

Capítulo IV. Diseño del Hardware

En este capítulo se explicará el diseño y las modificaciones al prototipo anterior, para poder cumplir con los objetivos planteados en esta tesis de diseño estético, portabilidad, precisión y exactitud en las gráficas obtenidas.

Para extraer información a partir de la señal de flujo, se necesita medirlo, describirlo y procesarlo. El procesamiento de señales es ejecutado de manera más conveniente por sistemas electrónicos que emplean transductores para convertir una magnitud física en una señal eléctrica. La señal resultante puede ser medida y procesada analógica o digitalmente para ser usada posteriormente como una señal de referencia, de evaluación o de control de un sistema [12]. La figura 4.1 muestra el diagrama a bloques del sistema rediseñado. Este sistema conserva todos los elementos del prototipo anterior, pero se han hecho cambios significativos en todos sus elementos a excepción de la tarjeta de adquisición de datos y del software.

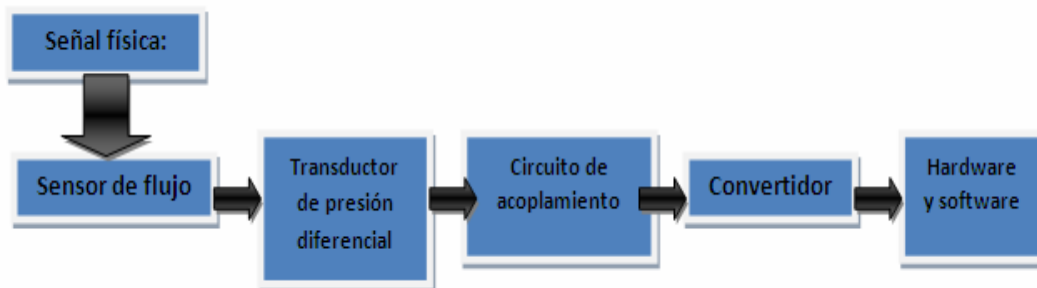


Fig. 4.1 Diagrama de un espirómetro de flujo [2].

4.1 Tecnología para la adquisición de la señal aérea

Neumotacógrafos

El espirómetro que se implementó se basa en un neumotacógrafo de flujo del tipo de resistencia neumática. Los neumotacógrafos son sensores de flujo gaseoso que transforman una señal primaria de flujo, o sea el aire espirado por el paciente, en presión diferencial proporcional. La presión diferencial es producida por la presencia de una resistencia neumática en la boquilla del neumotacógrafo [2].

4.2 Construcción del neumotacógrafo

El neumotacógrafo es un tubo que sirve como conductor de aire espirado al sensor y como estructura aislante a corrientes externas. En el prototipo anterior a esta tesis [2], se utilizó una adaptación de tubería de PVC, de 15 centímetros de longitud y 2 centímetros de diámetro cortado a la mitad para posicionar la resistencia neumática en el centro. Las 2 partes de este tubo fueron unidas con cinta de aislar y la resistencia era un filtro de fibra sintética, la cual no estaba fija, que hacía la función de una pantalla tipo Lilly. A cada lado de la unión de los tubos tenían acopladas las conexiones hacia un sensor de presión diferencial selladas con pegamento epóxico. La presentación reportada se muestra en la figura 4.2. Cabe señalar que además contaba con un elemento calefactor y un sensor de temperatura que evitaban la condensación de vapor de agua. El elemento calefactor era una resistencia de alambre desnuda que presentaba problemas de deformación con el calentamiento.

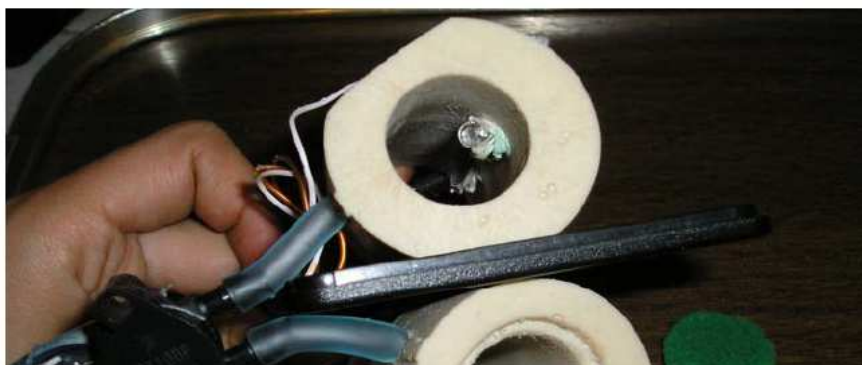


Figura 4.2 Neumotacógrafo anterior [2].

Se puede apreciar que este prototipo carece de las características adecuadas para su reproducción y fabricación en serie, dado que, es más bien un producto totalmente artesanal, de baja resistencia mecánica, poca maniobrabilidad, antihigiénico, elementos adicionales como son el calefactor, los sensores de presión y temperatura, y la restricción no tienen el soporte necesario para garantizar una operación estable en cuanto a la calidad de las mediciones obtenidas, principalmente por la fuerte posibilidad de fugas y su fragilidad mecánica.

Para resolver los problemas de resistencia mecánica y reproductibilidad, se maquinó el cuerpo del neumotacógrafo con un tubo de nylamid, que es un material resistente, higiénico, y que no permite fugas, de 15 centímetros de longitud y 2 centímetros de diámetro, dividido en 2 partes, que se pueden unir mediante una rosca intermedia, de tal forma que queden perfectamente selladas usando un empaque comercial para evitar fugas de aire de la misma manera presenta las características adecuadas para instalar la resistencia neumática, el elemento calefactor, el sensor de temperatura y las conexiones hacia el transductor de presión. El elemento calefactor fue sustituido por una resistencia de potencia

de tamaño estándar que pudo ser fácilmente instalada en el neumotacógrafo permitiendo ser fácilmente sustituida a diferencia de la configuración anterior.



Fig. 4.3 Nuevo Neumotacógrafo.

El nuevo prototipo cuenta con un filtro de fibra sintética pegado a un empaque de hule lo que permite fijarlo firmemente dentro del neumotacógrafo eliminando posibles fugas de aire, evitando de esta forma posibles errores en la medición, como se muestra en la figura 4.3.

4.3 Acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de presión diferencial

Análogamente a un circuito eléctrico, donde a través de la Ley de Ohm se infiere que la diferencia de potencial en las terminales de una resistencia aumenta al incrementar el valor de ésta o el de la corriente, la diferencia de presión sensada en el neumotacógrafo crece al aumentar el flujo de aire, el valor de la resistencia neumática o ambas [2].

Al igual que en el prototipo anterior se uso el sensor de presión diferencial de la serie MPX10 de Motorola, que es un transductor sin compensación de temperatura con un rango

de medición de 0 a 10 KPa (0 - 1.45 psi). El sensor contiene galgas extensiométricas de silicio (Si) con una sensibilidad de 70 mV ante una alimentación típica de 5 V [2].

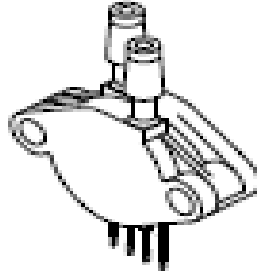


Fig. 4.4 Sensor de presión diferencial MPX10 [2].

El sensor está diseñado para operar en el rango de -40°C a 120°C pero en nuestro caso estará operando siempre en condiciones específicas (35 a 38°C) [2] dado que el neumotacógrafo cuenta con control de temperatura.

4.3.1 Sistema de acondicionamiento de presión anterior

El acondicionamiento analógico consistió en amplificar la señal 1000 veces por medio de un amplificador de instrumentación AD524, para ser introducida al convertidor A/D [2].

El acondicionamiento del sensor de presión diferencial, no funcionaba de forma eficiente, puesto que tenía un rango de 7.3 V a 12.3 V, el cual es un rango pequeño donde el voltaje máximo rebasaba el rango de entrada de la tarjeta de adquisición de datos, lo cual se verá más a detalle en el siguiente capítulo. Dado que la tarjeta de adquisición estaba configurada para operar dentro del rango analógico de $\pm 10\text{Vdc}$, se estaba perdiendo más de la mitad de la resolución de convertidor A/D. El diagrama del circuito original de

El acondicionamiento se muestra en la figura 4.5 que implementa el diagrama bloques de la figura 4.6.

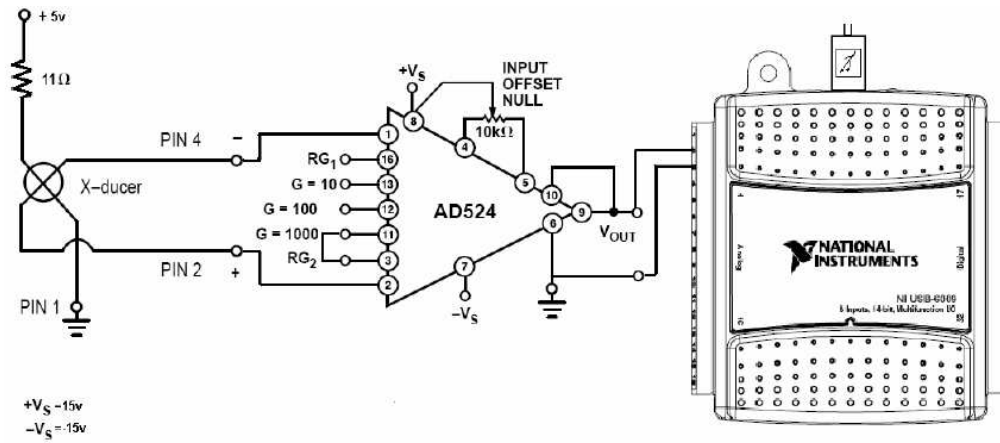


Fig. 4.5 Circuito de acondicionamiento de presión [2].

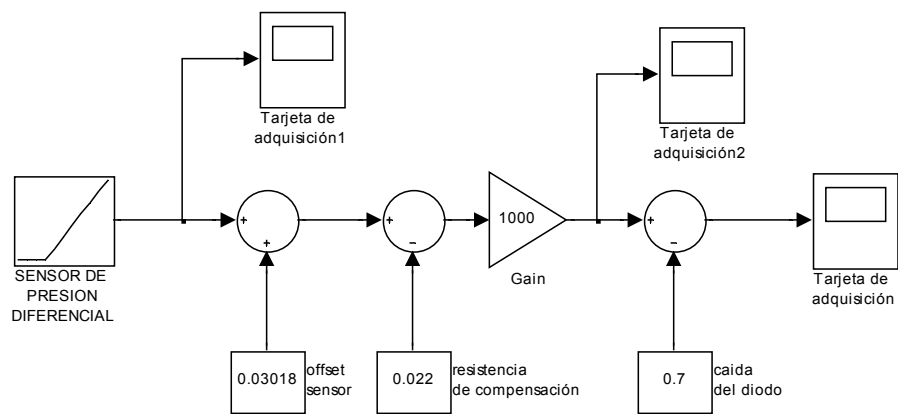
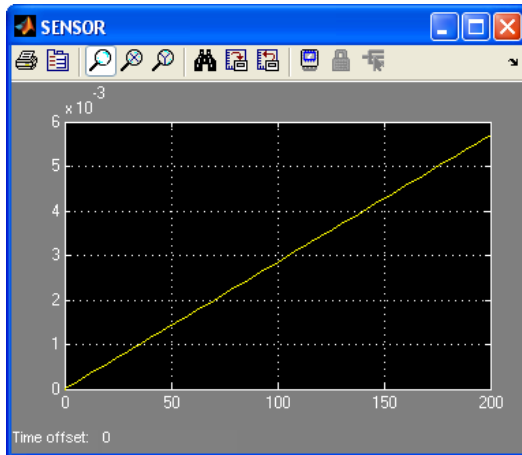
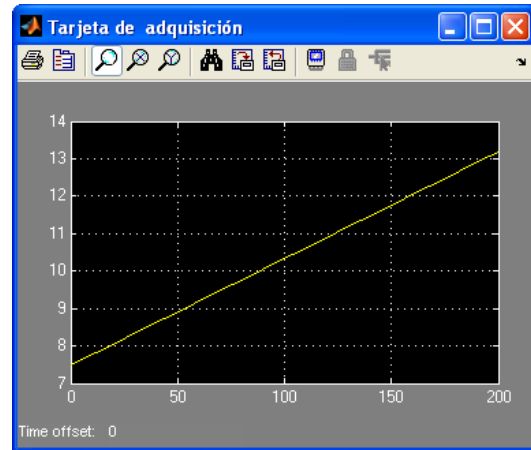


Fig. 4.6 Diagrama a bloques de acondicionamiento de presión anterior.



(a)

Respuesta del sensor



(b)

Salida hacia el A/D

Figura 4.7 Simulación del acondicionamiento del prototipo anterior.

Como se puede apreciar en las graficas de la figura 4.7, los niveles de salida del sistema de acondicionamiento rebasan el rango de entrada del A/D por lo cual se hizo necesario rediseñar esta etapa de manera que la salida cayera dentro del rango del convertidor A/D y además que permitiera efectuar calibración del nivel del offset dado que en el circuito previo este se compensa con la introducción de la resistencia en serie de 11Ω con el sensor lo cual reduce su rango.

4.3.2 Nuevo sistema de acondicionamiento

Se modificó totalmente el circuito de acondicionamiento de presión diferencial del prototipo implementado en esta tesis. Se utilizó el mismo sensor de presión diferencial MPX10 de Motorola, que compara la presión antes y después de la resistencia neumática. Para esto se realizaron dos hendiduras de 5 mm de diámetro en cada lado del neumotacómetro, para introducir en ellas dos mangueras de plástico conectadas a los

extremos del transductor y que van hacia el sensor de presión diferencial. El circuito quedó como se muestra en la figura 4.8.

Fig. 4.8 Acondicionamiento del sensor de presión diferencial en nuevo prototipo.

La señal del sensor de presión diferencial de las terminales 2 y 4, se introdujeron a un amplificador de instrumentación AD524 para ser amplificada 100 veces. Se amplificó 100 veces puesto que se observó que el amplificador de instrumentación se estaba saturando con la ganancia de 1000. Una modificación importante respecto al modelo anterior consiste en la introducción de un circuito para la eliminación del offset que consiste en el amplificador operacional TL082, que deberá restar un voltaje de 2.4 V proveniente del potenciómetro. Este potenciómetro permitirá la recalibración del sistema de acondicionamiento cuando el equipo final sea sometido a la pruebas de certificación y validación, o en caso de que el transductor tuviera que ser sustituido.

Después de eliminar el offset, se multiplica la señal por un factor de 10, y finalmente se hace pasar por el diodo de salida para evitar que eventuales voltajes negativos pudieran pasar al A/D de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI6008, que convertirá estas señales en señales digitales, que podrán ser interpretadas en la computadora para su

visualización mediante el software LABVIEW. Esto último será discutido en el capítulo siguiente.

Para comprobar que el acondicionamiento de señal del sensor de presión diferencial nos diera el rango correcto, se simuló el diagrama a bloques mediante la aplicación del software simulink, de Matlab, como lo muestra la figura 4.9.

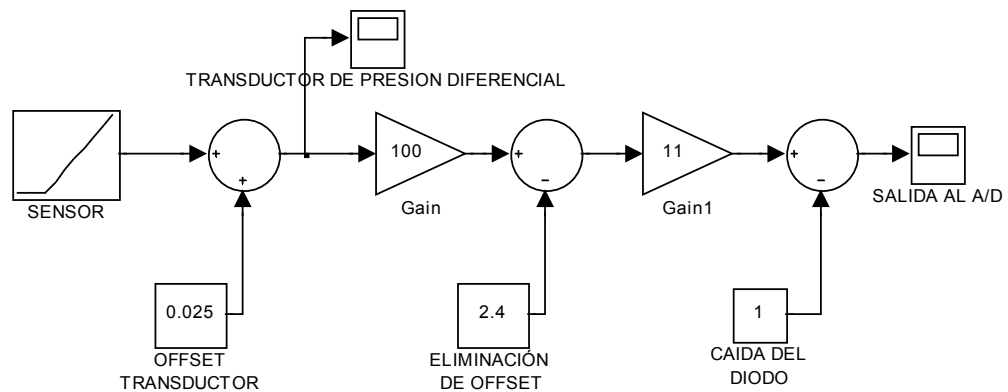
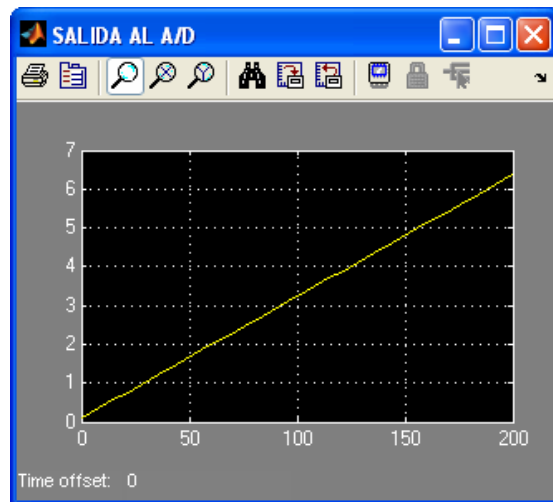
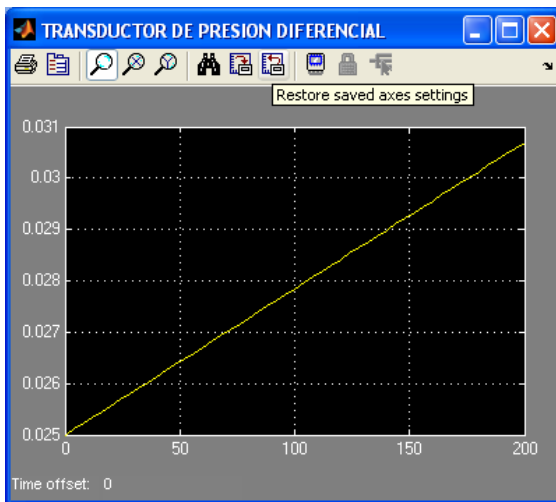


Fig. 4.9 Diagrama a bloques del sensor en el nuevo prototipo.

Después de simular el diagrama a bloques, obtuvimos las gráficas mostradas en la figura 4.10.



(a) (b)
Fig 4.10 Resultado del diagrama a bloques del nuevo prototipo.
(a) Respuesta del sensor (b) salida del circuito de acondicionamiento

En las figura 4.10 (a) se puede observar el rango de salida del sensor de presión diferencial, el cual va de 25mV, a cero Pa de presión, a 30.18mV a 200 Pa, teniendo un offset de 25mV. Después del acondicionamiento, en la figura 4.10 (b) obtenemos a la salida un rango de 0.1V a cero Pa de presión, por lo cual se puede decir que es un offset casi nulo, a 6.3V a 200 Pa aproximadamente, con lo que se cumple el objetivo de tener a salida un rango que esté entre 0 y 10V, que es el rango en el que opera la tarjeta de adquisición de datos sin la posibilidad de obtener voltajes negativos que pudieran dañar al convertidor.

4.4 Acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de temperatura

Para impedir la condensación de vapor de agua en las paredes interiores del neumotacógrafo, que puede alterar la medición y es antihigiénico, se colocaron resistencias calefactores en el interior que deben mantener una temperatura semejante a la del cuerpo humano con cierto rango permitido de variación.

4.4.1 Control de temperatura del prototipo anterior

El prototipo anterior contaba con dos resistencias calefactoras de alambre enrollado en el interior del neumotacógrafo las cuales en serie medían 6Ω , interconectadas externamente por un cable caimán- caimán que no garantiza un contacto eléctrico adecuado y presentaban inestabilidad mecánica.

Este control mide la temperatura con un sensor LM35 cuya salida de voltaje es proporcional al incremento de la temperatura en grados Celsius a razón de $1\text{mV}/^\circ\text{C}$. El sensor está colocado internamente en un costado del neumotacógrafo para registrar la temperatura dentro del neumotacógrafo.

De acuerdo a la figura 4.11, el valor entregado por el sensor LM35 se amplifica 10 veces para después ser comparado con un voltaje de referencia dado por la caída del diodo respecto a la fuente de alimentación de 5 V. Si el voltaje de diodo amplificado superaba el voltaje de referencia se excita al optoacoplador 4N29 activando la resistencia calefactora [2].

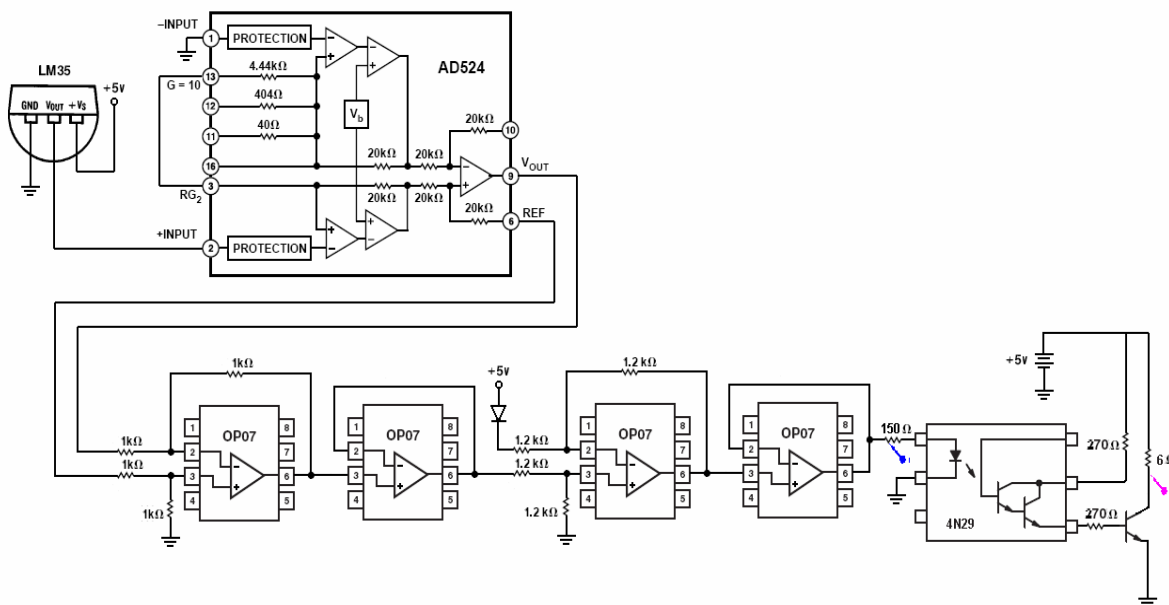


Fig. 4.11 Circuito de acondicionamiento de sensor de temperatura de prototipo anterior [2].

En el circuito de la figura 4.11 se puede apreciar que existe un exceso de Amplificadores Operacionales, que no tienen una función aparente y la resistencia calefactora no se calentaba lo suficiente para poder eliminar el vapor de agua que se condensaba en el

neumotacógrafo. Por ejemplo, la salida del AD524 no está referenciada a tierra y requiere de un nuevo amplificador diferencial. Esta condición puede ser evitada conectando la terminal de referencia de salida del AD524 (pin 6) a tierra y se evita el uso del amplificador diferencial. El primer seguidor no tiene razón de ser por lo cual puede ser eliminado. La salida del comparador también va hacia un buffer que no es necesario por lo cual también se puede eliminar. La salida del optoacoplador lleva a una configuración clase A, lo cual resta eficiencia a la transferencia de potencia hacia el calefactor que puede sustituirse por una configuración Darlington. A continuación se explicará el nuevo diseño propuesto y que fue el implementado en el prototipo final.

4.4.2 Control de temperatura del nuevo prototipo

En este nuevo diseño las resistencias calefactoras fueron sustituidas por resistencias de potencia de 13.5Ω a 10 W que se colocaron en el interior del nuevo neumotacógrafo a lo largo del tubo y firmemente pegada al sensor de temperatura para garantizar que la temperatura de la resistencia influyera directamente a la temperatura detectada por el transductor, con la finalidad de mantener la temperatura del aire exhalado entre 38 y 42 °C evitando el problema de humedad en el neumotacógrafo.

Se utilizó el mismo sensor de temperatura LM35 pero se hicieron cambios en el circuito de acondicionamiento que serán descritos a continuación y que pueden apreciarse en la figura 4.12.

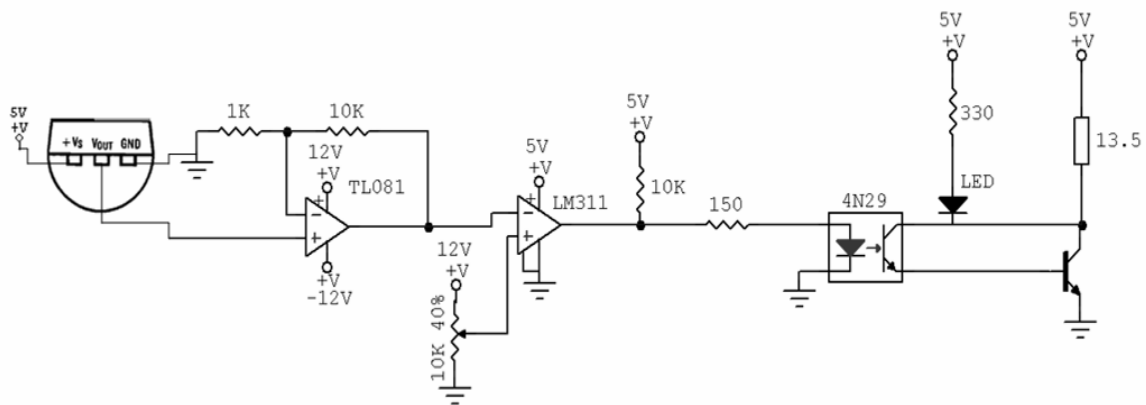


Fig. 4.12 Circuito de acondicionamiento de sensor de temperatura del nuevo prototipo.

El valor de la temperatura es sentido por el LM35, se amplifica por un factor de 11 para que la señal a 25 °C tenga un valor aproximado de 2.5 V según las hojas de especificaciones del transductor (hojas técnicas). La salida del amplificador se compara con un valor de referencia de 3.8 V provenientes del potenciómetro de calibración, que representan 38°C, respecto al voltaje entregado por el sensor de temperatura. El comparador se trata de un LM311 que se alimenta con un voltaje unipolar de +5V y con salida de colector abierto, que es usado para activar la resistencia calefactora mediante el optoacoplador 4N29. Podrá observarse que el transistor de salida del optoacoplador se ha conectado en configuración Darlington con el transistor de potencia para favorecer la transferencia de potencia hacia la resistencia calefactora. También se ha añadido un LED para indicar cuando el circuito está calentando.

Entonces, en el circuito descrito, si la temperatura sensada en el neumotacógrafo es menor a 38°C, significa que existe condensación de vapor de agua en el interior del mismo y la resistencia calefactora se activará. La resistencia quedará encendida hasta que se

detecte una temperatura mayor a 4.2V ó 42°C, entonces se apagará hasta que la temperatura descienda por debajo de 38°C debido a la histéresis propia del comparador.

4.5 Adquisición de datos

La conversión de la señal de presión debidamente acondicionada proveniente del transductor, requiere ser convertida a digital para su procesamiento en la computadora. Se requiere que la conversión tenga una resolución de 12 bits, por requerimiento de la ATS, y se desea que la transmisión de datos se realice vía USB. La opción más eficiente, al igual que en el primer prototipo, fue utilizar la tarjeta de Adquisición de Datos NI USB-6008 de National Instruments que es fácil de utilizar, didáctica, durable y de bajo costo [2].

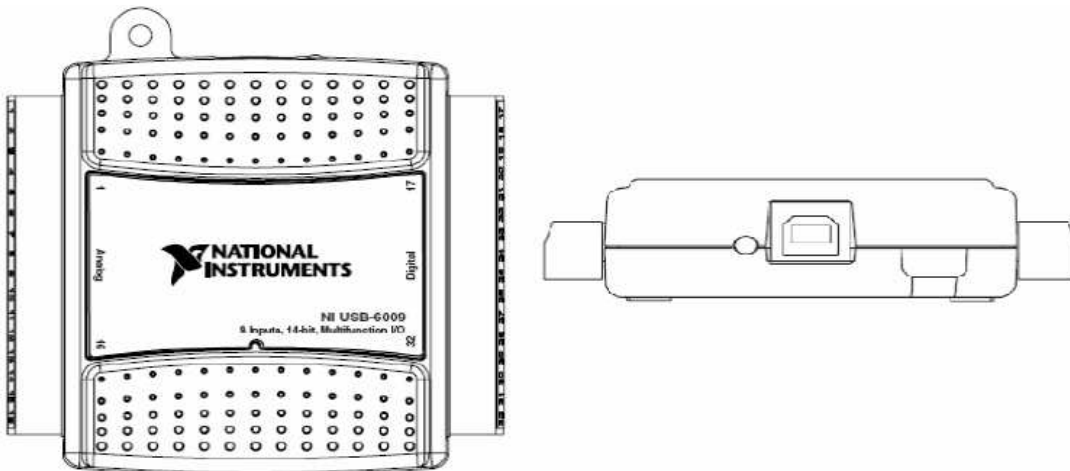


Fig. 4.13 Adquisición de datos NI-USB-6008 [2].

La tarjeta de adquisición NI USB-6008, como se ve en la figura 4.13, posee ocho entradas analógicas de ± 10 V, dos salidas analógicas de 5 V, 12 canales de entrada/salida digital y su convertidor interno tiene una resolución de 12 bits a una tasa de muestreo de 10,000 muestras/s. La tarjeta puede ser configurada y controlada mediante la aplicación

computacional Labview™, que es una aplicación desarrollada para crear programas de instrumentación virtual por medio de un lenguaje de programación gráfico [2].

En la conversión de datos se emplearán diferencialmente los pines 2 y 3 de la tarjeta de adquisición, siendo el pin 2 la terminal positiva.

4.6 Diseño de la fuente

Una de las principales carencias operativas de los trabajos anteriores es que estaban pensados como experimentos de laboratorio y nunca como un equipo totalmente funcional, de manera que nunca fue necesario dotarlos de una fuente de alimentación independiente.

En el caso de este trabajo, es primordial que el equipo opere sin ningún tipo de ayuda de laboratorio incluyendo el suministro eléctrico, por lo que se hizo necesario desarrollar una fuente de alimentación que cubriera las demandas de voltajes y corrientes de los componentes del equipo que incluyen: tarjetas electrónicas, resistencia calefactora, sensores, etc.

De acuerdo a los componentes usados, es necesario contar con la gama de voltajes concentrados en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Alimentación de componentes

Voltaje	Elementos alimentados	Demanda de corriente
----------------	------------------------------	-----------------------------

+5V	LM311	50 mA
	Optoacoplador	60 mA
	Calefactor	.377 A
	LED	30 mA
	Sensor de temperatura LM 35	1 mA
+12V	AD524	3.5 mA
	TL082	2.8 mA
	TL081	2.8 mA
	Circuitería	Aprox. 10 mA
-12V	AD524	3.5 mA
	TL082	2.8 mA
	TL081	2.8 mA
	Circuitería	Aprox. 10 mA

De acuerdo a la tabla 4.1 se puede ver que el elemento que más demanda corriente es la resistencia calefactora, de la fuente de 5V. Mientras que las otras dos fuentes de +12 y -12 presentan una demanda de corriente del orden de mA. En base a estos requerimientos se seleccionaron los componentes de la fuente de alimentación considerando que se necesitan voltajes regulados que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Obtención de voltajes demandados por los diferentes elementos

Fuente	Regulador	Corriente máxima	Voltaje de alimentación mínimo
+5V	LM7805	1.5 A	12 V
+12V	LM7812	1.5 A	18 V
-12V	LM7912	1.5 A	18 V

Para obtener los voltajes de entrada necesarios, el diseño de la fuente incluye dos transformadores reductores de 120Vac a 20Vac aproximadamente, los cuales alimentan a 2 puentes rectificadores de diodos de 1.5 A. Con todos estos componentes se implementó la fuente de alimentación mostrada en la figura 4.15 para poder obtener 12, -12V y 5V, que son los voltajes de alimentación correspondientes que el circuito requiere, a una corriente nominal de 1.5 A.

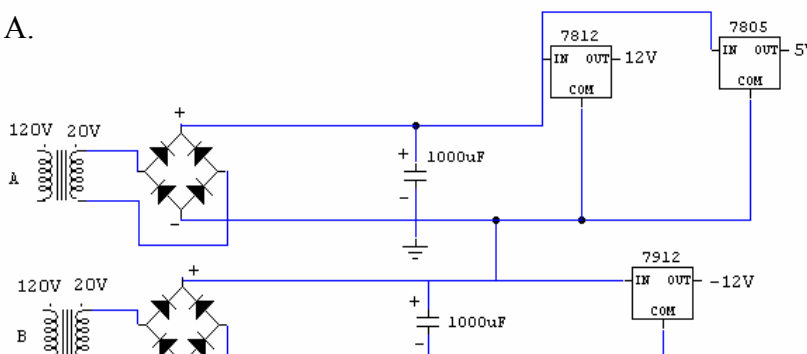


Fig. 4.14 Fuente de alimentación del espirómetro

Se necesitó un valor de corriente alto para la fuente de 5V debido a que la resistencia calefactora demanda demasiada corriente provocando una caída significativa de voltaje durante la fase de calentamiento. Esto generó que el regulador de voltaje a 5V se calentara demasiado, lo cual, se solucionó poniendo un disipador de calor.

Finalmente, se incluyeron todos los elementos antes mencionados en una tarjeta impresa que incluyó el control de presión, control de temperatura, y la fuente. Se realizó con el software *Circuit Maker*TM, y se muestra en la figura 4.15.

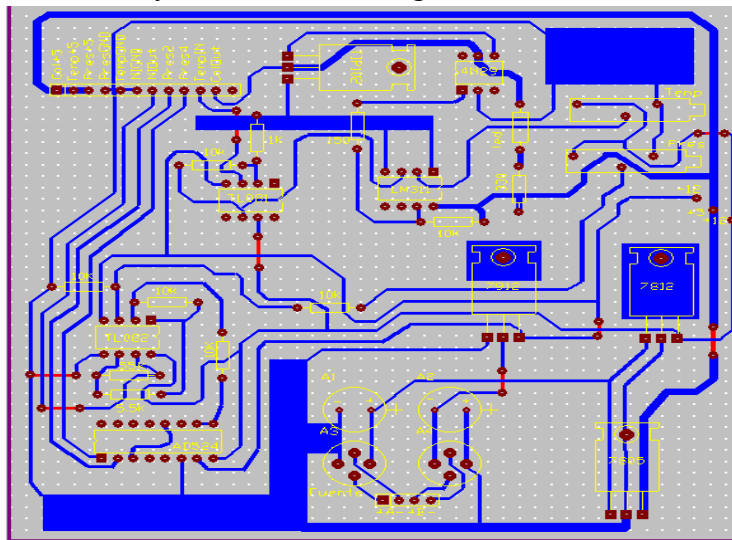


Fig. 4.15 Tarjeta impresa

4.7 Diseño del gabinete.

La tesis anterior, como ya se había mencionado, quedó solamente como un experimento, el objetivo en esta tesis es presentar el espirómetro como un producto terminado, por lo que

se necesitaba una estructura que albergue la tarjeta de acondicionamiento, la fuente, el neumotacógrafo y todos los elementos que integran el equipo.

Se diseñó una primera versión del gabinete en el programa PRO-E, para darnos una idea de las dimensiones ortogonales y del modelo 3-D vistas ortogonales y el modelo isométrico, que se muestran en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

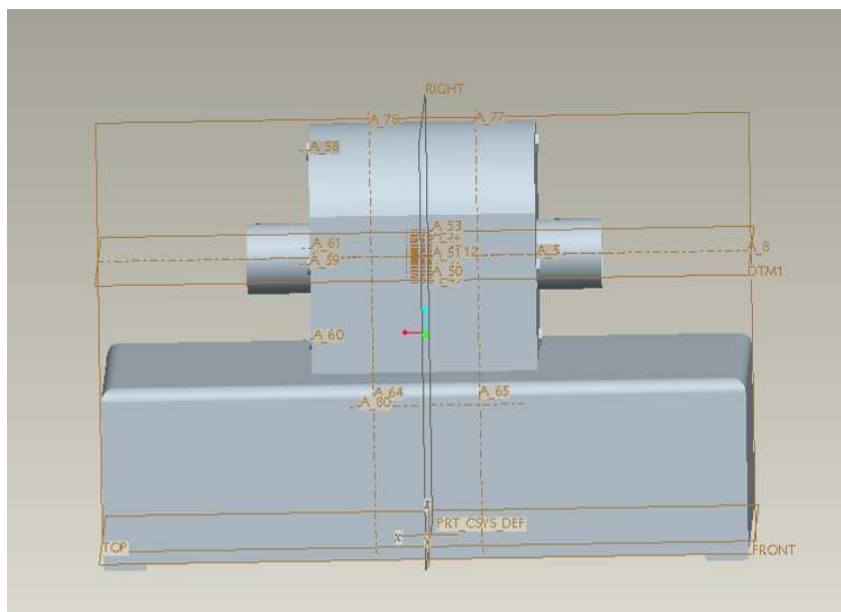


Fig. 4.16 Vista en sólido del gabinete

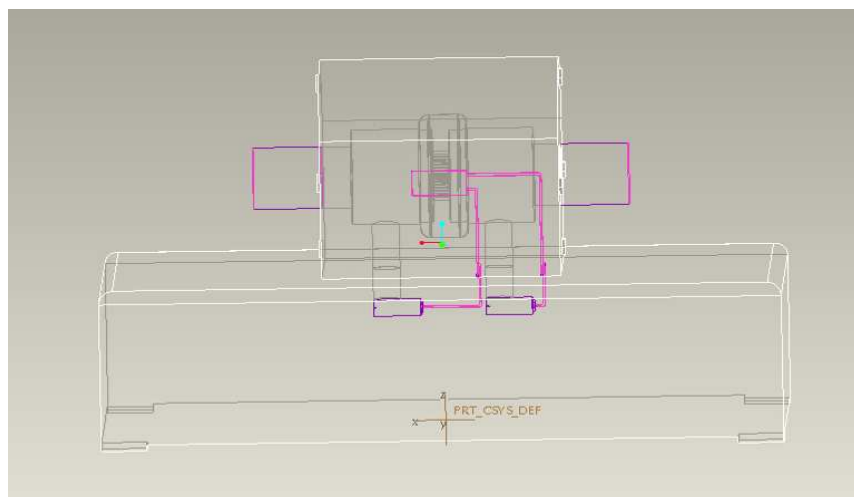


Fig. 4.17 Vistas ortogonaes del gabinete

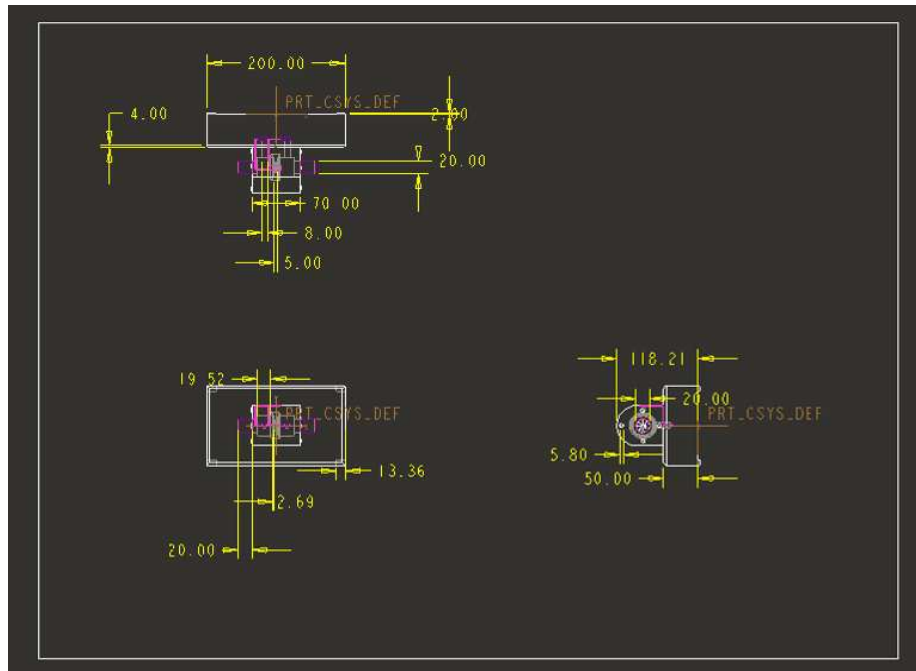


Fig. 4.18 Isométrico del gabinete

Utilizando los planos de las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se construyó un primer prototipo de gabinete y neumotacógrafo, lo que permitió probar diferentes materiales de construcción. En primer lugar, se construyeron modelos tridimensionales en cartón para tener una idea clara de las dimensiones reales y la distribución de componentes dentro del gabinete.

Este modelo de cartón fue proporcionado a los fabricantes del gabinete. Para esto, se tomó la decisión de construir el gabinete en acrílico transparente de 4mm. de espesor para

que el prototipo obtenido permitiera la visualización interna de los componentes. Un prototipo comercializable podría ser de material opaco.

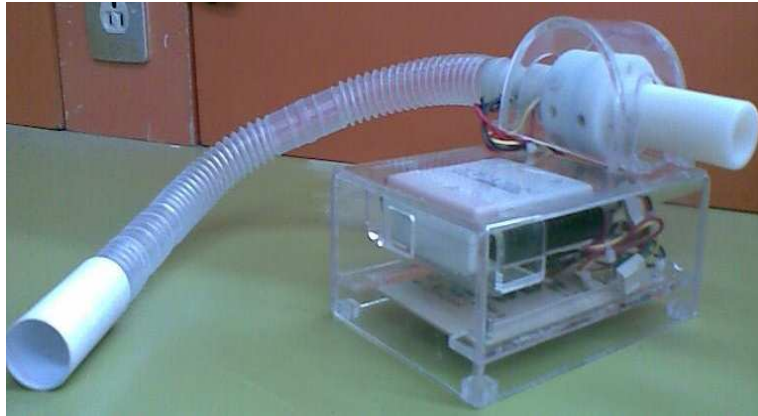


Fig. 4.19 Primer gabinete.

En el prototipo que se muestra en la figura 4.19, cuyas dimensiones eran 15cm de largo por 10 cm. de ancho, permitió identificar las carencias de los proyectos anteriores como son la falta de la fuente de alimentación que en principio se sustituyó por tres eliminadores de baterías no regulados para cubrir las necesidades de suministro eléctrico. También puso de manifiesto el exceso de componentes en el circuito que no tenían una función específica cuando se procedió a hacer la prueba de funcionamiento. La figura 4.19 muestra el circuito impreso elaborado a partir del circuito dejado en protoboard del proyecto previo.

Las observaciones anteriores condujeron a la reingeniería de las tarjetas de acondicionamiento y a la construcción de la versión final del circuito impreso presentado en la sección anterior, que ya incluía elementos de calibración, la fuente de alimentación regulada y un esquema de acondicionamiento optimizado en número de componentes, donde cada circuito integrado tiene funciones insustituibles.

La nueva tarjeta después de incluir todas las funciones necesarias quedó con un largo de 12cm. por 12cm. de ancho motivo por el cual, se tuvieron que modificar las dimensiones del gabinete para que pudiera albergar a la nueva tarjeta, a los transformadores, que permitiera fijar la tarjeta electrónica al sensor de presión y al neumotacógrafo. Para este nuevo gabinete no se elaboraron los diseños en Pro-E dado que solo fue necesaria la modificación de dimensiones partiendo del primer diseño.

La figura 4.20 muestra el gabinete con todos los elementos instalados incluyendo los arneses de conexión que le dan fuerza mecánica a los cables al ir agrupados de acuerdo al tipo de señales que conducen evitando tener cables sueltos que incrementan las posibilidades de fallas y corto circuito.

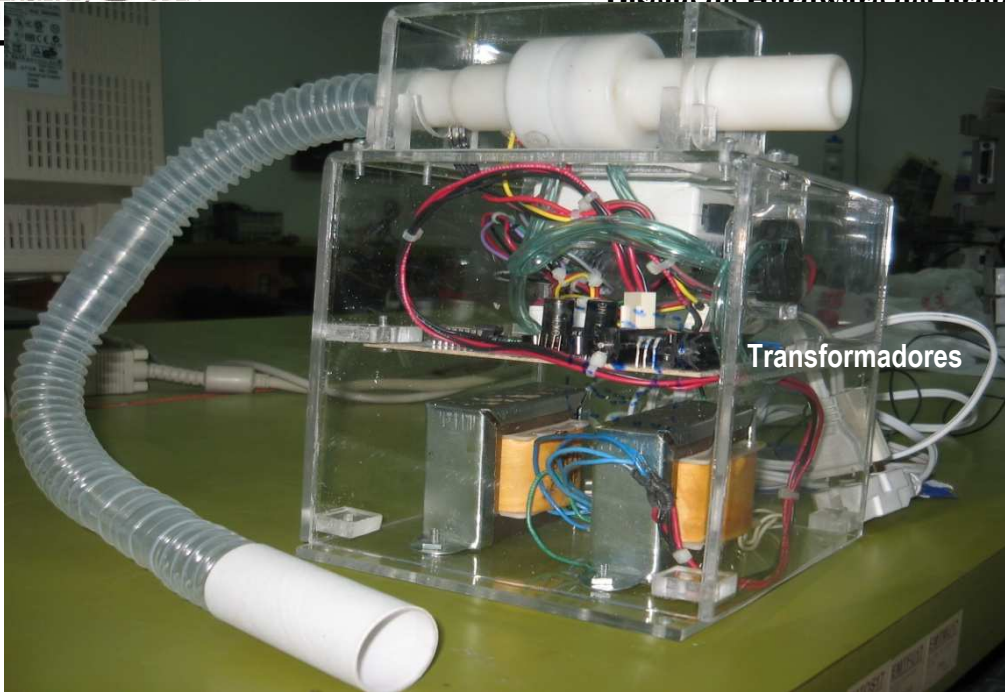


Fig. 4.20 Versión final del gabinete

En este capítulo, se explicó y justificó la elaboración de cada parte que conforma el Hardware del prototipo de un aparato espirométrico, así como las modificaciones que se tuvieron que hacer al prototipo anterior, cumpliendo así los objetivos planteados en esta tesis de diseño estético, portabilidad y precisión. Teniendo también que se deben modificar algunas cosas en el software, lo que se mencionará en el siguiente capítulo.