 Utilización como cámara:** Para ello se ha reemplazado la lente original del sensor por una convencional ( $F=5.5$  mm) y se ha encapsulado el sensor para evitar que la luz incida en el sensor de forma incontrolada. Este experimento sólo ofrece imágenes interpretables al enfocar directamente una fuente de luz (figuraN°33). Dado que las fuentes de luz son objetos normalmente fijos en el techo, podría diseñarse un robot que los buscara y los utilizara como puntos de referencia en su desplazamiento.



Figura N°33: Imagen de un fluorescente.

# Capítulo IV

*“Diseño del acelerómetro”*

## 4.1 Introducción

Este capítulo se enfoca al método utilizado para el diseño de manera de obtener un acelerómetro óptimo dentro de las limitaciones.

El diseño consiste en la planificación un acelerómetro *experimental*, para proceder posteriormente a su elaboración.

Las características dinámicas del equipo se evalúan parcialmente en el diseño de manera de marcar un lineamiento para la fabricación, posteriormente con el equipo experimental se evaluarán mediante ensayos las características reales del equipo.

Las limitaciones de diseño son elementos que por sus características no podemos cambiar como el tamaño del transductor o sus cualidades sensibles. También son limitantes los procesos de fabricación que excedan el presupuesto de esta investigación o estén fuera del marco teórico de esta. Como ejemplo la miniaturización del transductor podría consistir en una nueva disposición de los elementos electrónicos y el retiro de los elementos no utilizados. Esta ventaja aparente es una limitación de diseño pues no se estudia el componente electrónico.

## 4.2 Sensor

El sensor es el corazón del acelerómetro por lo que será lo primero y más importante a diseñar.

Para el caso de acelerómetros piezoeléctricos o piezorresistivos el sensor y el transductor son un solo elemento, para nuestro caso el sensor será totalmente separado del transductor lo que para algunos casos puede significar una ventaja comparativa.

### 4.2.1 Características de los sensores

*“El sensor de cualquier acelerómetro es un vibrador con una masa encargada de recoger la aceleración de su base a través de una deformación de una de sus partes o de sí misma”.*

Las características más importantes son: La rigidez debe mantenerse en un rango lineal o se pueda corregir posteriormente de manera satisfactoria, el tamaño debe ser reducido y los desplazamientos que entrega al transductor deben ser lo suficientemente grandes. En definitiva el sensor debe adaptarse al transductor.

Otra característica decisiva es el tipo de amortiguamiento al cual está sometido el sensor. Se intentará evitar el roce estático que enmascara una parte de la señal y perjudica la lectura notablemente.

### 4.2.2 Sensor de viga en volado

Este tipo de sensor consiste en una viga de sección circular empotrada en un extremo y en el otro una masa. El sensor ha sido utilizado en acelerómetros piezoeléctricos, y se denomina “*sensor a flexión*” ya que la rigidez soportante opera a flexión. Existen también sensores diseñados al corte o a la compresión.

Para el caso de nuestro trabajo este tipo de diseño es conveniente ya que este sensor trabaja en dos ejes simultáneos, situación que se adapta al transductor.

Un inconveniente en la utilización de este sensor es la necesidad de amplificar los desplazamientos generados por su masa, esto debido a que nuestro transductor funciona de manera óptima en rangos de desplazamiento relativamente altos (0-1.5cm), esto se puede conseguir teniendo un sensor con un periodo

propio muy bajo lo cual intentamos evitar ya que un valor de frecuencia propia bajo generara el problema de tener un rango útil de trabajo del equipo demasiado reducido. La solución que hemos adoptado para subsanar esta situación es acoplar al elemento sensor un sistema de amplificación de desplazamientos, este sistema no debe aportar demasiada rigidez e inercia al sistema de manera de aumentar solo el desplazamiento y no el periodo propio.

Bajo estas condiciones modelaremos las características del sensor considerando solo los elemento de masa, rigidez y amortiguamiento preponderantes para el sistema, los elementos que conformaran el elemento amplificador no serán considerados, las características reales del equipo se verificaran una vez se encuentre en funcionamiento.

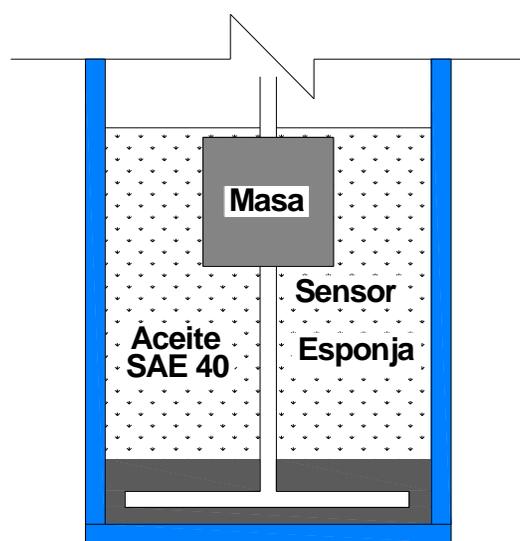


Figura N°34: Sensor viga empotrada con sistema de amortiguamiento viscoso.

La figura 41 muestra el sensor diseñado con un sistema de amortiguamiento consistente en una esponja embebida en aceite con una viscosidad aun no determinada. La viscosidad del aceite y la posibilidad de cambiarlo mediante un tapón permitirá aumentar o reducir el amortiguamiento del sistema, el aceite una vez embebido en la esponja ocupara los intersticios de la misma, al momento de vibrar la masa el aceite se verá forzado a desplazarse por entre los intersticios de la esponja de un lado para otro constantemente, transformando parte de la energía en calor dentro de la esponja, esto es lo que se llama comúnmente amortiguamiento viscoso y la capacidad disipativa es una función del tamaño de los intersticios, y de la viscosidad del aceite a utilizar.

Para el caso de pequeñas deflexiones a partir de la posición de equilibrio el desplazamiento  $\delta(t)$  de la viga en volado con una masa en el extremo es linealmente proporcional a la aceleración externa aplicada, entonces podemos decir que:

$$\delta(t) = \left( \frac{mL^3}{8EI} + \frac{ML^3}{3EI} \right) \alpha(t) \quad \text{Ecuación 25}$$

La Frecuencia natural del sistema  $\omega_n$  es de la siguiente forma:

$$\omega_n = \left[ \frac{3EI}{L^3(M+0.235m)} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 26}$$

En las ecuaciones anteriores  $m$  corresponde a la masa de la viga distribuida uniformemente, y  $M$  es la masa del extremo.

### 4.2.3 Sistema de amplificación de desplazamientos RL-RF

El sistema ideado en este trabajo para amplificar los desplazamientos del sensor consiste en un conjunto mecánico conformado por una rotula libre y una rotula fija, de ahí el nombre RL-RF. El sistema amplifica mecánicamente el desplazamiento sin alterar significativamente las cualidades físicas del vibrador por lo que su construcción se realizara en materiales de bajo peso como plástico, con el fin de disminuir la inercia y las rotulas serán de Goma como se muestra en las figuras siguientes:

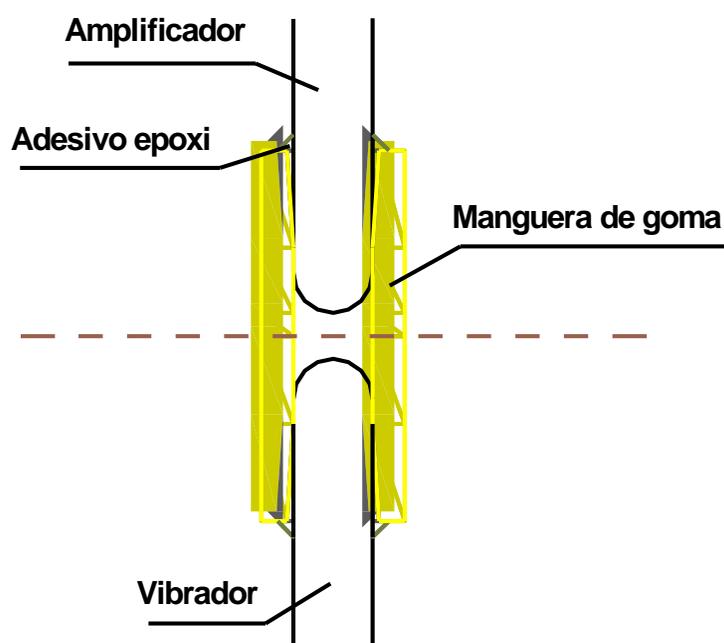
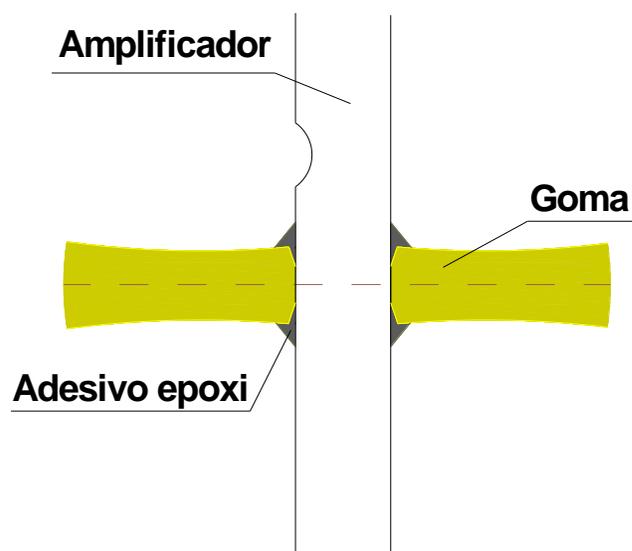


Figura N°35: Rotula libre

La rotula aportara rigidez y amortiguamiento al sistema, este aporte será cuantificado mediante una comparación de los resultados empíricos realizados con el Software de Acelerómetro y los resultados que se desprendan del cálculo sin su consideración.



**Figura N°36: Rotula fija**

El concepto de rotula libre se refiere a una rotula que no restringe desplazamientos, la rotula fija en cambio permite solo giros en 2 ejes y restringe los desplazamientos.

Finalmente el sistema resulta amplificando el desplazamiento de manera proporcional a la relación de separación de sus rotulas como esquematiza la figura siguiente:

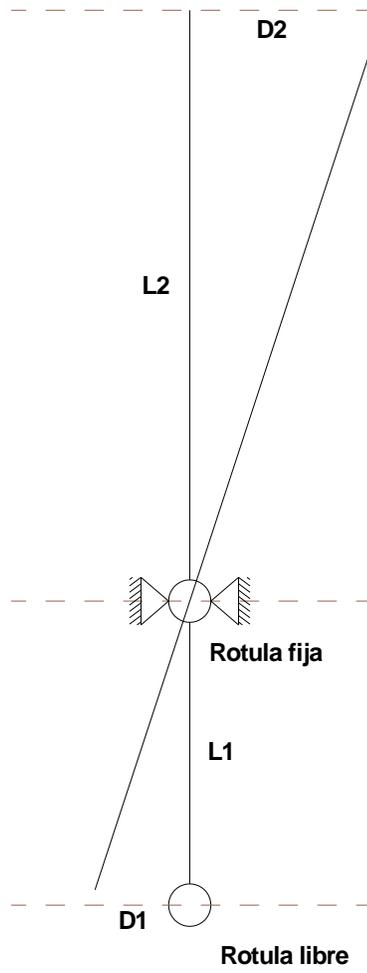


Figura N°37: Diagrama sistema amplificador rotula fija rotula libre

Como se aprecia en el diagrama la relación de desplazamientos  $\frac{D_1}{D_2} = \frac{L_1}{L_2}$  de donde se obtiene el factor de amplificación.

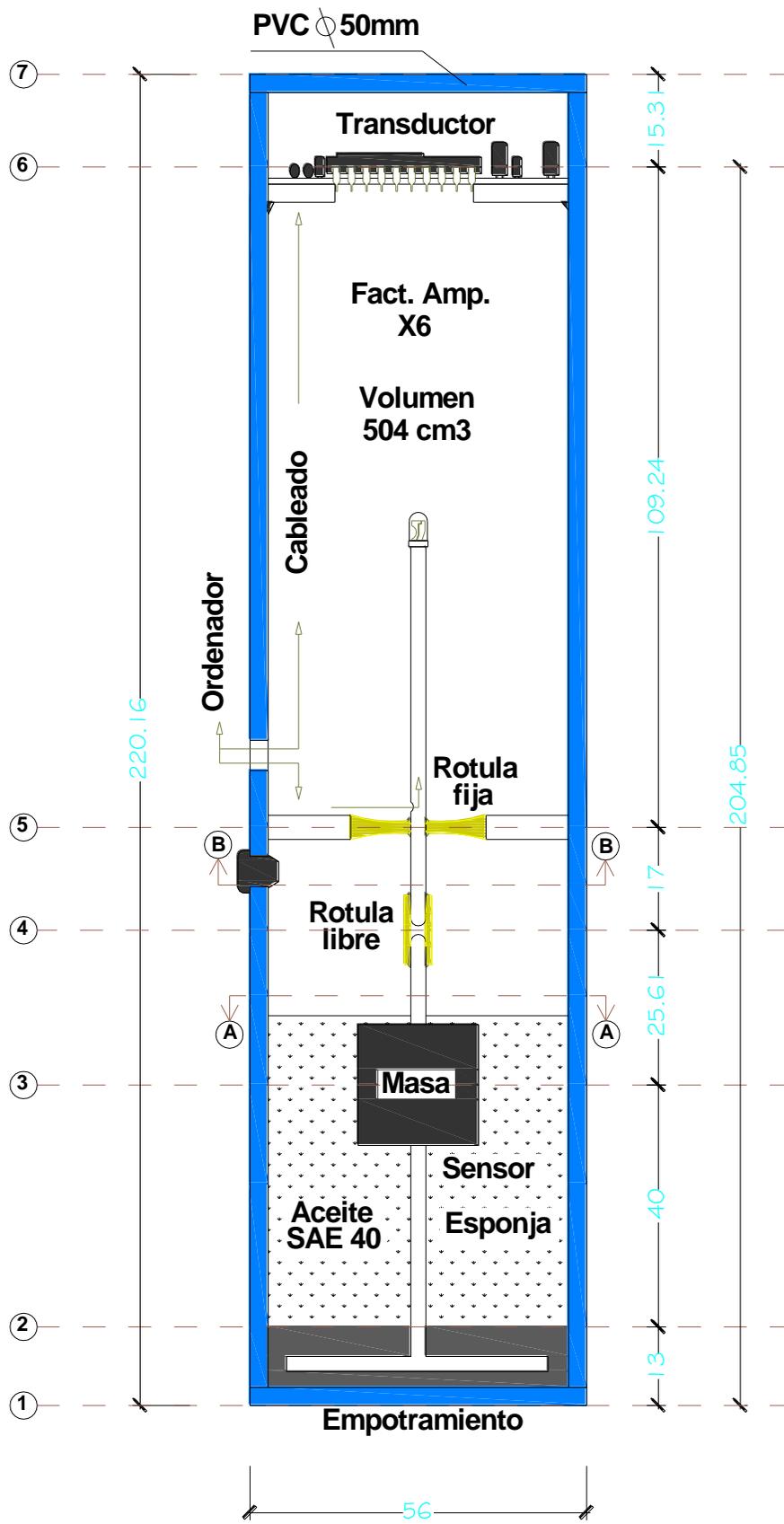


Figura N°38: Elevación acelerómetro con sistema de amplificación (Sin escala).

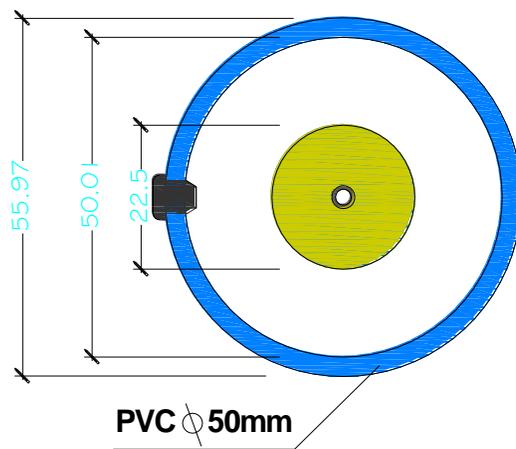
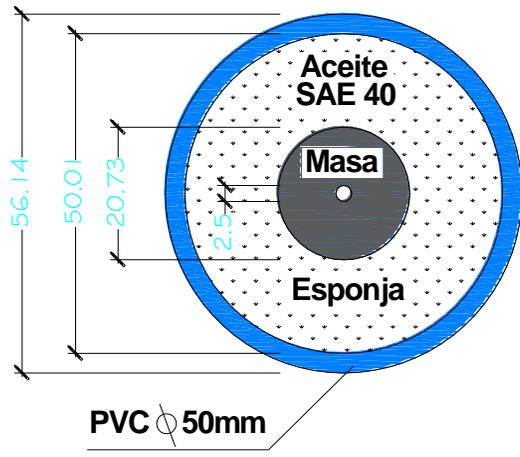


Figura N°39: Cortes A-A y B-B (Sin escala)

## Resultados preliminares acerca del sistema de amplificación:

El prototipo anterior presento problemas ya que el sistema amplificador introduce un periodo independiente al del sensor. Este hecho se intento evitar usando materiales liviano y rígidos, sin embargo la elasticidad de las rotulas generaron un periodo de 0.006 seg que aparece vibrando independiente en los ensayos por lo que se ha optado por eliminar el sistema RL-RF.

### 4.2.4 Características del modelo experimental

Con el objetivo de evaluar las características de los sensores en estudio se elaboro un modelo experimental definitivo de sensor acoplado a un transductor de mouse laser con sensor CMOS. (El acelerómetro es el mismo de la planimetría anterior con modificaciones leves y sin el sistema de amplificación)

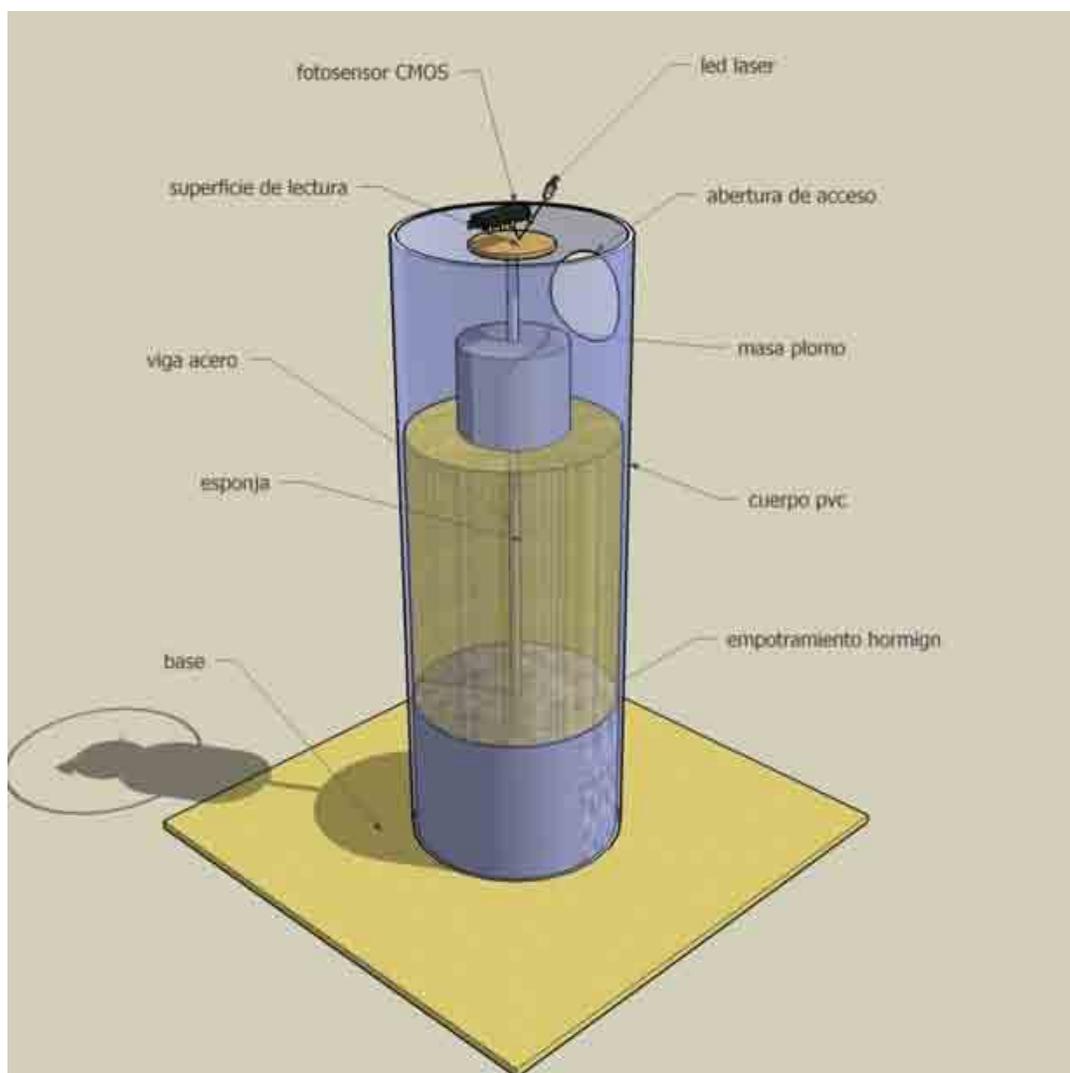


Figura N°40: Modelo de acelerómetro experimental 3D

El diseño de este equipo es homologado al equipo de la Figura N°40, con algunas variaciones en su elaboración por razones constructivas:

- 1) Se ha aumentado la altura del empotramiento de 13 a 30mm.
- 2) Se ha aumentado la altura de la viga desde el empotramiento hasta la masa de 40 a 50mm.
- 3) Se ha reemplazado el sistema amplificador por una conexión directa a la superficie de lectura (sin rotulas): Esta modificación fue efectuada en una segunda instancia ya que el sistema amplificador incorporó demasiado ruido a la lectura.
- 4) Se ha reemplazado la lectura directa del led por lectura sobre superficie de cartón reciclado.

A continuación se analizan las características dinámicas del sensor.

a) Rigidez del sistema:

La rigidez del sistema vibratorio es aportada principalmente por dos partes

1) Rigidez aportada por la viga:

-material: acero para muelles (tratado para aumentar la rigidez y el rango elástico del acero), se desconoce la elasticidad del material empleado, la viga tiene un largo de **5cm** y un diámetro de **1.5mm** la inercia de la viga  **$I = 0.0000248\text{cm}^4$**

2) Rigidez aportada por la esponja:

Se desconoce y se inferirá de los resultados.

b) Masa:

La masa principal de plomo se elaboró en un molde con un volumen de **24.6cm<sup>3</sup>**, y un peso de **0.28kgf**. La masa de la viga tiene un volumen de **0.37cm<sup>3</sup>** y un peso de **0.0288kgf**. La masa de la esponja es dependiente del volumen traslacional de la misma, ya que no toda la esponja se desplaza solidaria a la viga, por esta razón considerando que la esponja aportara una masa total de **0.03Kgf** lo consideramos despreciable.

La masa de la viga desde la masa hasta la superficie de lectura incluida esta se considero despreciable en el cálculo

c) Amortiguamiento:

El amortiguamiento se midió en experimentos detallados mas adelante como el **20.5%** del crítico mediante el método de decremento logarítmico para una cantidad de **65cc** de aceite **SAE 90**. La esponja ocupa un volumen de **123.2cm<sup>3</sup>** lo que permite eventualmente agregar aceite hasta su capacidad de llenado máxima que se estima en un **85%** para prevenir derrames, por lo anterior tenemos un volumen de servicio máximo de **104.7cm<sup>3</sup>**.



**Figura N°41: Foto de viga con empotramiento y masa durante su fabricación**

## Calculo del periodo propio:

Los ensayos del sensor montado en el acelerómetro revelaron una frecuencia propia de **0.05seg**.

Remplazando en la ecuación 26

$$\omega_n = \left[ \frac{3EI}{L^3(M + 0.235m)} \right]^{1/2}$$

Obtenemos un valor representativo de  $EI=1508.59 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ,  $W_n=11.32 \text{ rad/seg}$ .

“Podemos concluir que el valor del periodo propio  $T=0.088 \text{ seg}$  será inferior al periodo real ya que no se considero la rigidez de la esponja.”

## 5.3 Software controlador de dispositivo

### Requerimientos de Software

Los requerimientos de software se plantearon intentando optimizar las prestaciones del acelerómetro:

- 1) **Conectividad:** El software debe tomar los datos del transductor justo después de que Windows lo reconoce como mouse. Esto asegura soporte “*Plug & Play*” para los equipos que cumplan el protocolo estándar. Esto ocurre en la totalidad de los mouse comercializados actualmente.
- 2) **Máxima resolución:** El software tomara la información proveniente del equipo transductor en el lugar en donde se encuentre la totalidad de los datos entregados a Windows. En una primera etapa de la tesis se desarrollo un software que tomaba los desplazamientos como pixeles, esto deteriora considerablemente la resolución.
- 3) **Interfaz Eficiente:** La interfaz usuario debe ser simple, y permitir al usuario administrar de la manera más sencilla la información entregada por el transductor. Además deberá mostrar una grafica en tiempo real de las lecturas en cuestión.
- 4) **Almacenamiento:** La información deberá guardarse ordenada de la siguiente manera: Fecha, Hora, t,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ . y deberá encontrarse en un formato compatible con Excel.
- 5)

#### 5.3.1 Elaboración del Software

La lectura del mouse fue realizada por medio de las API de Windows, específicamente al archivo *user32.dll* que expone los servicios de Windows al programador, en nuestro caso acceder a dispositivos de mouse.

En Windows existen varias formas de comunicar el PC con el humano, a estas formas se les llama dispositivos de entrada o INPUT. Estos dispositivos, electrónicos, envían señales al PC que son transformadas en datos, pero para que ocurra debe existir un canal de comunicación, es decir, emisor y receptor que se entiendan, “*he aquí la funcionalidad de un driver, entender lo que dice el dispositivo y hacer la conversión a datos*”.

El mouse envía una palabra de bits, unos y ceros donde los 1 indican activación de un sensor, por ejemplo, movimiento en x, movimiento en y, clic en algún botón, etc.

Estos datos son recibidos por el driver y por medio de la *user32.dll* son accesibles por lo que se denomina Raw Input, por lo tanto un mouse es un tipo especial de estos Raw Inputs con propiedades idénticas al funcionamiento del mouse.

Cuando un software solicita datos a *user32.dll* debe decir que dispositivo quiere y la forma en que los datos le van a ser entregados, para el caso del mouse, son los delta x, delta y, estos valores van a depender del hardware del mouse, debido a que algunos tienen más detalle o delta que otros, debido a la memoria del chip CMOS, esto se encuentra en lo que se denomina DPI.

### 5.3.2 Operación del software:

El controlador opera con una interfaz gráfica que permite echar a andar y detener el registro (biaxial), se pueden soportar operando simultáneamente varios registros por lo que se podría controlar una red de una cantidad aún no definida de acelerómetros con un solo ordenador.

Es importante aclarar que el tiempo entregado en el registro de aceleraciones como SEGUNDOS corresponde al momento en que fue entregada la muestra al ordenador. Es decir el acelerómetro entrega un  $\Delta(x,y)/\Delta t$  implícito, es por eso que a la variable  $\Delta(x,y)$  se le considera como una velocidad. Es por esa razón que el transductor en su forma más simple es un velocímetro de lectura en 2 ejes con un rango de operación que varía entre  $-127 \leq \Delta(x,y) \leq 127$ .  $\Delta t = 1/10000$  Seg. y equivale a la velocidad de muestreo.

----- INIT -----

FECHA MUESTRA	SEGUNDOS	DELTA X	DELTA Y
07/10/2007 12:27	0.188	-1	2
07/10/2007 12:27	0.204	-9	11
07/10/2007 12:27	0.2041	-11	12
07/10/2007 12:27	0.2042	-15	15
07/10/2007 12:27	0.25	-15	14
07/10/2007 12:27	0.2501	-16	13
07/10/2007 12:27	0.2502	-14	12
07/10/2007 12:27	0.2503	-8	5
07/10/2007 12:27	0.2504	-3	4
07/10/2007 12:27	0.297	2	0
07/10/2007 12:27	0.2971	3	-3
07/10/2007 12:27	0.2972	8	-5
07/10/2007 12:27	0.2973	12	-7
07/10/2007 12:27	0.2974	16	-8
07/10/2007 12:27	0.2975	14	-8
07/10/2007 12:27	0.344	14	-10
07/10/2007 12:27	0.3441	12	-6
07/10/2007 12:27	0.3442	14	-8
07/10/2007 12:27	0.3443	12	-6
07/10/2007 12:27	0.3444	10	-4
07/10/2007 12:27	0.3445	6	0
07/10/2007 12:27	0.36	4	0

Tabla Nº2: Fragmento de un registro de aceleraciones con el formato entregado por el software

## Soporte:

Para correr el software del acelerómetro, para el caso de Windows XP se requiere instalar Microsoft Net Framework 2.0 o superior, para Windows Vista no es necesario ya que Net Framework viene incorporado.

También es necesario cambiar la configuración regional y asegurarse que la coma se utilice como separador de miles y el punto como separador decimal. De lo contrario se exportaran erróneamente los datos de las aceleraciones a excel.

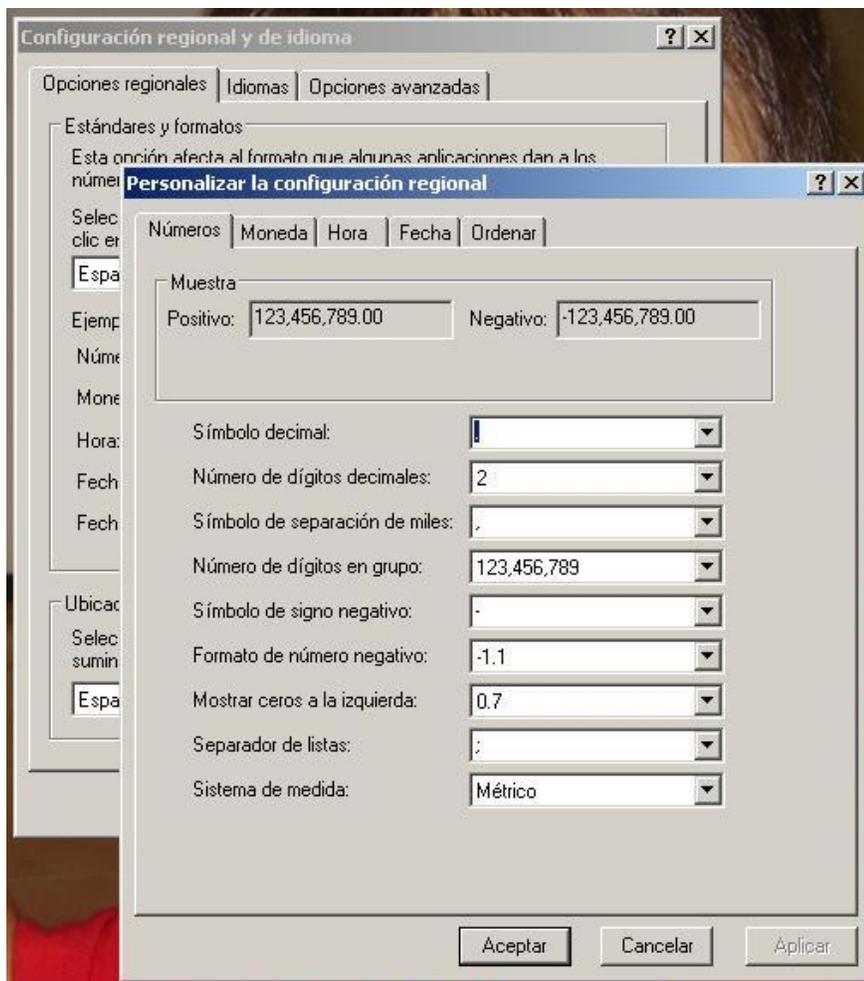


Figura N°42: Pantalla de configuración regional de Windows

## **Capitulo V**

*“Ensayos y resultados utilizando el modelo de acelerómetro experimental”*

## 5.1 Ensayos de determinación de error del sensor

El ensayo consiste en utilizar el sensor sobre una guía elaborada con una regla metálica sobre una superficie de “manila folder” o carpeta de papel reciclado correspondiente al mismo material utilizado como superficie de lectura en el prototipo.

Se realizaran repetidos desplazamientos sobre la guía solidaria al papel y luego se registra en una planilla la cantidad de pulsos de desplazamiento entregados por el transductor, estos pulsos se comparan en desplazamientos sucesivos para estimar una Desviación Estándar.

Es importante aclarar que este experimento no representa el error del equipo, solo del transductor. El equipo debería incorporar un grado de error algo mayor que esta asociado a la fabricación.

*EJEX*

1600DPI

CM	1	2	3	4	5	PROMEDIO	
1)	652	1302	1956	2604	3228	650,320	PULSOS/CM
2)	645	1299	1952	2582	3252	648,213	PULSOS/CM
3)	648	1290	1942	2592	3234	647,027	PULSOS/CM
4)	651	1298	1941	2580	3249	648,360	PULSOS/CM
5)	645	1293	1940	2601	3255	647,883	PULSOS/CM
6)	648	1305	1944	2607	3240	649,650	PULSOS/CM
7)	643	1296	1953	2592	3261	648,440	PULSOS/CM
PROM	647,429	1297,571	1946,857	2594,000	3245,571	648,556	PULSOS/CM
PROM/CM	647,429	648,786	648,952	648,500	649,114	648,556	PULSOS/CM
DESVEST	3,309	5,127	6,594	10,536	11,928	2,618	PULSOS/CM
%error	0,511	0,395	0,339	0,406	0,368	0,404	%

Tabla N°3: Valores obtenidos para determinar la desviación y el error del sensor en x.

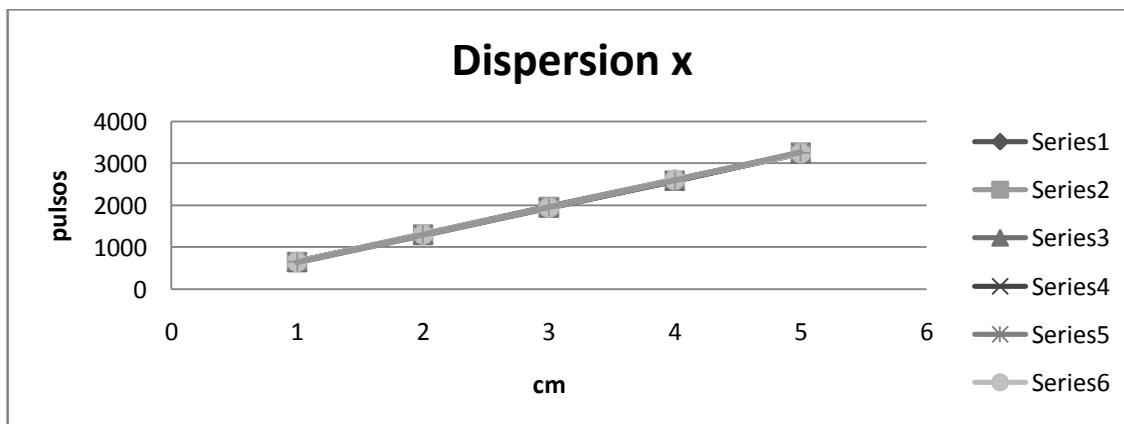


Figura N°43: Grafica de dispersión de la tabla N°3.

CM	1	2	3	4	5	PROMEDIO	
1)	642	1293	1944	2586	3216	645,240	PULSOS/CM
2)	648	1299	1939	2601	3260	649,217	PULSOS/CM
3)	648	1299	1950	2592	3249	649,060	PULSOS/CM
4)	648	1296	1944	2592	3243	648,120	PULSOS/CM
5)	651	1303	1953	2580	3231	648,940	PULSOS/CM
6)	648	1300	1938	2604	3249	648,960	PULSOS/CM
7)	651	1296	1944	2592	3250	649,000	PULSOS/CM
PROM	648,000	1298,000	1944,571	2592,429	3242,571	648,362	PULSOS/CM
PROM/CM	648,000	649,000	648,190	648,107	648,514	648,362	PULSOS/CM
DESVEST	3,000	3,266	5,412	8,203	14,616	2,282	PULSOS/CM
%error	0,463	0,252	0,278	0,316	0,451	0,352	%

Tabla N°4: Valores obtenidos para determinar la desviación y el error del sensor en y.

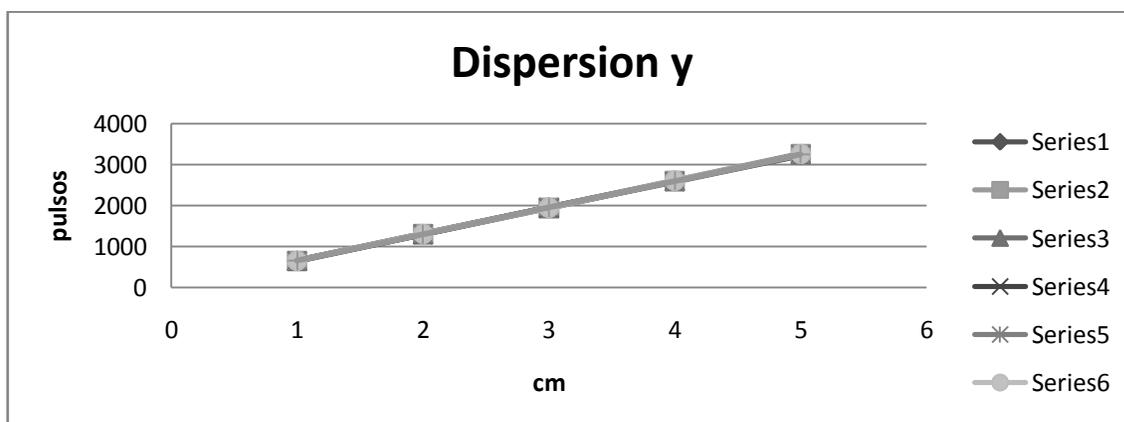


Figura N°44: Grafica de dispersión de la tabla N°4.

Obtenemos para el eje x un promedio de 648.556 Pulsos/cm y una desviación estándar de 2.618 Pulsos/cm con un error lineal de 0.404%.

Para el eje y el promedio corresponde a 648.362 Pulsos/cm y una desviación estándar de 2.282 Pulsos/cm con un error lineal de 0.352%.

## 5.2 Ensayo de determinación de frecuencia propia

Este ensayo consistirá en excitar repetidamente el acelerómetro induciéndolo a que vibre antes de detenerse. Los resultados deberán ser mayores a los calculados con el vibrador fuera de la carcasa debido a la rigidez aportada por la esponja y el amortiguamiento del sistema.

### PERIODO PROPIO MAXIMO Y MINIMO

TIEMPO(SEG)	MAX MIN	t(SEG)	f(HZ)
2,5941	-105	0	0
2,6411	26	0,094	10,638
2,672	-26	0,062	16,181
2,7041	10	0,064	15,576
2,7191	-7	0,03	33,333
2,797	4	0,156	6,4185
2,829	-4	0,064	15,625
2,891	3	0,124	8,0645
2,907	-1	0,032	31,25
2,938	1	0,062	16,129
2,969	-1	0,062	16,129
2,985	1	0,032	31,25
3,516	-1	1,062	0,9416
3,532	1	0,032	31,25
PROM		0,054	20,603

Tabla N°5: Tabla para estimar el periodo propio con el criterio de máximo y mínimo.

### CERO

TIEMPO(SEG)	CERO	t(SEG)	f(HZ)
2,485	0	0	0
2,625	-15	0,28	3,5714
2,657	5	0,064	15,625
2,6881	-2	0,0622	16,077
2,7041	10	0,032	31,25
2,7351	-3	0,062	16,129
2,8131	0	0,156	6,4103
2,8291	-3	0,032	31,25
2,8911	2	0,124	8,0645
2,922	-1	0,0618	16,181
2,9381	1	0,0322	31,056
2,9691	-1	0,062	16,129
3,5	0	1,0618	0,9418
3,5161	-2	0,0322	31,056
3,547	1	0,0618	16,181
PROM		0,051	21,712

Tabla N°6: Tabla para estimar el periodo propio con el criterio de cruces por cero.

### 5.3 Ensayo de determinación de amortiguamiento

Este ensayo se realizara con las curvas obtenidas en el experimento 5.2 y el método a utilizar consistirá en determinar el decrecimiento de la vibración desde el momento en que el equipo es excitado, vibra libremente y se detiene. La metodología a utilizar se denomina Decremento Logarítmico, y el amortiguamiento del sistema se mostrara como un grafico en función de la velocidad del desplazamiento. Se incorpora en esta etapa experiencias que se desprenden del análisis del primer prototipo estudiado y que servirá para observar las inconveniencias de incorporar el roce friccional (dos superficies) en el diseño del equipo.

#### GRADO DE AMORTIGUAMIENTO

METODO DE CALCULO: DECREMENTO LOGARITMICO

TIEMPO(SEG)	MAX MIN	LN X2/X1	AMORT
2,5941	-105		
2,672	-26	1,39586381	0,21687081
2,7191	-7	1,31218639	0,20443
2,829	-2	1,25276297	0,19553424
2,907	-1	0,69314718	0,10965233
2,969	-1	0	0
3,516	-1	0	0
PROM			20,5611683 %

Tabla N°7: Tabla para estimar el grado de amortiguamiento  $\xi$ .

### 5.4 Determinación de sensibilidad

Este ensayo consiste en inclinar el acelerómetro hasta obtener la primera lectura, luego obtenemos la componente de la gravedad para evaluar el valor más pequeño de la aceleración que produce una señal eléctrica en el equipo. Las unidades utilizadas en este caso son de aceleración (m/s<sup>2</sup> o g) como se explica convenientemente en el capítulo III.

	1600 alfa(grados)	dpi comp(m/s <sup>2</sup> )	g
1	5	0,854999831	0,08715595
2	4	0,684312605	0,06975664
3	3	0,51341693	0,05233608
4	4	0,684312605	0,06975664
5	3	0,51341693	0,05233608
6	2	0,342364863	0,03489958
7	5	0,854999831	0,08715595
8	3	0,51341693	0,05233608
9	2	0,342364863	0,03489958
10	3	0,51341693	0,05233608
11	3	0,51341693	0,05233608
12	4	0,684312605	0,06975664
13	4	0,684312605	0,06975664
PROM	3,461538462	0,592235728	0,06037061
DESVEST	0,967417922	0,165311692	0,01685134

Tabla N°8: Tabla para estimar la sensibilidad del acelerómetro con el método de inclinación a 1600dpi.

1600dpi		
	pulsos	pulso (m/seg <sup>2</sup> )
1	120	0,08175
2	114	0,08605263
3	125	0,07848
4	120	0,08175
5	116	0,08456897
6	120	0,08175
7	122	0,08040984
8	116	0,08456897
9	132	0,07431818
10	120	0,08175
11	119	0,08243697
12	116	0,08456897
13	120	0,08175
<b>PROM</b>	120	0,08185804
<b>DEVEP</b>	4,63680925	0,00303306

Tabla N°9: Tabla para estimar la sensibilidad del acelerómetro con el método de evaluación de g a 1600dpi.

800 dpi			
	alfa(grados)	comp(m/s)	g
1	4	0,684312605	0,06975664
2	3	0,51341693	0,05233608
3	3	0,51341693	0,05233608
4	5	0,854999831	0,08715595
5	3	0,51341693	0,05233608
6	3	0,51341693	0,05233608
7	4	0,684312605	0,06975664
8	3	0,51341693	0,05233608
9	4	0,684312605	0,06975664
10	3	0,51341693	0,05233608
11	2	0,342364863	0,03489958
12	3	0,51341693	0,05233608
13	2	0,342364863	0,03489958
<b>PROM</b>	3,230769231	0,552814299	0,05635212
<b>DESVEST</b>	0,832050294	0,142195437	0,01449495

Tabla N°10: Tabla para estimar la sensibilidad del acelerómetro con el método de inclinación a 800dpi.

	800dpi	
	pulsos	pulso(m/seg2)
1	61	0,16081967
2	56	0,17517857
3	59	0,16627119
4	58	0,16913793
5	61	0,16081967
6	58	0,16913793
7	60	0,1635
8	62	0,15822581
9	60	0,1635
10	60	0,1635
11	60	0,1635
12	55	0,17836364
13	58	0,16913793
<b>PROM</b>	<b>59,0769231</b>	<b>0,16623787</b>
<b>DEVESP</b>	<b>2,01913919</b>	<b>0,00581014</b>

Tabla N°11: Tabla para estimar la sensibilidad del acelerómetro con el método de evaluación de g a 800dpi.

### 5.4.1 Ensayo de determinación de sensibilidad transversal.

El equipo será montado en un carro fabricado con un montante para cajón de escritorio, y será sometido a desplazamientos arbitrarios en un solo eje. Posteriormente se evaluará el grado de sensibilidad en % del eje transversal al eje del carro.

El procedimiento se repetirá para ambos ejes.

X	EXITADO	TRANSVERSAL	%
10	2		20
7	1		14,28571429
6	0		0
9	1		11,11111111
10	2		20
9	1		11,11111111
10	2		20
9	1		11,11111111
6	0		0
10	2		20
10	2		20
7	1		14,28571429
9	1		11,11111111
11	2		18,18181818
10	2		20
<b>PROM</b>			<b>14,07984608</b>

Tabla N°12: Tabla para estimar la sensibilidad transversal del acelerómetro en x.

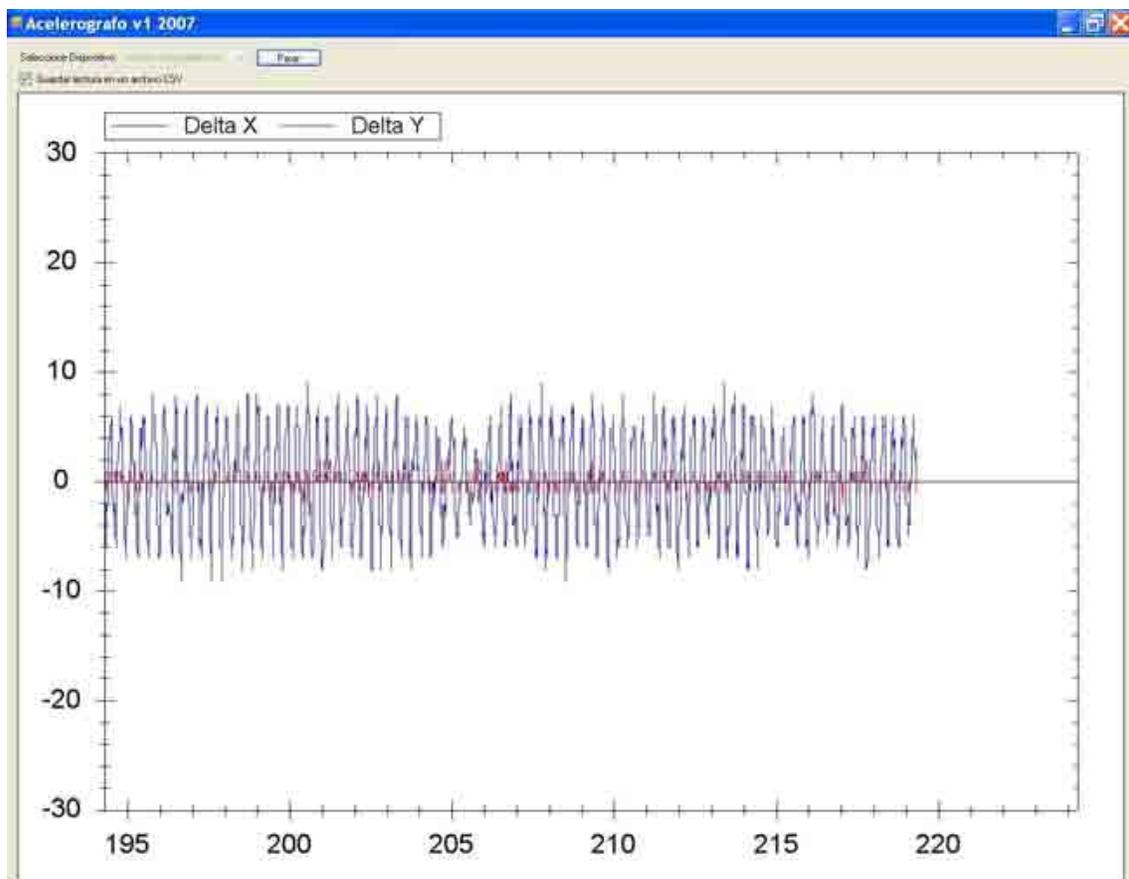


Figura N° 45: Grafica entregada por el acelerómetro en tiempo real para la evaluación de la sensibilidad transversal en x.

Y	EXITADO	TRANSVERSAL	%
	25	4	16
	30	5	16,66666667
	22	3	13,63636364
	26	2	7,692307692
	29	3	10,34482759
	30	4	13,33333333
	26	3	11,53846154
	23	2	8,695652174
	24	3	12,5
	20	4	20
	26	4	15,38461538
	29	3	10,34482759
	31	1	3,225806452
	23	3	13,04347826
	29	2	6,896551724
	PROM		11,95352614

Tabla N°13: Tabla para estimar la sensibilidad transversal del acelerómetro en 5.

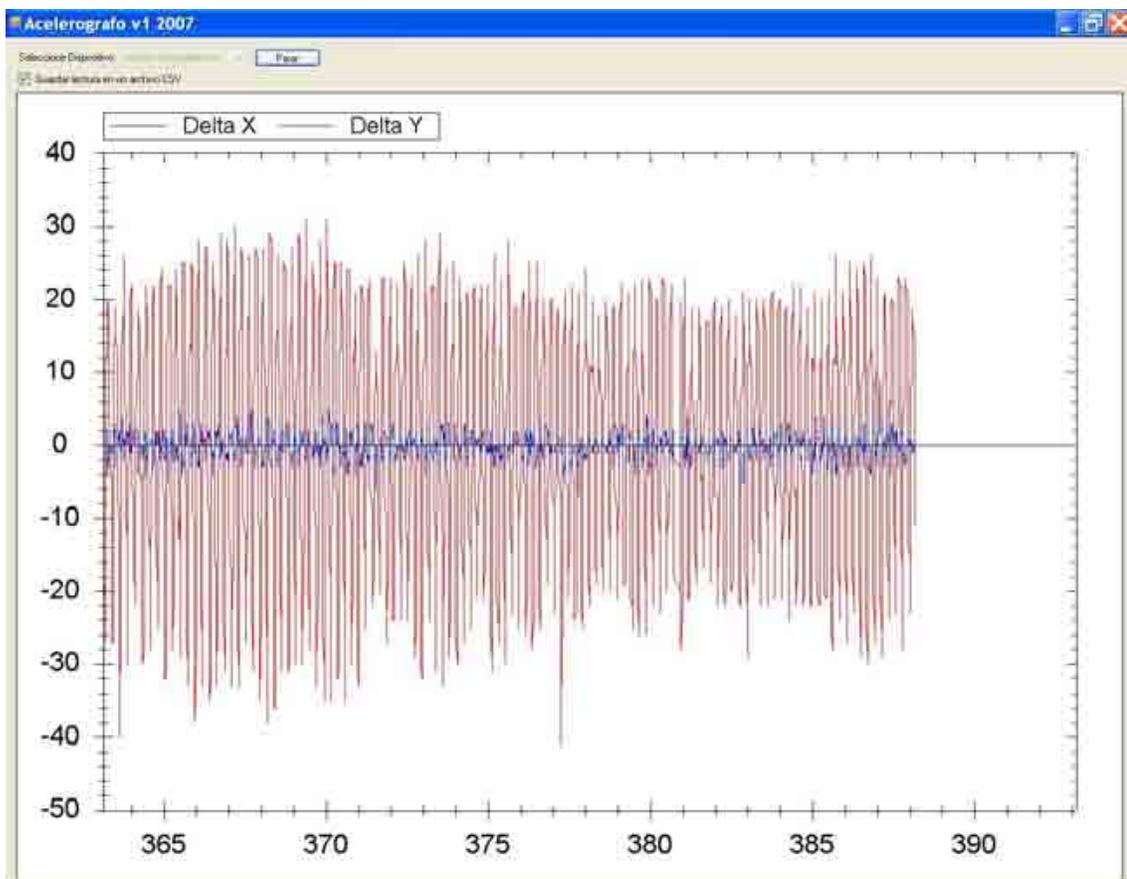


Figura N°46: Grafica entregada por el acelerómetro en tiempo real para la evaluación de la sensibilidad transversal en y.

## 5.5 Ensayo de determinación de resolución

La resolución del equipo se determinará con la información recopilada en los ensayos anteriores, y consistirá en evaluar la cantidad de pulsos o señales que el equipo es capaz de enviar al ordenador en una distancia determinada. Las unidades a utilizar serán las mismas que usa el fabricante DPI (Puntos por pulgada) y servirá para cruzar la información entregada por el mismo.

La resolución media del sensor es de 648.452 Pulsos/cm. o 1660.037 Pulsos/pulgada o DPI.

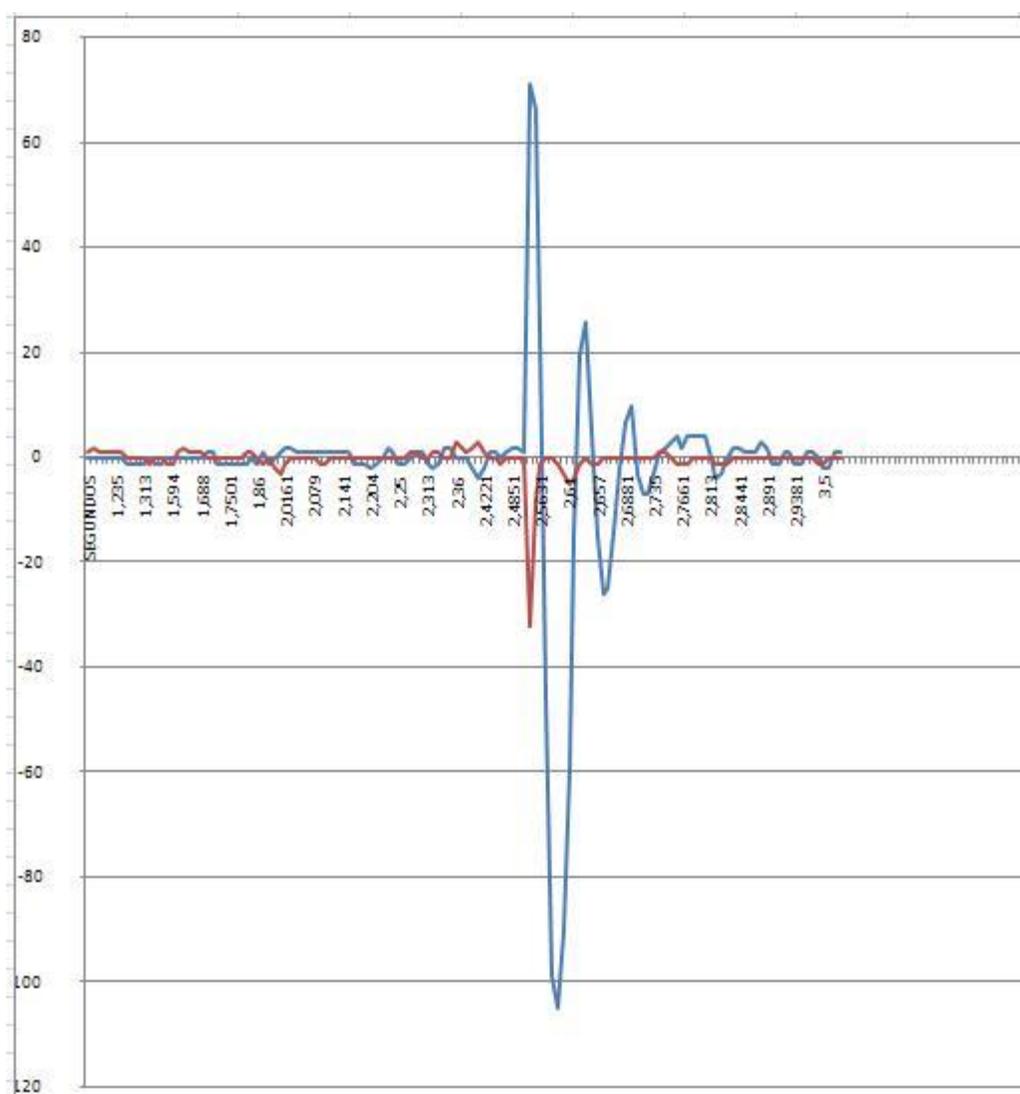


Figura N°47: Grafico de velocidad de los datos utilizado para la evaluación del periodo propio y el grado de amortiguamiento del acelerómetro.

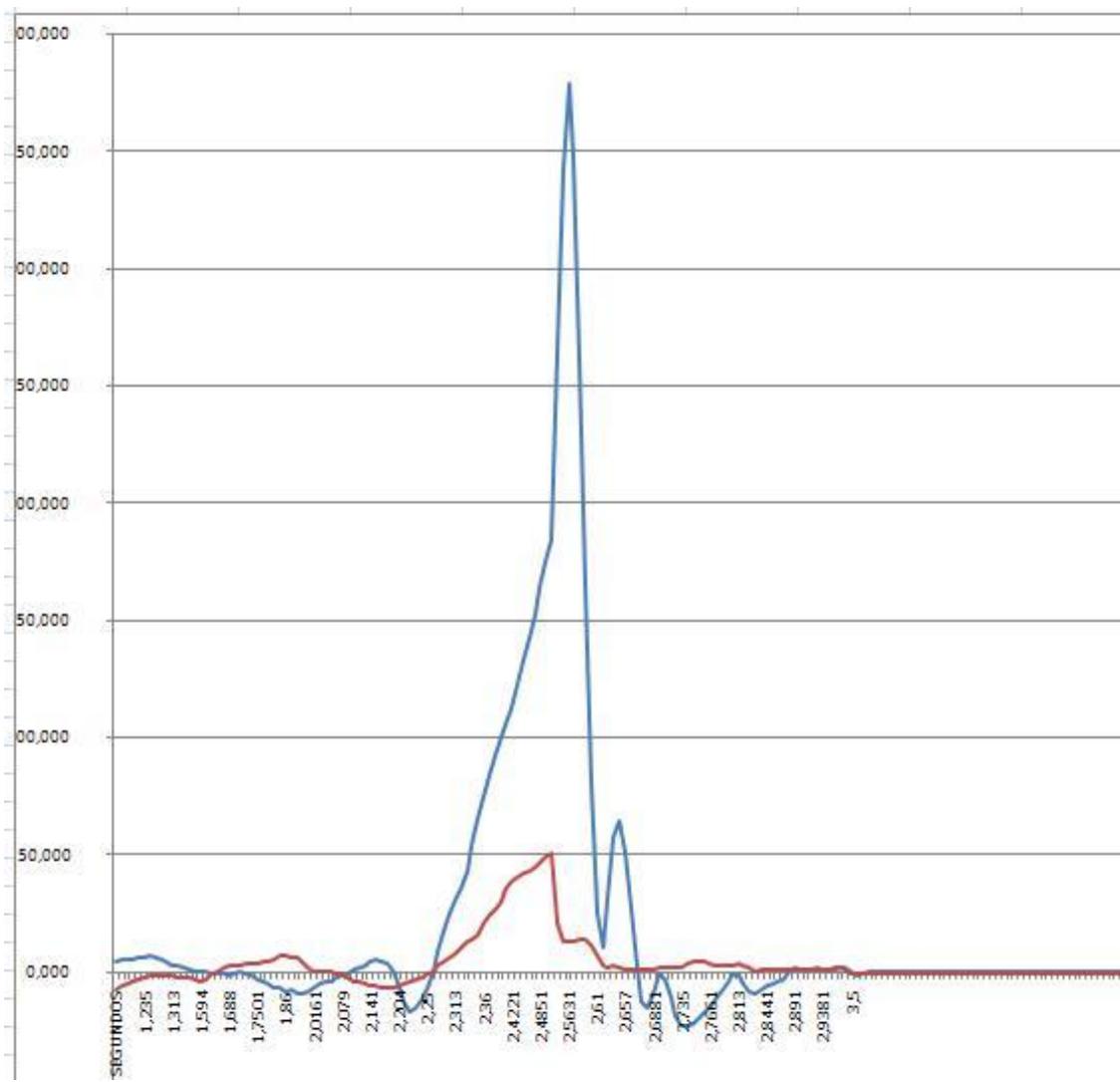


Figura N°48: Grafico de aceleración de los datos utilizado para la evaluación del periodo propio y el grado de amortiguamiento del acelerómetro.

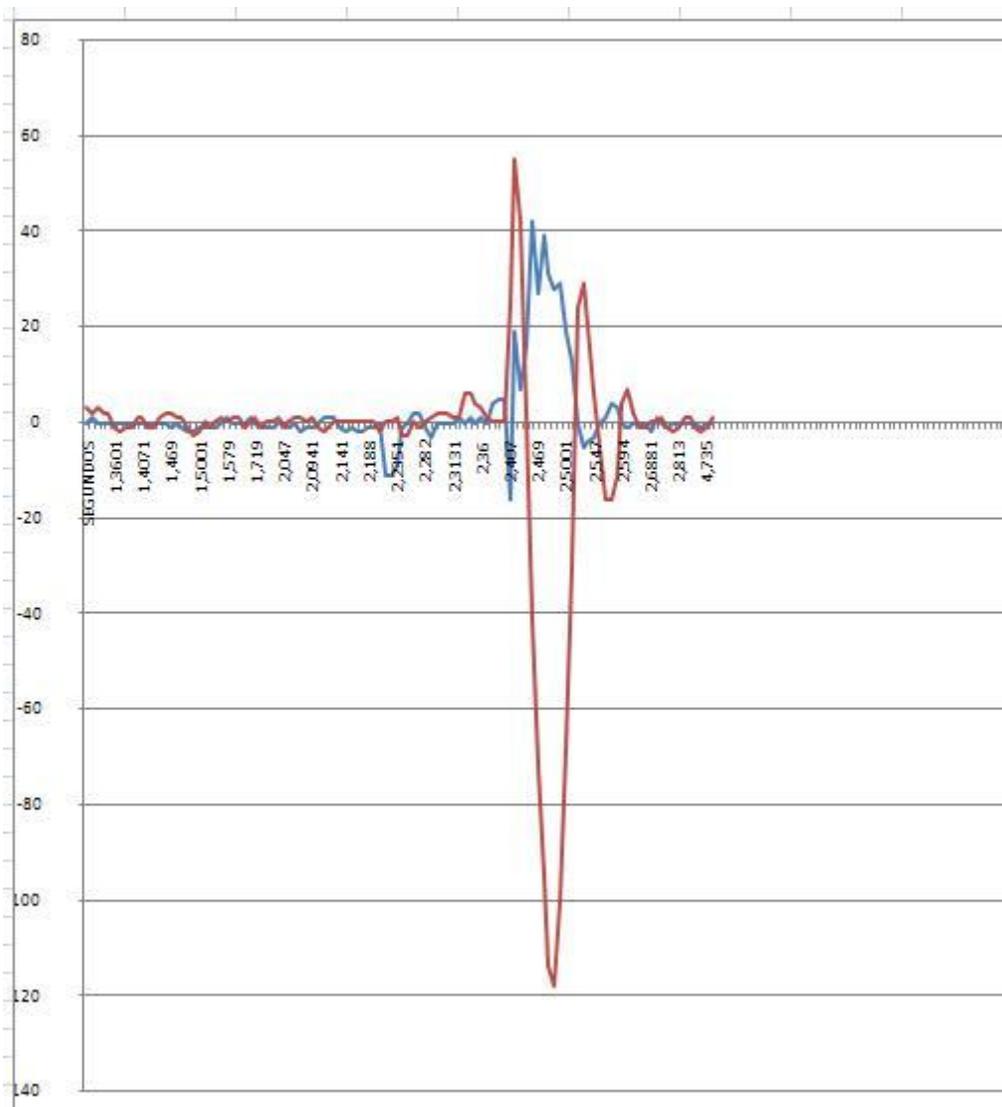


Figura N°49: Grafico de velocidad de los datos utilizado para la evaluación del periodo propio y el grado de amortiguamiento del acelerómetro.



Figura N°50: Grafico de aceleración de los datos utilizado para la evaluación del periodo propio y el grado de amortiguamiento del acelerómetro.

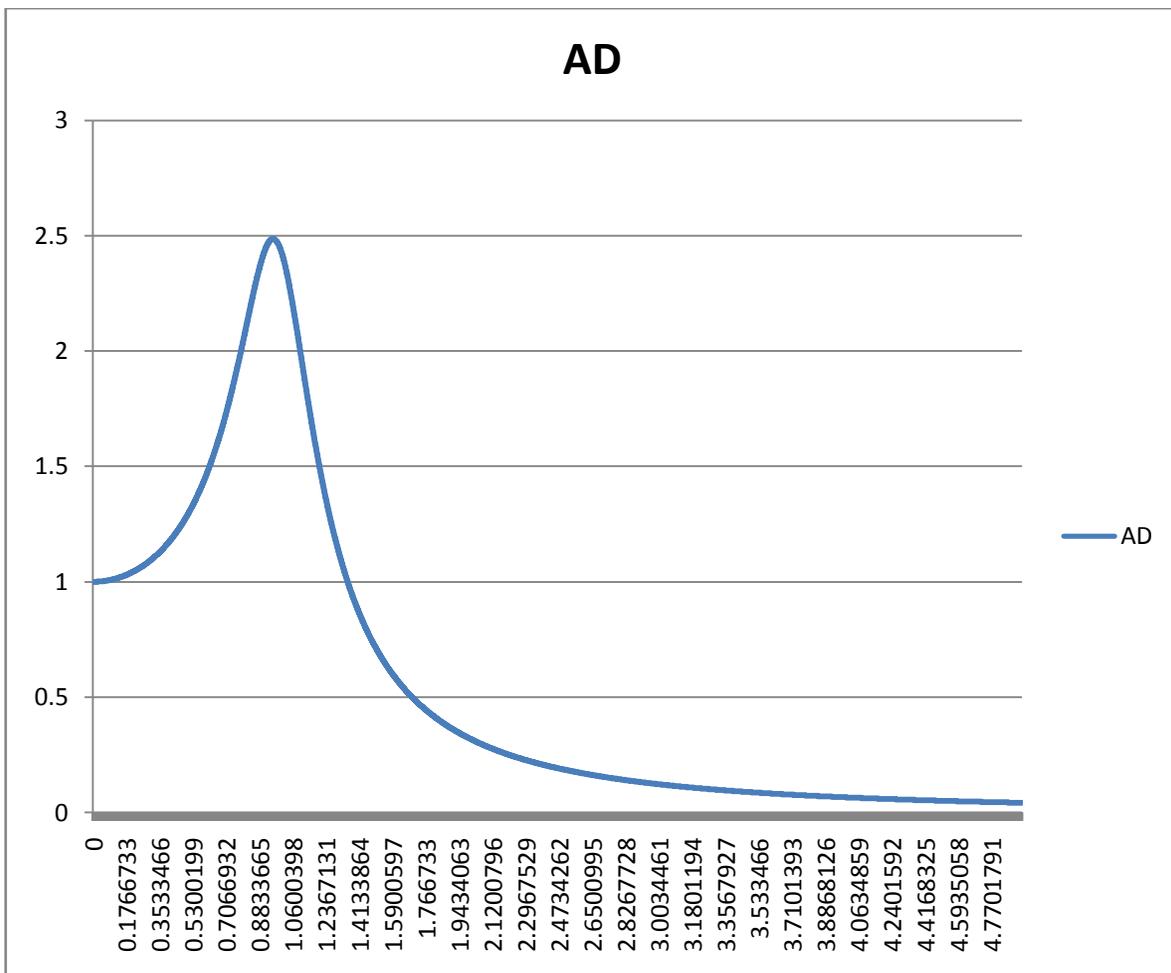


Figura N°51: Gráfico de Amplificación dinámica v/s r para  $\omega_0(\text{hz})=20.603$  y 20.56% de amortiguamiento

Del gráfico de amplificación dinámica se estima el rango de frecuencias de operación del equipo para que la amplitud sea lineal.

Se establece un rango lineal de 0 a 2hz,  $AD(2\text{hz})=1.0087$

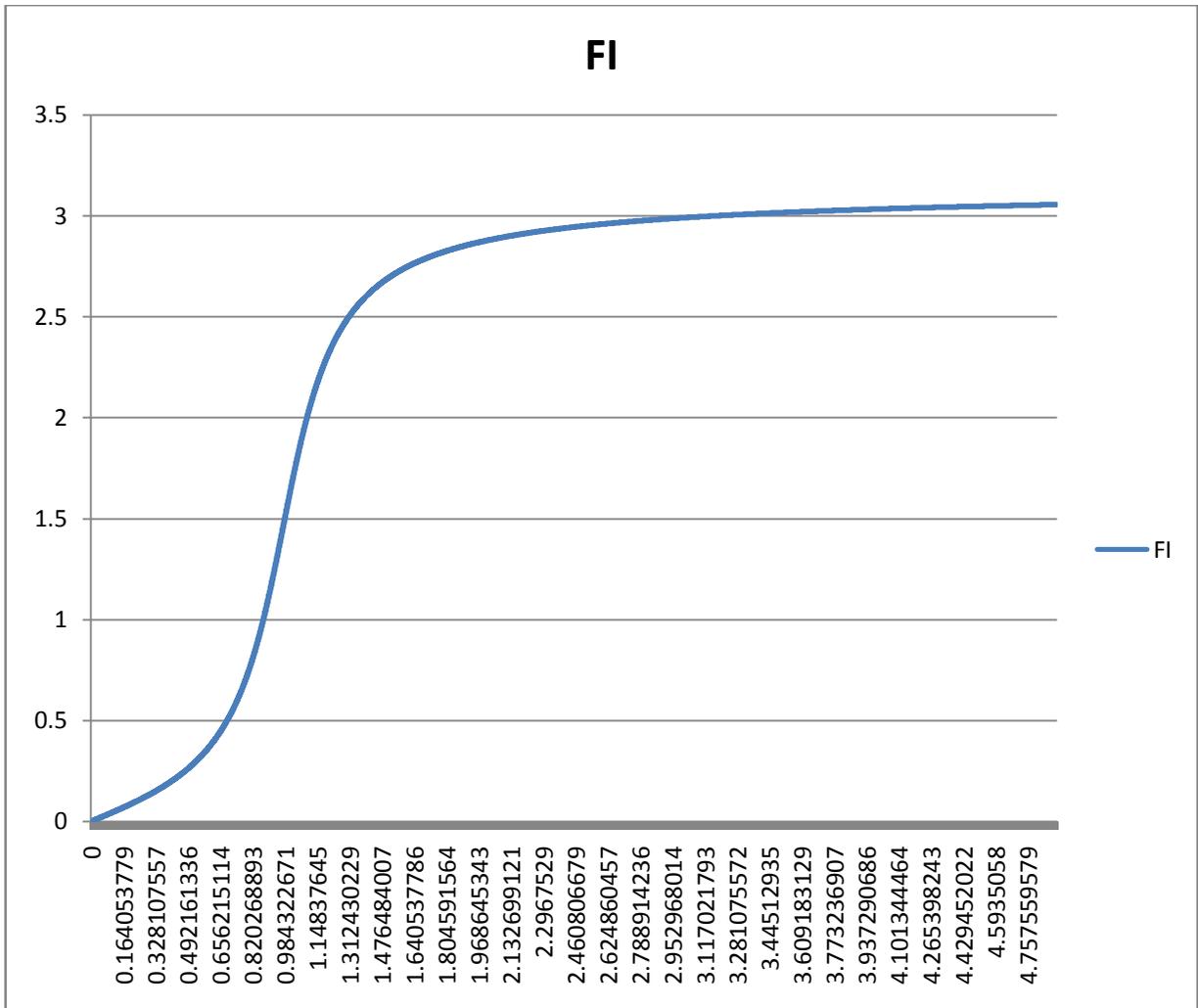


Figura N°52: Grafico de angulo de desfase FI(rad) v/s r para  $\omega_0(\text{hz})=20.603$  y 20.56% de amortiguamiento

Para el rango de frecuencias 0-2hz el valor de  $FI(2) = 0.04 \text{ rad}$

# Capítulo VI

*“Conclusiones”*

## 6.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados descritos en el capítulo anterior de forma ordenada en un formato similar al formato de presentación de acelerómetros comerciales consistente en un listado de las características del acelerómetro ordenado por categorías. A continuación se hace referencia a las conclusiones finales.

Acelerómetro Biaxial	
AL01	
<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
FABRICANTE CHIP	Agilent
FABRICANTE TRANSDUCTOR	Genius
TIPO DE CHIP	Fotosensor CMOS
TECNOLOGIA INVOLUCRADA	Navegación Óptica
FABRICANTE SOFTWARE	Proyecto UACH
FABRICANTE EQUIPO	Proyecto UACH
<b>CARACTERISTICAS DINAMICAS</b>	
EJES	2
SENSIBILIDAD	0,06g@1600dpi
RESOLUCION	800/1600dpi Intercambiable
RANGO DE ACELERACION	0-5,4g estática
ACC MAX de lectura	8g
VEL MAX de lectura	51,2 cm/seg
VEL DE MUESTREO	x,y simultaneo 1/10000seg
RESPUESTA LINEAL DE FRECUENCIAS	0-2hz
RESONANCIA	20,603HZ
AMORTIGUAMIENTO	20,56% Regulable
SENSIBILIDAD TRANSVERSAL (x,y)	11,9/14,08%
RESPUESTA A TEMPERATURA	-
<b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS</b>	
REQUERIMIENTOS ELECTRICOS	2,8volt
RUIDO ELECTRICO	N/A
IMPEDANCIA resonador	55Ω
VOLTAJE DE SALIDA	0,4v
VOLTAJE RADIOTRANSMISOR	5v
BATERIAS	2AAA

<b>AMBIENTALES</b>	
RANGO DE TEMPERATURA	-15/55°C
HUMEDAD	N/A
SENSIBILIDAD ELECTROMAGNETICA	N/A
SELLADO	Epoxi
<b>VARIABLES FISICAS</b>	
DISEÑO DEL SENSOR	viga en volado (acero plomo)
FLUIDO AMORTIGUADOR	Aceite Sintético SAE90
PESO ACELEROMETRO	
PESO RADIOTRANMISOR	
MATERIAL DEL CUERPO	PVC
MONTAJE	Manual
MONTAJE DE CONEXIÓN	N/A
ALMACENAMIENTO	HDD EXTERNO
<b>CONECTIVIDAD Y SOFTWARE</b>	
COMUNICACIÓN	Radiofrecuencia 24KHZ
ALCANCE EFECTIVO LIBRE	10m
CONECTIVIDAD	Plug & Play
SOFTWARE	Acelerómetro V1
BITRATE	1,188kb/seg

Tabla Nº14: Especificaciones del acelerómetro.

## 6.2 Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se elaboraron 4 acelerómetros de distintas características, los cuales intentaron incorporar técnicas para mejorar las prestaciones dinámicas de los equipos, dos fueron desechados por tener inconsistencias en su fabricación y planteamiento, el cuarto equipo, fruto de la experiencia acumulada, dio como resultado un acelerómetro inalámbrico que fue motivo de estudio en los capítulos anteriores.

### Hipótesis

*Dada las características de los transductores utilizados en los mouse comerciales, es posible diseñar acelerómetros de prestaciones similares a las de los equipos convencionales.*

Realizando un análisis de las características enumeradas en el capítulo V en comparación con la gama de características de acelerómetros, con especial énfasis en el catálogo de equipos Wilcoxon<sup>4</sup>, podemos determinar que el equipo estudiado supera en algunas prestaciones a los equipos convencionales, en otras cumple con estándares normales y en otras es inferior. Existen características que se pueden mejorar con técnicas de fabricación profesionales incorporando otras tecnologías usadas en la elaboración de sensores, también existen características fijas que no es posible mejorar y que son dependientes de la evolución futura de los mouse comerciales.

A continuación se detallan las prestaciones superiores, normales e inferiores y se menciona la posibilidad de mejora inmediata mediante procesos de fabricación e incorporación de tecnologías:

---

<sup>4</sup> Véase catálogo de acelerómetros Wilcoxon en Anexo.

<b>CARACTERISTICAS DEL TRANSDUCTOR</b>	<b>comparación</b>	<b>estructura</b>	<b>comentario</b>
Sensibilidad	Inferior	Mejorable	aplicación de transductores mas sensibles, sistemas de amplificación
Resolución	Superior	Fija	aplicación de transductores de mayor resolución
Velocidad de lectura	N/A	N/A	no existe punto de comparación
Rango de operación dependiente de variables físicas	Superior	Mejorable	homologo a equipos ópticos
<b>CARACTERISTICAS DEL SENSOR</b>			
Cualidades físicas (m,c,k)	Inferior	Mejorable	Mediante sistemas de fabricación profesionales
Frecuencias de operación lineal	Inferior	Mejorable	Mediante sistemas de fabricación profesionales
Rango de operación dependiente de variables físicas	Inferior	Mejorable	Mediante sistemas de fabricación profesionales
<b>FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA TRANSDUCTOR</b>			
Conectividad	Superior	Mejorable	Plug & Play, en todos los SO
Software	N/A	N/A	no existe punto de comparación
Velocidad de muestreo	Superior	Fija	10 veces mayor a los equipos convencionales
Interfaz usuario	N/A	N/A	no existe punto de comparación se presume inferioridad por el desarrollo del software
Rango de operación dentro del SO	N/A	N/A	se pueden operar una cantidad indefinida de equipos con un SO y un ordenador

**Tabla N°15: Tabla de comparación**

Dadas las características antes mencionadas podemos decir que es posible fabricar equipos a partir de transductores CMOS obtenidos de mouse con buenas prestaciones, algunas superiores a los equipos convencionales.

## 6.3 Trabajo futuro

Es importante mencionar que se ha omitido una cantidad importante de experimentos y estudios dirigidos a proporcionar más información referente a las características del equipo y a sus posibles aplicaciones. Lo anterior debido a la necesidad de acotar el problema.

Dentro de los experimentos omitidos tiene relevancia la calibración del acelerómetro instalándolo junto a un equipo de uso convencional, este experimento se puede realizar en una universidad en donde existan otros equipos o mesas vibratorias.

También sería relevante enfocar el trabajo en el diseño del sensor incluyendo un sistema de amplificación de desplazamientos. Todo indica que esto debería mejorar la sensibilidad del acelerómetro. Otro factor es la fabricación profesional, esto permitirá mejorar características como el peso y tamaño, sensibilidad transversal y mediante la incorporación de una superficie de lectura fabricada con el radio de curvatura de la viga mejorar la calidad de lectura (SQUAL).

También se pueden adquirir mouse que contengan sistemas transductores mucho más sensibles lo que mejorara considerablemente todas las prestaciones.

Como ultimo punto se debe adquirir bibliografía especializada referente al tema, de manera de poder contar con el mismo material con que han contado trabajos similares a este.

## 6.4 Aplicaciones

Las aplicaciones para el sistema Transductor-Software son muy variadas. Ya se ha mencionado en otros capítulos la versatilidad del transductor y del software.

A continuación se enumeran alguna:

### 1) Medición de aceleraciones:

- Calibración de ejes en maquinas: dada las características inalámbricas es posible montar el acelerómetro solidario al eje a calibrar.
- Mantenimiento en maquinas: es posible monitorear la frecuencia y la amplitud de las mismas detectando tempranamente una condición de desbalance.
- Medición de sismos fuertes: Es posible medir fenómenos sísmicos fuertes e instalas redes acelerográficas con un solo ordenador a costos mínimos.
- Instalación sobre un carro de laboratorio
- Elaboración de una mesa vibradora: Es posible diseñar una mesa vibradora a partir de el acelerómetro, un motor con una masa excéntrica y un regulador de voltaje, acoplados a una estructura (mesa) que ofrezca la rigidez necesaria.

### 2) Medición de velocidad:

- Es posible acoplar el transductor a una hélice y calibrarlo para medir la velocidad de rotación directamente en el eje. (será necesario verificar la linealidad de la hélice. De esta manera se puede medir la velocidad de diversos fluidos en movimiento como viento agua u otro.

## Bibliografía

- Clough, Raw W. 1995; Dynamics of Structures, Ed: McGraw-Hill, Computers & Structures, University Ave. Berkeley, CA 94704 USA
- Eller E.; R. Whittier; Manual de medidas acústicas y control de ruido, C. 7 Transductores de Vibración.
- Ruiz Patricio. 1974 Dinámica de Estructuras, Programa de especialización en ingeniería UC, Publicación N° 74-2, Santiago, Chile. (236 Pag.)
- Palacín J., V. A. Blas. 2005; Nuevas Aplicaciones del Sensor del Mouse Óptico. Departamento de Informática de Ingeniería Industrial. Universidad de Lleida. Jaume II, 69. 25001 Lleida
- Chopra, Anil K. 2001; “Dynamics of Structures- theory and applications to earthquake engineering”. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall,
- Paz Mario. 1991; “Structural Dynamics”, New York : Van Nostrand Reinhold,
- Burgos Henríquez, Sandra Lucía.1989; “Introducción a la sismología y construcción de un sismólogo” Tesis UACH.
- Martínez Durá, Rafael J, 2001 Estructura de computadores y periféricos, México: Alfaomega/RA-MA.
- Bosch Solsona, José, 1980 “Interconexión de periféricos a microprocesadores”, Barcelona: Marcombo,.
- Allen H., S. C. Terry , D. W. de Bruin, Accelerometer systems with selfs-testable features, Sensors and Actuators, 20, pp.153-161, 1989
- P.D. Dinev, (1996) Sci. Instrum. 67, 1.
- Roylance L. M.J. Angel, , 1979; A batch-fabricated silicon accelerometer, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-26. pp. 1911-1917

## Referencias de Internet

- Product brief catalog, Wilcoxon accelerometers.

En: <http://www.wilcoxon.com>

Consultado el: 05/06/2006.

- Product brief catalog, Kinematics accelerometers.

En: <http://www.kinematics.com>

Consultado el: 07/06/2006.

- Product brief catalog, Analog-Devices accelerometers.

En: <http://www.Analog.com>

Consultado el: 07/06/2006.

- Product brief ,900/868 MHz G-Link® Wireless Accelerometer Node.

En: <http://www.microstrain.com/g-link.aspx>

Consultado el: 07/06/2006.

- Product brief Agilent ADNB-6031 and ADNB-6032 Low Power Laser Mouse Bundles

En: <http://www.agilent.com/>

Consultado el: 09/06/2006.

- Product brief Agilent ADNS-2610 Optical Mouse Sensor Data Sheet.

En: <http://www.genius-europe.com/en/produktdetail.php?ID2=66&ID=24&ID3=357>

Consultado el: 09/06/2006.

- Avago Technologies, Agilent ADNS-2610 Optical Mouse Sensor Data Sheet,

En: <http://www.agilent.com/semiconductors>

Consultado el: 09/06/2006

QUICKVIEW SENSOR CHART

MODEL #	SENSITIVITY		TOLERANCE ±%	FREQUENCY RESPONSE @ 3dB		RESONANCE		EXIT TYPE/ CONNECTOR	MAX. OPERATING TEMP.	PAGE NO.
	Metric	English		cpm	Hz	kcpm	KHz			
<b>GENERAL PURPOSE ACCELEROMETERS</b>										
793	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±5%	30 - 900K	0.5 - 15k	1,500	25	top, R6 2 pin	120°C	18
797	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±5%	60 - 720K	1.0 - 12k	1,560	26	side, R6 2 pin	120°C	19
799A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±5%	30 - 840K	0.5 - 14k	1,800	30	top, R6 2 pin	120°C	20
777 / 777B	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	30 - 720K	0.5 - 12k	1,800	30	top, R6 2 pin	85°C	21
781A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	42 - 600K	0.7 - 10k	1,320	22	side, R6 2 pin	120°C	22
784A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±20%	120 - 600K	2.0 - 10k	1,500	25	top, R6 2 pin	120°C	23
785A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	60 - 720K	1.0 - 12k	1,800	30	side, R6 2 pin	120°C	24
775A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±20%	30 - 600K	0.5 - 10k	1,560	26	top, R35	80°C	25
S100C	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±20%	30 - 600K	0.5 - 10k	1,800	30	top, R35	80°C	26
S100CS	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±20%	30 - 600K	0.5 - 10k	1,560	26	top, R35	80°C	27
<b>LOW FREQUENCY ACCELEROMETERS</b>										
793L	51 mV/(m/s <sup>2</sup> )	500 mV/g	±5%	12 - 138K	0.2 - 2.3k	900	15	top, R6 2 pin	120°C	29
797L	51 mV/(m/s <sup>2</sup> )	500 mV/g	±5%	12 - 222K	0.2 - 3.7k	1,080	18	side, R6 2 pin	120°C	30
799LF	51 mV/(m/s <sup>2</sup> )	500 mV/g	±5%	6 - 150K	0.1 - 2.5k	1,080	18	top, R6 2 pin	120°C	31
799M	102 mV/(m/s <sup>2</sup> )	1,000 mV/g	±5%	12 - 150K	0.2 - 2.5k	1,080	18	top, R6 2 pin	80°C	32
<b>HIGH FREQUENCY ACCELEROMETERS</b>										
712F	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	180 - 1.5k	3.0 - 25k	2,700	>45	side, integral cable	120°C	34
732A/732AT	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	10 mV/g	±5%	30 - 1.5k	0.5 - 25k	3,600	60	side, R1 10-32 coaxial	120°C	35
786/786T	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±5%	120 - 1.5k	2.0 - 25k	3,600	60	side, R1 10-32 coaxial	120°C	36
<b>PIEZOVLOCITY TRANSDUCERS (PVT)</b>										
793V	3.94 mV/mm/s	100 mV/in/sec	±10%	90 - 420K	1.5 - 7k	900	15	top, R6 2 pin	120°C	38
797V	3.94 mV/mm/s	100 mV/in/sec	±10%	90 - 420K	1.6 - 7k	1,080	18	side, R6 2 pin	120°C	39
<b>TRIAXIAL ACCELEROMETERS</b>										
993A	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	120 - 120K	2 - 20k	N/A	N/A	side, R9W 4 pin	120°C	46
993A-5	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	120 - 120K	2 - 20k (z axis)	N/A	N/A	top, integral cable	120°C	47
993B-5	2.55 mV/(m/s <sup>2</sup> )	25 mV/g	±10%	120 - 600K	2 - 7k (k&y axis)	N/A	N/A	top, integral cable	120°C	48
993B-6	5.1 mV/(m/s <sup>2</sup> )	50 mV/g	±10%	120 - 600K	2 - 10k (z axis)	N/A	N/A	top, integral cable	120°C	48
993B-7	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	120 - 420K	2 - 7k (k&y axis)	N/A	N/A	top, integral cable	120°C	48
<b>HIGH TEMPERATURE ACCELEROMETERS</b>										
376	2.55 pC/(m/s <sup>2</sup> )	25 pC/g		60 - 720K	1 - 12k	1,800	30	top, R1 10-32 coaxial	260°C	41
376 / COT0HT	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	60 - 720K	1 - 12k	1,800	30	inline, 10-32 coaxial	260°C	42
793-6	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	60 - 720K	1 - 12k	1,200	20	top, R6 2 pin	150°C	43
797-6	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	100 mV/g	±10%	60 - 660K	1 - 11k	1,200	20	side, R6 2 pin	150°C	44
<b>4-20 MA OUTPUT VIBRATION LOOP POWERED SENSORS (LPS)</b>										
PC420A	N/A	4-20mA	±5%	120 - 120K	2 - 2k	1,080	18	top, R6 2 pin	85°C	51
PC420V	N/A	4-20mA	±5%	120 - 120K	2 - 2k	1,080	18	top, R6 2 pin	85°C	52
PC420V2	3.94 mV/mm/s	100 mV/in/sec	±5%	120 - 180K	2 - 3k (dynamic)	1,080	18	top, R19	85°C	53

## Anexo 2: Especificaciones generales de acelerómetro 993B

Model 993A

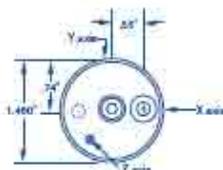
triaxial

INDUSTRIAL

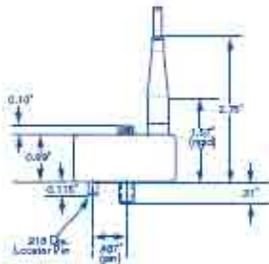


### FEATURES:

- Rugged design
- Hermetic
- Broad Frequency Response
- Easy to mount
- EM/RFI protection
- ESD protection
- Reverse wire protection
- Low Noise
- Low weight



Top View



Side View

### Model 993B Series Premium Triaxial Accelerometers

	993B-5	993B-6	993B-7
<b>DYNAMIC</b>			
Sensitivity, $\pm 10\%$ , 25 °C	25 mV/g	50 mV/g	100 mV/g
Acceleration Range	150 g peak	75 g peak	40 g peak
Amplitude Nonlinearity	1%		
Frequency Response:			
Z Axis $\pm 3$ dB	2 - 10,000 Hz	—	—
X & Y Axis $\pm 3$ dB	2 - 7,000 Hz	—	—
Transverse Sensitivity, max	7% of axial	—	—
Temperature Response	-50 °C +120 °C	-10% +15%	

<b>ELECTRICAL</b>			
Power Requirement:	voltage source	18 - 30 VDC	—
	current regulating diode	2 - 5 mA	—
Electrical Noise, equiv. g:			
Broadband	2.5 Hz to 25 kHz	336 $\mu$ g	220 $\mu$ g
Spectral	10 Hz	34 $\mu$ g/√Hz	15 $\mu$ g/√Hz
	100 Hz	3.2 $\mu$ g/√Hz	2.0 $\mu$ g/√Hz
	1000 Hz	2 $\mu$ g/√Hz	1.1 $\mu$ g/√Hz
Output Impedance, max		400 $\Omega$	—
Bias Output Voltage		11 VDC	—
Grounding		case isolated, internally shielded	—

<b>ENVIRONMENTAL</b>	
Temperature Range	-50 to 120 °C
Vibration Limit	500 g peak
Shock Limit	5,000 g peak
Electromagnetic Sensitivity, equiv. g	100 $\mu$ g/gauss
Sealing	Hermetic
Base Strain Sensitivity, max	0.0005 g/strain
Hydrostatic Pressure, max	100 psi

<b>PHYSICAL</b>	
Sensing Element Design	PZT ceramic / shear
Weight	134 grams
Case Material	316L stainless steel
Mounting	1/4 - 28 captive screw
Mating Connector	Not applicable
Integral Cabling	J12, 16 ft.

### FUNCTION:

axis X, power / signal  
axis Y, power / signal  
axis Z, power / signal  
common (all channels)  
N/C

### CABLE CONDUCTOR COLOR

Green  
Red  
White  
Black  
Shield

**ACCESSORIES SUPPLIED:** 1/4-28 captive screw (International customers specify mounting requirements); Calibration data (level 3).

**OPTIONS:** 3 Conductor, shielded cable is supplied with CSA intrinsically safe model.



W-15

VIBRATION INSTRUMENTATION

50

WILCOXON RESEARCH, INC. • 1-800-945-2696 • TEL 301-330-8811 • FAX 301-330-8873 • EMAIL sensors@wilcoxon.com • WEB www.wilcoxon.com

### Anexo 3: Planilla para tratamiento de datos de aceleraciones

Factor= 0,08		Velocidad				Acc				max y min		
----- INIT -----												
FECHA MUESTRA	SEGUNDOS	DELTA X	DELTA Y	Modulo	direccion	Acum x	Acum y	corr dim30 x	corr dim30 y	Pic x	Pic y	t
04-09-2007 15:51	0,063	2	0	2	y	2	0	-2,3	6,6	-	-	-
04-09-2007 15:51	0,156	2	-1	2,236067977	-0,4636476	4	-1	-0,2	5,83333333	0	5,83333333	0,093
04-09-2007 15:51	0,625	0	1	1	y	4	0	-0,03333333	7	0	0	0,469
04-09-2007 15:51	0,6251	0	1	1	y	4	1	0,16666667	8,2	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,6252	1	0	1	y	5	1	1,4	8,43333333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,6253	1	0	1	y	6	1	2,66666667	8,63333333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,813	1	0	1	x	7	1	3,96666667	8,8	0	0	0,1877
04-09-2007 15:51	0,8131	1	0	1	x	8	1	5,3	9	0	9	0,0001
04-09-2007 15:51	0,938	0	-1	1	y	8	0	5,66666667	8,23333333	0	0	0,1249
04-09-2007 15:51	0,9381	0	-1	1	y	8	-1	6,03333333	7,46666667	6,03333333	7,46666667	0,0001
04-09-2007 15:51	0,9382	-1	0	1	x	7	-1	5,4	7,5	0	7,5	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9383	-1	-1	1,414213562	0,78539816	6	-2	4,73333333	6,36666667	4,73333333	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9384	0	-1	1	y	6	-3	5,03333333	5,16666667	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9385	0	-1	1	y	6	-4	5,33333333	3,83333333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9386	0	-2	2	y	6	-6	5,63333333	1,4	5,63333333	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,985	-1	-1	1,414213562	0,78539816	5	-7	4,93333333	-0,0666667	4,93333333	0	0,0464
04-09-2007 15:51	0,9851	0	-1	1	y	5	-8	5,2	-1,53333333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9852	0	-1	1	y	5	-9	5,46666667	-3,0666667	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9853	0	-1	1	y	5	-10	5,73333333	-4,6666667	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	0,9854	0	-1	1	y	5	-11	6,03333333	-6,33333333	0	0	0,0001
04-09-2007 15:51	1	0	-3	3	y	5	-14	6,36666667	-10,066667	0	0	0,0146
04-09-2007 15:51	1,0001	0	-3	3	y	5	-17	6,73333333	-13,9	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	1,016	0	-1	1	y	5	-18	7,1	-15,8	7,1	-15,8	0,0159
04-09-2007 15:51	1,047	-1	1	1,414213562	-0,7853982	4	-17	6,46666667	-15,7	0	0	0,031
04-09-2007 15:51	1,0471	-2	2	2,828427125	-0,7853982	2	-15	4,8	-14,533333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	1,063	-2	1	2,236067977	-1,1071487	0	-14	3,06666667	-14,266667	0	-14,266667	0,0159
04-09-2007 15:51	1,0631	-1	0	1	x	-1	-14	2,23333333	-14,933333	2,23333333	-14,933333	1E-04
04-09-2007 15:51	1,078	0	1	1	y	-1	-13	2,33333333	-14,566667	0	0	0,0149
04-09-2007 15:51	1,125	0	3	3	y	-1	-10	2,43333333	-12,133333	0	0	0,047
04-09-2007 15:51	1,1251	0	2	2	y	-1	-8	2,53333333	-10,533333	0	0	1E-04
04-09-2007 15:51	1,1252	0	1	1	y	-1	-7	2,63333333	-9,8333333	0	0	1E-04

## Anexo 4: Archivo estándar de aceleración

	<b>Universidad Austral de Chile</b>	
1	Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia	
2	81594511- 063212330	
3		
4		
5	<b>AECHIVO ESTANDAR DE ACELERACION</b>	
6	FORMATO	1
7	NOMBRE DEL ARCHIVO	datalog633243685058125000
8	FECHA U HORA DE CREACION	04-09-2007 15:51
9		
10	<b>DATOS DE LA ESTACION</b>	
11	NOMBRE DE LA ESTACION	Laboratorio
12	CLAVE DE LA ESTACION	-
13	LOCALIZACION DE LA ESTACION	Puerto Montt
14	COORDENADAS DE LA ESTACION:	41°28'59.11" S
15		72°58'50.54"
16		238 Pies
17	TIPO DE SUELO	-
18	RESPONSABLE	CARLOS MONCADA
19		
20	<b>DATOS DEL ACELEROMETRO</b>	
21	MODELO DEL ACELEROGRAFO	MODELO EXPERIMENTAL A2O V2
22	NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO	-
23	TRANSDUCTOR	OPTICO, MOUSE
24	SENSOR	FLEXION
25	NUMERO DE CANALES	2
26	ORIENTACION	/N/X,Y/N90E,N00E
27	VEL. DE MUESTREO X,Y (1/SEG)	/10000/10000
28	DENSIDAD DE MUESTREO M/SEG	91,46425203
29	ESCALA DE SENSORES X,Y (g)	/K1/K2
30	FREC. NAT. DE SENSORES X,Y (HZ)	/17/17
31	AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES	/2.4/2.4
32	INTERVALO DE MUESTREO X,Y (SEG)	/0.0001/0.0001
33	UMBRAL DE DISPARO X,Y (G)	DISPARO MANUAL
34	MEMORIA	HDD EXTERNO
35	BRITRATE (KB/S)	1,188
36	FRECUENCIA DE TRABAJO	-

37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82

---

**DATOS DEL REGISTRO**

HORA DE LA PRIMERA MUESTRA 04-09-2007 15:51  
EXACTITUD DEL TIEMPO 0,0001  
DURACION DEL REGISTRO X,Y (s) /46.188/46.188  
TOTAL DE MUESTRAS 3100  
ACEL. MAX.(G)  
ACEL. MAX., V,X,Y EN LA MUESTRA  
UNIDADES DE LOS DATOS

---

**CALIDAD DEL ACELEROGRAMA**

REGISTRO DIGITAL COMPLETO, TIEMPO ABSOLUTO CORRECTO

---

**COMENTARIOS**

LAS ACELERACIONES REGISTRADAS CORRESPONDEN A EXITACIONES  
PROVOCADAS INTENCIONALMENTE CON EL FIN DE CONOCER LAS C  
ARACTERISTICAS DEL SENSOR Y EL TRANSDUCTOR

---

**DATOS DE ACELERACION**

	X	Y	T
V	N00E	N90E	
0,6324555	0,2	0,6	56,3669
0,7071068	0,5	-0,5	3,5625
0,400125	0,4	-0,01	13,6591

Este archivo ha sido elaborado en base al ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION de sismos fuertes en Mexico, el que a su vez a sido elaborado a partir del archivo estandar ASCII El archivo original tiene como objetivo la estandarizacion de las lecturas sismicas en Mexico<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> <http://www.unam.mx/db/spanish/aea2.html>

## Anexo N°5: Código Software Acelerómetro V1

### FRM\_MOUSE.CS

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using ZedGraph;
using System.IO;

namespace mouse
{
    public partial class frmMouse : Form
    {
        Mouse Mo;
        bool Lectura = false;
        int tickStart = 0;
        LineItem curveDeltaX;
        LineItem curveDeltaY;
        IPointListEdit listY;
        IPointListEdit listX;
        TextWriter Log;

        void init()
        {
            Mo=new Mouse(this.Handle);
            int ms = Mo.EnumerateDevices();
            Console.WriteLine("Detected " + ms + " mouses");
            foreach (Mouse.DeviceInfo inf in Mo.deviceList.Values)
            {
                this.cbMouses.Items.Add(inf.Name);
                Console.WriteLine("_____");
                Console.WriteLine("Mouse " + inf.deviceName + " " + inf.Name);
            }
            Console.WriteLine("_____");

            Mo.MouseEvent += new Mouse.DeviceEventHandler(m_mouseEvent);

            Mo.isReady = true;

            Log = new StreamWriter("datalog"+DateTime.Now.Ticks+".csv",true);
        }

        double lTime = 0; int micro = 0;
        private void m_mouseEvent(object sender, Mouse.DeviceInfo e)
        {
            if (this.cbMouses.Text == e.Name && Lectura == true)
            {
                double time = ((double)(Environment.TickCount - tickStart))/1000;
                if (lTime == time)
                {
                    micro++;time += (double)micro / 10000;
                }
                else { micro = 0; lTime = time; }

                listX.Add(time, e.LastX);
                listY.Add(time, e.LastY);
                if (this.checkBox1.Checked){
```

```

        Log.WriteLine(
            DateTime.Now.ToString() + ";" +
            time.ToString() + ";" +
            e.LastX + ";" +
            e.LastY
        );
    }
}

public frmMouse()
{
    InitializeComponent();

    init();
}

protected override void WndProc(ref Message message)
{
    if (Mo != null && Mo.isReady)
        Mo.ProcessMessage(message);
    base.WndProc(ref message);
}

private void frmMouse_Load(object sender, EventArgs e)
{
    initGraph();
}

private void initGraph()
{
    GraphPane myPane = this.chartDelta.GraphPane;
    myPane.CurveList.Clear();

    myPane.Title.Text = "";
    myPane.XAxis.Title.Text = "";
    myPane.YAxis.Title.Text = "";

    RollingPointPairList plistX = new RollingPointPairList(5000);
    RollingPointPairList plistY = new RollingPointPairList(5000);

    curveDeltaX = myPane.AddCurve("Delta X", plistX, Color.Blue, SymbolType.None);
    curveDeltaY = myPane.AddCurve("Delta Y", plistY, Color.Red, SymbolType.None);
    listX = this.curveDeltaX.Points as IPointListEdit;
    listY = this.curveDeltaY.Points as IPointListEdit;

    // Sample at 50ms intervals
    timer1.Interval = 50;
    timer1.Enabled = true;

    // Just manually control the X axis range so it scrolls continuously
    // instead of discrete step-sized jumps
    myPane.XAxis.Scale.Min = 0;
    myPane.XAxis.Scale.Max = 30;
    myPane.XAxis.Scale.MinorStep = 1;
    myPane.XAxis.Scale.MajorStep = 5;

    // Scale the axes
    chartDelta.AxisChange();

    //init
    tickStart = Environment.TickCount;
    listX.Clear();
    listY.Clear();
    timer1.Stop();
}

private void frmMouse_Resize(object sender, EventArgs e)
{
}

```

```

private void btInicio_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (btInicio.Tag.ToString() == "1")
    {
        btInicio.Tag = "0";
        btInicio.Text = "Iniciar";
        Lectura = false;
        this.cbMouses.Enabled = true;
        timer1.Stop();
    }
    else {
        btInicio.Tag = "1";
        btInicio.Text = "Parar";
        Lectura = true;
        this.cbMouses.Enabled = false;
        initGraph();
        Log.WriteLine("\n----- INIT ----- \n");
        Log.WriteLine("FECHA MUESTRA;SEGUNDOS;DELTA X;DELTA Y");
        timer1.Start();
    }
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    // Time is measured in seconds
    double time = (Environment.TickCount - tickStart) / 1000.0;

    // Keep the X scale at a rolling 30 second interval, with one
    // major step between the max X value and the end of the axis
    Scale xScale = chartDelta.GraphPane.XAxis.Scale;
    if (time > xScale.Max - xScale.MajorStep)
    {
        xScale.Max = time + xScale.MajorStep;
        xScale.Min = xScale.Max - 30.0;
    }
    chartDelta.AxisChange();
    chartDelta.Invalidate();
}

private void frmMouse_FormClosed(object sender, FormClosedEventArgs e)
{
    Log.Close();
}
}

```

## FRM\_MOUSE.DESIGNER.CS

```

namespace mouse
{
    partial class frmMouse
    {
        /// <summary>
        /// Required designer variable.
        /// </summary>
        private System.ComponentModel.IContainer components = null;

        /// <summary>
        /// Clean up any resources being used.
        /// </summary>
        /// <param name="disposing">true if managed resources should be disposed; otherwise, false.</param>
        protected override void Dispose(bool disposing)
        {
            if (disposing && (components != null))
            {
                components.Dispose();
            }
            base.Dispose(disposing);
        }

        #region Windows Form Designer generated code

```

```

/// <summary>
/// Required method for Designer support - do not modify
/// the contents of this method with the code editor.
/// </summary>
private void InitializeComponent()
{
    this.components = new System.ComponentModel.Container();
    this.cbMouses = new System.Windows.Forms.ComboBox();
    this.label1 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.btInicio = new System.Windows.Forms.Button();
    this.checkBox1 = new System.Windows.Forms.CheckBox();
    this.chartDelta = new ZedGraph.ZedGraphControl();
    this.timer1 = new System.Windows.Forms.Timer(this.components);
    this.SuspendLayout();
    //
    // cbMouses
    //
    this.cbMouses.FormattingEnabled = true;
    this.cbMouses.Location = new System.Drawing.Point(135, 12);
    this.cbMouses.Name = "cbMouses";
    this.cbMouses.Size = new System.Drawing.Size(141, 21);
    this.cbMouses.TabIndex = 0;
    //
    // label1
    //
    this.label1.AutoSize = true;
    this.label1.Location = new System.Drawing.Point(12, 15);
    this.label1.Name = "label1";
    this.label1.Size = new System.Drawing.Size(117, 13);
    this.label1.TabIndex = 1;
    this.label1.Text = "Seleccione Dispositivo:";
    //
    // btInicio
    //
    this.btInicio.Location = new System.Drawing.Point(283, 12);
    this.btInicio.Name = "btInicio";
    this.btInicio.Size = new System.Drawing.Size(75, 21);
    this.btInicio.TabIndex = 2;
    this.btInicio.Tag = "\\ALGO\\";
    this.btInicio.Text = "Iniciar";
    this.btInicio.UseVisualStyleBackColor = true;
    this.btInicio.Click += new System.EventHandler(this.btInicio_Click);
    //
    // checkBox1
    //
    this.checkBox1.AutoSize = true;
    this.checkBox1.Location = new System.Drawing.Point(15, 39);
    this.checkBox1.Name = "checkBox1";
    this.checkBox1.Size = new System.Drawing.Size(191, 17);
    this.checkBox1.TabIndex = 3;
    this.checkBox1.Text = "Guardar lectura en un archivo CSV";
    this.checkBox1.UseVisualStyleBackColor = true;
    //
    // chartDelta
    //
    this.chartDelta.Anchor = ((System.Windows.Forms.AnchorStyles)((((System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Bottom)
    | System.Windows.Forms.AnchorStyles.Left)
    | System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right)));
    this.chartDelta.EditButtons = System.Windows.Forms.MouseButtons.None;
    this.chartDelta.EditModifierKeys = System.Windows.Forms.Keys.None;
    this.chartDelta.IsEnableHPan = false;
    this.chartDelta.IsEnableHZoom = false;
    this.chartDelta.IsEnableVPan = false;
    this.chartDelta.IsEnableVZoom = false;
    this.chartDelta.IsPrintFillPage = false;
    this.chartDelta.IsPrintKeepAspectRatio = false;
    this.chartDelta.IsPrintScaleAll = false;
    this.chartDelta.IsShowContextMenu = false;
    this.chartDelta.IsShowCopyMessage = false;
    this.chartDelta.Location = new System.Drawing.Point(12, 62);
    this.chartDelta.Name = "chartDelta";
    this.chartDelta.ScrollGrace = 0;
    this.chartDelta.ScrollMaxX = 0;

```

```

        this.chartDelta.ScrollMaxY = 0;
        this.chartDelta.ScrollMaxY2 = 0;
        this.chartDelta.ScrollMinX = 0;
        this.chartDelta.ScrollMinY = 0;
        this.chartDelta.ScrollMinY2 = 0;
        this.chartDelta.Size = new System.Drawing.Size(495, 223);
        this.chartDelta.TabIndex = 2;
        //
        // timer1
        //
        this.timer1.Tick += new System.EventHandler(this.timer1_Tick);
        //
        // frmMouse
        //
        this.AutoScaleDimensions = new System.Drawing.SizeF(6F, 13F);
        this.AutoScaleMode = System.Windows.Forms.AutoScaleMode.Font;
        this.ClientSize = new System.Drawing.Size(518, 294);
        this.Controls.Add(this.chartDelta);
        this.Controls.Add(this.checkBox1);
        this.Controls.Add(this.btInicio);
        this.Controls.Add(this.label1);
        this.Controls.Add(this.cbMouses);
        this.Name = "frmMouse";
        this.Text = "Acelerografo v1 2007";
        this.FormClosed += new System.Windows.Forms.FormClosedEventHandler(this.frmMouse_FormClosed);
        this.Resize += new System.EventHandler(this.frmMouse_Resize);
        this.Load += new System.EventHandler(this.frmMouse_Load);
        this.ResumeLayout(false);
        this.PerformLayout();
    }

    #endregion

    private System.Windows.Forms.ComboBox cbMouses;
    private System.Windows.Forms.Label label1;
    private System.Windows.Forms.Button btInicio;
    private System.Windows.Forms.CheckBox checkBox1;
    private ZedGraph.ZedGraphControl chartDelta;
    private System.Windows.Forms.Timer timer1;
}

```

## MOUSE.CS

```

using System;
using System.Collections;
using System.IO;
using System.Runtime.InteropServices;
using System.Windows.Forms;
using Microsoft.Win32;

namespace mouse
{
    class Mouse
    {
        public Hashtable deviceList = new Hashtable();
        public bool isReady = false;
        public delegate void DeviceEventHandler(object sender, DeviceInfo e);
        public event DeviceEventHandler MouseEvent;

        #region const definitions

        // The following constants are defined in Windows.h

        private const int RIDEV_INPUTSINK = 0x00000100;
        private const int RID_INPUT = 0x10000003;

        private const int FAPPCOMMAND_MASK = 0xF000;
        private const int FAPPCOMMAND_MOUSE = 0x8000;
        private const int FAPPCOMMAND_OEM = 0x1000;

        private const int RIM_TYPEMOUSE = 0;
        private const int RIM_TYPEKEYBOARD = 1;

```

```

private const int RIM_TYPEHID = 2;

private const int RIDI_DEVICENAME = 0x20000007;

private const int WM_KEYDOWN = 0x0100;
private const int WM_SYSKEYDOWN = 0x0104;
private const int WM_INPUT = 0x00FF;
private const int VK_OEM_CLEAR = 0xFE;
private const int VK_LAST_KEY = VK_OEM_CLEAR; // this is a made up value used as a sentinel

#endregion const definitions

#region structs & enums

/// <summary>
/// An enum representing the different types of input devices.
/// </summary>
public enum DeviceType
{
    Key,
    Mouse,
    OEM
}

/// <summary>
/// Class encapsulating the information about a
/// keyboard event, including the device it
/// originated with and what key was pressed
/// </summary>
public class DeviceInfo
{
    public string deviceName;
    public string deviceType;
    public IntPtr deviceHandle;
    public string Name;
    public string source;
    public ushort key;
    public string vKey;
    public int LastX;
    public int LastY;
    public int X;
    public int Y;
}

#region Windows.h structure declarations

// The following structures are defined in Windows.h

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct RAWINPUTDEVICELIST
{
    public IntPtr hDevice;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int dwType;
}

[StructLayout(LayoutKind.Explicit)]
internal struct RAWINPUT
{
    [FieldOffset(0)]
    public RAWINPUTHEADER header;
    [FieldOffset(16)]
    public RAWMOUSE mouse;
    [FieldOffset(16)]
    public RAWKEYBOARD keyboard;
    [FieldOffset(16)]
    public RAWHID hid;
}

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct RAWINPUTHEADER
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int dwType;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]

```

```

    public int dwSize;
    public IntPtr hDevice;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int wParam;
}

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct RAWHID
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int dwSizHid;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int dwCount;
}

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct BUTTONSSTR
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort usButtonFlags;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort usButtonData;
}

[StructLayout(LayoutKind.Explicit)]
internal struct RAWMOUSE
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    [FieldOffset(0)]
    public ushort usFlags;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    [FieldOffset(4)]
    public uint ulButtons;
    [FieldOffset(4)]
    public BUTTONSSTR buttonsStr;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    [FieldOffset(8)]
    public uint ulRawButtons;
    [FieldOffset(12)]
    public int lLastX;
    [FieldOffset(16)]
    public int lLastY;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    [FieldOffset(20)]
    public uint ulExtraInformation;
}

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct RAWKEYBOARD
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort MakeCode;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort Flags;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort Reserved;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort VKey;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public uint Message;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public uint ExtraInformation;
}

[StructLayout(LayoutKind.Sequential)]
internal struct RAWINPUTDEVICE
{
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort usUsagePage;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U2)]
    public ushort usUsage;
    [MarshalAs(UnmanagedType.U4)]
    public int dwFlags;
    public IntPtr hwndTarget;
}

```

```

#endregion Windows.h structure declarations

#endregion structs & enums

#region DllImports

[DllImport("User32.dll")]
extern static uint GetRawInputDeviceList(IntPtr pRawInputDeviceList, ref uint uiNumDevices, uint cbSize);

[DllImport("User32.dll")]
extern static uint GetRawInputDeviceInfo(IntPtr hDevice, uint uiCommand, IntPtr pData, ref uint pcbSize);

[DllImport("User32.dll")]
extern static bool RegisterRawInputDevices(RAWINPUTDEVICE[] pRawInputDevice, uint uiNumDevices, uint cbSize);

[DllImport("User32.dll")]
extern static uint GetRawInputData(IntPtr hRawInput, uint uiCommand, IntPtr pData, ref uint pcbSize, uint cbSizeHeader);

#endregion DllImports

private string ReadReg(string item, ref bool isMouse)
{
    // Example Device Identification string
    // @"?^ACPI#PNP0303#3&13c0b0c5&0#{884b96c3-56ef-11d1-bc8c-00a0c91405dd}";

    // remove the ?^
    item = item.Substring(4);

    string[] split = item.Split('#');

    string id_01 = split[0]; // ACPI (Class code)
    string id_02 = split[1]; // PNP0303 (SubClass code)
    string id_03 = split[2]; // 3&13c0b0c5&0 (Protocol code)
    //The final part is the class GUID and is not needed here
    RegistryKey OurKey = Registry.LocalMachine;
    string findme = string.Format(@"System\CurrentControlSet\Enum\{0}\{1}\{2}", id_01, id_02, id_03);
    OurKey = OurKey.OpenSubKey(findme, false);
    //Retrieve the desired information and set isKeyboard
    string deviceDesc = (string)OurKey.GetValue("DeviceDesc");
    string deviceClass = (string)OurKey.GetValue("Class");
    if (deviceClass.ToUpper().Equals("MOUSE"))
    {
        isMouse = true;
    }
    else
    {
        isMouse = false;
    }
    return deviceDesc;
}

public Mouse( IntPtr hwnd )
{
    //Create an array of all the raw input devices we want to
    //listen to. In this case, only keyboard devices.
    //RIDEV_INPUTSINK determines that the window will continue
    //to receive messages even when it doesn't have the focus.
    RAWINPUTDEVICE[] rid = new RAWINPUTDEVICE[1];

    rid[0].usUsagePage = 0x01;
    rid[0].usUsage = 0x02;
    rid[0].dwFlags = RIDEV_INPUTSINK;
    rid[0].hwndTarget = hwnd;

    if( !RegisterRawInputDevices( rid, (uint)rid.Length, (uint)Marshal.SizeOf( rid[0] )))
    {
        throw new ApplicationException( "Failed to register raw input device(s).");
    }
}

public int EnumerateDevices()
{
    int NumberOfDevices = 0;
    uint deviceCount = 0;
}

```

```

int dwSize = (Marshal.SizeOf(typeof(RAWINPUTDEVICELIST)));
if (GetRawInputDeviceList(IntPtr.Zero, ref deviceCount, (uint)dwSize) == 0)
{
    IntPtr pRawInputDeviceList = Marshal.AllocHGlobal((int)(dwSize * deviceCount));
    GetRawInputDeviceList(pRawInputDeviceList, ref deviceCount, (uint)dwSize);
    for (int i = 0; i < deviceCount; i++)
    {
        DeviceInfo dInfo;
        string deviceName;
        uint pcbSize = 0;

        RAWINPUTDEVICELIST rid = (RAWINPUTDEVICELIST)Marshal.PtrToStructure(
            new IntPtr((pRawInputDeviceList.ToInt32() + (dwSize * i))),
            typeof(RAWINPUTDEVICELIST));

        GetRawInputDeviceInfo(rid.hDevice, RIDI_DEVICENAME, IntPtr.Zero, ref pcbSize);

        if (pcbSize > 0)
        {
            IntPtr pData = Marshal.AllocHGlobal((int)pcbSize);
            GetRawInputDeviceInfo(rid.hDevice, RIDI_DEVICENAME, pData, ref pcbSize);
            deviceName = (string)Marshal.PtrToStringAnsi(pData);
            if (deviceName.ToUpper().Contains("ROOT"))
                {continue;}
            if (rid.dwType == RIM_TYPEMOUSE)
            {
                dInfo = new DeviceInfo();
                dInfo.deviceName = (string)Marshal.PtrToStringAnsi(pData);
                dInfo.deviceHandle = rid.hDevice;
                dInfo.deviceType = "MOUSE";
                bool IsDevice = false;
                string DeviceDesc = ReadReg(deviceName, ref IsDevice);
                dInfo.Name = DeviceDesc;
                if (!deviceList.Contains(rid.hDevice) && IsDevice)
                {
                    NumberOfDevices++;
                    deviceList.Add(rid.hDevice, dInfo);
                }
            }
            Marshal.FreeHGlobal(pData);
        }
    }

    Marshal.FreeHGlobal(pRawInputDeviceList);

    return NumberOfDevices;

}
else
{
    throw new ApplicationException("An error occurred while retrieving the list of devices.");
}

}

public void ProcessMessage(Message message)
{
    switch (message.Msg)
    {
        case WM_INPUT:
        {
            ProcessInputCommand(message);
        }
        break;
    }
}

public void ProcessInputCommand( Message message )
{
    uint dwSize = 0;
    GetRawInputData( message.LParam,
        RID_INPUT, IntPtr.Zero,
        ref dwSize,
        (uint)Marshal.SizeOf( typeof( RAWINPUTHEADER )));
}

```

```

IntPtr buffer = Marshal.AllocHGlobal( (int)dwSize );
try
{
    if (buffer != IntPtr.Zero &&
        GetRawInputData(message.LParam,
            RID_INPUT,
            buffer,
            ref dwSize,
            (uint)Marshal.SizeOf(typeof(RAWINPUTHEADER))) == dwSize)
    {
        RAWINPUT raw = (RAWINPUT)Marshal.PtrToStructure(buffer, typeof(RAWINPUT));
        if (raw.header.dwType == RIM_TYPEMOUSE)
        {
            DeviceInfo dInfo = null;
            if (deviceList.Contains(raw.header.hDevice))
            {
                dInfo = (DeviceInfo)deviceList[raw.header.hDevice];
                if (raw.mouse.usFlags == 0)
                {
                    dInfo.LastX = raw.mouse.lLastX; dInfo.X += raw.mouse.lLastX;
                    dInfo.LastY = raw.mouse.lLastY; dInfo.Y += raw.mouse.lLastY;
                }
                MouseEvent(this, dInfo);
            }
            else
            {
                string errorMessage = String.Format("Handle :{0} was not in hashtable. The device may support more than one handle
or usage page, and is probably not a standard mouse.", raw.header.hDevice);
                throw new ApplicationException(errorMessage);
            }
        }
    }
}
finally
{
    Marshal.FreeHGlobal( buffer );
}
}
}

```

## PROGRAM.CS

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Runtime.InteropServices;
using System.Windows.Forms;

namespace mouse
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            Application.EnableVisualStyles();
            Application.SetCompatibleTextRenderingDefault(false);
            Application.Run(new frmMouse());
        }
    }
}

```