

# Módulo de adquisición y registro para un acelerómetro en tres ejes para vectores de alta dinámica

Larosa, F.S., Mignone, M.N., Castelucci Vidal, I., Guanca, A.A., Giampetruzzi, J.G.  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Haedo, Haedo, Argentina

**Abstract**—Este trabajo trata sobre el diseño y construcción de un módulo de adquisición cuya fuente de datos es un acelerómetro de 3 ejes de hasta  $\pm 200g^{(1)}$ , capaz de ser integrado en un vector de alta dinámica (como carga útil), con el objetivo de caracterizar el empuje del mismo. Este tipo de módulos se encuentran en una amplia variedad de aplicaciones de cohetes y lanzamiento de vectores.

**Keywords**—Acelerómetro, aceleración, empuje, MEMS, trayectografía, vector.

## I. INTRODUCCIÓN

Los vectores de alta dinámica, en su mayoría, tienen la característica de poseer un amplio rango de aceleración (mayor a  $20g^{(1)}$ ) durante su trayectoria en un lapso corto de tiempo<sup>[1]</sup>. Los acelerómetros convencionales no logran cubrir dicho margen, y además, no poseen la suficiente resolución como para realizar una caracterización efectiva del empuje del mismo<sup>[2]</sup>.

Para lograr satisfacer las necesidades anteriores, es necesario utilizar acelerómetros con tecnología MEMS (Sistemas Micro-electromecánicos) de amplio rango, con un sistema fiable y, a la vez robusto, de adquisición de datos y acondicionamiento de señal<sup>[1]</sup>.

Esto resulta útil en el campo de la cohetes al momento de realizar la caracterización precisa del empuje del vector, como también forma parte de uno de los datos primordiales (entre otros) para lograr la restitución de su trayectoria.

Por ello, en el presente trabajo se planteó la meta de construir un módulo con una alta tasa de muestreo (mayor o igual a 500 muestras por segundo), confiabilidad y gran capacidad de almacenamiento en memoria de datos provenientes de un acelerómetro del tipo MEMS de rango mayor o igual a  $25g^{(1)}$  con un sistema de acondicionamiento de señal que permita obtener una alta resolución en la adquisición (menor o igual a  $0,02g^{(1)}$ ). Estos valores de resolución y aceleración máxima fueron sugeridos por el usuario final del instrumento en base a experiencias previas con vectores similares.

<sup>(1)</sup>La unidad g corresponde a una aceleración de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , que es la aceleración provocada por la fuerza de gravedad.

## II. ASPECTOS PRELIMINARES

La trayectoria de un vector de alta dinámica cumple, en reglas generales, con las siguientes etapas<sup>[3]</sup>:

- t0: Salida de rampa
- t1: Final de Combustión.
- t2: Separación carga útil.
- t3: Apogeo.
- t4: Extracción del paracaídas.
- t5: Apertura del paracaídas completada.

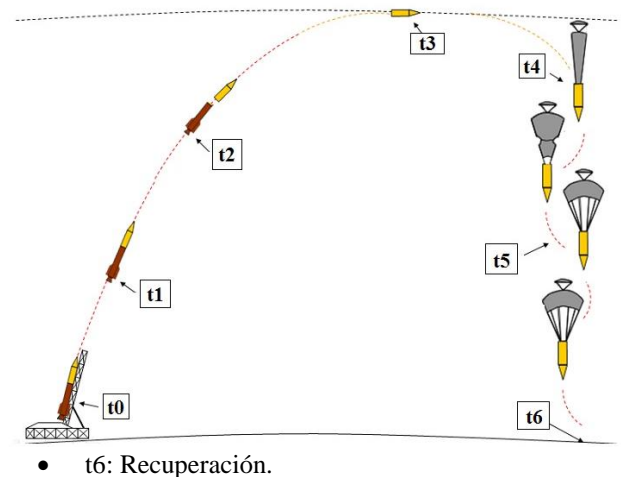


Fig. 1 Trayectografía de un vector de alta dinámica. (Crédito: Grupo ACEMA).

En el punto de “final de combustión” (t1) la aceleración del vector es máxima y puede llegar a alcanzar aceleraciones superiores a  $20g$ . La duración de esta etapa por lo general no supera los 15-20 segundos, haciendo crítico el muestreo y resolución del módulo de adquisición, como así también su integridad y robustez, ya que debe soportar las extremas condiciones externas que esta etapa demanda (vibraciones bruscas, altas temperaturas, etc.).

En el caso de la etapa de “Recuperación” (t6), el módulo debe tener la capacidad de poder ser recuperado para realizar la transferencia de los datos almacenados en su memoria interna y su posterior procesamiento. Para lo anterior es imprescindible resguardar la integridad física del instrumento así como la integridad lógica de los datos.

Los acelerómetros MEMS son los más utilizados en este tipo de aplicaciones, ya que se basan en sistemas micro-mecanizados capaces de ser integrados en una o varias superficies de silicio, ofreciendo una mayor integración y resistencia en un solo encapsulado<sup>[4]</sup>. En este tipo de acelerómetros, los sensores son generalmente de un material de poli-silicio construidos sobre una superficie base de silicio. Resortes, también de poli-silicio, suspenden dicha estructura sobre la superficie base, y proporcionan resistencia frente a las fuerzas de aceleración<sup>[4]</sup>. La deflexión de la estructura se mide a través de un capacitor diferencial, el cual detecta cuando la aceleración desvía la masa en movimiento, provocando un desequilibrio de potencial, el cual se traduce en una amplitud de salida proporcional a la fuerza de aceleración a través de técnicas de demodulación de fase<sup>[4]</sup>.

### III. DISEÑO E INGENIERÍA PRELIMINAR

En base a los requerimientos antes mencionados, se diseñó el módulo siguiendo el siguiente diagrama en bloques:

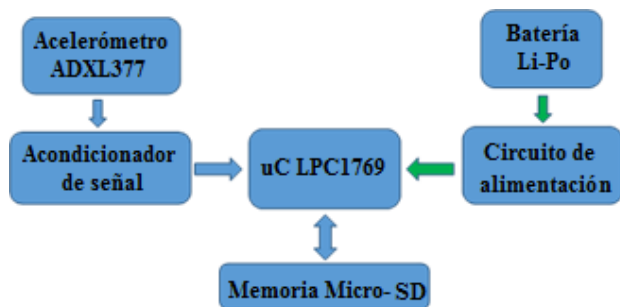


Fig. 2 Diagrama en bloques del módulo.

El sensor seleccionado para este módulo fue el ADXL377 de AnalogDevices®, el cual es de tecnología MEMS, y posee un amplio rango efectivo de  $\pm 200g$ , con ancho de banda ajustable y tensión de alimentación hasta 3,6V.

En lo que concierne a la adquisición de datos, optamos por utilizar el micro-controlador LPC1769 de 32 bits de Philips NXP®, el cual posee la capacidad de trabajar con un reloj de 120MHz y cuenta con un convertor analógico digital con multiplexación para 8 entradas de 12 bits de resolución, operando con una tensión de alimentación de 3,3V<sup>[5]</sup>.

El módulo trabaja en modo “off-line” (sin telemetría) por lo que se optó por utilizar una memoria micro-SD® para el almacenamiento de datos, debido a su gran capacidad de almacenamiento y a la fácil recuperación y portabilidad de los datos guardados.

La fuente de alimentación consiste en una batería de Litio-Polímero (Li-Po) de 3,7V – 1200mA.h, debido a que ofrece una muy buena relación entre capacidad de carga y tamaño, seguido por el “circuito de alimentación”, el cual consiste en un regulador lineal de tensión de 3,3V LDO (por sus siglas en inglés Low Dropout Voltaje - Baja caída de la tensión de salida), que permite mantener estable la tensión de salida hasta valores de batería muy cercanos al mismo (del orden de los 200mV de diferencia).

El acondicionador de señal se diseñó para adaptar la salida analógica del acelerómetro a valores adecuados para el convertor analógico-digital del LPC1769, y a su vez, para lograr la resolución requerida.

La ecuación de transferencia del acelerómetro (considerando linealidad en todo el rango) corresponde a:

$$V_o = \frac{3,3V}{400g} Fg + 1,65V = 8,25 \cdot 10^{-3} Fg + 1,65V \quad (1)$$

Donde  $V_o$  es la salida del acelerómetro en (Volts) y  $Fg$  es la aceleración medida en (g), como se muestra en la Fig. 3.

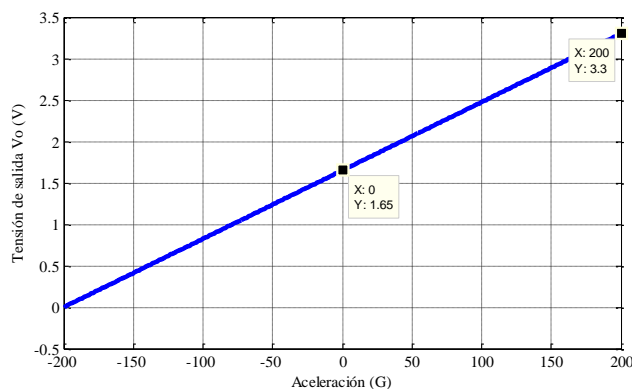


Fig. 3. Gráfico de la función transferencia del acelerómetro sin acondicionamiento de señal (rango completo).

El acondicionador de señal consta de una red de amplificadores operacionales para trasladar la curva de transferencia del acelerómetro a una zona particular de operación. En la Fig. 4, se muestra el circuito esquemático de dicha red para uno de los canales del acelerómetro (replicado para los tres canales X, Y, y Z).

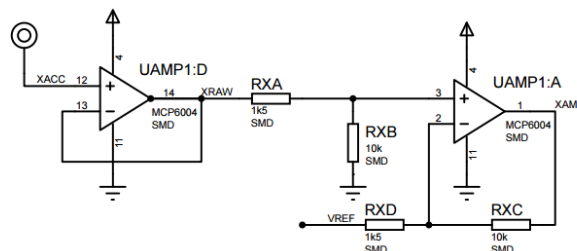


Fig. 4 Circuito esquemático del acondicionador de señal para un canal del acelerómetro (en este caso, canal X).

Donde el nodo  $XACC$  esta conectado al canal X del acelerómetro;  $XRAW$  sigue a  $XACC$  a través de una etapa de ganancia unitaria y  $XAMP$  es el valor amplificado y adecuado de  $XRAW$  a través de una etapa de amplificador-restador y una tensión de referencia  $VREF$ , de forma tal que  $XAMP$  pueda conectarse directamente al ADC del microcontrolador.

La ecuación de transferencia de la red operacional se muestra en (2):

$$XAMP = XRAW \cdot \left( \frac{R_{XB}}{R_{XA} + R_{XB}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_{XC}}{R_{XD}} \right) - VREF \cdot \left( \frac{R_{XC}}{R_{XD}} \right) \quad (2)$$

Siendo  $R_{XD} = R_{XA}$ ,  $R_{XC} = R_{XB}$ , y  $VREF = 1,65V$  la ecuación (2) queda como (3):

$$XAMP = (XRAW - 1,65V) \cdot \left( \frac{R_{XC}}{R_{XD}} \right) \quad (3)$$

$$XAMP = (XRAW - 1,65V) \cdot 6,6 \quad (4)$$

De esta forma, la curva de la Fig. 3 se traslada a una a una curva como se muestra en la Fig. 5:

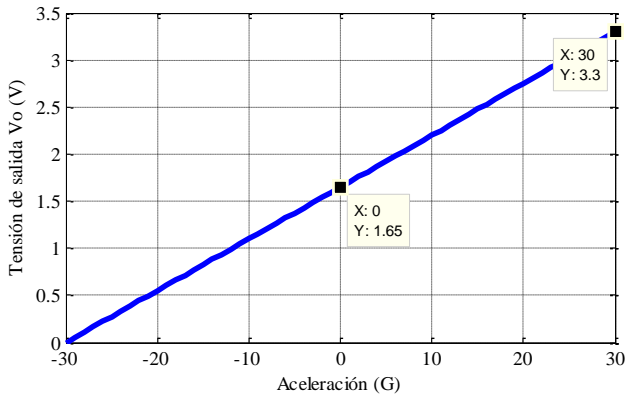


Fig. 5. Gráfico de la función transferencia del acelerómetro luego del acondicionamiento de señal (rango acotado).

De esta manera, pasamos de tener una sensibilidad de  $8,5mV/g$  a una de  $55mV/g$ , a costa de acotar el rango efectivo a  $\pm 30g$ ; utilizando los 12 bits del convertor ADC del micro-controlador nos quedaría una resolución de:

$$\frac{3,3V}{2^{12}} \frac{1}{55 mV/g} \cong 0,015 g \quad (5)$$

De esta forma, se satisfacen las especificaciones requeridas por el usuario final en cuanto a resolución y rango máximo.

Se utilizaron 6 canales del ADC para la adquisición: los tres primeros para adquirir la señal directamente del acelerómetro de los tres ejes en su rango completo y los tres restantes para la señal acondicionada y amplificada (rango acotado y con mayor resolución), con el objeto de poder contrastar si la red de acondicionamiento introducía errores en la señal original (por ejemplo, alinealidades).

Pudo comprobarse que la función transferencia de dicha red conservaba la linealidad esperada.

Todos estos componentes se integraron en una placa principal como muestra la Fig. 6:

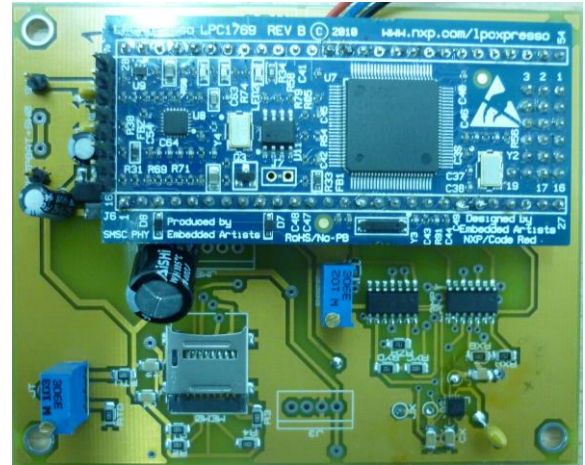


Fig. 6. Placa principal del módulo.

Con el objeto de proveer una estructura de soporte mecánico, se diseñó y fabricó, en conjunto con el Departamento de Ingeniería Mecánica y el Grupo ACEMA, un gabinete donde fue montado dicha placa en un material de aluminio aeronáutico especializado para soportar condiciones extremas. El gabinete cumple la función de soporte mecánico para la placa como así también del medio de fijación a través del cual el módulo podrá ser montado en el interior del vector.

Para asegurar que la placa y la batería queden totalmente firmes y estables frente a las condiciones del vuelo, el gabinete fue relleno con una silicona especial de alta flexibilidad y elongación, la cual brinda a su vez resistencia mecánica, quedando un solo bloque uniforme<sup>[6]</sup>.

El gabinete se muestra en la Fig. 7:



Fig. 7. Gabinete para albergar el módulo.

#### IV. FUNCIONAMIENTO

El módulo se implementó de manera tal que pueda muestrear los seis canales analógicos del ADC en tiempo real a una tasa de 1000 muestras por segundo y, al mismo tiempo, almacenar los datos adquiridos en la memoria micro-SD<sup>®</sup> a través de un sistema de controladores que organizan el tráfico de datos y evitan la pérdida y corrupción de los mismos, como se indica en la Fig. 8:

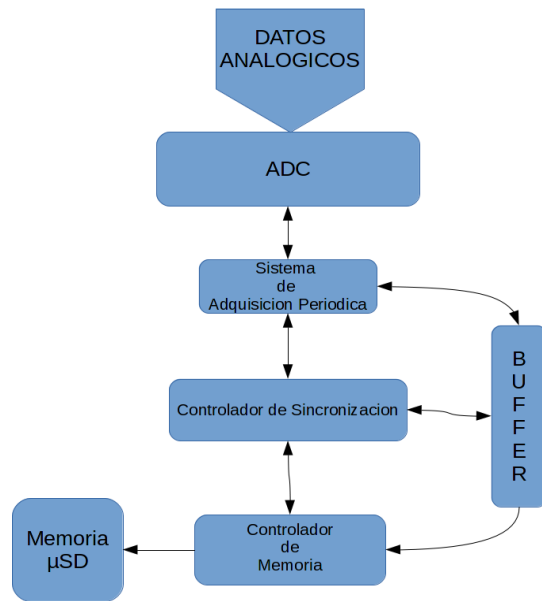


Fig. 8. Diagrama de flujo del programa principal.

El “sistema de adquisición periódica” almacena las capturas individuales del ADC en un “buffer” (espacio de memoria temporal) para luego trasladarlas a memoria en el momento indicado para reducir los tiempos de espera y evitar cuellos de botella debido a las velocidades relativas de los dispositivos. El “controlador de sincronización” coordina la adquisición de datos con el volcado de los mismos en memoria y maneja los tiempos de llenado del buffer para que se realice de forma óptima.

Por último el “controlador de memoria” optimiza la escritura en memoria de las adquisiciones, y a su vez, asegura la persistencia de los datos.

## V. PUESTA EN MARCHA

El módulo completo (Fig. 9) se activa al conectar el cable **rojo y verde** entre sí, a través de una llave externa, que cierra el circuito de alimentación positiva al módulo. En esta instancia el módulo esperará 30 segundos (para evitar falsos arranques) y luego comenzará a adquirir los datos de los sensores y almacenarlos en la memoria.

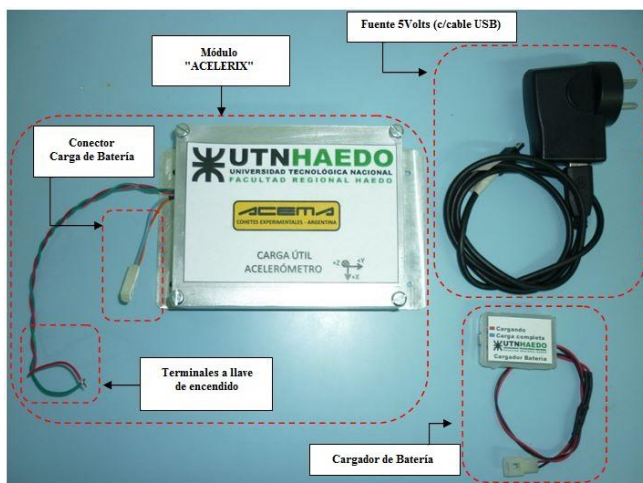


Fig. 9. Módulo con todos los accesorios.

También posee un conector de carga para la batería, el cual se conecta al cargador asociado el cual recibe alimentación externa de 5V a través de una fuente externa, permitiendo cargarla sin necesidad de abrir el módulo.

## VI. CALIBRACIÓN

En una primera instancia se realizó la calibración del acelerómetro utilizando el modo “*self test*” (auto diagnóstico) indicado por el fabricante, el cual pone al acelerómetro en un estado de prueba en donde sus tres ejes evidencian valores explícitos y tabulados de aceleración, con los cuales se pueden realizar ensayos preliminares con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema<sup>[4]</sup>.

Luego, se procedió a calibrar y testear el módulo con una referencia externa al mismo y dentro del gabinete, de forma de tener una observación más real sobre el comportamiento del acelerómetro en el ambiente para el cual fue diseñado. Para ello, se colocó en una máquina centrífuga, ubicado a una distancia fija del eje de rotación. Esa distancia fue medida y la caja se sometió a velocidades crecientes de rotación.

La aceleración centrífuga de un cuerpo en rotación alrededor de un eje se calcula por medio de (6)<sup>[7]</sup>:

$$a = \omega^2 r \quad (6)$$

Donde  $a$  corresponde a la aceleración centrífuga expresada en ( $m/s^2$ );  $\omega$  a la velocidad angular expresada en ( $1/s$ ); y  $r$  a la distancia del acelerómetro al centro del eje de rotación expresada en ( $m$ ). Para tabular los valores deseados y que sean acordes a los parámetros de operación de la centrífuga, se definió un factor  $k$ , el cual integra todas las constantes de la ecuación y tiene en cuenta la velocidad angular en unidades de RPM<sup>(2)</sup> y la aceleración en unidades de  $g$ . Por lo que la (6) queda como se indica en (7).

$$a = \left(\frac{n}{k}\right)^2 \quad (7)$$

Siendo  $k = 36,79$  en unidades de ( $RPM/\sqrt{g}$ )<sup>(2)</sup>, y  $n$  la velocidad angular expresada en ( $RPM$ )<sup>(2)</sup>. Se buscó a priori obtener valores de aceleración equiespaciados cada 1  $g$ . No obstante, debido a la imposibilidad de ajustar los valores de ‘ $n$ ’ con precisión a través de los controles de la máquina, se eligieron diferentes valores de ‘ $n$ ’, para luego calcular la aceleración centrífuga asociada a partir de (7). Así se obtuvo la siguiente tabla.

<sup>(2)</sup>La unidad RPM (del inglés, Revolutions per minute) corresponde a una velocidad angular equivalente a una vuelta por minuto o  $\pi/30$  (rad/s) en el Sistema Internacional.

TABLA I  
VALORES DE LA ACELERACIÓN PARA DIFERENTES VELOCIDADES

Velocidad angular	Aceleración centrífuga
n (RPM) <sup>(2)</sup>	a (g)
37,0	1,01
51,8	1,98
63,0	2,93
73,1	3,95
82,6	5,04
90,5	6,05
98,0	7,09
105,0	8,14
112,6	9,36
116,0	9,94
122,5	11,08
127,5	12,01
-	-
140,2	14,52
-	-
-	-
150,5	16,73
-	-
162,0	19,38
-	-
-	-
170,5	21,47
-	-
182,0	24,46
-	-

Para este ensayo de calibración, el módulo fue colocado de manera tal que la dirección negativa del eje Z coincidiera con la dirección del vector de la aceleración centrífuga. Remitiéndonos a la Fig. 3, la tensión de salida  $V_o$  decrece a medida que la aceleración se hace más negativa y mayor en módulo, motivo por el cual, la Fig. 10 muestra una lectura decreciente del ADC para valores cada vez más grandes de aceleración.

Para cada intervalo de aceleración, se obtuvo el valor medio de la cuenta del ADC y se creó un conjunto de puntos conformados por la siguiente expresión:

$$(x,y)=(\text{valor ADC, aceleración centrífuga}) \quad (8)$$

Finalmente, se ajustaron los puntos obtenidos con un modelo de regresión para convertir los datos obtenidos del conversor analógico digital (un número de 0 a 4095) a valores de aceleración ( $\text{m/s}^2$ ).

Dada la linealidad inherente al sistema, se ajustaron los puntos obtenidos usando un modelo de regresión lineal<sup>[8]</sup>. Los resultados se muestran en la Figura 11.

Al usar este método para calibrar el instrumento, la recta de calibración corresponde a:

$$a=mx+b \quad (9)$$

Donde:

- **a:** Aceleración (g).
- **x:** Medición obtenida del ADC proveniente del sensor (adimensional, número entre 0 y 4095).
- **m:** Pendiente (g)  $\rightarrow m=0,01659$  g.
- **b:** Ordenada al origen (g)  $\rightarrow b=-38,56$  g.

Realizando, luego, el cálculo de los residuos para cada punto de medición, se observó que la desviación máxima de éstos respecto de la recta de calibración está en el orden de 0,04 g, obteniendo un error máximo del 4% en todo el rango de medición.

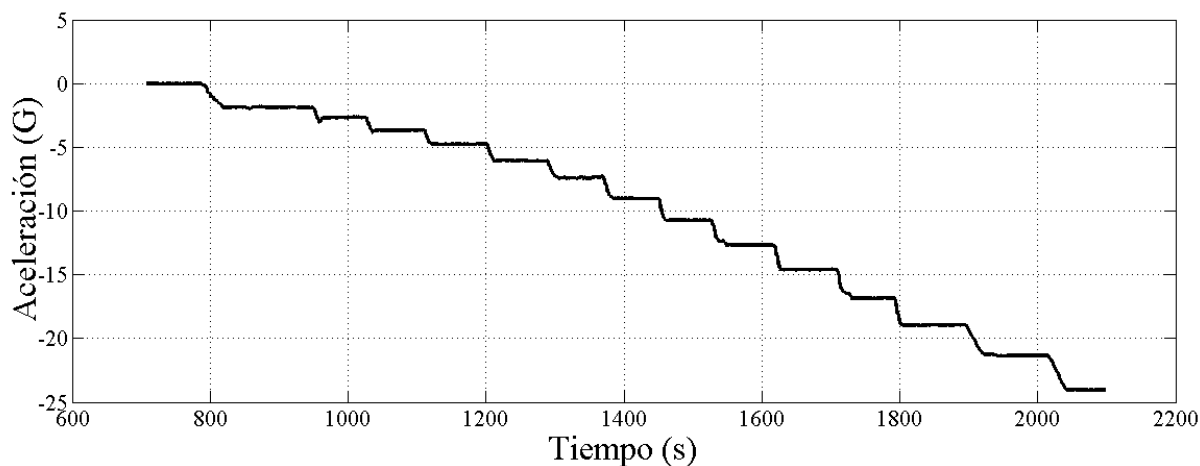


Fig. 10 Gráfico de la aceleración medida por el ADC del módulo en función del tiempo, para la prueba de calibración.

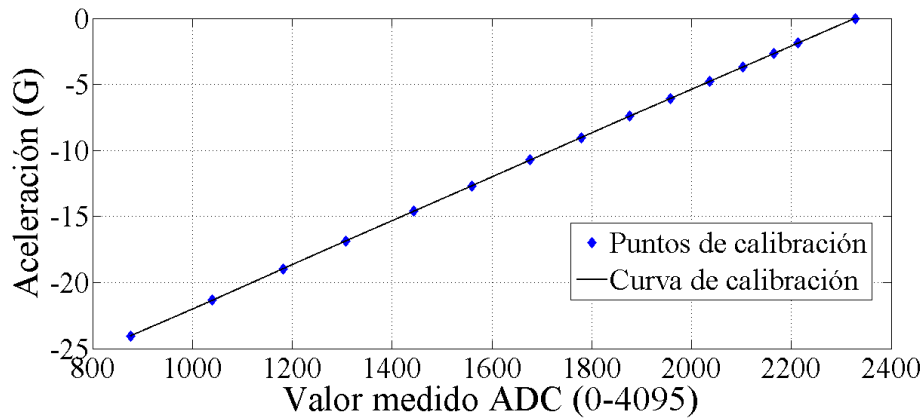


Fig. 11 Gráfico de los datos obtenidos versus la recta de calibración obtenida de la regresión lineal.

## VII. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el diseño y construcción de un módulo acelerómetro de 3 ejes partiendo de las especificaciones requeridas por la dinámica del vector utilizado; procurando adaptar todos los componentes disponibles para constituir una sola unidad compleja de adquisición de datos, y a su vez, obteniendo una alta resolución de 0,015g con un error máximo del 4%. El módulo fue entregado a la Fuerza Aérea Argentina para su integración previo a la realización de la experiencia de lanzamiento. Se espera su arribo para la recuperación de datos y posterior análisis.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] J. L. Weston, D. H. Titterton, "Modern inertial navigation technology and its application," *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol.12, n.º 2, pp. 49-64, Abril. 2000.
- [2] J. Huerfano, O. Ojeda y N. Álvarez, "Concepción de un sistema de Telemetría para estimar la trayectoria de un vehículo de ascenso vertical," presentado en el 8vo. Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Mayo 6-8, 2015, Buenos Aires, Argentina [Online], Disponible en: [https://www.academia.edu/attachments/37701919/download\\_file?st=MTQ2MDI2MjM3NywxOTAuMjQ0LjYxLjEz&s=swp-splash-paper-cover](https://www.academia.edu/attachments/37701919/download_file?st=MTQ2MDI2MjM3NywxOTAuMjQ0LjYxLjEz&s=swp-splash-paper-cover).
- [3] Documento interno, ACEMA.
- [4] Data sheet, (2012.). ADXL377 - Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 200$  g Accelerometer. Analog Devices®. [Online]. Disponible en: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL377.pdf>.
- [5] User Manual, (2014, Abril). UM10360 LPC176x/5x., Rev. 3.1, pp. 4-7, Abril, 2014. [Online]. Disponible en: [http://www.nxp.com/documents/user\\_manual/UM10360.pdf](http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf).
- [6] Instrucciones de uso y especificaciones, CAUCHO DE SILICONA RTV 3-8001, pp 1-2, 2015.
- [7] H. Young, R. Freedman, *Física Universitaria*, tomo I. Addison-Wesley, Ed., México, 2009, p. 306.
- [8] MATLAB, Mathworks® Support Documentation: "Lineal Regression", R2106a, 2016, TheMathWorks, Inc., Estados Unidos. [Online]. Disponible en: [http://www.mathworks.com/help/matlab/data\\_analysis/linear-regression.html](http://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html).