

5 Diseño del sistema acondicionador y selección de transductores

5.1 Análisis y selección de los equipos para la instrumentación

Debido a que el control de la mesa vibradora se requiere hacer por aceleración y por posición, se utilizarán como transductores de realimentación un acelerómetro y un transductor magnetostrictivo.

La selección del acelerómetro y del transductor magnetostrictivo se hizo comparando varios modelos, por lo que se decidió usar los siguientes:

- Acelerómetro Marca SETRA modelo 141B con las características mostradas en la tabla 4:

Datos de rendimiento	
Salida a Escala Completa	$\pm 1000[mV]$ (nominal)
Precisión (Método de mínimos cuadrados)	$\pm 1.0\%$ a escala completa
No repetitividad	0.05%
Tipo de Medición	Intervalos de G (Intervalos de $\pm G$ a escala completa)
Intervalos	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 15g, \pm 30g, \pm 60g, \pm 150g, \pm 600g$ (Respuesta: DC a 200-3000 [Hz], dependiendo del intervalo)
Efectos térmicos	Intervalo de compensación °C: -23 a 65 %FS/100°C máx. cero: ± 3.6 %FS/100°C máx. span: ± 3.6
Datos Eléctricos	
Aislamiento	100[MΩ]
Frecuencia Interna	20[MHz] aproximadamente
Impedancia de salida	9[kΩ] nominal
Intervalo de excitación	10 a 28 [V_{DC}]
Tensión de excitación	24 [V_{DC}]
Corriente de excitación	10[mA]

Tabla 4 Características del acelerómetro SETRA

- Transductor magnetostrictivo marca MTS modelo Temposonics ER que funciona de la siguiente forma:

El transductor utiliza un sensor de posición magnetostrictivo con base en tiempo, desarrollado principalmente por MTS. Dentro del elemento sensor, un pulso de tensión sónico es inducido en un diseño especial de guía de onda magnetostrictivo por una interacción momentánea de dos campos magnéticos. Un campo magnético, que proviene del imán permanente movable, pasa por fuera del sensor.

El otro campo viene de un pulso de corriente “Interrogador” aplicado a través de la guía de onda. El pulso de tensión resultante viaja a una velocidad ultrasónica por la guía de onda y es detectada en la cabeza del elemento sensor.

La posición del imán es determinada con alta precisión y velocidad por la medida precisa del tiempo transcurrido entre la aplicación del pulso interrogador y el arribo del pulso de tensión resultante con un contador de alta velocidad. Usando el tiempo transcurrido para determinar la posición del imán permanente provee una lectura de la posición absoluta que nunca necesita recalibración o reiniciar después de una pérdida de energía. El sensado sin contacto elimina la fricción y garantiza la mayor durabilidad y repetitividad en la salida.

El transductor magnetostrictivo tiene las características mostradas en la tabla 5:

Variable de medición	Desplazamiento
Resolución	Infinita
No linealidad	$< \pm 0.02\%$ a desplazamiento completo
Repetitividad	$< \pm 0.01\%$ a desplazamiento completo
Salida	0 a $10[V_{DC}]$ o 10 a $0[V_{DC}]$
Frecuencia de actualización	$> 1.5[kHz]$
Intervalo de medición	0 a $15[in]$ (0 a $38.1[cm]$)
Temperatura de operación	- 40 a $75^{\circ}C$
Humedad relativa	90% sin condensación.
Intervalo de vibración	10 g / 10 - 2000 [Hz]
Tensión de operación	+24 $[V_{DC}]$ nominal (-15 ó +20%)
Protección de polaridad	$> -30[V_{DC}]$
Protección de sobre tensión	$> 36 [V_{DC}]$
Corriente de operación	50 - 140 $[mA]$

Tabla 5 Características del transductor magnetostrictivo

5.1.1 Pruebas de los acelerómetros

Para seleccionar los acelerómetros que obtendrán las aceleraciones de diferentes puntos en las estructuras a probar, se hicieron pruebas de dos posibles acelerómetros a usar. El primero es un ADXL103CE de 1.7g y 1 eje de medición, mientras que el segundo es un ADXL330 de 3g y 3 ejes de medición.

Las pruebas se realizaron en un vibrador excitador (Ling Dynamic Systems, modelo 227L) el cual está conectado a un generador de señales (figura 25).

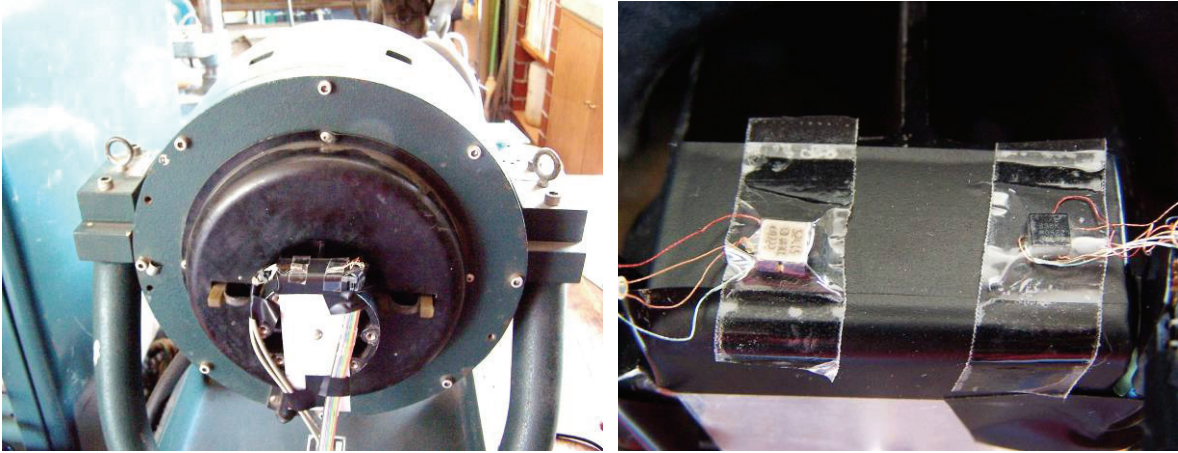


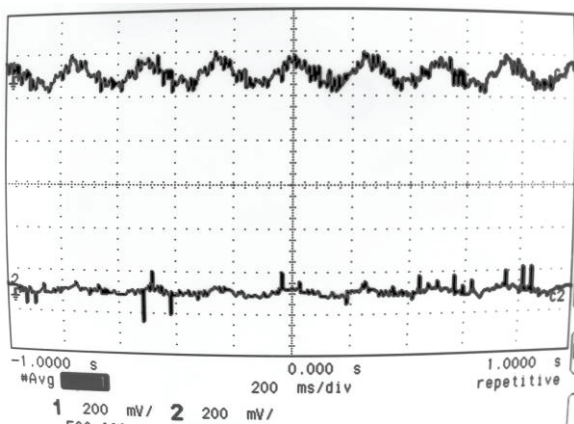
Figura 25 Pruebas de los acelerómetros en el vibrador Ling

La excitación fue una señal senoidal y se obtuvieron los siguientes resultados:

Canal 1 (superior): Acelerómetro ADXL103

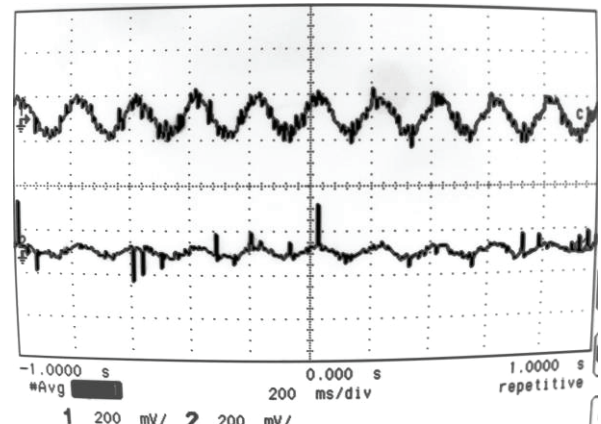
Canal 2 (inferior): Acelerómetro ADXL330

Frecuencia de excitación: 4[Hz]



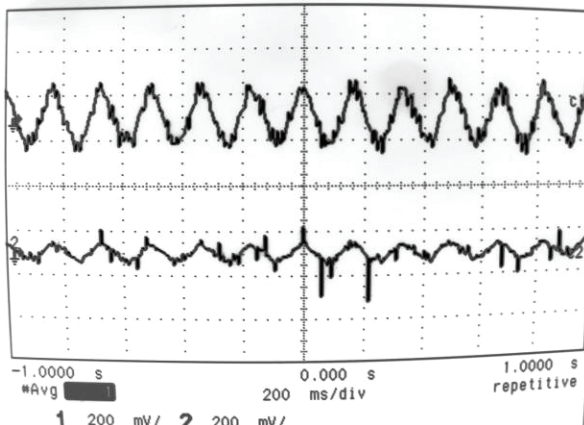
Canal 1 200[mV/div]
 Canal 2 200[mV/div]
 200[ms/div]

Frecuencia de excitación: 5[Hz]



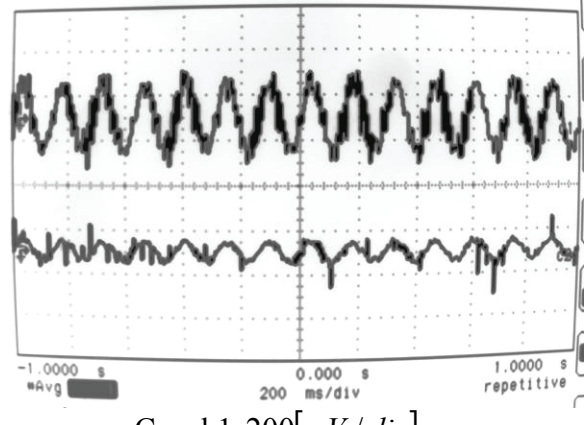
Canal 1 200[mV/div]
 Canal 2 200[mV/div]
 200[ms/div]

Frecuencia de excitación: 6[Hz]



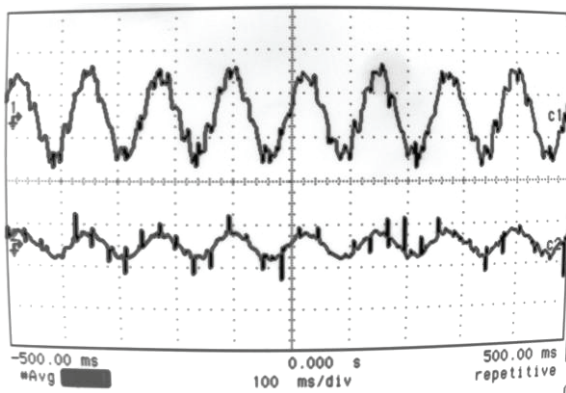
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 7[Hz]



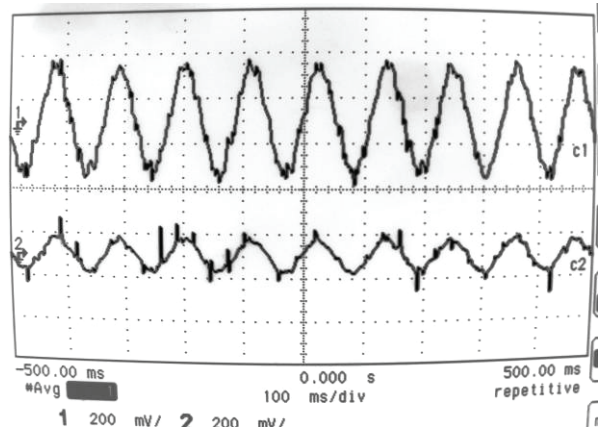
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 8[Hz]



Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
100[ms / div]

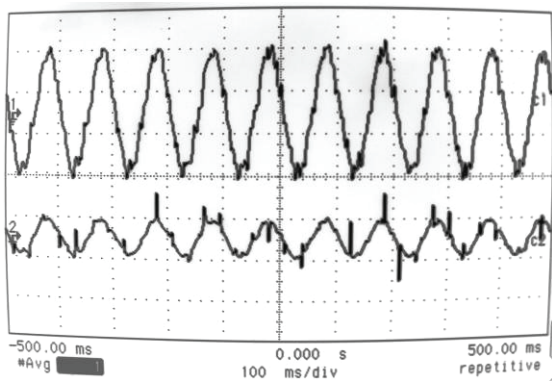
Frecuencia de excitación: 9[Hz]



Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
100[ms / div]

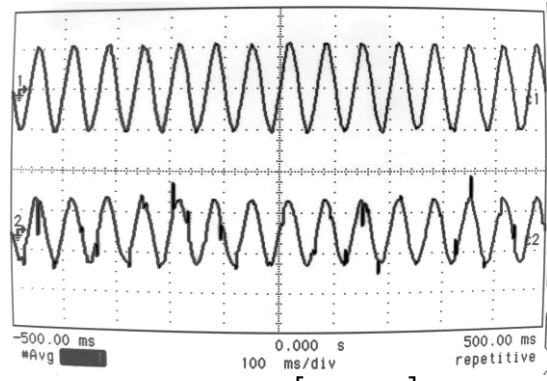
Canal 1 (superior): Acelerómetro ADXL103
Canal 2 (inferior): Acelerómetro ADXL330

Frecuencia de excitación: 10[Hz]



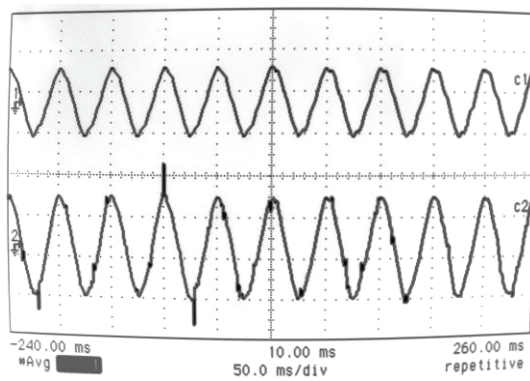
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
100[ms / div]

Frecuencia de excitación: 15[Hz]



Canal 1 500[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
100[ms / div]

Frecuencia de excitación: 20[Hz]



Canal 1 1[V / div]
Canal 2 200[mV / div]
50[ms / div]

Canal 1 (superior): Acelerómetro ADXL103
Canal 2 (inferior): Acelerómetro ADXL330

Debido a los resultados obtenidos, los acelerómetros que se eligieron para realizar la obtención de aceleraciones en las estructuras de prueba son los Analog Devices modelo ADXL103CE.

5.1.2 Funcionamiento del acelerómetro ADXL103

El ADXL103 es un sistema de aceleración completo en un circuito integrado monolítico simple. Contiene un sensor de polisilicio micro-maquinado en superficie y un circuito acondicionador de señal para implementar una arquitectura de medición de aceleración de lazo abierto. La señal de salida es una tensión analógica proporcional a la aceleración. El ADXL103 es capaz de medir aceleraciones positivas y negativas de por lo menos $\pm 1.7[g]$. El acelerómetro puede medir fuerzas de aceleración estáticas como la gravedad, permitiendo ser usado como sensor de inclinación.

El sensor es una estructura de polisilicio micro-maquinado en superficie construido sobre una oblea de silicio. Resortes de polisilicio suspenden la estructura sobre la superficie de la oblea y proveen una resistencia contra las fuerzas de aceleración. La deflexión de la estructura es medida usando un capacitor diferencial que consiste de placas fijas independientes y placas adheridas a la masa movable. Las placas fijas son manejadas por ondas cuadradas con un desfase de 180° . La aceleración defleca la viga y desbalancea el capacitor diferencial, obteniendo así una onda cuadrada de salida cuya amplitud es proporcional a la aceleración. Las técnicas demoduladoras sensibles a la fase son usadas para rectificar la señal y determinar la dirección de la aceleración.

La salida del demodulador es amplificada y sale del integrado a través de un resistor de $32[k\Omega]$. En este punto, el usuario puede definir el ancho de banda de la señal del dispositivo añadiendo un capacitor. Este filtrado mejora la resolución de la medición y ayuda a prevenir el alias[‡].

5.1.3 Desempeño del Acelerómetro ADXL103

En lugar de utilizar un circuito compensador de temperatura adicional, las técnicas de diseño que han sido usadas aseguran que está construido internamente para un alto desempeño. Como resultado, esencialmente no hay cuantización o comportamiento no monolítico, y la temperatura de histéresis es muy baja (típicamente menor a $10[mg]$ sobre un intervalo de temperatura de $-40[^\circ C]$ a $+125[^\circ C]$).

La estabilidad de sensibilidad es óptima para $V_s = 5[V]$, pero sigue siendo muy buena sobre el intervalo especificado, esto es típicamente mejor que $\pm 1\%$ sobre la temperatura a $V_s = 3[V]$.

[‡] Efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se les muestrea digitalmente.

El ADXL103 tiene las siguientes características:

Entrada del censor	
Intervalo de medición	$\pm 1.7[g]$
No linealidad a escala completa	$\pm 0.2\%$ a $\pm 1.25\%$
Sensibilidad	
Sensibilidad en la salida	960 a 1040[mV/g], 1000[mV/g] típico
Sensibilidad debido al cambio de temperatura	$\pm 0.3\%$
Nivel de salida a 0[g]	
Tensión a 0[g]	2.5[V] con 5[V] de alimentación
0[g] Offset vs. Temperatura	$\pm 0.1[mg/^{\circ}C]$, con 5[V] de alimentación y a 25°C
Eficiencia al ruido	
Salida de ruido	1 a 3[mV _{rms}] con 5[V] de alimentación y una frecuencia menor a 4[kHz]
Respuesta a frecuencia	
Intervalo de C_x	De 0.002 a 10[μF]
Alimentación	
Intervalo de tensión de operación	De 3 a 6[V], 5[V] típico
Corriente con el censor sin movimiento	0.7 a 1.1[mA]
Tiempo de encendido	20[ms]

Tabla 6 Características acelerómetro ADXL103

5.2 Selección del acondicionador para los acelerómetros ADXL103

El acondicionador que se decidió usar es una tarjeta acondicionadora ya usada previamente en proyectos anteriores de la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se le hicieron pocas modificaciones.

5.2.1 Descripción de la tarjeta acondicionadora para los acelerómetros ADXL103

Esta parte del circuito es la que alimenta al transductor:

En la figura 26, una tensión V_{ref} es aplicada por medio del resistor R201, el cual se conecta con el potenciómetro VR201, que sirve para fijar una tensión de referencia. El cursor de dicho potenciómetro se conecta a la entrada no inversora del amplificador operacional U1A.

Este amplificador operacional tiene una configuración de amplificador no inversor con un limitador de corriente con el Darlington Q201 y el transistor Q102, y da una ganancia de:

$$A = \frac{R205}{R206} + 1 = 2$$

Y la corriente máxima es:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{V_{BE}}{R204} = \frac{0.7[V]}{4.7[\Omega]} = 148.93[mA]$$

Se conecta un capacitor C201 entre tierra y la resistencia R204 para evitar cambios en la tensión.

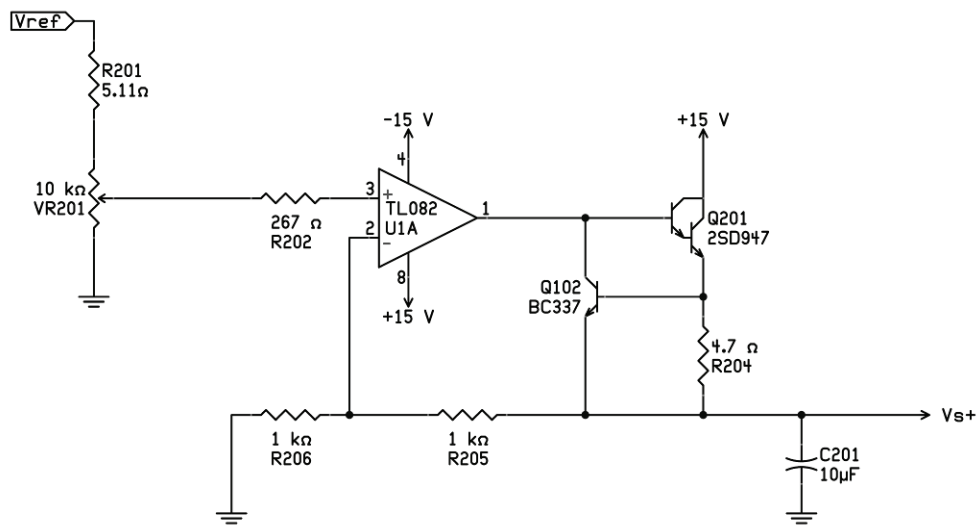


Figura 26 Circuito alimentador para el transductor

La siguiente parte del circuito es la que acondiciona la señal del transductor:

En la figura 27 se observa que se inyecta la señal del transductor por In+ e In-, y se le suma una tensión que viene del potenciómetro VR202 que está polarizado con Vs+ y Vs- para eliminar alguna tensión de corriente directa (offset) que pudiera tener la señal del transductor.

El amplificador de instrumentación U2 está en configuración diferencial, y tiene una ganancia dada por el resistor R104. En este caso, la ganancia es de 1.62.

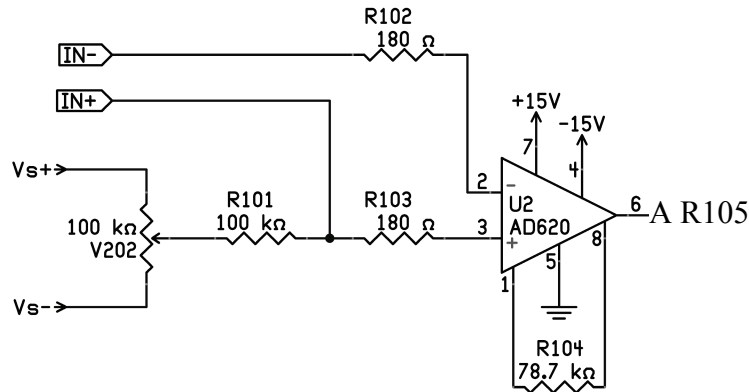


Figura 27 Circuito de entrada de la señal del transductor

La salida U2-6 está conectada a un filtro activo (ver figura 28), formado por el amplificador operacional U3A, los resistores R105 y R106, y los capacitores C101 y C102.

La frecuencia de corte de este filtro es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100[k\Omega])(0.1[\mu F])} = 15.91[Hz]$$

Donde R105 y R106 tienen la misma resistencia, y C101 con C102 tienen el mismo valor.

El filtro tiene también una ganancia dada por la resistencia R107 y R108:

$$A = \frac{R107}{R108} + 1 = \frac{21[k\Omega]}{35.7[k\Omega]} + 1 = 1.588$$

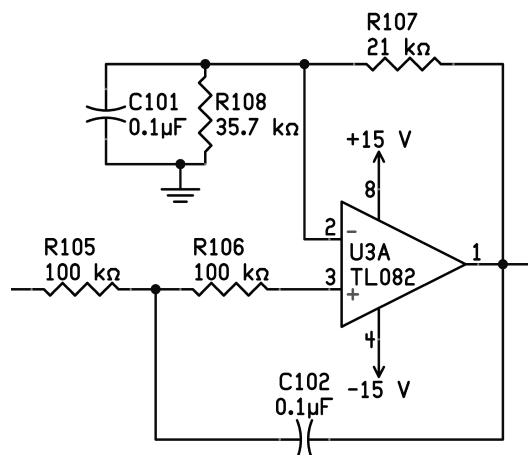


Figura 28 Filtro paso bajas activo con ganancia

En la figura 29 se observa que la salida U3A-1 se conecta al amplificador operacional U3B-5 (entrada no inversora). Dicho amplificador operacional tiene una configuración de amplificador no inversor, y la resistencia que va de entrada inversora a tierra puede ser seleccionada para poder tener diferentes ganancias. Las ganancias posibles son:

$$A_1 = \frac{R_{111}}{\infty} + 1 = 1$$

$$A_3 = \frac{R_{111}}{R_{114}} + 1 = \frac{18[k\Omega]}{4.53[k\Omega]} + 1 = 4.97$$

$$A_2 = \frac{R_{111}}{R_{113}} + 1 = \frac{18[k\Omega]}{18[k\Omega]} + 1 = 2$$

$$A_4 = \frac{R_{111}}{R_{115}} + 1 = \frac{18[k\Omega]}{2[k\Omega]} + 1 = 10$$

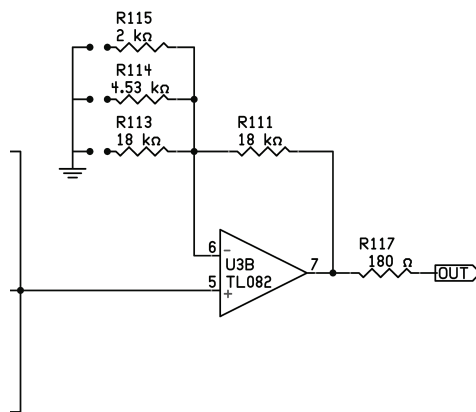


Figura 29 Circuito con ganancia ajustable

El circuito que acondiciona la señal del transductor completo se puede observar en la figura 30.

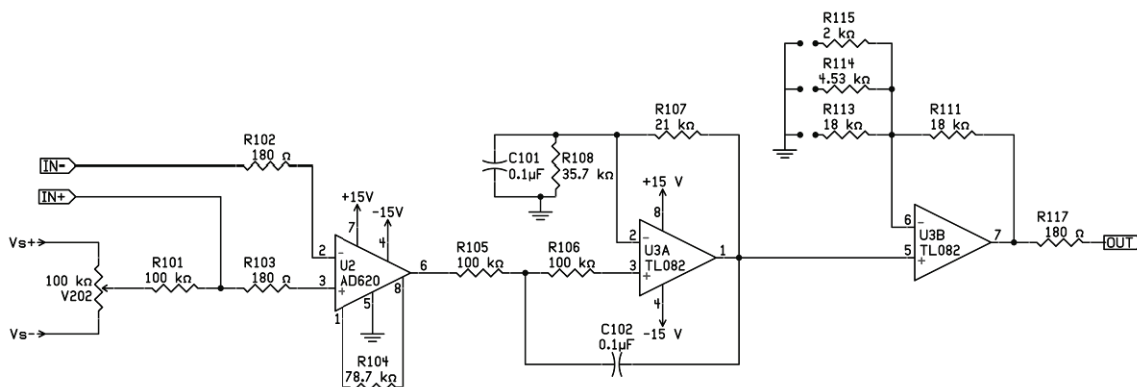


Figura 30 Circuito acondicionador de la señal del transductor

El circuito impreso es el que se muestra en la figura 31.

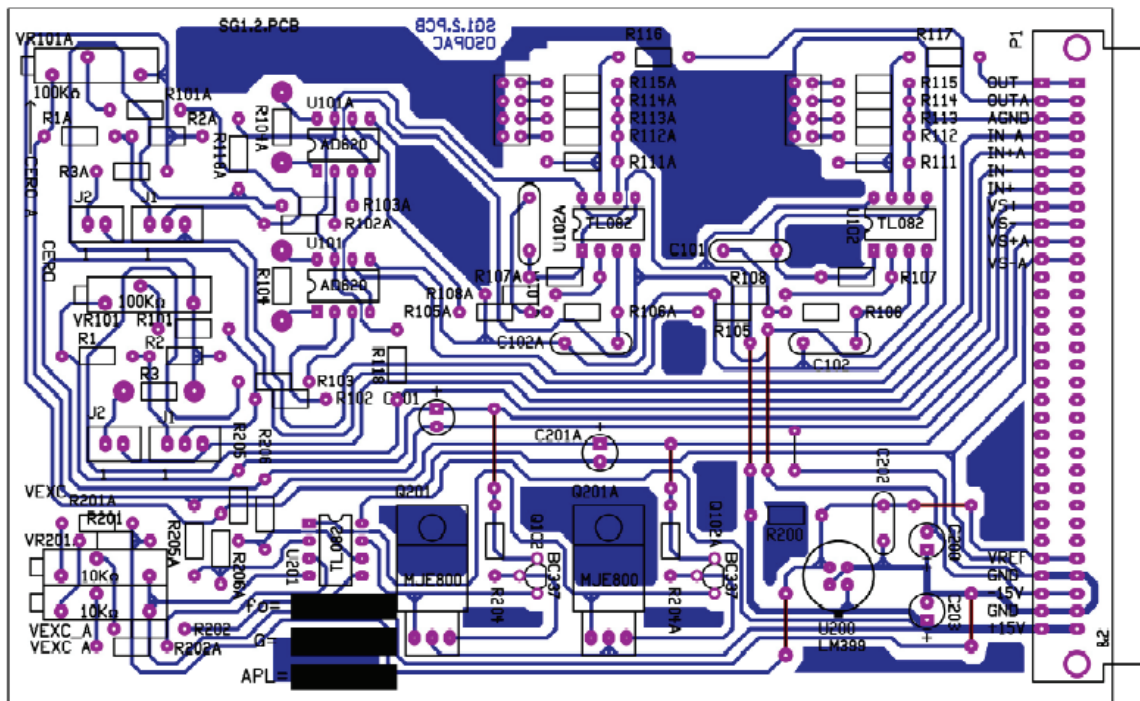


Figura 31 Circuito impreso de la tarjeta acondicionadora para los acelerómetros ADXL103

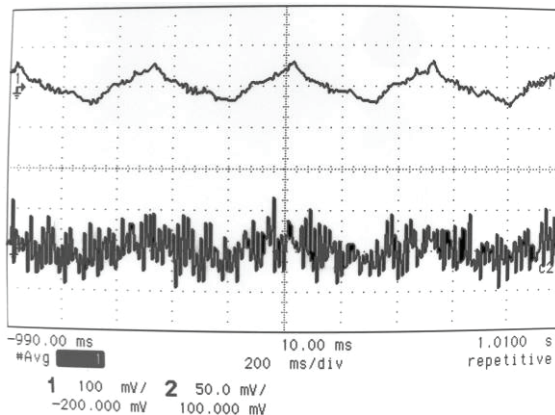
Este circuito impreso tiene dos circuitos acondicionadores idénticos.

5.3 Pruebas de las tarjetas

5.3.1 Pruebas de la tarjeta acondicionadora para los acelerómetros ADXL103

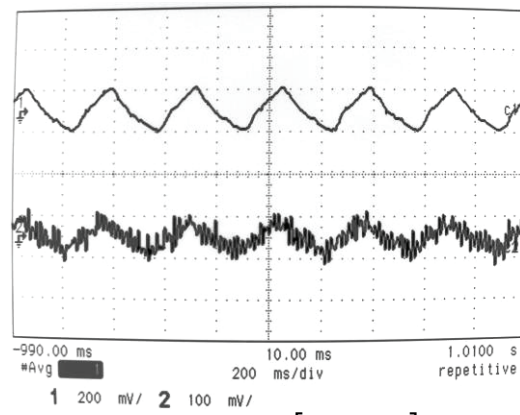
Las pruebas se realizaron con el vibrador excitador Ling Dynamic Systems modelo 227L el cual está conectado a un generador de señales. La excitación fue una señal senoidal, se utilizó en el canal 1 el acelerómetro ADXL103 (superior) y en el canal 2 el acelerómetro ADXL330 (inferior) para comparación. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Frecuencia de excitación: 2[Hz]



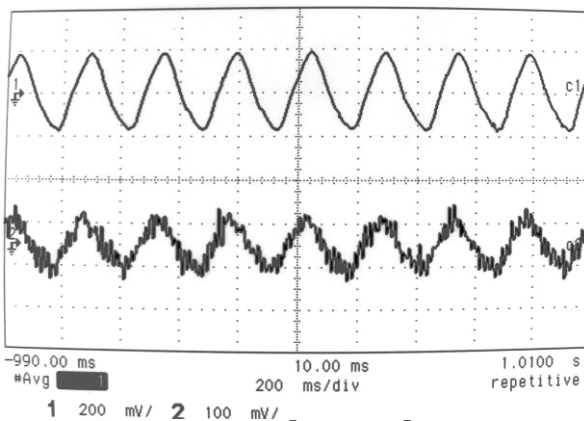
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 100[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 3[Hz]



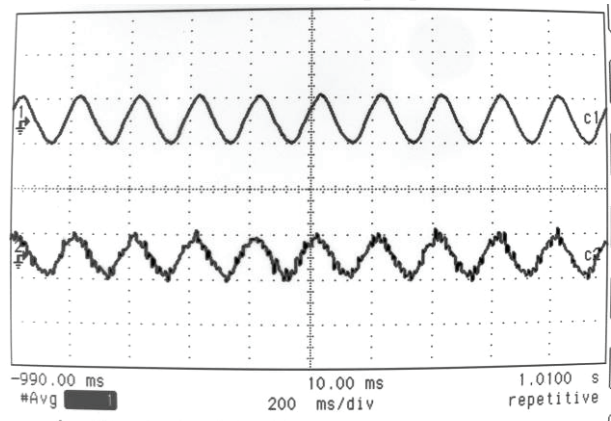
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 100[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 4[Hz]



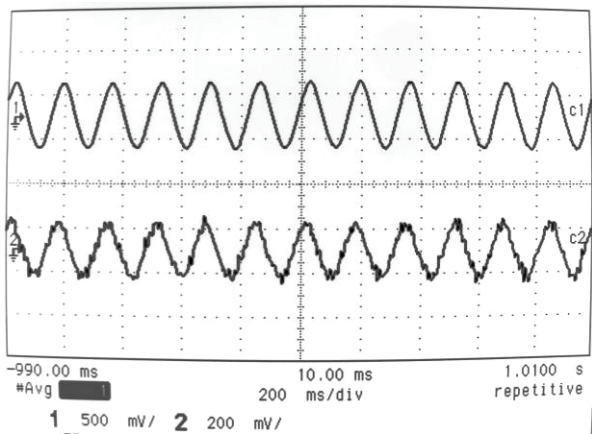
Canal 1 200[mV / div]
Canal 2 100[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 5[Hz]



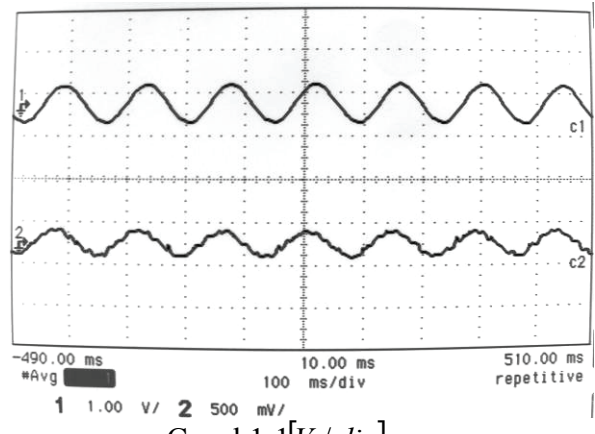
Canal 1 500[mV / div]
Canal 2 200[mV / div]
200[ms / div]

Frecuencia de excitación: 6[Hz]



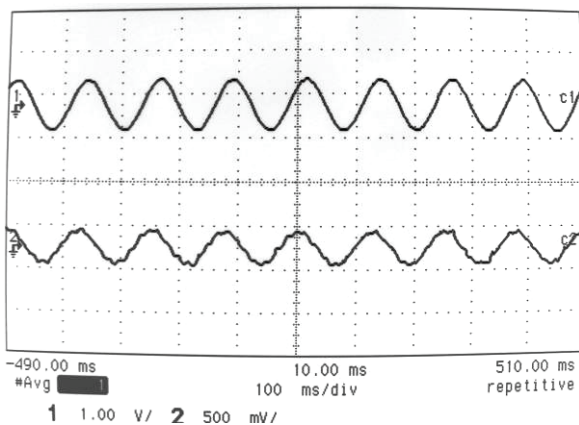
Canal 1 500[mV/div]
Canal 2 200[mV/div]
200[ms/div]

Frecuencia de excitación: 7[Hz]



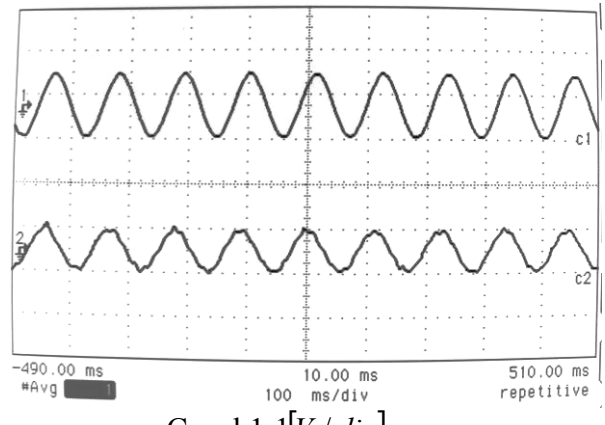
Canal 1 1[V/div]
Canal 2 500[mV/div]
100[ms/div]

Frecuencia de excitación: 8[Hz]



Canal 1 1[V/div]
Canal 2 500[mV/div]
100[ms/div]

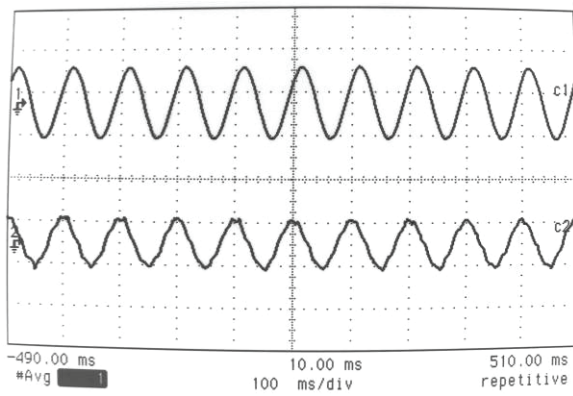
Frecuencia de excitación: 9[Hz]



Canal 1 1[V/div]
Canal 2 500[mV/div]
100[ms/div]

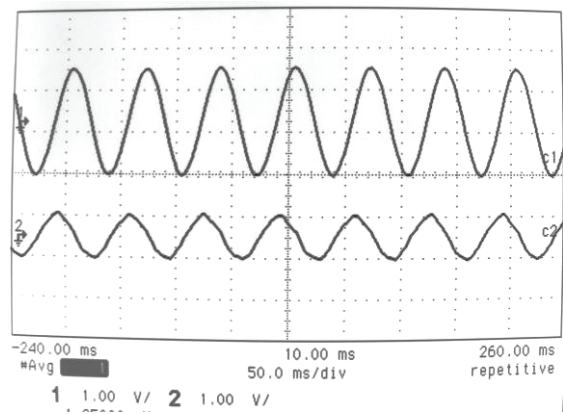
Canal 1 (superior): Acelerómetro ADXL103
Canal 2 (inferior): Acelerómetro ADXL330

Frecuencia de excitación: 10[Hz]



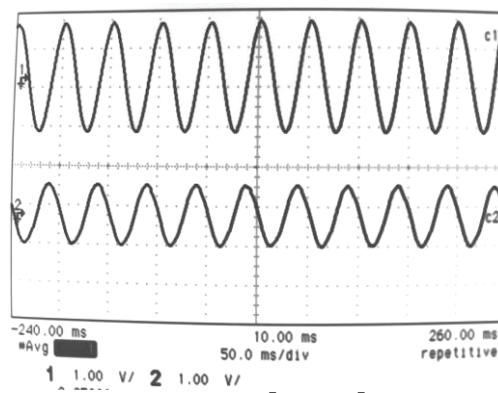
Canal 1 1[V / div]
Canal 2 500[mV / div]
100[ms / div]

Frecuencia de excitación: 15[Hz]



Canal 1 1[V / div]
Canal 2 1[V / div]
50[ms / div]

Frecuencia de excitación: 20[Hz]



Canal 1 1[V / div]
Canal 2 1[V / div]
50[ms / div]

Canal 1 (superior): Acelerómetro ADXL103

Canal 2 (inferior): Acelerómetro ADXL330

Podemos observar que las señales de los acelerómetros mejoraron respecto a las no filtradas, por lo que las tarjetas acondicionadoras funcionaron de manera correcta.

5.3.2 Pruebas de la tarjeta acondicionadora del acelerómetro y del transductor magnetostrictivo de control

Estas pruebas se hicieron simulando la salida de los transductores a utilizar. Se utilizó un generador de señales para simular a los transductores, y se observaron las señales por medio de un osciloscopio, como se muestra en la figura 32.

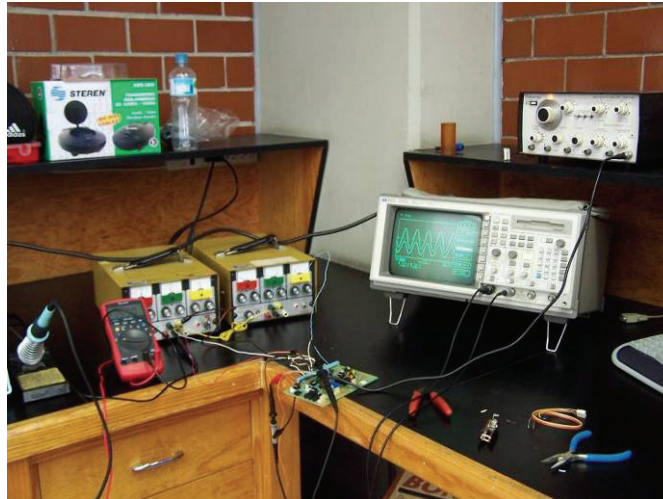


Figura 32 Pruebas a la tarjeta acondicionadora realizada en el laboratorio

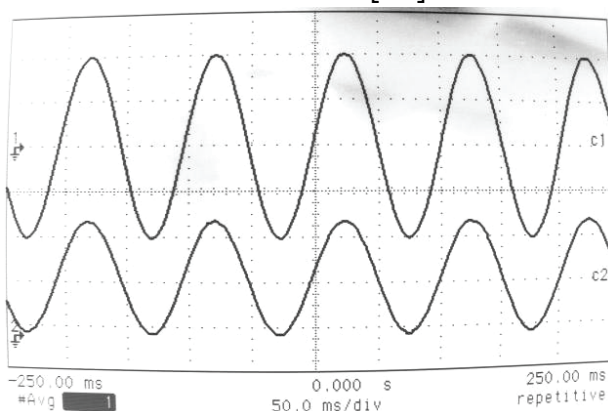
La señal simulada del acelerómetro fue una señal senoidal de aproximadamente $2[V_{pp}]$ con una tensión de corriente directa (offset).

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Canal 1 (Superior): Señal de salida de la tarjeta (señal de realimentación deseada)

Canal 2 (Inferior): Señal simulada de la señal de salida del acelerómetro.

Frecuencia de excitación: $10[Hz]$

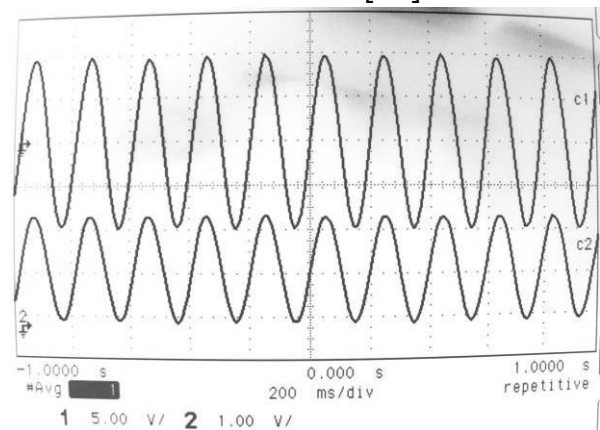


Canal 1 $5[V/div]$

Canal 2 $1[V/div]$

$50[ms/div]$

Frecuencia de excitación: $5[Hz]$



Canal 1 $5[V/div]$

Canal 2 $1[V/div]$

$200[ms/div]$