



Universidad Industrial de Santander  
Modelo Electrónico Funcional de Laboratorio para la Generación  
y monitorización de señales piezoactuadas en ductos metálicos.

# **MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL A NIVEL DE LABORATORIO, PARA LA GENERACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES PIEZOACTUADAS EN DUCTOS METÁLICOS**

**Por:**

**JOHN LEONARDO QUIROGA PINEDA  
WILSON ARLEY BARAJAS BARAJAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010



Universidad Industrial de Santander  
Modelo Electrónico Funcional de Laboratorio para la Generación  
y monitorización de señales piezoactuadas en ductos metálicos.

# **MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL A NIVEL DE LABORATORIO, PARA LA GENERACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES PIEZOACTUADAS EN DUCTOS METÁLICOS**

**JOHN LEONARDO QUIROGA PINEDA  
WILSON ARLEY BARAJAS BARAJAS**

Trabajo de Grado presentado como Requisito  
para optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director:

**PHD. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA**

Codirector:

**MsC(c). WILMER ALEXIS SANDOVAL CÁCERES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010



# Dedicatoria

*A mi familia, que han sido mi apoyo y mi motivación durante mis estudios. Mi mamá, mi papá, Edwin y Anderson.  
A Jesucristo quien es mi Señor y mi Salvador,  
y quien llena mi vida.*

*John Leonardo Quiroga Pineda.*

*A Dios nuestro señor que me ha permitido alcanzar mis metas.  
A mi esposa Cecilia y a mi hija Sofía por su comprensión y apoyo  
durante esta etapa de mi vida. A mis padres Olga y Pedro, por su  
gran amor, dedicación y apoyo incondicional.*

*Wilson Arley Barajas.*



Universidad Industrial de Santander  
Modelo Electrónico Funcional de Laboratorio para la Generación  
y monitorización de señales piezoactuadas en ductos metálicos.

## Agradecimientos

Agradecemos a cada una de las personas que contribuyeron de forma directa en el desarrollo de este proyecto, al Profesor Rodolfo Villamizar Mejía, Wilmer Alexis Sandoval, Luis Eduardo Mujica, y a Jairo Mantilla y Guillermo Galindez.

De manera especial a los compañeros que con sus aportes, sugerencias y acompañamiento participaron en la elaboración de este trabajo, entre ellos se destacan, William Valenzuela, John Angulo, Cesar Almeida.



# Contenido

<b>I. introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>II. definición del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>III. marco conceptual y antecedentes .....</b>	<b>2</b>
3.1. Efecto piezoeléctrico.....	2
3.2. Antecedentes .....	2
<b>IV. selección y caracterización de los piezoeléctricos .....</b>	<b>2</b>
4.1. Selección de los piezoeléctricos. ....	2
4.2. Caracterización de los piezoeléctricos .....	3
4.3. Velocidad de respuesta de los piezoeléctricos .....	5
4.4. Identificación paramétrica del circuito equivalente R L C del piezoeléctrico. ....	5
4.5 Medición de la señal mecánica vibratoria propagada .....	6
<b>V. MODELO FUNCIONAL DE LABORATORIO .....</b>	<b>7</b>
5.1. Módulo 1. Adquisición y visualización.....	7
5.2. Modulo 2. Acondicionamiento Actuación. ....	8
5.2.1. Etapa Aislamiento. ....	8
5.2.2. Etapa de Amplificación.....	9
5.2.3 Etapa de Seguidor de tensión.....	9
5.3. Módulo 3. Acondicionamiento Sensado.....	9
5.3.1 Etapa1 Acoplamiento de impedancias.....	10



5.3.2 Etapa2 Amplificación. ....	10
5.3.3 Etapa3 Filtrado.....	10
5.3.4 Etapa4 Aislamiento. ....	11
5.4. Fuente de alimentación.....	11
5.5. Resultados finales.....	11
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>12</b>
<b>VII. REFERENCIAS.....</b>	<b>13</b>
<b>VIII. BIOGRAFIA.....</b>	<b>14</b>



## Lista de Tablas

<b>Tabla 1. Características dispositivos piezoeléctricos.....</b>	<b>3</b>
<b>Tabla 2. Voltajes sensados para el esquema de la figura 3.....</b>	<b>4</b>
<b>Tabla 3. Parámetros de operación del sistema.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 4. Características principales ISO 124.....</b>	<b>8</b>

## Lista de Figuras.

<b>Fig 1. Circuito equivalente de un cristal piezoeléctrico .....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2: Piezoeléctricos disponibles en el mercado local.....</b>	<b>3</b>
<b>Fig 3. Montajes experimentales utilizados para la caracterización de los piezoeléctricos en sus dos modos de operación actuador y sensor.....</b>	<b>3</b>
<b>Fig 4. Piezoeléctricos en sus modos de operación, actuador y sensor. ....</b>	<b>4</b>
<b>Fig 5. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.b. ....</b>	<b>4</b>
<b>Fig 6. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.c .....</b>	<b>4</b>
<b>Fig 7. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.d. ....</b>	<b>4</b>
<b>Fig 8. Curva característica obtenida para los montajes .....</b>	<b>5</b>
<b>Fig 9. Voltaje y frecuencia máximos para la señal de actuación. ....</b>	<b>5</b>
<b>Fig 10. Montaje experimental utilizado para la medición de la corriente en resonancia.....</b>	<b>6</b>
<b>Fig 11. Ondas de tensión y corriente en el piezoeléctrico .....</b>	<b>6</b>
<b>Fig 12. Esquema del sistema de pruebas implementado.....</b>	<b>7</b>
<b>Fig 13. Amplitud de la señal sensada para el esquema de la figura 12 .....</b>	<b>7</b>
<b>Fig 14. Esquema del modelo electrónico funcional.....</b>	<b>7</b>
<b>Fig 15. Esquema del modelo electrónico desarrollado. ....</b>	<b>7</b>
<b>Fig 16. Diagrama de bloques para la generación y adquisición de la señal mecánica vibratoria. ....</b>	<b>8</b>
<b>Fig 17. Señal Vibratoria Periódica programada.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 18. Etapas modulo actuación.....</b>	<b>8</b>

<b>Fig 19. Etapa de aislamiento del actuador.....</b>	<b>8</b>
<b>Fig 20. Amplificador puente.....</b>	<b>9</b>
<b>Fig 21. Salida diferencial del amplificador puente cuando se aplica el producto de dos senoidales a diferente frecuencia .....</b>	<b>9</b>
<b>Fig 22. Seguidor de voltaje circuito actuador.....</b>	<b>9</b>
<b>Fig 23. Etapas módulo de sensado .....</b>	<b>10</b>
<b>Fig 24. Acople de impedancias circuito sensor. ....</b>	<b>10</b>
<b>Fig 25. Filtro NOTCH a 60Hz.....</b>	<b>10</b>
<b>Fig 26. Señal de salida del filtro notch.....</b>	<b>10</b>
<b>Fig 27. Esquema de la etapa de aislamiento del circuito sensor.....</b>	<b>11</b>
<b>Fig 28. Esquema fuentes de alimentación.....</b>	<b>11</b>
<b>Fig 29. Módulo de actuación.....</b>	<b>11</b>
<b>Fig 30. Módulo de sensado. ....</b>	<b>12</b>
<b>Fig 31. Pruebas modelo electrónico de laboratorio.....</b>	<b>12</b>
<b>Fig 32. Señales generada y sensada a 40Hz.....</b>	<b>12</b>



## Resumen Ejecutivo del Trabajo de Grado

**TÍTULO:** MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL DE LABORATORIO PARA LA GENERACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES PIEZOACTUADAS EN DUCTOS METALICOS†

**AUTORES:** John Leonardo Quiroga Pineda, Wilson Arley Barajas Barajas,‡

**PALABRAS CLAVES:** Sensores piezoeléctricos, actuadores piezoeléctricos, adquisición de datos, acondicionamiento de señales.

Este artículo describe la construcción de un modelo electrónico funcional a nivel de laboratorio, para la generación y monitorización de señales piezo-actuadas en ductos metálicos. El modelo consta de dos circuitos de acondicionamiento y un circuito de alimentación.

Para la realización de tales circuitos de acondicionamiento se caracterizaron los sensores y actuadores piezoeléctricos, con el fin de determinar los rangos de tensión y corriente a los que se deben acondicionar. Así mismo se tuvo en cuenta los niveles de tensión y corriente a los que se debe acondicionar las señales para ser adquiridas y visualizadas mediante una tarjeta de adquisición de datos y el PC.

De esta manera se construyó un circuito para acondicionar una señal programada desde PC y entregar esta a un piezoactuador en los niveles de tensión y corriente necesarios para que inducir una señal mecánica vibratoria. También se construyó un circuito que sensa una señal de voltaje generada por los piezo-sensores colocados a lo largo de una tubería metálica de prueba para ser almacenados y visualizados en un PC. Desde el PC se pueden observar las señales del sensor y actuador respectivamente haciendo uso de SIMULINK/MATLAB. El modelo funcional permite obtener datos experimentales de una tubería piezoactuada a nivel de laboratorio, los que serán utilizados en un proyecto de investigación cuyo objetivo es la monitorización experta de salud estructural en tuberías de gas, a cargo del grupo de investigación CEMOS.

---

† Trabajo de grado desarrollado en la modalidad de investigación.

‡ Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía. Co director: MsC(c). Wilmer Alexis Sandoval.



## Abstract of the Undergraduate Project

**TITLE:** ELECTRONIC FUNCTIONAL MODEL OF LABORATORY LEVEL FOR THE GENERATION AND MONITORING OF PIEZOACTUATED SIGNALS IN METALLIC PIPELINES.<sup>†</sup>

**AUTHOR:** John Leonardo Quiroga Pineda, Wilson Arley Barajas Barajas,<sup>‡</sup>

**KEYWORDS:** Piezoelectric sensors, piezoelectric actuators, data acquisition, signal conditioning.

This article describes the construction of a electronics functional model for being used at laboratory level, with capacity to generate and monitore piezo-actuated signals in metal ducts. The model consists of two conditioning circuitry and a power circuit. To achieve these conditioning circuits, it was characterized piezoelectric sensors and actuators to determine the voltage and current ranges to be conditioned. The level of voltage and current that the data acquisition card can handle was also taken into account.

Thus we built a circuit for conditioning a scheduled signal from PC and to deliver this to a piezoactuator in voltage and current levels to induce a mechanical vibration signal. It was also constructed a circuit that senses a voltage signal generated by piezoelectric sensors placed along a test pipe to be stored and viewed on a PC. From the PC can see the sensor and actuator signals respectively using SIMULINK / MATLAB. The functinal model allows obtaining experimental data from a piezo-actuated pipe for use in the test lab, which will be used in a research project aimed at expert monitoring of structural health on gas pipelines. By the research group CEMOS.

---

<sup>†</sup> Final undergraduate Project developed in the research modality.

<sup>‡</sup> Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía. Co-director: MsC(c). Wilmer Alexis Sandoval.

# Modelo electrónico funcional para la generación y monitorización de señales piezoactuadas en ductos metálicos.

John L. Quiroga, Wilson A. Barajas, MsC (c) Wilmer A. Sandoval, PhD. Rodolfo Villamizar

**Resumen:** Este artículo describe la construcción de un modelo electrónico funcional a nivel de laboratorio, para la generación y monitorización de señales piezo-actuadas en ductos metálicos. El modelo consta de dos circuitos de acondicionamiento y un circuito de alimentación.

Para la realización de tales circuitos de acondicionamiento se caracterizaron los sensores y actuadores piezoeléctricos, con el fin de determinar los rangos de tensión y corriente a los que se deben acondicionar. Así mismo se tuvo en cuenta los niveles de tensión y corriente a los que se debe acondicionar las señales para ser adquiridas y visualizadas mediante una tarjeta de adquisición de datos y el PC.

De esta manera se construyó un circuito para acondicionar una señal programada desde PC y entregar esta a un piezoactuador en los niveles de tensión y corriente necesarios para inducir una señal mecánica vibratoria. También se construyó un circuito que acondiciona una señal de voltaje generada por los piezo-sensores colocados a lo largo de una tubería metálica de prueba, para ser almacenados y visualizados en un PC. Desde el PC se pueden observar las señales del sensor y actuador respectivamente haciendo uso de SIMULINK/MATLAB. El modelo funcional permite obtener datos experimentales de una tubería piezoactuada a nivel de laboratorio, los que serán utilizados en un proyecto de investigación cuyo objetivo es la monitorización experta de salud estructural en tuberías de gas, a cargo del grupo de investigación CEMOS.

**Palabras clave:** Sensores piezoeléctricos, actuadores piezoeléctricos, adquisición de datos, acondicionamiento de señales.

**Abstract:** This article describes the construction of a electronics functional model for being used at laboratory level, with capacity to generate and monitore piezo-actuated signals in metal ducts. The model consists of two conditioning circuitry and a power circuit. To achieve these conditioning circuits, it was characterized piezoelectric sensors and actuators to determine the voltage and current ranges to be conditioned. The level of voltage and current that the data acquisition card can handle was also taken into account.

Thus we built a circuit for conditioning a scheduled signal from PC and to deliver this to a piezoactuador in voltage and current levels to induce a mechanical vibration signal. It was also constructed a circuit that conditions a voltage signal generated by piezoelectric sensors placed along a test pipe to be stored and viewed on a PC. From the PC can see the sensor and actuator signals respectively using SIMULINK / MATLAB. The functional model allows obtaining experimental data from a piezo-actuated pipe for use in the test lab,

which will be used in a research project aimed at expert monitoring of structural health on gas pipelines. By the research group CEMOS.

**Keywords:** Piezoelectric sensors, piezoelectric actuators, data acquisition, signal conditioning.

## I. INTRODUCCIÓN

Las tuberías usadas para el transporte de fluidos tales como gas, el petróleo y sus derivados, requieren ser constante monitorizadas con el fin de conocer su estado de salud estructural. Las empresas encargadas de su operación actualmente no disponen de herramientas de inspección, que combinen las dos características más importantes; alto desempeño y economía. Actualmente las labores de inspección se realizan en el mejor de los casos solo una vez al año, debido al elevado costo de adquisición y/o contratación de las herramientas que sean confiables para esta labor.

El anterior problema ha motivado el grupo de investigación CEMOS de la UIS ha investigar sobre una posible solución para esta aplicación, que consiste en disponer de una herramienta capaz de evaluar deformaciones en un gasoducto basada en vibraciones mecánicas inducidas y sensadas a lo largo de este usando herramientas computacionales para el procesamiento y razonamiento [1]-[3]. Sin embargo para el desarrollo de esta herramienta se requiere validar experimentalmente el algoritmo usado para la evaluación, por lo que en el presente artículo se muestra detalladamente el modelo electrónico desarrollado para tal propósito.

## II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad no se cuenta con una herramienta que integre el uso de piezoeléctricos (en modos de actuador y sensor) con un sistema de adquisición de propósito general, a nivel de laboratorio con la capacidad de piezoactuar y adquirir las vibraciones resultantes a lo largo del objeto piezoactuado.

Por tal razón se diseñó y construyó un modelo electrónico funcional a nivel de laboratorio, que integra el uso de materiales piezoeléctricos, operando uno en modo de actuador y los demás en modo de sensores, con hardware propio y comercial para la adquisición y almacenamiento de las señales sensadas. Este modelo posibilita el desarrollo de

pruebas de laboratorio de algoritmos propuestos para la monitorización de salud estructural basada en la piezoactuación. La principal motivación para el desarrollo de este proyecto fue la disponibilidad comercial de los dispositivos piezoeléctricos de bajo costo y de hardware de propósito general para la adquisición y almacenamiento de datos desde PC como lo son las tarjetas NI PCI6025E.

### III. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES

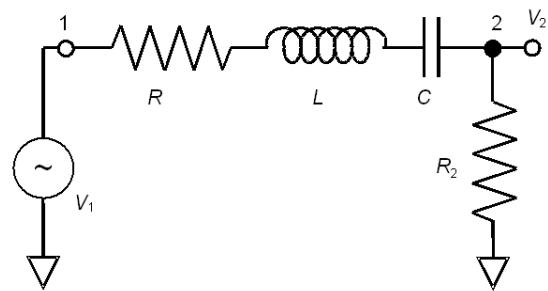
#### 3.1. Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico se debe a la propiedad de ciertos materiales de producir una tensión a lo largo de sus ejes cristalográficos cuando se les aplica una presión mecánica (el efecto piezoeléctrico directo). Hay un reordenamiento de las cargas internas, tanto positivas como negativas, y por ende produce un potencial eléctrico. La tensión eléctrica es proporcional a la deformación y depende en gran medida de la dirección en que se aplique dicha deformación. El efecto inverso ocurre cuando se aplica un potencial eléctrico al cristal piezoeléctrico, este se deforma [4], [5].

Sin embargo los piezoeléctricos son dispositivos de *alta impedancia*, por lo que suministran corrientes muy pequeñas. Estos dispositivos no tienen una buena respuesta a la aplicación de una fuerza constante, pero su respuesta es adecuada para la medición de fuerzas mecánicas variables. Su respuesta en frecuencia va desde unos pocos Hertz hasta el nivel de Mega Hertz.

En la actualidad se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, como el BaTiO<sub>3</sub> y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT), los cuales pertenecen al grupo de materiales cerámicos ferro eléctricos policristalinos [6]-[8].

La respuesta en frecuencia de estos materiales no es plana, es decir, hay ciertas frecuencias para las que la transferencia de energía eléctrica-mecánica es máxima, y otras en las que es mínima. En este sentido, el piezoeléctrico se comporta de manera análoga a un circuito eléctrico *RLC* sometido a una excitación de corriente alterna [9]-[11]. El equivalente eléctrico del piezoeléctrico se muestra en la figura 1.



\* Fuente artículo; Diseño, Fabricación y Caracterización de transductores piezoeléctricos de ultrasonido.

Fig 1. Circuito equivalente de un cristal piezoeléctrico.

En donde la relación voltaje corriente se puede modelar mediante la siguiente ecuación.

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV1}{dt} \quad (1)$$

#### 3.2. Antecedentes.

Entre los proyectos donde se han utilizado actuadores piezoeléctricos se destacan la construcción de una válvula piezoeléctrica de acondicionamiento para la modulación de líquido [12].

Otra aplicación es la fabricación de transformadores eléctricos [13]. Igualmente han sido utilizados en la reducción de ruidos dañinos en ciertos sistemas. Una aplicación relacionada se encuentra en la reducción de ruido acústico en las máquinas de reluctancia [14].

En robótica también se han utilizado para producir movimiento a robots tales como los miniatura [15]. Un ejemplo de esta aplicación se hizo en la medicina donde se han construido prototipos de robots miniatura que pueden entrar en cavidades o capilares angostos y hacer diagnósticos [16]. Otro ejemplo de aplicaciones de este tipo fue el dar movimiento a un prototipo de lombriz para la búsqueda de anomalías en pacientes, de forma intrusiva, funcionando así como un endoscopio inalámbrico [17]. Otras áreas en donde se hace uso de la piezoelectricidad son: Óptica, fotónica y tecnología de medición. Estabilización de imagen, alineación y conexión de fibra óptica, sintonización de laser, holografía y estimulación de vibraciones [18]-[21].

#### iv. selección y caracterización de los piezoeléctricos

##### 4.1. Selección de los piezoeléctricos.

Los piezoeléctricos utilizados en el modelo funcional, tanto para la actuación como el sensado son del tipo PZT (usados comúnmente en la fabricación de parlantes). Estos dispositivos

se caracterizan por su bajo costo, variedad de tamaños, formas de conexión y fácil implementación.

El objetivo inicial fue el de adquirir los piezoeléctricos comercialmente disponibles, y luego mediante la realización de pruebas experimentales observar el piezoeléctrico cuyas características se ajustaran a las condiciones de diseño del modelo electrónico.

En el mercado local se encontraron los presentados en la figura 2.

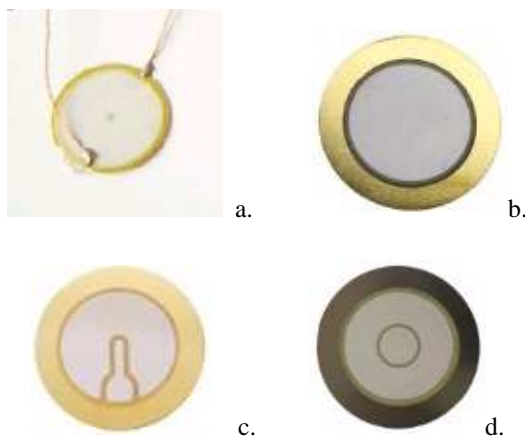


Figura 2: Piezoeléctricos disponibles en el mercado local.

La tabla 1, resume las características principales de operación de estos dispositivos.

PIEZOS	F. Resonancia (Hz)	Impedancia en resonancia ( $\Omega$ )	Max input voltaje (Vpp)	Capacitancia pF a 1kHz	Material	Temperatura de operación ( $^{\circ}$ C)
b.	3700 $\pm$ 500	500	30	20000	ALLOY	-30 a 70
c.	2500 $\pm$ 300	500	30	80000 $\pm$ 30%	BULK	-30 a 70
d.	3200	150	30	30000	BULK	-30 a 70

Tabla 1. Características dispositivos piezoeléctricos.

Los criterios de selección fueron: mayor amplitud de voltaje sentido en un rango de frecuencia entre 0Hz y 2kHz, mayor rango de respuesta plana, mayor inmunidad al ruido y mayor durabilidad.

#### 4.2. Caracterización de los piezoeléctricos.

Para caracterizar y evaluar el desempeño de los piezoeléctricos, se efectuaron las siguientes pruebas.

- i) Barrido en frecuencia desde 0 Hz hasta 2 kHz para diferentes niveles de tensión, con el fin de identificar el piezoeléctrico con una ganancia adecuada. Los resultados obtenidos en esta prueba mostraron que el piezoeléctrico mas adecuado y el que se seleccionó para el modelo electrónico es el mostrado en la figura 2.d.

Para la realización de la prueba anterior se implementaron los montajes experimentales de la figura 3.

La tabla 2 resume los resultados obtenidos de esta prueba. Se aprecia como la tensión sensada para distintos valores de frecuencia obtuvo un comportamiento más uniforme y a más bajas frecuencias para el piezoeléctrico de la figura 2.d. También se muestra como los piezoeléctricos b, c, presentan intervalos de frecuencia en los cuales no se obtuvo señal sensada. Además la señal de tensión sensada por los piezoeléctricos b y c para frecuencias por debajo de 1kHz no mantenía la forma de onda ni la frecuencia de la señal de actuación.

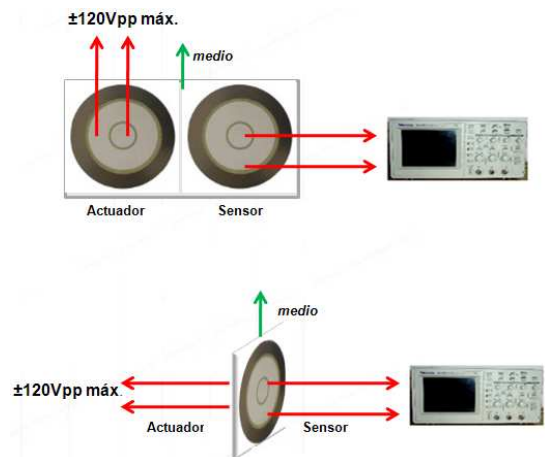


Fig 3. Montajes experimentales utilizados para la caracterización de los piezoeléctricos en sus dos modos de operación actuador y sensor.

PIEZO B		PIEZO C		PIEZO D	
Frec Hz	Vsen mV	Frec Hz	Vsen mV	Frec Hz	Vsen mV
122	26.2	250	2	50	36
143	21.8	460	2	100	44
186	20	540	12.8	170	36
280	18	1580	20	280	34
310	19	1620	22	420	36
345	20	1680	52	620	35
416	18	1690	600	700	27

517	20	1710	200	800	30.4
645	16	1735	50	920	31.2
1520	20	1760	41.6	1060	36
1590	29.2	1820	41.6	1230	34
1610	37	1865	37	1440	37.2
1630	72	1920	32	1700	21
1660	106	2000	50	2010	44
1680	190	2030	43	2016	112

Tabla 2. Voltajes sentidos para el esquema de la figura 3.

Además se realizaron pruebas experimentales sobre dos tuberías de un metro de largo de diferente material, acero A36 y aluminio respectivamente, colocando los piezoeléctricos b, c, d, en modo actuador y en modo sensor a una distancia de 10cm, como se aprecia en la figura 4. Estas tuberías presentan sus modos fundamentales de vibración a bajas frecuencias, por tal razón se consideró de interés el intervalo de frecuencias entre 0Hz y 2kHz.

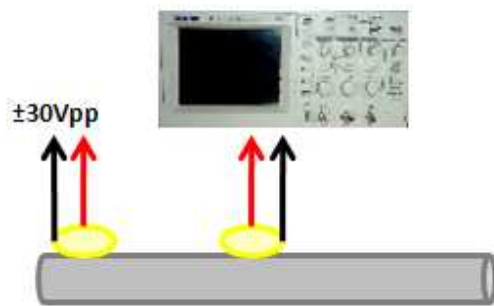


Fig 4. Piezoeléctricos en sus modos de operación, actuador y sensor.

A continuación se presentan algunos resultados de esta prueba.

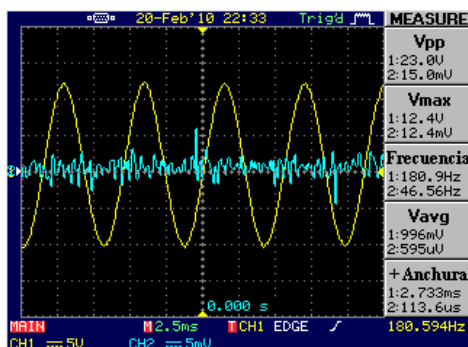


Fig 5. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.b.

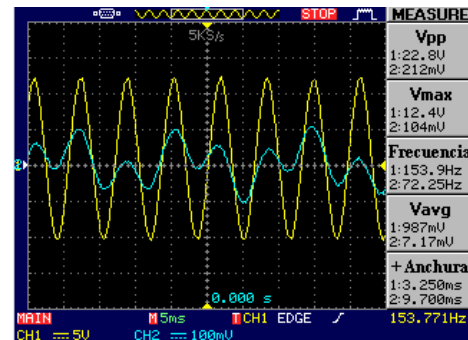


Fig 6. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.c.

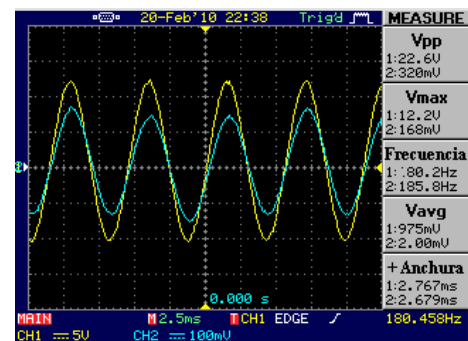


Fig 7. Señal generada y sensada para el piezoeléctrico de la figura 2.d.

Las figuras 5, 6, 7, presentan las señales de actuación (amarilla) y sensado (azul), para los piezoeléctricos b, c, d, respectivamente de la figura 2. Estos resultados, junto con otros obtenidos de realizar el mismo procedimiento a diferentes valores de frecuencia, corroboraron que el piezoeléctrico que se comporta adecuadamente para esta aplicación, es el piezoeléctrico de la figura 2.d.

- i) Adicionalmente se realizaron pruebas sobre una sección de lámina de acero plana con el fin de identificar efectos secundarios en la señal mecánica inducida por el piezoeléctrico, debida a la geometría del tubo. Obteniéndose resultados similares a los antes presentados, es decir la señal sensada presenta mayor amplitud y mayor fidelidad con respecto a la señal actuación en el piezoeléctrico de la figura 2.d.
- ii) Se midió la corriente consumida por el piezoactuador variando la frecuencia desde 0 Hz hasta su valor de frecuencia de resonancia 3.2 kHz, con un valor máximo de 0.1A cuando el piezoeléctrico fue excitado con una tensión de 30Vpp. A esta frecuencia la impedancia del piezoeléctrico es puramente resistiva 150Ω.
- iii) Por último, para el piezoeléctrico seleccionado se realizó un barrido en tensión para tres valores de frecuencia, observándose que la amplitud de la señal sensada mantenía un comportamiento lineal con

respecto a la tensión de entrada en el rango de 0Hz a 2KHz.

De las pruebas realizadas se obtuvo la curva característica que relaciona la variación de la amplitud de la tensión sensada con el aumento de la frecuencia de excitación, para el sistema de pruebas actuador, medio, sensor, mostrados en la figura 3.

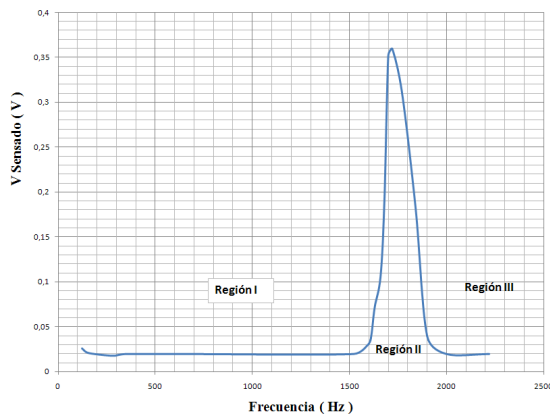


Fig 8. Curva característica obtenida para los montajes de la figura 3.

Para la obtención de esta curva característica se realizó un barrido en frecuencia desde los 0Hz hasta los 2000Hz, tomando muestras a intervalos de 10 Hz. En dicha curva se observan tres regiones:

- La primera de ellas va desde los 120 Hz hasta los 1520 Hz, en esta región la amplitud de la señal sensada es casi constante lo cual hace que esta región sea adecuada para el sensado de la señal.
- La segunda va desde aproximadamente los 1520 Hz hasta los 2000 Hz, en esta región la amplitud de la señal sensada varía considerablemente entre los 20mV y los 366mV, haciendo que esta región no sea adecuada para el sensado de las señales.
- La última parte desde los 2000 Hz hasta un valor de frecuencia en donde nuevamente alcanzaría un valor máximo en la tensión sensada. Esta región no es de interés ya que en este modelo se trabajará con frecuencias por debajo de los 2000 Hz.

#### 4.3. Velocidad de respuesta de los piezoeléctricos

A fin de determinar los rangos de voltaje y de frecuencia adecuados para el funcionamiento de los piezo eléctricos, se realizó un barrido en frecuencia desde 0 hasta 120 kHz y un barrido en tensión desde los 0 voltios hasta 60Vp obteniendo los siguientes resultados.

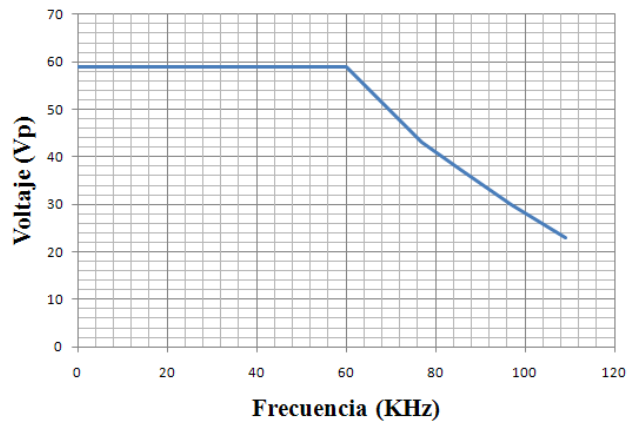


Fig 9. Voltaje y frecuencia máximos para la señal de actuación.

La gráfica anterior muestra la relación existente entre la amplitud de voltaje máxima que se puede aplicar al piezoactuador y el máximo valor de frecuencia admisible, sin que se presente deformación de la señal de actuación. Los resultados obtenidos mostraron que el piezoeléctrico puede ser excitado de forma adecuada para valores de frecuencia entre los 0Hz y los 60KHz aproximadamente, con una amplitud máxima de la señal de actuación de 55Vp. Para frecuencias superiores a 60KHz y menores o iguales a los 109KHz la amplitud mínima de la señal de actuación fue de 23V aproximadamente. Esto se debe a que ha estas frecuencias se presenta una descompensación entre la resistencia de salida del circuito de actuación y la impedancia del piezoeléctrico.

#### 4.4. Identificación paramétrica del circuito equivalente R L C del piezoeléctrico.

Teniendo en cuenta que la corriente consumida por el piezoactuador a la frecuencia de resonancia (3.2 kHz) es de 0.1A y que en tal frecuencia la tensión aplicada y la corriente están en fase (circuito resistivo). Se calculó el valor del parámetro R del piezoeléctrico. La señal de excitación fue una senoidal de amplitud 15 V, y la tensión de resonancia registrada mediante un piezosensor es de 14.96 V. Estos valores se obtuvieron tanto de las características eléctricas del dispositivo dadas por el fabricante y por medio del siguiente esquema experimental.

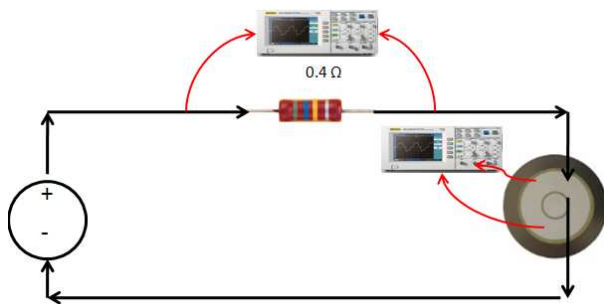


Fig 10. Montaje experimental utilizado para la medición de la corriente en resonancia.

La figura 11 muestra la magnitud de la tensión de actuación (azul) y la corriente consumida por el piezoeléctrico (amarilla). Para la obtención de esta grafica se realizo un barrido en frecuencia desde 0Hz hasta 3619 Hz. La frecuencia de resonancia del piezoactuador se ubica en 3.2kHz según lo expresa el fabricante del dispositivo en la hoja de datos característicos. Para ningún valor de este rango de frecuencia se pudo observar que la tensión y la corriente del piezoeléctrico estuviesen en fase. La aproximación más cercana se muestra en la figura 11.

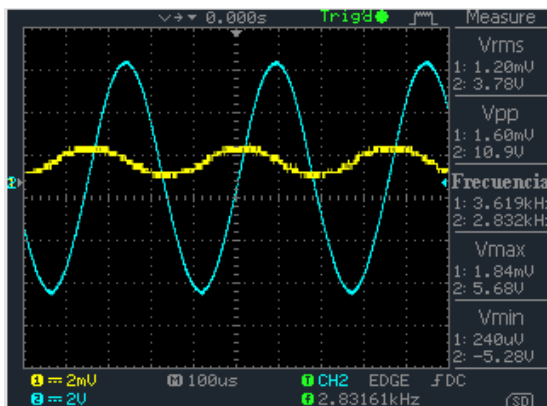


Fig 11. Ondas de tensión y corriente en el piezoeléctrico.

El ancho de banda de este pico de resonancia es de 430Hz, con los valores obtenidos experimentalmente se calcularon los parámetros R, L y C, mediante las ecuaciones 4.1 a 4.4.

$$R = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{50}{0.0202} = 150\Omega \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{F_0}{BW} = \frac{3.2 \text{ kHz}}{430 \text{ Hz}} = 7.44 \quad (4.2)$$

$$C = \frac{Q}{W_0 * R} = \frac{7.44}{(2 * \pi * 3.2k)(150\Omega)} = 2.466\mu F \quad (4.3)$$

$$L = \frac{1}{W_0^2 * C} = 1mH \quad (4.4)$$

La función de transferencia del piezoeléctrico es la presentada en las ecuaciones 4.5 y 4.6.

$$T(s) = \frac{a_1 * s}{s^2 + s \frac{W_0}{Q} + W_0^2} \quad (4.5)$$

$$T(s) = \frac{a_1 * s}{s^2 + 2702.44s + 404258996.3} \quad (4.6)$$

#### 4.5 Medición de la señal mecánica vibratoria propagada.

Se realizaron pruebas en una tubería de acero A36 de 1 metro de largo con piezosensores colocados a lo largo de la misma y separados una distancia de 10 centímetros entre sus centros tal como se muestra en la figura 12. Tales pruebas permitieron determinar en qué rango de tensión, la señal mecánica vibratoria inducida por el piezoeléctrico se propaga en condiciones adecuadas, es decir que mantenga su forma de onda, su frecuencia y que no sea afectada por ruido.

La tubería se soportó en tres medios, sobre una superficie plana de madera, sostenida en los extremos por dos apoyos, y suspendida por un hilo de nylon. Esto se hizo con el fin de observar cómo se comportaba la señal propagada en la tubería. Los resultados experimentales mostraron que las amplitudes de la señal sensada son mayores cuando el apoyo de la tubería es la cuerda de nylon. El apoyo menos favorable fue la superficie plana (mayor atenuación).

Con la tubería apoyada sobre una superficie de madera plana se realizaron las siguientes pruebas.

Inicialmente se sensaron las señales de voltaje de los piezosensores que se muestran en la figura 12, manteniendo una ganancia de 1 en el circuito de sensado, para así medir la señal de voltaje generada por cada piezosensor y observar la forma de onda de la misma.

La señal de excitación fue una senoidal de amplitud 50 voltios y frecuencia variable de los 0 Hz a los 2 kHz. Para esta

prueba se obtuvieron amplitudes de voltaje en el piezosensor entre 50mV y 500mV aproximadamente. Ver figura 13.

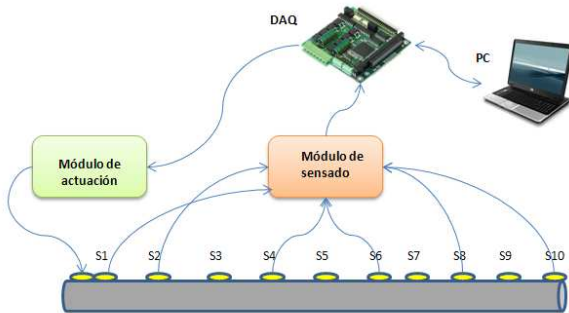


Fig 12. Esquema del sistema de pruebas implementado.

Se observó que a bajas frecuencias la señal se atenuó en un factor de 5000. Es decir el piezoactuador se excitó con 100Vpp y en el piezosensor colocado junto al actuador se sensaron 20mVpp.

Adicionalmente se observó que al desplazar el punto de sensado hacia la derecha de la tubería, la amplitud de la señal sensada fue mayor, excepto en el extremo opuesto a donde se actuó.

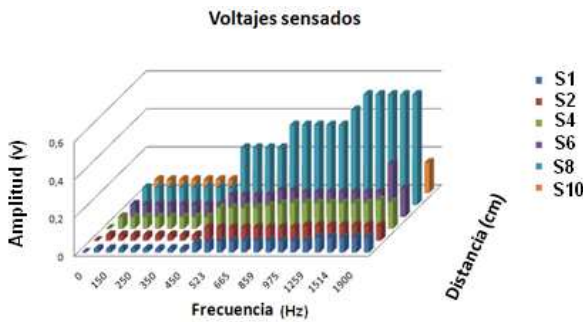


Fig 13. Amplitud de la señal sensada para el esquema de la figura 12.

### V. MODELO FUNCIONAL DE LABORATORIO

El modelo funcional de laboratorio construido permite excitar un piezoactuador instalado en una tubería de prueba y sensar la señal propagada a lo largo de esta mediante piezosensores. Los datos pueden ser almacenados y visualizados desde un PC mediante una tarjeta de adquisición de datos DAQ ver figura 14.

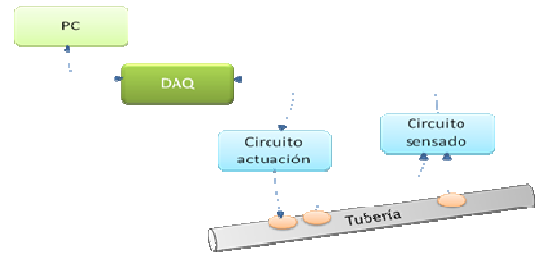


Fig 14. Esquema del modelo electrónico funcional.

El modelo electrónico de laboratorio construido se divide en tres módulos: Adquisición y visualización, acondicionamiento actuación y acondicionamiento sensado, ver figura 15.

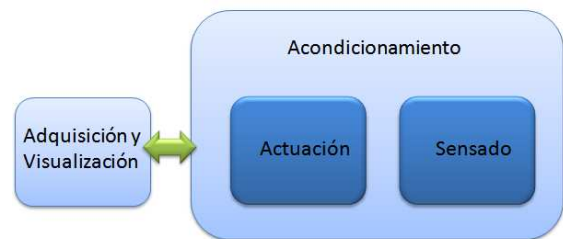


Fig 15. Esquema del modelo electrónico desarrollado.

Los módulos de acondicionamiento de actuación y sensado se realizan a través de estas etapas: aislamiento, amplificación, filtrado, acople de impedancias [22]-[25].

Para el diseño general de los módulos de acondicionamiento se tomó como referencia la tabla 3.

Tipo de onda.	$A_1 sen(w_1 t) * A_2 sen(w_2 t)$
Frecuencia.	1Hz a 3kHz.
Amplitud de la señal de actuación.	10 Vp a 60 Vp.
Amplitud máxima DAQ.	10 Vp.
Precisión del DAQ.	4.88 mV.

Tabla 3. Parámetros de operación del sistema.

#### 5.1. Módulo 1. Adquisición y visualización

El módulo de visualización y adquisición de datos se encarga de procesar las señales de actuación y sensado en el PC.

La herramienta computacional utilizada tanto para la programación de la señal de actuación como para la adquisición de las señales sensadas fue, Simulink de Matlab.

Las señales se adquirieron en tiempo real, a través de la tarjeta de adquisición de datos 6025E de NI. Se utilizaron los bloques ANALOG INPUT y ANALOG OUTPUT (Entrada Analógica y Salida Analógica) que son los encargados de recibir y enviar datos desde el PC desde y hacia la tarjeta por puerto PCI [26].

La figura 17 muestra la señal programada desde PC que luego de ser acondicionada en los niveles de tensión y de corriente apropiados se aplicó a un piezoeléctrico utilizado como actuador. La señal generada corresponde a una perturbación mecánica periódica, resultado del producto de dos señales senoidales a diferentes frecuencias. El tiempo de duración de la señal es igual al periodo de la señal con menor frecuencia, enviándose así una ventana de la señal. Sin embargo el ancho del pulso y su amplitud, pueden ser ajustados por el usuario. Si lo requiere para otro tipo de pruebas diferentes a las realizadas en esta investigación.

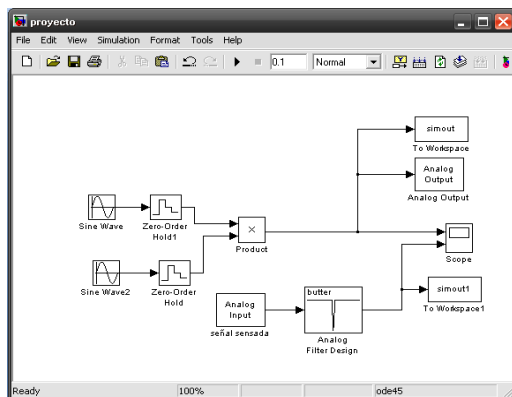


Fig 16. Diagrama de bloques para la generación y adquisición de la señal mecánica vibratoria.

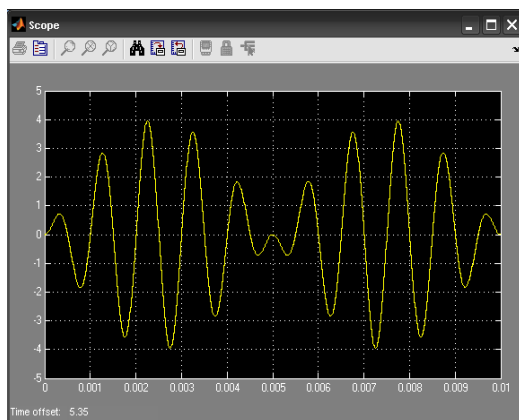


Fig 17. Señal Vibratoria Periódica programada.

### 5.2. Modulo 2. Acondicionamiento Actuación.

El módulo de actuación tiene como fin acondicionar la señal generada desde PC, a los niveles de tensión y corrientes adecuados para la señal de actuación (60Vp máximo). La señal generada desde PC es entregada en los niveles de voltaje y corriente admisibles por la tarjeta de adquisición de datos ( $\pm 10Vp$  máximo).

El módulo de actuación se compone de las siguientes etapas:



Fig 18. Etapas modulo actuación.

#### 5.2.1. Etapa Aislamiento.

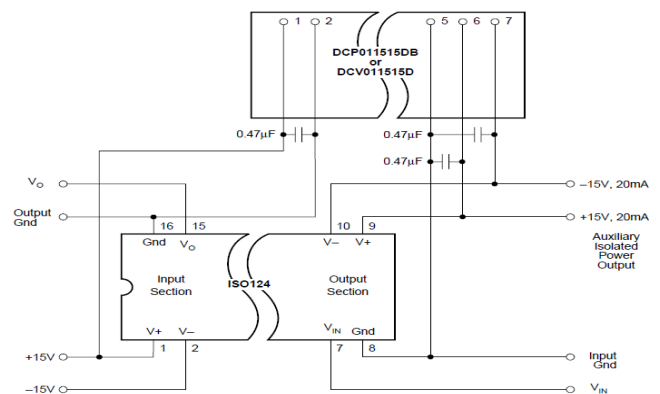
La etapa de aislamiento consiste en un amplificador y un convertor de voltaje DC/DC aislados individualmente. El amplificador seleccionado fue el iso124 con una tensión de alimentación de  $\pm 10V$ . Este dispositivo aísla la señal de entrada de la de salida.

Algunas características principales de este dispositivo son:

Característica	Valor
<b>Ancho de banda</b>	<b>50kHz</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	<b><math>\pm 4.5V</math> a <math>\pm 18V</math></b>
<b>Quiescent currents</b>	<b><math>\pm 5mA</math> en <math>Vs1</math> y <math>\pm 5.5mA</math> en <math>Vs2</math></b>
<b>Voltaje máximo aislado</b>	<b>1500Vrms</b>

Tabla 4. Características principales ISO 124.

El convertor DC/DC aislado DCP0115DBP alimenta el ISO 124P a un voltaje de  $\pm 10V$ , tanto a la entrada, que es donde se conecta la tarjeta de adquisición, como a la salida.



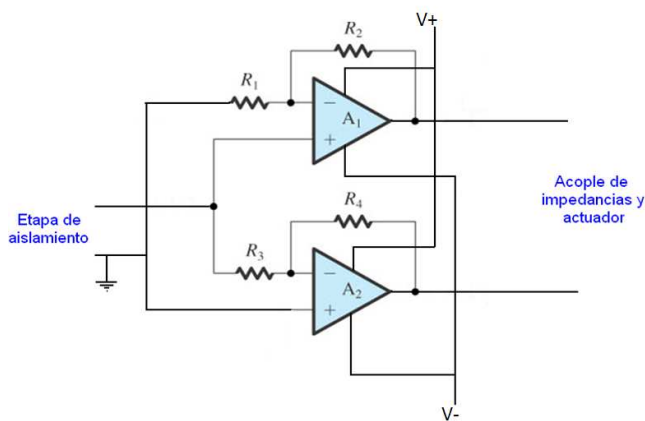
\*Fuente Datasheet ISO124

Fig 19. Etapa de aislamiento del actuador.

### 5.2.2. Etapa de Amplificación.

Dado que la tarjeta de adquisición de datos entrega como máximo  $\pm 10V_p$ , insuficientes para excitar el piezoactuador, se implementó una configuración de amplificador que permitió alcanzar los niveles de voltajes requeridos en la señal de actuación, para que las distancias de propagación sobre la tubería de prueba sean mayores.

La configuración seleccionada fue el amplificador tipo puente, comúnmente utilizada en etapas de potencia [27], presentada en la figura 19.



\*Fuente: Adel Sedra y Kenet Smith y modificada por el autor.

Fig 20. Amplificador puente.

Para implementar el amplificador puente se seleccionó el OPA445AP de Texas instruments.

El funcionamiento del amplificador puente consiste en aplicar una misma señal de forma simultánea a dos amplificadores, conectados en configuración inversora y no inversora, obteniendo a la salida la diferencia de tensión amplificada por cada OPAM.

La magnitud de la señal ingresada al amplificador puente es de hasta 10Vp, proveniente del amplificador de aislamiento, y la magnitud de la señal diferencial de salida es de hasta 70Vp a una corriente máxima de 120mA y en un rango de frecuencias de 0 a 2 kHz.

La figura 15 muestra el voltaje de salida de cada amplificador que conforma el circuito puente y la salida diferencial que es de mayor magnitud es la que se aplica al piezoactuador a través de un circuito de acoplamiento de impedancia.

Se debe tener en cuenta que el amplificador OPA445 tiene un ancho de banda de 70kHz para una ganancia de lazo abierto de 110dB.

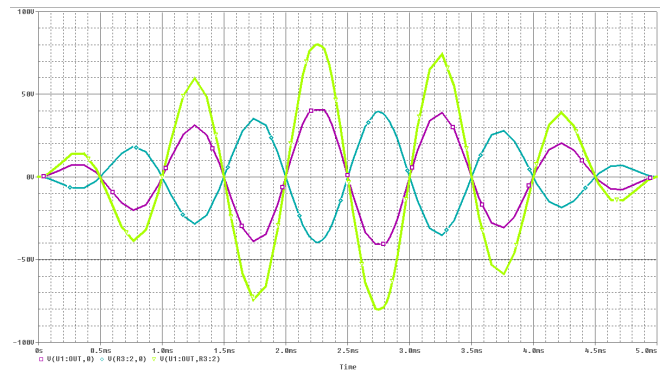


Fig 21. Salida diferencial del amplificador puente cuando se aplica el producto de dos senoidales a diferente frecuencia.

### 5.2.3 Etapa de Seguidor de tensión

Los piezoactuadores son manipulados de forma directa por el usuario, por tal razón se requiere de una etapa de aislamiento entre el modulo de actuación y el piezoactuador. La configuración utilizada para brindar esta protección es el amplificador seguidor de tensión. Este circuito debe tener una gran impedancia de entrada y una impedancia de salida mínima [27]. Esta etapa se implementó como se observa en la figura 21.

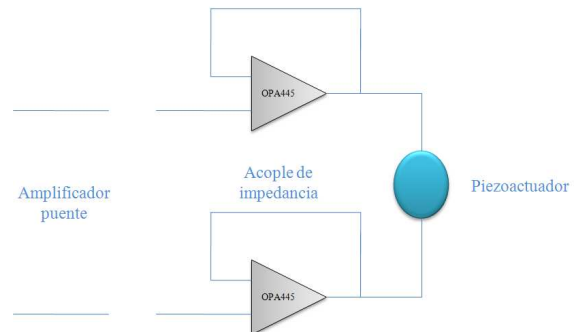


Fig 22. Seguidor de voltaje circuito actuador.

### 5.3. Módulo 3. Acondicionamiento Sensado

La señal de voltaje obtenida del sensor piezoeléctrico es acondicionada a través del modulo de sensado, que es el responsable de entregar esta señal a la tarjeta de adquisición de datos para luego ser almacenados y visualizados en el PC. Este módulo de sensado consta de las siguientes etapas:



Fig 23. Etapas módulo de sensado.

### 5.3.1 Etapa1 Acoplamiento de impedancias.

La impedancia de salida del transductor PZT es alta, por lo que se debió acoplar mediante una configuración con una impedancia de entrada equivalente para transferir toda la tensión generada por el piezoeléctrico. La configuración utilizada se presenta en la figura 23.

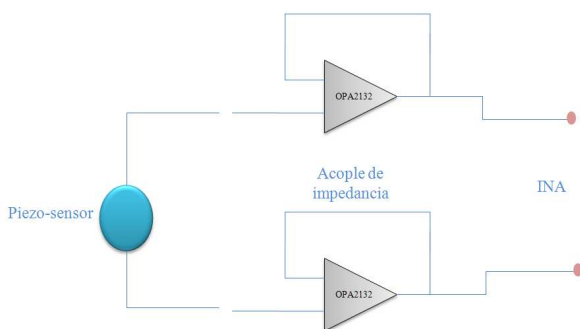


Fig 24. Acople de impedancias circuito sensor.

### 5.3.2 Etapa2 Amplificación.

Para amplificar la señal de sensado se utilizó el INA 128AP por su alta capacidad de rechazo a la señal de modo común, su velocidad de respuesta y el muy bajo consumo de potencia en estado de reposo. Adicionalmente el dispositivo cuenta con etapas de protección a sobretensiones de hasta  $\pm 40$  V en sus entradas y por las diversas aplicaciones en las que se puede emplear afines a las desarrolladas en la aplicación implementada.

El amplificador de instrumentación acondicionó la señal recibida a un valor de tensión mayor, de tal manera que se observa una gran diferencia entre el voltaje máximo de la señal y la resolución del DAQ, permitiendo así que la señal

almacenada en el computador sea lo más parecida a la señal real.

La ganancia del amplificador puede ser ajustada variando  $R_G$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (5.1)$$

### 5.3.3 Etapa3 Filtrado.

Debido a que la señal generada por los transductores es de amplitud pequeña, ésta se ve fuertemente afectada por la componente de frecuencia de 60Hz. Por tanto se implementó un filtro NOTCH, a fin de eliminar el efecto de dicha componente, sin afectar las componentes de frecuencias cercanas a los 60 Hz.

El circuito empleado es la configuración NOTCH que se muestra en la figura 25. La respuesta de este ante una excitación de 10 volts de amplitud y 60Hz se observa en la figura 26. A esta frecuencia la atenuación presentada por el filtro es de aproximadamente 30db.

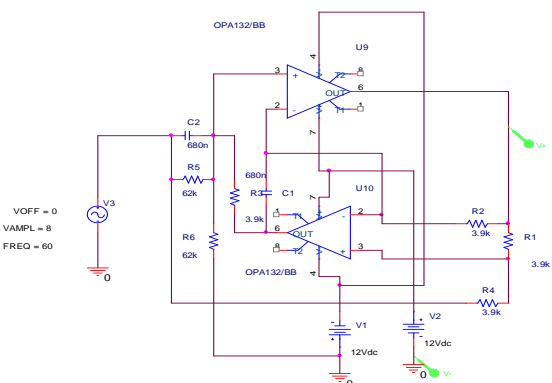


Fig 25. Filtro NOTCH a 60Hz.

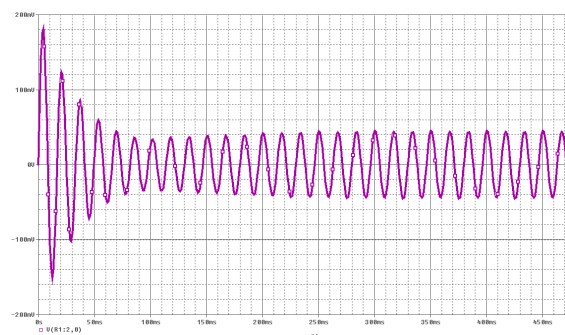
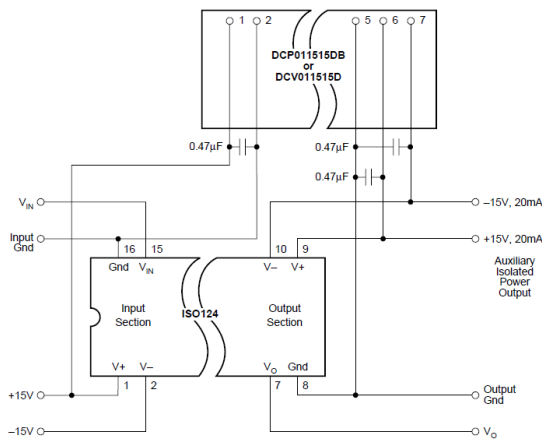


Fig 26. Señal de salida del filtro notch.

### 5.3.4 Etapa4 Aislamiento.

La señal entregada por el módulo de acondicionamiento de sensado, está en el mismo rango de voltaje que acepta la tarjeta de adquisición de datos, sin embargo la monitorización de señales piezoactuadas se realizó sobre una tubería metálica de prueba, donde existe el riesgo de que una señal externa pueda energizar el tubo y transferir esta energía por medio del circuito a la tarjeta, al PC y los periféricos que estén conectados al mismo, ocasionando daños a estos equipos, por lo que se requirió su aislamiento.

El dispositivo de aislamiento seleccionado, tanto en el circuito actuador como en el circuito sensor fue el ISO124, ver figura 27.



\*Fuente Datasheet ISO124 y modificada por el Autor.

Fig 27. Esquema de la etapa de aislamiento del circuito sensor.

### 5.4. Fuente de alimentación.

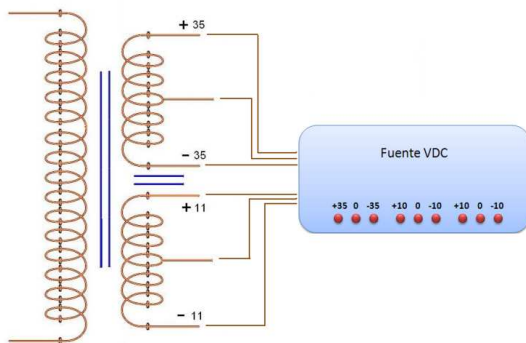


Fig 28. Esquema fuentes de alimentación.

Para el diseño de la fuente de voltaje se tuvo en cuenta las especificaciones de alimentación del circuito actuador ( $\pm 35V$ ) y el circuito de acondicionamiento de la señal sensada ( $\pm 10V$ ).

De igual forma se tuvo en cuenta que los amplificadores de aislamiento debían ser alimentados con una fuente aislada.

La fuente de voltaje implementada para alimentar las etapas de acondicionamiento tiene una salida máxima de 35W a 35V para el circuito actuador y una de 8W a 8V para el circuito sensor. Esta fuente de voltaje diseñada tiene 5 convertidores de voltaje DC/DC aislados de 1W los que permiten alimentar el amplificador de aislamiento de 4 circuitos de sensado y el amplificador de aislamiento del circuito de actuación. Inicialmente se construyeron dos (2) circuitos de sensado (ver figura 28).

### 5.5. Resultados finales.

El modelo electrónico funcional construido opera bajo los siguientes parámetros:

La señal programada desde el PC debe tener una amplitud máxima de 5Vp, para evitar la saturación en el módulo de actuación. Esto permite obtener a la salida una señal con amplitud máxima de 70Vp.

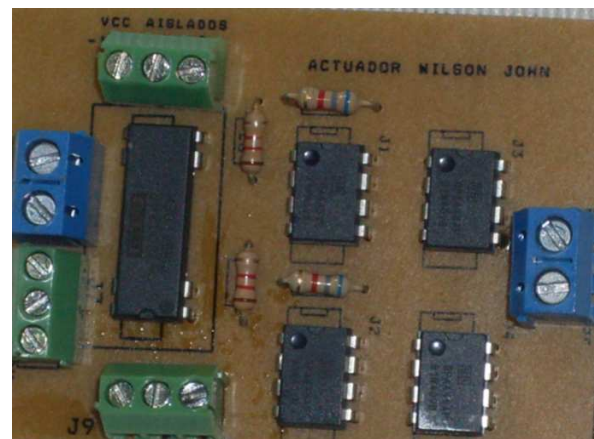


Fig 29. Módulo de actuación.

El modulo de sensado puede trabajar con dos valores de ganancia diferentes. La ganancia del amplificador de instrumentación es ajustada mediante dos resistencias en serie colocadas entre los terminales 1 y 8 del mismo, para evitar saturación y/o distorsión armónica en la señal sensada. En la figura 29 se presenta en cuadro rojo la etapa de amplificación.

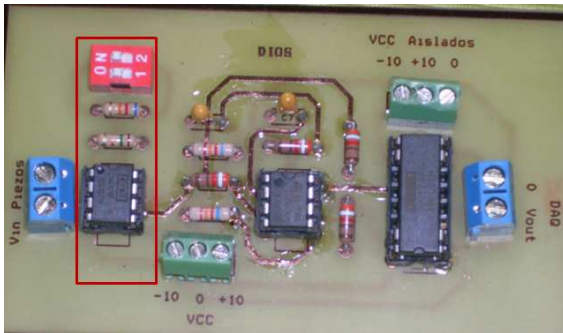


Fig 30. Módulo de sensado.

Para el diagrama de bloques de las figura 15 se deben configurar los siguientes parámetros.

- La amplitud de las señales y su frecuencia.
- La frecuencia de muestreo del retenedor de orden cero, debe ser mayor que la frecuencia de la señal (se sugiere al menos 10 veces).
- En el bloque analog output se configura la tarjeta DAQ NI 6025E, la frecuencia de muestreo (igual al bloque zero order hold).
- El bloque analog input se configura de la misma forma que el bloque analog output.
- El usuario puede colocar un filtro a la salida del analog input para eliminar ruidos que afecten los circuitos.

Para observar el funcionamiento del modelo electrónico de laboratorio se generó una señal de 0.55 voltios con una frecuencia de 100Hz obteniéndose el resultado que se muestra en la figura 31.

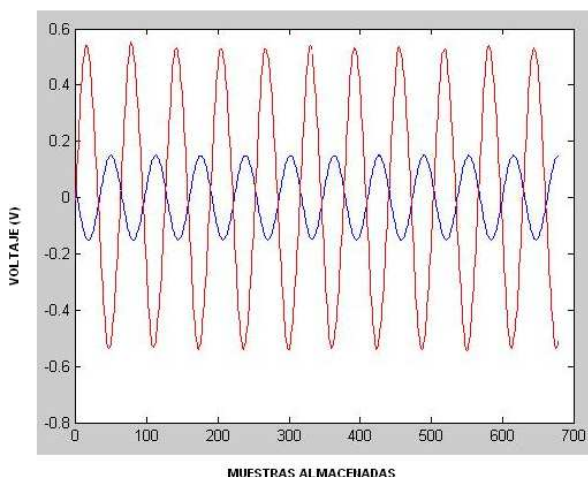


Fig 31. Pruebas modelo electrónico de laboratorio.

La señal de color rojo corresponde a la señal que es programada en pc y que luego es acondicionada hasta un voltaje máximo de 58Vp para actuar sobre el piezoeléctrico colocado sobre la tubería de prueba, que realiza la función de actuador.

En color azul se aprecia la señal sensada por un piezoeléctrico, para el montaje de la figura 12.

A continuación se muestra otra prueba realizada al modelo electrónico. Para esta prueba se generó desde pc una señal de actuación de amplitud 0.3V y de frecuencia 40Hz, la cual se aprecia en la figura 32a.

La figura 32b corresponde a la señal sensada, en esta se aprecia una leve distorsión debida a la componente de 60Hz. Con el fin de eliminar este efecto se implementó un filtro digital notch de octavo orden el cual se colocó en cascada con la terminal de entrada de la tarjeta de adquisición de datos, ver figura 16.

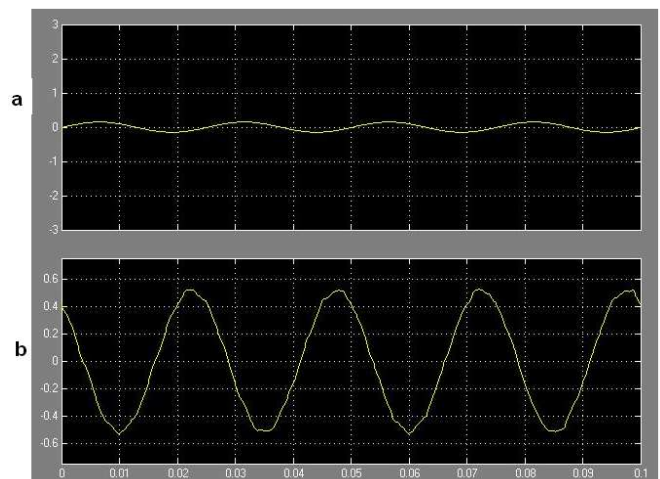


Fig 32. Señales generada y sensada a 40Hz.

## VI. CONCLUSIONES.

En las pruebas de caracterización de los piezoeléctricos se observó que el sensado de las señales es fuertemente afectado por una componente de ruido a 60Hz con un valor de tensión mucho más alto que el de las señales de interés. Esta situación obligó el uso de un filtro NOTCH en esta frecuencia que atenúa 30dB.

Se debe tener en cuenta que se puede actuar sobre el piezoeléctrico con una tensión máxima de hasta 60Vp a una frecuencia máxima de 60KHz.

Para la realización de estas pruebas se recomienda adquirir piezoeléctricos que soporten tensiones de excitación altas (50Vp), con el fin de obtener mayor amplitud en las señales sensadas.

Para la presente aplicación las frecuencias de interés están en el rango de 0Hz a 2500Hz, lo que no limitó la amplitud de la señal de entrada.

En trabajos futuros donde se requiera la utilización de más de cuatro sensores se tendrán que construir nuevos circuitos de sensado teniendo en cuenta que a estos se debe añadir los convertidores de DC/DC que la fuente de voltaje ya no tiene disponibles.

El circuito del sensor tiene dos opciones de ganancia con el fin de mantener la amplitud de la señal sensada que ingresa a la DAQ, a un valor menor o igual que 10Vp.

## VII. REFERENCIAS

- [1]. R.P. Leger, W.J. Garland, W.F.S. Poehlman. "Fault detection and diagnosis using statistical control charts and artificial neural networks." *Artificial intelligence in engineering*. Vol. 12. pp. 35-47. 1998.
- [2]Silva, J.J.; Queiroz, I.B.; Lima, A.M.N.; Neff, F.H.; Neto, J.S.R. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, IEEE Volume, Issue, Page(s):636 – 640. 12-15 May 2008.
- [3] R. K. Stanley, "An Overview of the Nondestructive Inspection Techniques for Coiled Tubing and Pipe", ASNT, 2004.
- [4] Federico Davoine Santiago Reyes, Transductores piezoeléctricos, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería 2007.
- [5] Miguel Cúpich Rodríguez, Fernando J. Elizondo Garza. Actuadores piezoeléctricos; Ingenierías Vol. III, No.6, Enero-Marzo 2000,
- [6] S. Acrabelli and A. Tonoli. System properties of flexible structures with selfsensing piezoelectric transducers. *Journal of Sound and Vibration*, 235(1):1–23, 2000.
- [7] Schäfer, J.; Janocha, H., Compensation of Hysteresis in solid state actuators. *Sensors and Actuators A49*, pages 97-102, (1995).
- [8] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping 2006.
- [9] H. J. M. T. A. Adriaens, W. L. de Koning, and R. Banning. Modeling piezoelectric actuators. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 5(4):331–341, December 2000.
- [10] Accionamiento mediante actuadores piezoeléctricos de alas flexibles para micro- vehículos aéreos súper maniobrables inspirados en la biología. Sergio Preidikman, Julio C. Massa y María F. Bandi, Argentina 2006.
- [11] Tim King School of Textile Professor Industries The University of Leeds. Piezo Actuators - can they give enough displacement for 'real world' applications? Page(s):2/1 - 2/6. 13 Oct 1998.
- [12] Srihari Rajgopal, Aaron Knobloch, Stacey Kennerly, Mehran Mehregany. A piezoelectrically-actuated valve for modulation of liquid at high flow rate under high pressure Department of Electrical Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA. General Electric Global Research, Niskayuna, NY, USA. Volume, Issue, Page(s):743 – 746.10-14 June 2007.
- [13] E.L. Horsley, M.P. Foster, D.A. Stone, State-of-the-art Piezoelectric Transformer Technology Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield, S1 3JD, England 1985.
- [14] Michael G. Harris and William J. Burmeister, Jr. Department of Electrical Engineering University of Central Florida Orlando, Florida. Vibration cancellation effectiveness using a second order piezoelectric actuator model. page(s): 88-91 vol.112-14 Aug 1990.
- [15] Active piezoelectric vibration control for high speed switched reluctance machine Xavier Ojeda, Xavier Mininger, Mohamed Gabsi, Sami Hlioui, Michel Leclivainens Cachan Satie 61 avenue du président Wilson, 94235 Cachan, France 2007.
- [16] M. Puig Vidal, S. Johansson, P.L. Miribel, E. Montané. Instrumentation & communication system (SIC), department of electronics, University of Barcelona, Spain. A miniature robot driven by smart power integrated circuits. J Lopez-Sanchez, U. Simu, Page(s): 1954 - 1959 vol.2 2002.
- [17] Yang Guozheng, Liu Qihong, Yan Detian. School of electric and information, Shanghai Jiaotong University. The prototype of a piezoelectric medical microrobot 1998.
- [18] Kim Sukho Park, Chang Yeol Jee Seok-Jin Yoon. *Microsystem Research Center, Thin Film Material Research Center Korea Institute of Science and Technology, Cheongryang, Seoul*. An Earthworm-Like Locomotive Mechanism for Capsule Endoscopes Byungkyu. Page(s): 2997- 3002 Publication Date: 2-6 Aug 2005.
- [19] Piezoelectric flexure elements, <http://sensortech.ca/flexure.html/flexure.html>, sensor technology Ltd, Canadá, 1999. Visitada noviembre 22 de 2009.
- [20] Elka E. and Elata D. The electromechanical response of multilayered piezoelectric structures. *Journal of Micromechanical Systems*, 13:332-341, 2004.
- [21] Sitti M., Campolo D., Yan J. and Fearing R. *Development of PZT and PZN-PT based unimorph actuators for micromechanical flapping mechanisms*. Department of EECS, Berkeley, 2004.
- [22] Lim K.B., Lake R.C. and Heeg J. Effective selection of piezoceramic actuators for an experimental flexible wing. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 21:704-709, 1998.
- [23] Acondicionamiento de señales, National Instruments. <http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/D864C2C25C7B5EE086256F49007B>. Consultada Mayo 13 de 2009:
- [24] Antonio Creus Solé, Instrumentación Industrial, sexta edición, Capítulos 1 a 8. 1997.
- [25] Albert D. Helfrick, William D. Cooper; Instrumentación Electrónica y Técnicas de Medición; Capítulos 2 al 11. Segunda Edición 1991.
- [26] DAQ, 6023E/6024E/6025E User Manual, National Instruments. Edition Part Number 322072C-01. December 2000.
- [27] Adel Sedra y Kennet. C. Smith quinta edición año Circuitos Microelectrónicos. Capítulos 2, 10, 12, 14. 2006.



## VIII. BIOGRAFIA

**John Leonardo Quiroga Pineda** nació el 29 de septiembre de 1985 en Bucaramanga, Colombia. Actualmente es estudiante de ingeniería electrónica en la escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones, en la Universidad Industrial de Santander. Tiene experiencia como tutor auxiliar en PAMRA, bienestar universitario, de las materias Teoría electromagnética y Álgebra lineal. Sus intereses profesionales se centran en la automatización.

**Wilson Arley Barajas Barajas** nació el 1 de mayo de 1984 en Molagavita Santander, Colombia. Actualmente es estudiante de Ingeniería Electrónica en la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, de la Universidad Industrial de Santander. Sus intereses profesionales se centran en la automatización de procesos e instrumentación electrónica.

**MsC(c). Ing. Wilmer Alexis Sandoval Cáceres.** Ingeniero electrónico egresado de la Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Santander, Colombia (2005), Candidato a maestría en ingeniería electrónica UIS (Universidad Industrial de Santander), Bucaramanga (2006-2010). Director del semillero de investigación Asimov, Universidad Santo Tomas De Aquino, Bucaramanga, Santander, Colombia (Primer semestre de 2009). Miembro del grupo de investigación CEMOS, UIS (2006-2010). Áreas de investigación: Robótica móvil, control, identificación de daños basados en vibraciones.

**PhD Rodolfo Villamizar Mejía.** Ingeniero electricista egresado de la UIS. Bucaramanga, Santander, Colombia (1999), Ingeniero electrónico egresado de la UIS, Bucaramanga, Santander, Colombia (2000). Doctor en Tecnologías Avanzadas de Control, Universitat de Girona, Girona, España (2005). Miembro del grupo de investigación CEMOS, UIS, Bucaramanga, Santander, Colombia (2006-2010). Coordinador de la Maestría en Ingeniería Electrónica de la UIS. Miembro del grupo de investigación MICElab Research Group, Universitat de Girona. Áreas de investigación: Técnicas avanzadas de control, técnicas basadas en intervalos modales y control supervisorio.