

## Servoacelerómetro por Balance de Fuerza

Ing. Amadeo M. Mariani, Lic. Emilio E. Ciccolella

Departamento de Electrónica, UTN Facultad Regional Buenos Aires  
LIDAC (Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Automatización y Control)  
Mozart 2300 (1439) Campus Universitario  
E-Mail: amariani@electron.frba.utn.edu.ar

Facultad de Ingeniería  
Departamento de Mecánica  
Universidad Nacional de Lomas de Zamora  
Camino de Cintura y Juan XXIII

### RESUMEN

La ingeniería de instrumentos destinados a la medición eficiente de magnitudes como *aceleración, velocidad y desplazamiento*, integra los dominios de la Física, Matemática, Sistemas de Control, Electrónica y Mecánica [1, 2, 6]. La utilización de la modelización matemática en el diseño, y su posterior validación con estudios y análisis de simulación, como así también los ensayos experimentales de laboratorio y campo, constituyen una herramienta indispensable para obtener dispositivos eficientes, lineales, repetibles y exactos [3,12,].

En este trabajo se presentan las bases y procedimientos que se han tenido en cuenta para diseñar un "Servoacelerómetro por Balance de Fuerza", destinado a la medición de aceleración traslacional en innumerables aplicaciones industriales, militares y de I&D. Si bien, en el mundo, se disponen de muchos métodos y tecnologías de diseño e implementación [2, 7, 8] la realidad tecnológica de cada país, establece un condicionamiento a las posibilidades reales para obtener un dispositivo totalmente propio que pueda ir evolucionando a medida que nuevas tecnologías de fabricación se tornen disponibles. El instrumento que motiva este trabajo se basa en dichos objetivos, y en especificaciones que han surgido de necesidades en aplicaciones locales. Este desarrollo, se ha realizado, con el objetivo principal de mejorar las prestaciones del modelo antecesor, llamado: "Servoacelerómetro por Balance de Cupla", diseñado, construido y utilizado en CITEFA en los misiles A-S (Aire-Superficie/Martín Pescador), S-A (Superficie-Aire/Halcón) e Hilo-Guiado (Antitanque-Mathogo) [17,18, 19]. El modelo desarrollado y construido en CITEFA, tenía el inconveniente (que no era grave) del acoplamiento cruzado entre ejes de sensado, y que se pretende eliminar con el modelo por balance de fuerza.

Bajo el número de Proyecto 25/C088, en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Automatización y Control (LIDAC), perteneciente al Departamento de Electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA), se han realizado tres acelerómetros traslacionales con rango de 5g, 10g y 50 g.

Si bien se han diseñado varios modelos de uno y tres ejes de medición, y construido los de un eje, en este trabajo se presenta el Modelo monoaxial de 10 g ( $98.1 \text{ m/seg}^2$ ), por considerarse representativo del Proyecto.

**Palabras Claves:** acelerómetro, sensor, transductor, instrumentación

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Características deseadas del acelerómetro

Las características deseadas en un acelerómetro [3,5] que se aproxima al ideal, son básicamente las siguientes:

- Tener una frecuencia natural varias veces superior a la mayor frecuencia presente en la señal de aceleración a medir.
- Realizar la medición con un error del orden de 0.1 % de la máxima aceleración a medir.
- Tener un amortiguamiento adecuado para seguir lo más cercanamente posible la aceleración real a medir.

Las posibilidades físicas que se disponen para lograr aproximarse a las características de un acelerómetro ideal, son principalmente dos, a saber:

- Medición mediante deflexión total (analogía de la pesada simple).
- Medición sin deflexión o deflexión mínima (analogía de la doble pesada)

El método que realiza la medición mediante deflexión total (en adelante, *Lazo abierto*), conduce a un diseño de dimensiones importantes y con elementos que deben tener mucha linealidad y repetibilidad. Estas desventajas se pueden minimizar adecuadamente con métodos de diseño de componentes, basados en MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*) [7,8]. Como esta Tecnología, no la tenemos disponible actualmente (si bien se está trabajando en ello), en forma confiable ni totalmente accesible, sobre todo por sus costos; no la consideraremos en el corto plazo.

El método de medir sin deflexión (en adelante *Lazo cerrado*) [11, 12, 13,14], conduce a un diseño de dimensiones, costo, exactitud, linealidad y repetibilidad razonables para la mayoría de las aplicaciones industriales, investigación y de laboratorio. Por estas razones, fundamentalmente, se utilizará dicho método de medición y diseño.

### 1.2. Especificaciones Generales

Sobre la base de las características deseadas, las aplicaciones más frecuentes, las posibilidades tecnológicas de implementación, y la experiencia, se han establecido para el servoacelerómetro a diseñar y construir, las siguientes especificaciones técnicas generales:

- Coeficiente de amortiguamiento:  $\xi \geq 0.5$
- Tiempo de establecimiento:  $t_s \leq 30 \text{ mseg}$
- Overshoot:  $M_o \leq 10 \%$
- Ancho de banda:  $BW \geq 35\text{Hz} = 220 \text{ rad } / \text{seg}$
- Margen de fase:  $PM \geq 20^\circ$
- Margen de ganancia:  $GM \geq 20 \text{ dB}$
- Eje de sensado: uno
- Acoplamiento cruzado entre ejes:  $\leq 40 \text{ dB}$

- Temperatura de operación:  $-40^{\circ}C \leq \theta_{amb} \leq 80^{\circ}C$
- Altura de medición sobre el nivel del mar:  $h_{món} \geq 12000\text{ m}$
- Rangos: 1g, 5g, 10g, 20g, 50g, y 100g
- Volumen máximo:  $V_{máx} \leq 130\text{ cm}^3$
- Tensión de alimentación:  $\pm 12\text{ VDC}$
- Tensión de salida: analógica:  $\pm 10\text{ VDC}$
- Salida digital por puerto serie universal (USB)
- Sensibilidad: 10V/g, 5V/g, 1V/g, 0.5V/g, 0.2V/g, y 0.1V/g
- Exactitud y linealidad:  $\pm 1\%$  del rango

## 2. Consideraciones para el diseño del servoacelerómetro por Balance de fuerza.

La idea básica que se aplicó para desarrollar el acelerómetro sin deflexión (lazo cerrado) o *servoacelerómetro*, es el criterio de diseño por *balance de fuerza*. Consiste en generar una fuerza de igual magnitud, y sentido contrario a la producida por la aceleración a medir, y que actúa sobre la masa del sensor. Una vez generada esta fuerza, que en nuestro caso (Por limitaciones tecnológicas y posibilidades de realización) se obtiene a través de la interacción de una corriente eléctrica con un campo magnético, se procede a medir la corriente, cuyo valor es proporcional a la fuerza. Dicha fuerza (léase "corriente eléctrica") es proporcional a la aceleración a medir (que es una variable exterior independiente al sistema). De esta forma se tiene un acelerómetro que por aplicación de la realimentación negativa (negative feedback), se convierte en un *servoacelerómetro*. Se ha seleccionado el balance de fuerza porque permite lograr un menor acoplamiento cruzado, entre ejes, que el balance de cupla [9,10,].

Una ventaja muy importante de este método de diseño es que la medición se realiza sin desplazamiento (en realidad un desplazamiento muy pequeño) de los elementos mecánicos sensibles. De esta manera se aprovechan las fortalezas de los sistemas realimentados de control.

En la figura 1, se muestra un esquema que simboliza la idea del servoacelerómetro por balance de fuerza, motivo del presente Proyecto (25/C088).

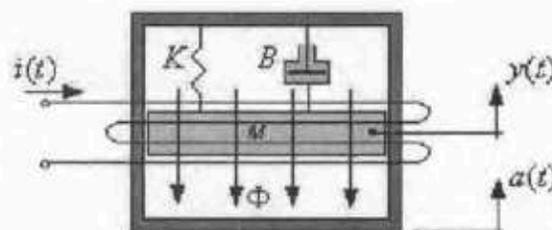


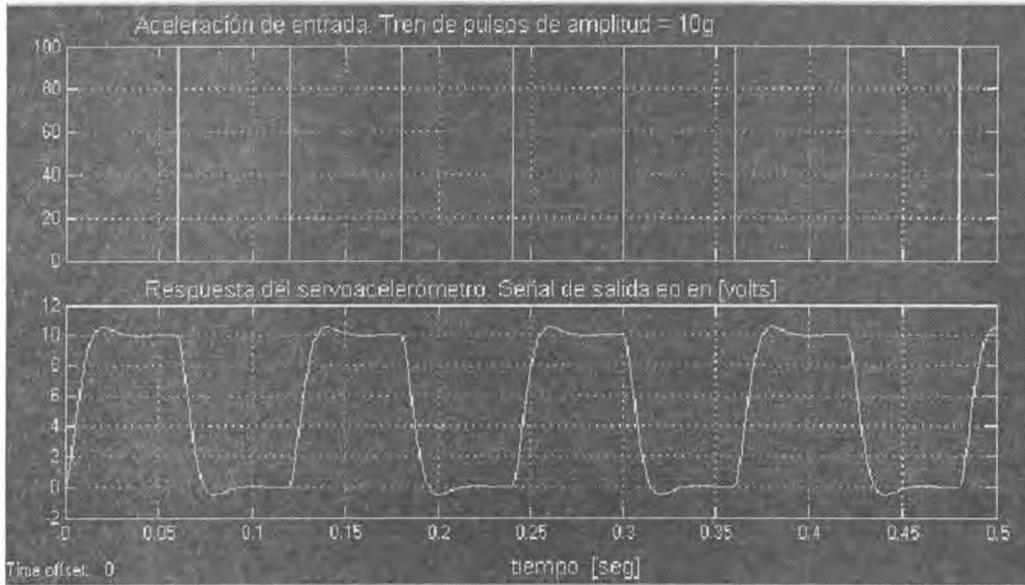
Fig. 1. Esquema del servoacelerómetro por balance de fuerza.

Donde:

- $a(t)$ : Aceleración del bastidor (motivo de la medición)
- $i(t)$ : Corriente en la bobina
- $y(t)$ : Desplazamiento de la masa M
- $\Phi$ : Flujo magnético
- K: Constante elástica
- B: Rozamiento viscoso
- M: Masa del sensor inercial.

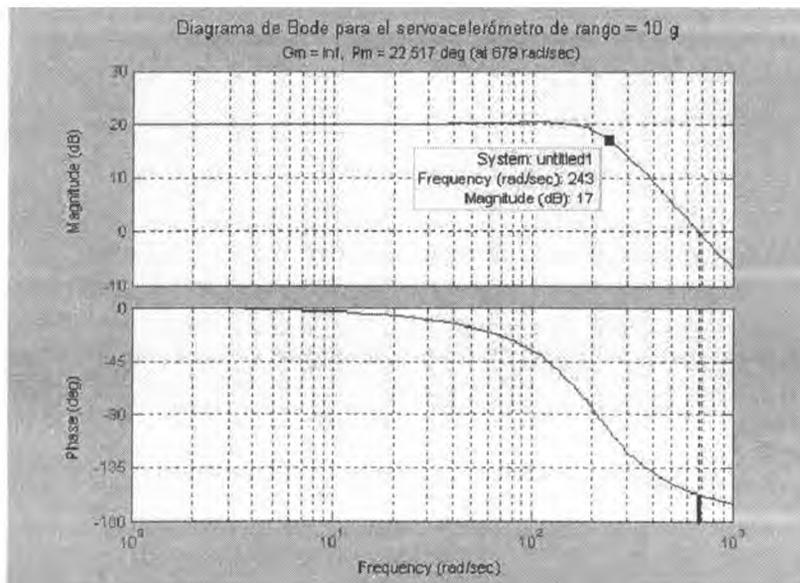
tensión de salida, en régimen estacionario, es 10 Volts DC. Esta respuesta en régimen estacionario, da para el modelo del servoacelerómetro analizado, una *sensibilidad o ganancia estática de 1 Volt/g*

En la figura 4 se muestra la respuesta del servoacelerómetro a una señal de aceleración en forma de pulsos, con amplitud 10 g y periodo 0.12 seg (frecuencia de 8.3 Hz), y con un ancho de pulso de 50 %.



**Fig.4.** Respuesta del servoacelerómetro a un tren de pulsos de aceleración.

Otra característica importante del servoacelerómetro, es su respuesta en frecuencia. Dicha respuesta se puede obtener mediante el diagrama de Bode de amplitud y fase. Con los parámetros de diseño, correspondientes al servoacelerómetro, cuyo rango es de  $10g = 98.1 \text{ m/seg}^2$ , se obtiene el diagrama de Bode, mostrado en la figura 5.



**Fig. 5.** Diagrama de Bode para el servoacelerómetro de rango = 10 g.

La relación entre las variables y parámetros del servoacelerómetro, mostrado en forma esquemática en la figura 1, está dada por la ecuación diferencial (1) que se indica a continuación:

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + B \frac{dy(t)}{dt} + K y(t) = M a(t) - K_b i(t) \quad (1)$$

En la expresión (1)  $K_b$  = constante de la bobina. Dicha constante depende del flujo magnético ( $\Phi$ ), de la geometría y propiedades magnéticas de los materiales involucrados.

Convirtiendo el desplazamiento  $y(t)$ , de la masa sensora  $M$ , en una corriente eléctrica  $i(t)$ , empleando un transductor adecuado, se puede lograr una vinculación entre el desplazamiento y la corriente. La relación dinámica, entre el desplazamiento  $y(t)$  de la masa sensora  $M$ , y la corriente generada por el transductor mecánico-electrónico [15,16], está dada, para nuestro caso, por la ecuación diferencial (2), que se muestra a continuación:

$$k_1 \frac{dy(t)}{dt} + k_1 \alpha y(t) = \frac{di(t)}{dt} + \beta i(t) \quad (2)$$

Los parámetros  $k_1$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  del modelo indicado por (2), dependen del diseño particular realizado para el convertidor *desplazamiento-corriente*.

La señal de salida más conveniente, para el servoacelerómetro, es una tensión  $e_o(t)$ . Dicha tensión se puede obtener a partir del conocimiento de la corriente  $i(t)$ , mediante un convertidor *corriente-tensión*. En nuestro caso, el convertidor *corriente-tensión* tiene una relación dada por la ecuación diferencial (3):

$$e_o(t) + \tau_e \frac{de_o(t)}{dt} = k_i i(t) \quad (3)$$

Los parámetros  $\tau_e$  y  $k_i$ , del modelo indicado por (3), dependen del diseño particular realizado para el convertidor *corriente-tensión*.

### 3. Simulación dinámica del Servoacelerómetro [7]

Sobre la base de las ecuaciones diferenciales (1), (2) y (3), y con el cálculo adecuado de los parámetros correspondientes a los subsistemas siguientes:

- Sensor inercial.
- Convertidor *desplazamiento-corriente*.
- Convertidor *corriente-tensión*.

Se construye el modelo de bloques, y se lo representa mediante SIMULINK como se muestra en la figura 2. En dicha figura se muestran algunos dispositivos, que permiten obtener las variables en función del tiempo, y en particular en régimen estacionario.

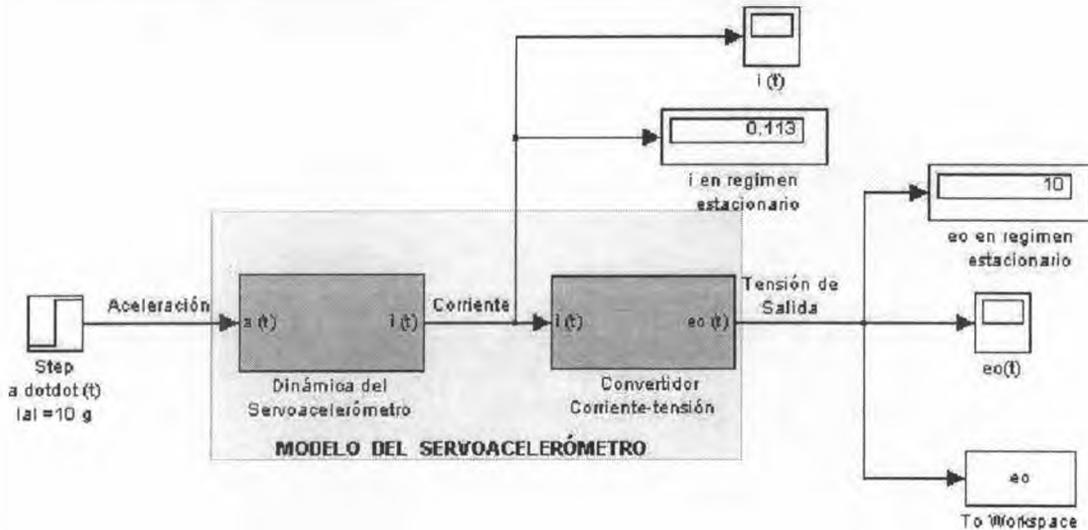


Fig. 2. Modelo del servoacelerómetro con rango 10 g.

La respuesta dinámica del servoacelerómetro frente a un escalón de aceleración, se puede ver a través de la tensión de salida  $e_o(t)$ . En la figura 3, se muestra la respuesta del servoacelerómetro

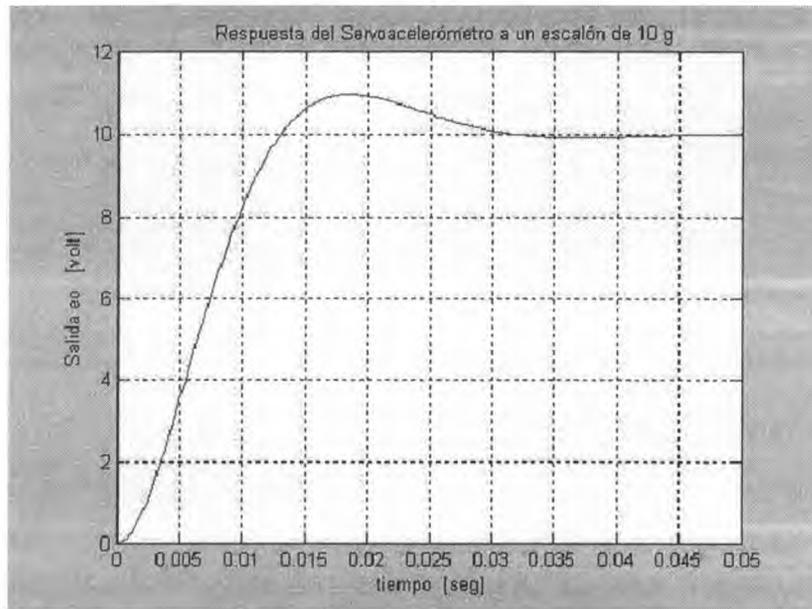


Fig. 3. Respuesta temporal frente a un escalón de aceleración.

En las figuras 2 y 3, se puede ver que, para el modelo analizado (Rango 10g), la corriente en régimen estacionario en la bobina recuperadora es de 113 mA, y la tensión de salida es 10 Volts DC. El Servoacelerómetro representado en la figura 2, corresponde al Modelo de  $10g = 98.1 \text{ m/seg}^2$ . Esto significa que al ser la aceleración máxima de entrada 10 g, la

#### 4. Resultados Obtenidos

Sobre la base del diseño realizado (que ha permitido el cálculo y determinación de los parámetros más adecuados para el servoacelerómetro), y de las simulaciones efectuadas con el modelo, se han obtenido los índices de comportamiento siguientes, para el servoacelerómetro:

1. Overshoot:  $M_0 = 9.58 \%$
2. Coeficiente de amortiguamiento:  $\xi = 0.598$
3. Rise time:  $t_r = 13 \text{ mseg}$
4. Tiempo de establecimiento:  $t_s = 28 \text{ mseg}$
5. Ancho de banda:  $BW = 243 \text{ rad/seg} = 38.7 \text{ Hz.}$
6. Margen de fase:  $PM = 22.5^\circ$
7. Margen de ganancia:  $GM = \infty$  (infinito)
8. Sensibilidad:  $S = 1 \text{ V/g}$

Para efectuar algunas de las mediciones de laboratorio, se ha implementado un dispositivo que permite simular la aplicación de un escalón de aceleración y así poder obtener la respuesta mediante un osciloscopio en tiempo real.

La medición a diferentes frecuencias se ha realizado con un "shaker" (Lab. De Ensayos Ambientales de CITEFA), es decir un dispositivo que permite suministrar a la muestra bajo ensayo, un perfil de aceleración en un rango de frecuencias especificado (mediante un barrido automático).

Los resultados experimentales, obtenidos de los ensayos de dicho dispositivo, han permitido comprobar que los parámetros medidos tienen errores menores que el 10 %, respecto de las predicciones teóricas, realizadas con la modelización y simulación dinámica.

El diseño realizado, se ajustó sobre la base de las mediciones experimentales a los fines que el modelo se aproxime lo más posible a la realidad física.

#### 5. Conclusiones y Recomendaciones.

##### 5.1. Conclusiones

- i. El diseño del servoacelerómetro a través del planteo de un adecuado modelo dinámico, ha dado resultados muy aproximados y concordantes con los obtenidos a través de los ensayos experimentales de laboratorio y campo.
- ii. Tanto el peso como volumen del servoacelerómetro, son muy similares a los establecidos en las especificaciones. Esto permite utilizarlo en la mayoría de las aplicaciones previstas.
- iii. No se requiere un Laboratorio extremadamente equipado para realizar e implementar el diseño de un acelerómetro por realimentación, confiable, de calidad y competitivo.

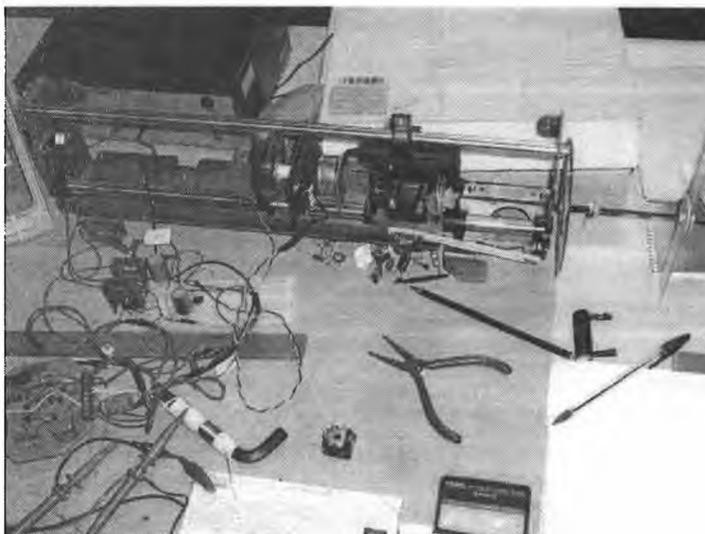
- iv. Con tecnologías disponibles en Argentina, es posible diseñar Servoacelerómetros para innumerables aplicaciones prácticas, y al mismo tiempo trasladar dichos conocimientos a la industria, que los puede absorber sin grandes dificultades.
- v. El desarrollo del servoacelerómetro permite generar recursos humanos altamente capacitados, para continuar luego con otros desarrollos y aumentar la formación de especialistas en I&D, como así también trasladar los conocimientos a los cursos de especialización y postgrado que se imparten en la Universidad.

### Recomendaciones.

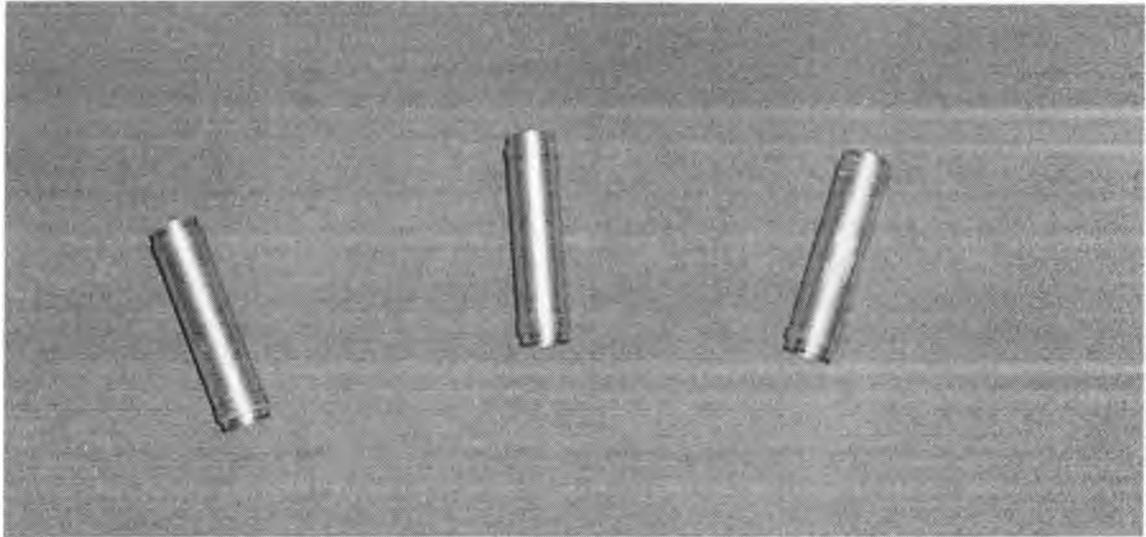
- i. El diseño de un servoacelerómetro para un eje de sensado (eje- $x$ ), ha generado la posibilidad de diseñar un servoacelerómetro para tres ejes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de sensado.
- ii. El conocimiento adquirido permitió realizar el diseño de "Servo sismógrafos", con múltiples aplicaciones en estudios Geológicos, Sísmicos e industriales. Actualmente se está trabajando en un Proyecto Sismológico de la Agencia, en conjunto con la Facultad de Geología de la Universidad Nacional de la Plata.
- iii. El conocimiento adquirido en el desarrollo del servoacelerómetro por balance de fuerza, facilita la incursión en el desarrollo de sensores tipo MEMS, que permitirá la reducción drástica del volumen y peso del sensor. Actualmente, un equipo de trabajo de nuestra Universidad, está dando pasos en este sentido.

### **6. Algunas Fotografías de partes del servoacelerómetro.**

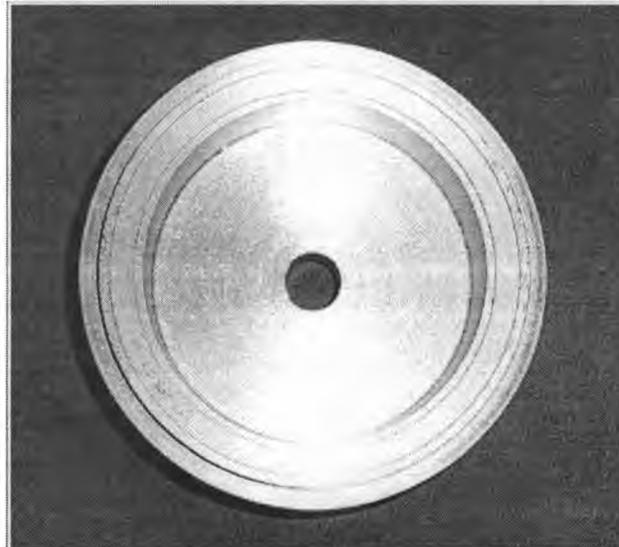
Las fotografías que se adjuntan, se han obtenido en el *Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Automatización y Control (LIDAC)*, dependiente del departamento de Electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA). Su reproducción solo tienen validez y autorización en el contexto del *I Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*.



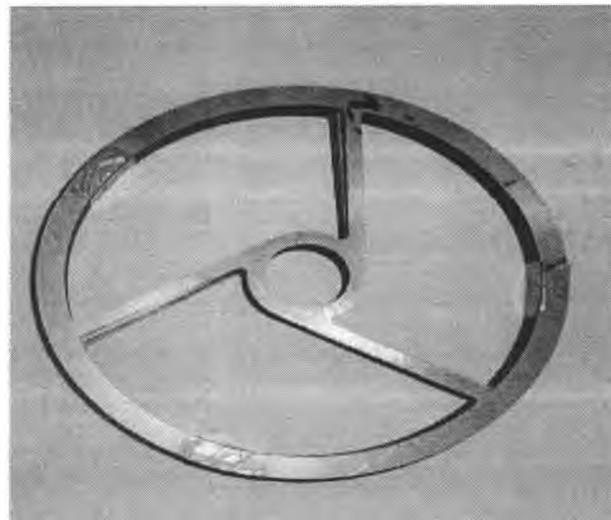
Fotografía Nº 1. Dispositivo para generar un escalón de aceleración.



Fotografía Nº 2. Carrete de la bobina de fuerza(Recuperadora)



Fotografía Nº 3. Cabezal de cierre del servoacelerómetro.



Fotografía Nº 4. Suspensión elástica



Fotografía N° 5. Algunas piezas del servoacelerómetro.

## 7. Referencias.

- [1] Report N° 100. "Accelerometer Design". By F. H. Norton and E. P Warner. Langley Memorial Aeronautical Laboratory. National Advisory Committee for Aeronautics, Langley Field, Va. U.S. Navy Department.
- [2] Patrick L. Walter, Endevco and Texas Christian University. *Sensors*, march 1999.
- [3] Wayne Tustin and George Hibner. Oct. 1975. "Understanding and Measuring the Shock Response Spectrum", Spectral Dynamics Corp. SSA-3, San Diego, CA.
- [4] Chris Burroughs. Sept. 1998. "Micro Navigator team moving to take IMEMS Technology From prototype to product". Sandia lab News, 50:18, Albuquerque, NM.
- [5] B. F Payne and G.B. Booth. 1995, "The NIST Super Shaker Project". Proc Eighteenth Transducer Workshop, Range Commanders Council, White Sands Missile Range, NM.
- [6] Patrick Walter, 1996. "History of the Development of the Accelerometer", 50 Year of Shock and Vibration History, The Shock and Vibration Information Analysis Center (SAVIAC), Arlington, VA:376-385.n
- [7] "Micro machined Accelerometer Design, Modeling and Validation". B. R. Davies, V. I. Bateman, F. A. Brown, S. montague, J. R. Murray, D. Rey, J. H. Smith. Sandia National Laboratories a Lockheed Martin Company.
- [8] James Doscher. Micromachining Evangelist. Analog Devices.
- [9] Permanent Magnet Design Guidelines. 2000, Magnet Sales & Manufacturing Company, Inc.
- [10] Electromagnetic Devices, Herbert C. Roters. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1941.
- [11] Ashok Ambaradar, "Procesamiento de señales analógicas y digitales" Michigan Technological University. 2002 Thomson Editores.
- [12] K. Ogata. "Modern Control Engineering" .Prentice Hall 2001.

- [13] P. H. Sydenham, "Handbook of Measurement Science" John Wiley and Sons, 1983.
- [14] B. E. Jones, "Instrumentation, Measurement and Feedback". McGraw Hill, NY, 1977.
- [15] M. Watts, "CMOS Oscillators" Application Note 118, National Semiconductors.
- [16] R. Pallás Areny, "Sensores y Acondicionadores de Señal". Alfaomega-Marcombo. Edición 2004.
- [17] Amadeo M. Mariani, "Servoacelerómetro por balance de Cupla, consideraciones teóricas para su diseño y fabricación. Aplicación especial en misiles y cohetes". CITEFA, Villa Martelli, Bs. As., 1984.
- [18] Amadeo M. Mariani, "Desarrollo del modelo matemático para el misil A-S (Aire – Superficie Martín Pescador) en vuelo y su aplicación al diseño de un Simulador de Tiro" CITEFA, Villa Martelli, Bs. As., 1985.
- [19] Amadeo M. Mariani, "Estudio teórico de un sistema de guiado combinado, Inercial e Infrarrojo, para su aplicación en un misil antibuque (A-S Martín Pescador modificado), Sugerencias para el diseño", CITEFA, Villa Martelli, Bs. As. 1983.

## **9. Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la SECyT del Rectorado de la UTN y de la Facultad Regional Buenos Aires, por el apoyo recibido, materializado en becarios, pasantes, medios materiales y por el nuevo Laboratorio para el LIDAC construido en el Campus de la Universidad. No podemos dejar de mencionar el constante apoyo recibido por parte de los Directores de Departamento de Electrónica de las Facultades Regionales de Bs. As., y Haedo. También deseamos agradecer a las autoridades académicas de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora por su constante apoyo y paciencia para nuestras actividades de docencia e investigación.