

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de un sistema de anemometría de hilo caliente para estudios de
turbulencia en laboratorio.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Aron Daniel Juvin Vallejo

Mario Christopher Ramírez Mazón

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios por haberme guiado y dado fuerzas para atravesar cada obstáculo presentado en esta etapa de mi vida.

A mis padres, Isabel Vallejo y Ruperto Juvín que siempre confiaron en mí y me brindaron su apoyo incondicional aun en situaciones difíciles.

A mis hermanos Jonathan y Ariana, por depositar su confianza en mí y darme ánimos en todo momento.

Aron Juvín V.

DEDICATORIA

A Dios por darme la sabiduría y entendimiento para poder culminar esta etapa.

A mi hijo Matthew y esposa Alexandra, por darme la motivación de superarme.

A mis hermanos Kristel y David, por darme el apoyo económico y motivacional durante toda la etapa académica.

A mis padres Marcia Mazón y David Ramírez, por darme los valores y educación para formarme como persona de bien.

Mario Ramírez M.

AGRADECIMIENTOS

Me siento orgulloso de mencionar a las personas que de manera indirecta han contribuido de forma positiva para culminar este proyecto. En primera instancia a Dios, por ser un pilar fundamental en mi vida, luego a Kristel Ramírez y David Ramírez por darme el apoyo económico para culminar esta tesis, también a Carlos Mazón por compartir sus conocimientos en el campo práctico y apoyo incondicional.

Mario Ramírez M.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Mario Ramírez Mazón y Aron Juvín Vallejo damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Mario Ramírez Mazón

Aron Juvín Vallejo

EVALUADORES

Ing. Dennys Cortez

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Carlos Salazar

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto aborda el diseño de un sistema de anemometría de hilo caliente como instrumento de medición, ya que el Laboratorio de Termofluidos de la ESPOL no dispone de un instrumento de este tipo; no se fabrican en grandes cantidades y su coste es elevado. El objetivo principal del proyecto es diseñar un circuito de control y un sistema de adquisición de datos para el anemómetro de hilo caliente y la estación de calibración.

Se utilizó una metodología con un enfoque teórico, desarrollando simulaciones con el uso de software como Proteus y Labview. La solución se subdivide en dos etapas, la primera es el desarrollo y simulación del circuito electrónico y la segunda es la adquisición y procesamiento de datos. Para el circuito fue necesario implementar componentes como OpAmps, transistores, resistencias y condensadores. Mientras que en la segunda etapa fue necesario utilizar un DAQ USB 6001 y un ordenador o PC.

En base a los resultados obtenidos, se evidencia el funcionamiento del circuito al mantener la temperatura constante del filamento variando la resistencia y la corriente y obteniendo la relación con el voltaje del cable, además se obtuvo la adquisición y procesamiento de estos datos de voltaje para ser convertidos a un valor de velocidad utilizando la ley de King.

De acuerdo al análisis realizado, se concluye que el diseño de un anemómetro de hilo caliente es de fácil construcción y bajo costo, capaz de ser implementado y replicado por estudiantes y profesores para los Laboratorios de Termofluidos.

Palabras Clave: Anemómetro, Laboratorio de Termofluidos, adquisición de datos y circuito electrónico.

ABSTRACT

This project deals with the design of a hot wire anemometry system as a measuring instrument, since the Thermofluids Laboratory of the ESPOL does not have such an instrument, they are not manufactured in large quantities and their cost is high. The main objective of the project is to design a control circuit and a data acquisition system for the hot wire anemometer and the calibration station.

A methodology with a theoretical approach was used, developing simulations with the use of software such as Proteus and Labview. The solution is subdivided into two stages, the first one is the development and simulation of the electronic circuit and the second one is the data acquisition and processing. For the circuit it was necessary to implement components such as OpAmps, transistors, resistors, and capacitors. While in the second stage it was necessary to use a DAQ USB 6001 and a computer or PC. Based on the results obtained, the operation of the circuit is evidenced by maintaining the constant temperature of the filament by varying the resistance and current and obtaining the relationship with the wire voltage, also obtained the acquisition and processing of these voltage data to be converted to a speed value using King's law. According to the analysis performed, it is concluded that the design of a hot wire anemometer is of easy construction and low cost, capable of being implemented and replicated by students and professors for the Thermofluids Laboratories.

Keywords: *Anemometer, Thermofluids Laboratory, data acquisition and electronic circuit.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | I |
| <i>ABSTRACT</i> | II |
| ÍNDICE GENERAL..... | III |
| ABREVIATURAS | V |
| SIMBOLOGÍA | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| CAPÍTULO 1 | 10 |
| 1. Introducción..... | 10 |
| 1.1 Descripción del problema | 11 |
| 1.2 Justificación del problema..... | 11 |
| 1.3 Objetivos..... | 11 |
| 1.3.1 Objetivo General | 11 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 11 |
| 1.4 Marco teórico | 12 |
| 1.4.1 Generalidades..... | 12 |
| 1.4.2 Antecedentes | 13 |
| 1.4.3 Tipos de sensores | 14 |
| 1.4.4 Modelos de hilos del sensor..... | 15 |
| 1.4.5 Métodos electrónicos en anemómetros..... | 17 |
| 1.4.6 Herramientas y configuraciones electrónicas..... | 19 |
| 1.4.6.1 Puente de Wheatstone..... | 19 |
| 1.4.6.2 Amplificadores Operacionales..... | 20 |
| 1.4.6.3 Transistores BJT | 23 |
| 1.4.7 Sistemas de adquisición de datos..... | 23 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 2..... | 26 |
| 2. Metodología | 26 |
| 2.1 Descripción de la metodología..... | 27 |
| 2.2 Análisis y definición de parámetros del sensor | 28 |
| 2.3 Diseño del circuito electrónico y sistema de control | 29 |
| 2.3.1 Configuración del diseño electrónico..... | 29 |
| 2.3.2 Modos del circuito | 33 |
| 2.4 Adquisición y tratamiento de datos | 38 |
| 2.4.1 Herramientas empleadas | 38 |
| 2.4.2 Relación física eléctrica en el proceso de calibración | 39 |
| 2.4.3 Programa implementado en el proceso de calibración..... | 42 |
| 2.4.4 Interacción fluido sensor en el cálculo de la velocidad..... | 46 |
| 2.4.5 Programa para calcular la velocidad | 48 |
| CAPÍTULO 3..... | 50 |
| 3. Análisis Y resultados..... | 50 |
| 3.1 Circuito electrónico | 50 |
| 3.2 Calibración..... | 52 |
| 3.3 Cálculo de la velocidad del fluido..... | 53 |
| 3.4 Análisis de costos | 57 |
| CAPÍTULO 4..... | 58 |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 58 |
| 4.1 Conclusiones | 58 |
| 4.2 Recomendaciones | 58 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 60 |
| APÉNDICE..... | 64 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| CTA | Anemómetro a Temperatura Constante |
| CCA | Anemómetro a Corriente Constante |
| BJT | Transistor de Unión Bipolar |
| NI | National Instrument |
| ADC | Convertidor Analógico a Digital |
| DAQ | Adquisición de Datos |
| OpAmp | Amplificadores Operacionales |
| Labview | Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench |
| PCB | Printed Circuit Board |

SIMBOLOGÍA

| | |
|----------|----------------------------|
| mA | Miliamperio |
| uA | Microamperio |
| V | Voltio |
| Ω | Ohmios |
| V_{cc} | Voltaje corriente continua |
| V_{ac} | Voltaje corriente alterna |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| um | Micrómetro |
| s | Segundos |
| Hz | Hercio |
| KHz | Kilohercio |
| % | Por ciento |
| Kg | Kilogramo |
| °C | Grado Celsius |
| txt | Texto |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Tipos de diseños de sensores [5] | 14 |
| Figura 1.2 a) Sonda unidimensional. b) Sonda bidimensional. c) Sonda tridimensional. [5]..... | 16 |
| Figura 1.3 Circuito electrónico del método de corriente constante | 18 |
| Figura 1.4 Circuito electrónico del método de temperatura constante | 19 |
| Figura 1.5 Puente de Wheatstone [9] | 20 |
| Figura 1.6 Relación de entrada y salida de un OpAmp..... | 21 |
| Figura 1.7 Símbolo de un amplificador operacional | 21 |
| Figura 1.8 Curva característica del amplificador operacional | 22 |
| Figura 1.9 Transistor BJT tipo NPN-PNP..... | 23 |
| Figura 1.10 Señal muestreada con alias..... | 25 |
| Figura 1.11 Teorema de Nyquist en acción | 25 |
| Figura 2.1 Planteamiento del desarrollo de la solución del problema | 27 |
| Figura 2.2 Diseño de circuito electrónico del anemómetro de hilo caliente | 29 |
| Figura 2.3 Configuración interna del TIP 147 | 32 |
| Figura 2.4 Esquema del amplificador comparador..... | 34 |
| Figura 2.5 Circuito detector de calibración..... | 35 |
| Figura 2.6 Circuito generador de onda cuadrada..... | 36 |
| Figura 2.7 Tarjeta DAQ NI USB 6009 [18]..... | 38 |
| Figura 2.8 Herramienta computacional [16]..... | 39 |
| Figura 2.9 Estación de calibración general [19] | 40 |
| Figura 2.10 Ingreso de parámetros iniciales al sistema de calibración | 43 |
| Figura 2.11 Ingreso de parámetros durante la adquisición de voltaje..... | 43 |
| Figura 2.12 Elección de ruta para guardar datos de calibración | 44 |
| Figura 2.13 Simulador de adquisición de datos | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.14 Anemómetro con afectación de un flujo..... | 47 |
| Figura 2.15 Descomposición de vector de velocidad U. [22] | 47 |
| Figura 2.16 Ingreso de constante de calibración y frecuencia de muestreo | 49 |
| Figura 3.1 Valores de simulación resistencia vs corriente | 51 |
| Figura 3.2 Valores de simulación resistencia vs voltaje V_a | 52 |
| Figura 3.3 Grafica de calibración | 53 |
| Figura 3.4 Adquisición de voltaje | 54 |
| Figura 3.5 Cálculo de la velocidad y velocidad media | 55 |
| Figura 3.6 Intensidad de turbulencia..... | 56 |
| Figura 4.1 Pantalla inicial del sistema..... | 64 |
| Figura 4.2 Pantalla de calibración..... | 65 |
| Figura 4.3 Pantalla del cálculo de la velocidad | 65 |
| Figura 4.4 Programación en Labview de la pantalla de calibración | 66 |
| Figura 4.5 Programación en Labview de la pantalla de velocidad | 66 |
| Figura 4.6 Diseño en 3D del circuito..... | 67 |
| Figura 4.7 PCB del circuito | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Resistividad y coeficiente de temperatura de materiales [17] | 28 |
| Tabla 2.1 Relación resistencia y corriente | 50 |
| Tabla 3.2 Relación resistencia y voltaje | 51 |
| Tabla 4.3 Constantes de calibración con variación de n..... | 53 |
| Tabla 5.4 Costos de componentes | 57 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El anemómetro de hilo caliente es un instrumento encargado de realizar mediciones de velocidades de fluidos, que, a pesar de que actualmente existen otros métodos y técnicas empleadas para realizar este tipo de estudios, la técnica del alambre caliente sigue siendo uno de los modelos más importantes y utilizados para el análisis de las fluctuaciones de velocidad en los flujos turbulentos. Esto se debe principalmente a su alta respuesta en frecuencia y a su gran precisión de sus mediciones.[7]

La herramienta principal de los anemómetros de hilo caliente es el sensor o filamento encargado de detectar las fluctuaciones de velocidad del fluido, y que usualmente suele ser de tungsteno, platino o platino-iridio [8]; el mismo que es colocado entre dos puntas bases que lo sostienen para poder ser expuesto al flujo. Además, cuentan con el circuito electrónico encargado de controlar y estabilizar al sistema. El funcionamiento de los sistemas de anemometría de hilo caliente es en base a la transferencia de calor por convección entre el filamento y el fluido al que es expuesto, por lo tanto, el hilo caliente es básicamente un transductor térmico.

Generalmente los anemómetros de alambre caliente son los instrumentos adecuados para realizar investigaciones y estudios de turbulencia de fluidos dentro de laboratorios, los cuales son de gran importancia en investigaciones fundamentales de mecánica de fluidos que abarcan desde el diseño de aeronaves, como también de vehículos submarinos. Es por ello y ante la necesidad de este tipo de herramienta en el Laboratorio de Termofluidos de la ESPOL, se realiza el diseño electrónico y sistema de adquisición de datos de un anemómetro de hilo caliente, en base al método de temperatura constante con el cual se obtiene la velocidad de los fluidos a estudiar.

1.1 Descripción del problema

Actualmente el Laboratorio de Termofluidos de la ESPOL no cuenta con instrumentos para realizar estudios de turbulencia de fluidos, el instrumento empleado generalmente para realizar dichos estudios es el anemómetro de hilo caliente y pese a lo relativamente sencillo de su principio de operación, por tratarse de un instrumento para fines de investigación no son producidos a gran escala; por lo cual su costo en el mercado es elevado. Es por esto por lo que, se requiere diseñar de un sistema de anemometría de hilo caliente de bajo costo, que pueda ser utilizado para futuras investigaciones dentro de la ESPOL.

1.2 Justificación del problema

Mediante el diseño de un sistema de anemometría de hilo caliente se permitirá realizar los estudios necesarios en el Laboratorio de Termofluidos de la ESPOL, además de múltiples investigaciones que tendrían impacto directo sobre las capacidades investigativas experimentales de la Universidad en general, por ejemplo: para investigaciones fundamentales de mecánica de fluidos, optimización de diseños de vehículos submarinos, aeronaves o drones, entre otras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de anemometría de hilo caliente de bajo costo para estudios de turbulencia en un laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar un circuito de control y sistema de adquisición de datos para el anemómetro de hilo caliente y la estación de calibración. (Ingeniería en Electrónica y Automatización)
2. Establecer las relaciones físicas y eléctricas para el diseño del circuito electrónico del sistema de anemometría. (Ingeniería en Electrónica y Automatización)

3. Estimar los costos de diseño, materiales, operación, mano de obra y tiempos requeridos para construir el sistema. (Ingeniería Mecánica - Ingeniería en Electrónica y Automatización)
4. Elaborar manuales de operación del diseño para el mantenimiento básico del sistema. (Ingeniería Mecánica)

1.4 Marco teórico

1.4.1 Generalidades

La finalidad de un anemómetro de hilo caliente es realizar mediciones de flujos turbulentos a gran precisión, por ello, en su diseño consta de un pequeño filamento metálico (sensor) muy sensible y que inmerso en flujos turbulentos ocurren variaciones de temperatura. Estas variaciones son detectadas por el circuito electrónico del anemómetro y mediante su sistema de control responderá a las mismas, de esta forma se obtiene la señal que será enviada al programa para el cálculo de la velocidad.[1]

Los sistemas de anemometría, aunque muchas veces pasen desapercibidos son empleados en una amplia variedad de campos, ya que con ellos se realizan estudios sobre el flujo del aire en ciertos lugares necesarios para la elaboración de productos finales o la adecuación de áreas específicas.

Existen diferentes tipos de anemómetros, entre los cuales tenemos:

- **Anemómetro de empuje:** poseen la forma de una esfera hueca, que al estar sometido al aire gira, muy similar a las turbinas empleadas en los sistemas eólicos.
- **Anemómetro de compresión:** está conformado por un sistema de tubos similar al tubo Pitot, con la finalidad de medir presiones dinámica y estática. A partir de estas se calcula la presión diferencial para luego obtener la velocidad del flujo.
- **Anemómetro de hilo caliente:** usualmente compuesto por dos soportes en los que tienen entre ellos un alambre delgado que es el sensor, el cual se encuentra inmerso en un flujo, a medida que este detecta las

fluctuaciones de velocidad del fluido se le inyecta o hace fluir corriente por el alambre mediante un circuito de control. A partir de las relaciones físicas y eléctricas se obtiene la velocidad del fluido.

1.4.2 Antecedentes

Se han encontrado diferentes estudios acerca de los sistemas de anemometría en todo el mundo ya que estos son utilizados en el diseño y estudio de sistemas importantes referentes a la ingeniería y temas científicos de investigación.

Adentrándonos un poco a los orígenes del anemómetro, encontramos que el pionero en el diseño de este sistema fue el italiano León Battista Alberti a mediados del siglo XV, su diseño estaba compuesto por un disco que al estar sometido al flujo del viento era empujado ocasionando que el disco tuviera un ángulo de inclinación y mediante el uso de una escala era posible realizar el registro de la fuerza del fluido. Luego de este primer diseño y basándose en el mismo, hubo personas tales como Leonardo dan Vinci o Robert Hooke quienes crearon distintas versiones de anemómetros reinventándolo y mejorándolo, así ha ido cambiando el anemómetro a lo largo del tiempo.[3]

A medida que se realizaban estudios sobre los sistemas de anemometría y al avance y desarrollo de la ingeniería, fue necesario la creación de anemómetros de una alta precisión y exactitud. Por lo cual surgió el tubo Pitot, que en la época de su invención cumplía con los requerimientos que le exigía la ciencia, aunque a pesar de lo grandioso de este sistema tenía algunos inconvenientes ya que debido a su diseño este no era fácil de movilizar, además que en la realización de mediciones cerca de superficies u obstáculos no se tenía gran exactitud de las variaciones de la velocidad del fluido [2].

Debido a los problemas que surgieron con el tubo Pitot y ante la necesidad de desarrollar un modelo que cumpla con todos los requerimientos de los estudios realizados para medir con más exactitud las fluctuaciones del fluido, fue que se llevó a cabo el desarrollo de sistemas de anemometría de hilo caliente. Uno de los primeros en realizar el estudio de este sistema fue Lois Vessot King, quien estableció la relación entre la variación de la resistencia del alambre debido a su

temperatura al estar expuesto a un flujo cambiante, así también como la relación entre la velocidad del flujo y la corriente de calentamiento del alambre [4]-[2].

Los anemómetros modernos de hilo caliente se construyeron en base al estudio de King, que, aunque son creados nuevos diseños el sistema electrónico elaborado es de acorde a la relación que estableció en sus ensayos y pruebas de laboratorio.

1.4.3 Tipos de sensores

En los sistemas de anemometría de alambre caliente el sensor a utilizar puede variar, entre los cuales se tiene a los sensores basados en: Alambres miniatura, alambres bañados en oro, sensores de fibra o de película [5]. El alambre empleado en el diseño de estos sistemas cuya sección es transversal circular por lo general posee un diámetro que va de los 3 a 5 μm . En cuanto a la longitud, en los diferentes diseños que se han investigado se indica que varía ente 1 a 2 mm, en dependencia a aquella longitud se colocarán las bases que sostendrán al filamento las cuales generalmente poseen forma de aguja. [2]

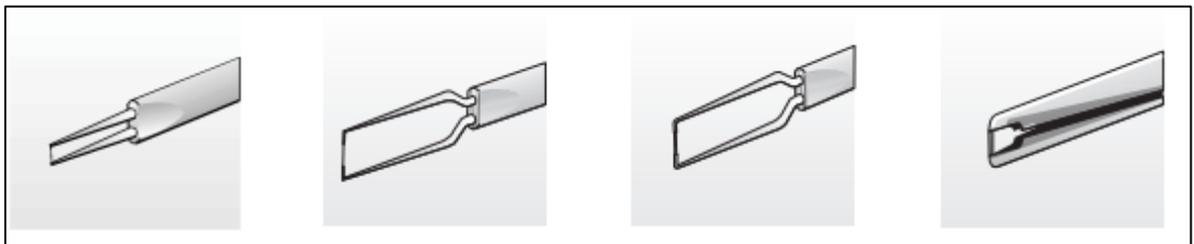


Figura 1.1 Tipos de diseños de sensores [5]

Para la elección de los diferentes tipos de sensores, se debe tener en cuenta que existe variedad y en dependencia al uso se pueden elegir los siguientes:

- **Sensores de alambres**

- o Los Alambres en miniatura, poseen características que permiten emplearlos en fluctuaciones de aire que van del 5 al 10%, su principal ventaja es que poseen una alta respuesta en frecuencia, se debe acotar que este tipo de sensores pueden ser reparados.

- Alambres bañados en oro, debido a las características del material por el que está compuesto son empleados en fluctuaciones de aire que van hasta 20-25%, a diferencias de los alambres miniatura estos poseen una baja respuesta en frecuencia, sin embargo, algo en común que tienen es que este también puede repararse.
- **Sensores de película de fibra pueden ser:**
 - Los recubiertos de cuarzo fino, se emplean sólo para mediciones en flujos de aire, poseen una baja respuesta en frecuencia, mucho menor a las de los sensores basados en alambres. Sin embargo, se debe recalcar que son de mayor duración debido a su composición, por ende, son más resistentes que los descritos anteriormente.
 - Los de Recubrimiento de cuarzo pesado, empleados en las mediciones de fluctuaciones de líquidos, siendo más exactos, en agua. Ambos sensores de película de fibra tienen la característica que pueden ser reparados.
- **Sensores de película, pueden ser:**
 - De Recubrimiento de cuarzo fino, son empleados en las mediciones de fluctuaciones de aire, siempre y cuando estas sean moderadas. Este tipo de sensor se ajusta perfectamente en lugares donde el aire este contaminado, algo desfavorable es que estos sensores poseen una sola vida de uso.
 - De Recubrimiento de cuarzo pesado, debido a su alta resistencia son empleados en las mediciones de fluctuaciones de líquidos, siendo más exactos en agua. Al igual que los de recubrimiento de cuarzo fino no son reparables.

1.4.4 Modelos de hilos del sensor

Existen 3 modelos de sondas empleadas en los sistemas de anemometría de hilo caliente, los cuales son: las unidimensionales, que poseen un solo filamento entre los dientes bases para realizar las mediciones de turbulencias de fluidos en un solo sentido. Las bidimensionales, a las cuales se le agrega un filamento adicional

a la sonda unidimensional, por lo que asimismo los dientes bases serán el doble para poder sujetar ambos hilos y realizar las mediciones requeridas.

Por último, se tiene al modelo tridimensional, en el cual ahora se tienen 3 hilos encargados de realizar las mediciones de flujo de forma más avanzada, así mismo el modelo de la base que sostiene a los filamentos varia, otorgándole un diseño más complejo. A continuación, se observa los modelos o variaciones de la sonda del anemómetro de hilo caliente.

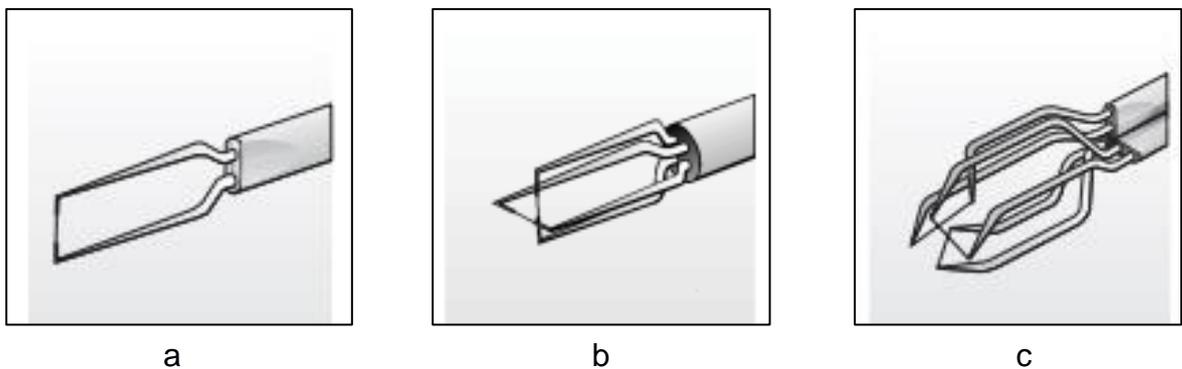


Figura 1.2 a) Sonda unidimensional. b) Sonda bidimensional. c) Sonda tridimensional. [5]

Tal y como lo indican sus nombres, estos pueden medir la velocidad del fluido en una, dos o tres dimensiones, sin embargo, únicamente en las sondas bidimensionales y tridimensionales es posible obtener los datos de magnitud y dirección de la velocidad del fluido.

Cabe indicar que el ángulo del sensor influye mucho en la toma de mediciones, por lo que se mencionará algunas variaciones del tipo de sondas.

Sondas normales de sensor único: estas corresponden a las sondas que únicamente pueden medir las fluctuaciones de velocidad en una sola dirección, el filamento es colocado de modo que quede de forma perpendicular a las bases que lo sostienen, por lo que las agujas bases estarán paralelas al flujo [5].

Sondas inclinadas de sensor único: al igual que las anteriores, poseen un único filamento para censar las mediciones, pero la posición de este respecto al eje de

la sonda es de una inclinación de 45° . Debido a la posición del alambre son utilizados en flujos estacionarios tridimensionales [5].

Sondas de doble sensor:

- **Sondas X:** estas corresponden a las sondas que pueden realizar mediciones en dos dimensiones, es decir es posible obtener los datos de magnitud y dirección de la velocidad del fluido. Su precisión depende del ángulo existente entre el eje de la sonda y el vector velocidad del flujo, donde este debe estar entre -45° y 45° [5].
- **Sondas de fibra dividida:** al igual que las sondas x, pueden realizar mediciones en dos dimensiones, a diferencia que las anteriores el vector velocidad del flujo se encuentre en un rango más amplio, el cual va de -90° a 90° respecto al eje de la sonda. Referente a capas de corte este diseño posee una mayor eficiencia que las sondas X, al contar con una resolución espacial transversal de 0.2 mm [5].

Sondas de triple sensor:

- **Sondas triaxiales:** corresponden a las sondas que pueden realizar mediciones en dos dimensiones, poseen 3 filamentos encargados de medir las fluctuaciones de velocidades de flujos en un rango de 70° con respecto al eje de la sonda. En cuanto a su resolución espacial, esta es mayor que las de dos hilos, la cual toma la estructura de una esfera cuyo diámetro es de 1.3mm [5].
- **Sondas de película de triple división:** Este diseño únicamente se encarga de realizar la inversión de flujos correspondientes a mediciones en dos dimensiones, su rango de trabajo de trabajo va de -180° a 180° .

1.4.5 Métodos electrónicos en anemómetros

Para el diseño electrónico de los sistemas de anemometría de hilo caliente usualmente se emplean dos métodos, los cuales son:

- Método de corriente constante (CCA)

- Método de temperatura constante (CTA).

Método de corriente constante.

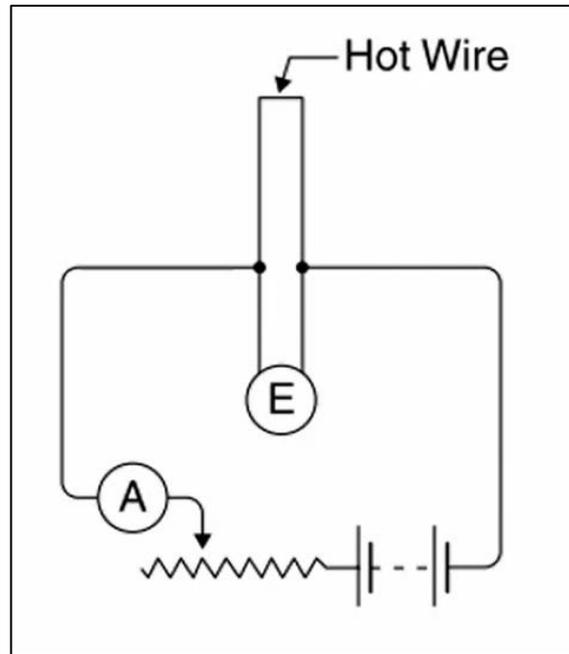


Figura 1.3 Circuito electrónico del método de corriente constante

En la figura 1.3 se observa el esquema electrónico general del método de corriente constante (CCA), el cual está compuesto por una fuente constante, el sensor y una resistencia de alto ohmiaje. Estos componentes están colocados tal como se observa en la figura mencionada formando un circuito en serie entre ellas. De esta forma se tiene una corriente constante, ya que la variación de la resistencia del sensor en comparación con la resistencia fija de alto ohmiaje es mínima y por ende la corriente no cambia, el circuito está gobernado por la resistencia de gran valor que se ha colocado.

Este circuito es usualmente empleado para mediciones de velocidades medias y no para fluctuaciones.

Método de temperatura constante (CTA).

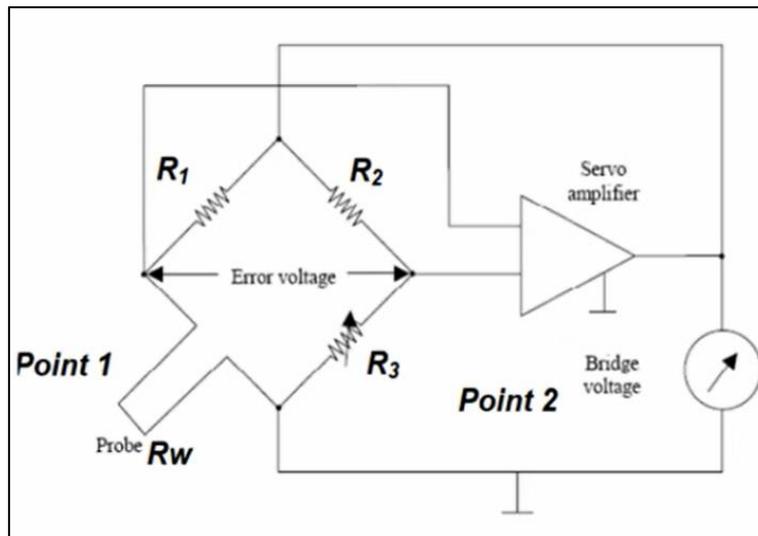


Figura 1.4 Circuito electrónico del método de temperatura constante

En la figura 1.4, se tiene el método de temperatura constante (CTA) cuyo diseño básico está conformado por una configuración de resistencias (puente de Wheatstone), un amplificador operacional y un sistema de retroalimentación. Este método consiste en mantener constante la temperatura del sensor el cual está relacionado con la resistencia eléctrica del mismo. Por lo tanto, al someter al sensor a fluctuaciones de flujos su resistencia varía, el puente se desbalancea y el circuito de retroalimentación actúa proporcionando la corriente necesaria para balancear el puente y por ende variar la resistencia para el correcto equilibrio. Este método es el más empleado en circuitos de anemometría de hilo caliente, ya que posee gran precisión en medir las fluctuaciones de velocidad del viento.

1.4.6 Herramientas y configuraciones electrónicas

1.4.6.1 Puente de Wheatstone

Mencionados los métodos empleados en los circuitos de anemómetros de hilo caliente es imprescindible hablar del puente de Wheatstone, ya que esta configuración electrónica es la más utilizada y la parte principal de los sistemas de anemometría diseñados para medir velocidades fluctuantes de flujos turbulentos. Como elemento esencial del puente tenemos al sensor o transductor denominado también filamento, el cual es colocado en uno de los brazos del

puente tal como se observa en la figura 1.5, a este le acompañan otras tres resistencias en la configuración; es decir es un arreglo de cuatro resistencias eléctricas [9].

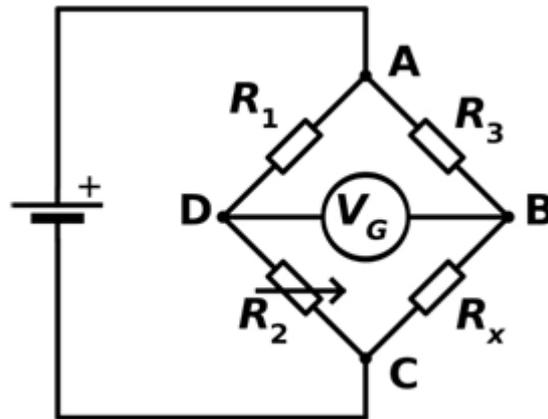


Figura 1.5 Puente de Wheatstone [9]

La aplicación principal del puente es determinar el valor desconocido de alguna de las resistencias que conforma el mismo, como se evidencia en la figura 1.5 para realizar este proceso se alimenta el circuito en los extremos del puente y se toman los nodos intermedios para medir la diferencia de potencial eléctrico, formando así un divisor de voltaje.

La relación entre resistencias cuando el circuito está en equilibrio es:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad (1.1)$$

Para esta condición se tiene una diferencia de potencial nula en los puntos intermedios del puente donde se ha colocado el instrumento de medición (V_G). De esta manera es posible encontrar el valor de alguna de las resistencias que conforman el puente de Wheatstone [9].

1.4.6.2 Amplificadores Operacionales

Los amplificadores operacionales “OpAmp” como lo llamaremos en este documento, es un componente electrónico donde al aplicar una señal de entrada se obtiene como resultado una señal amplificada que depende de una ganancia AX [10], tal como se ilustra en la figura 1.6.

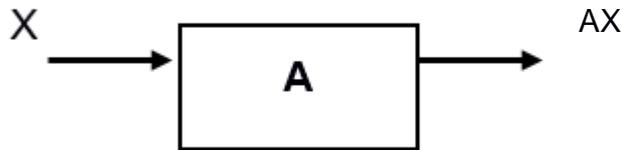


Figura 1.6 Relación de entrada y salida de un OpAmp

La forma simbólica de un OpAmp se representa por medio de un triángulo y cuenta con dos entradas, una positiva y la otra negativa (V_+ ; V_-) respectivamente; también cuenta con dos pines de alimentación uno positivo y otro negativo (V_{S+} ; V_{S-}) respectivamente, además de esto nos entrega una señal de salida por medio de un pin V_{out} , en la imagen 1.7 podemos visualizar el símbolo de un OpAmp.

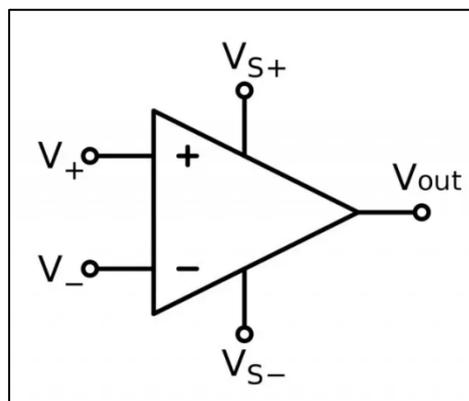


Figura 1.7 Símbolo de un amplificador operacional

El OpAmp cuenta con alta ganancia, comúnmente se los utiliza en circuitos electrónicos que tengan retroalimentación [10], otra de las características que resalta a un OpAmp es que cuenta con entrada diferencial lo que significa que la salida del amplificador será la diferencia en los voltajes de entrada ($V^+ - V^-$) multiplicado por la ganancia A_V [10], tal como se muestra en la ecuación 1.2.

$$V_{out} = A_V(V^+ - V^-) \quad (1.2)$$

Gráficamente la relación entre tensión de entrada y salida del OpAmp se visualiza como una señal lineal donde la pendiente de la recta representa la ganancia del amplificador, cabe mencionar que los valores de salida están limitados a los valores de tensión de alimentación esto es por (V_{s+} ; V_{s-}), cuando esto sucede se dice que la salida está saturada. En la figura 1.8 podemos visualizar con más detalle lo antes mencionado.

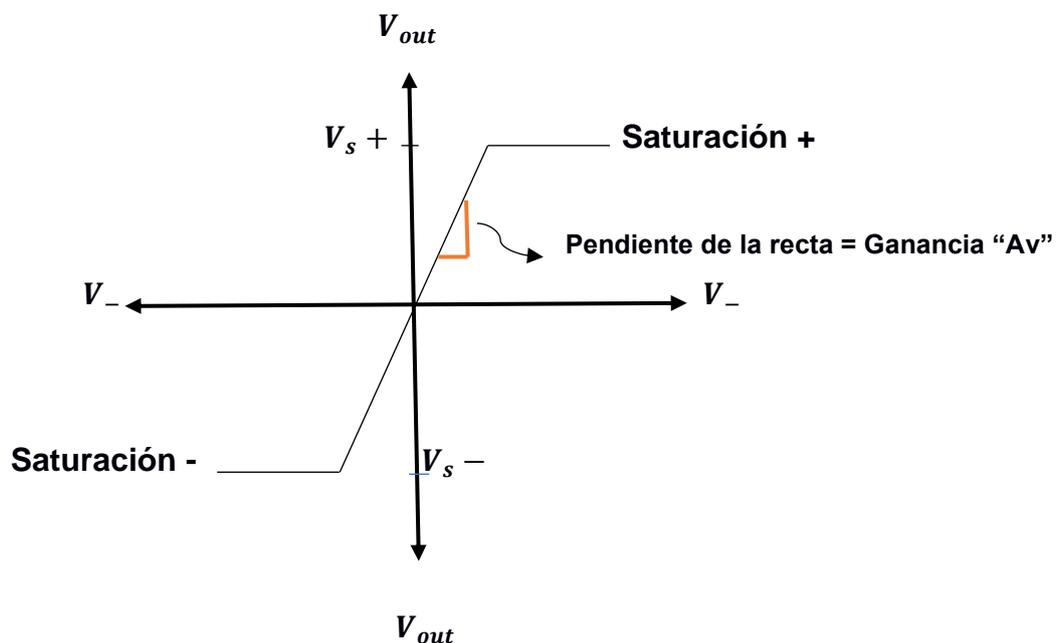


Figura 1.8 Curva característica del amplificador operacional

En condiciones ideales la corriente que ingresa al OpAmp por los pines (V^+ ; V^-) se dice que es cero, esta se la considera como una propiedad característica que nos permite el análisis de circuitos que contengan estos componentes [11].

Existen diversas configuraciones dentro de ellas las básicas que son: Amplificador inversor, amplificador no inversor, sumador, diferencial, comparador y seguidor de voltaje [11]. Otras configuraciones más complejas que no serán de mucha relevancia para este proyecto sin embargo son necesarias nombrarlas son: integrador, derivativo, convertidor de corriente a voltaje, entre otros.

Haremos énfasis en las configuraciones tipo comparador y amplificador inversor puesto que se tomarán en cuenta para el diseño del circuito electrónico de anemómetro de hilo caliente.

1.4.6.3 Transistores BJT

El transistor BJT es un elemento electrónico que cuenta con tres terminales, las cuales reciben los nombres de emisor, colector y base y que a su vez posee dos tipos de configuración que puede ser: NPN y PNP. En la figura 1.9 se encuentran los símbolos empleados en circuitos de los tipos de transistores que ya se han mencionado y se pueden diferenciar ya que la flecha del terminal del emisor cambia en cada una de las configuraciones e indica el sentido de la corriente [12].

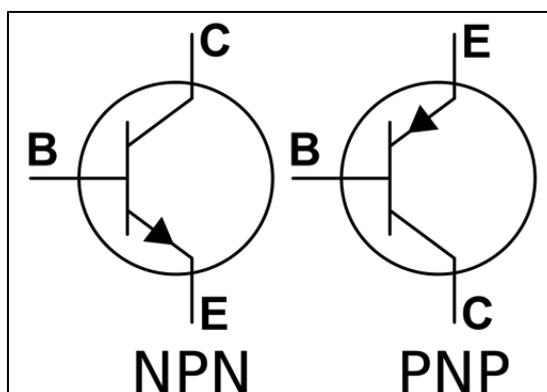


Figura 1.9 Transistor BJT tipo NPN-PNP

En cuanto a su funcionamiento se puede decir que estos elementos pueden controlar una alta potencia a partir de una mínima.

Siendo más precisos, entre los terminales del colector y emisor se aplica una potencia la cual va a ser controlada, mientras que en la base del transistor es aplicada la señal de control. La señal de la base es mínima y mediante pequeñas variaciones se puede controlar el paso de grandes corrientes a través de los terminales de colector y emisor, es decir que existe una relación entre las corrientes que fluyen por cada uno de los ramales del transistor (I_E , I_B e I_C) la cual será descrita en el capítulo siguiente [12].

1.4.7 Sistemas de adquisición de datos

El objetivo principal de un sistema de adquisición de datos es de adquirir información de procesos físicos o eléctricos como lo son: voltaje, corriente, temperatura, presión o

sonido y procesar esa información mediante un pc sea de escritorio o portátil; convirtiendo ese pc en un sistema de medición flexible y de alto rendimiento [13]. Existen diferentes medios por lo cual se envía la información desde un sensor a una computadora, el hardware de adquisición de datos añade entradas y salidas a la computadora donde se podrá procesar, visualizar y analizar este tipo de información.

Puesto que las computadoras son digitales es inevitable tener que pasar la información captada por un convertidor análogo a digital, esto se realiza por un componente denominado ADC, el cual toma una señal analógica y los convierte en valores binarios, entonces cada valor binario que nos entrega el ADC representa un valor determinado de la señal analógica [14]. La resolución del ADC representa los números binarios discretos que el ADC puede utilizar para describir una señal analógica, esto se calcula mediante la ecuación 1.6.

$$2^{\text{resolucion}} = \text{niveles} \quad (1.6)$$

Se puede apreciar que a mayor número de resolución entonces más niveles se tendrá para representar la señal analógica.

La velocidad en las que se convierten las señales de analógicas a digitales se las conoce como frecuencia de muestreo, el valor de esta velocidad debe ser precisa puesto que se distorsiona la forma de la onda original a valores exagerados. Esto se debe a que las señales analógicas son una serie continua de puntos y al ser muestreada se obtienen solo unos cuantos valores de ellas, a mayor velocidad de muestreo más valores de la señal original se adquieren y la representación de la señal será mejor. Por otra parte, si la frecuencia de muestreo es muy baja se genera un error denominado Aliasing [15].

Existe un método denominado "Teorema de Nyquist" donde se sugiere que para representar una señal con precisión en la frecuencia esta se debe muestrear mayor o igual a dos veces a la frecuencia máxima de la señal original, por otra parte, si se desea representar con precisión la forma de onda de la señal esta se debe muestrear entre 5 a 10 veces más que la frecuencia máxima de la señal original [15].

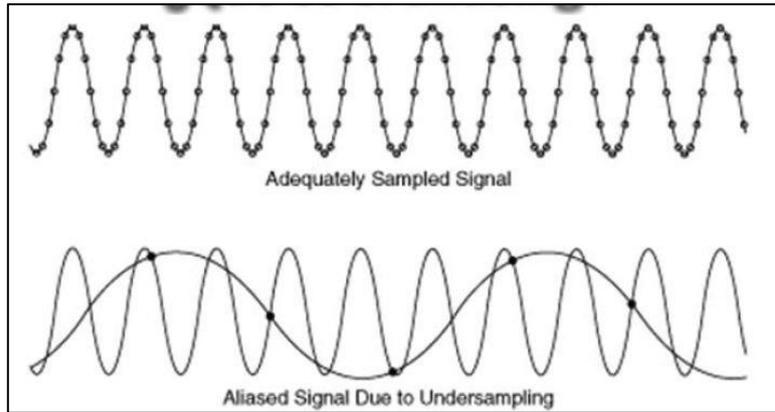


Figura 1.10 Señal muestreada con alias

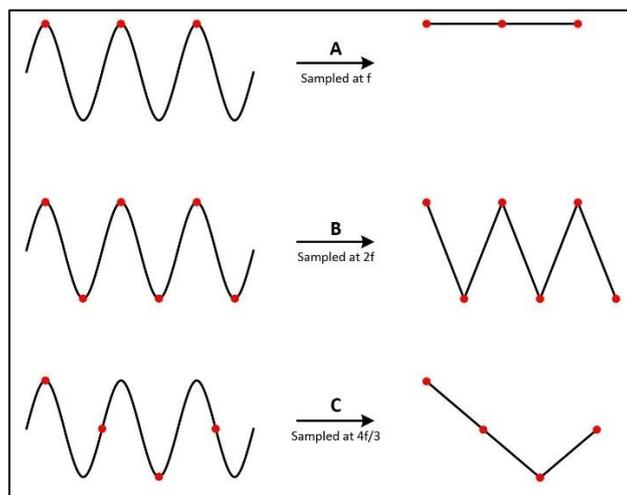


Figura 1.11 Teorema de Nyquist en acción

Para mejorar una señal en la cual la medición es dificultosa es necesario hacer un acondicionamiento de señal, un caso similar ocurre con las galgas extensiométricas las cuales requieren de un puente de Wheatstone para poder obtener una señal de medición. También requieren de un hardware externo puesto que no todos los transductores envían una tensión perfecta para la medición en DAQ, puesto que la señal puede tener mucho ruido o a la vez puede estar fuera del rango permitido en la DAQ. Para el caso de este proyecto, los valores de voltaje que nos entregara el circuito electrónico del anemómetro serán valores muy pequeños por lo que será importante casi indispensable acondicionar la señal antes de utilizar un sistema DAQ.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El uso de sistemas de anemometría de hilo caliente como instrumentos para realizar estudios teóricos y experimentales de flujo de fluidos principalmente en entes investigativos, ha ocasionado que al no existir una alta demanda de estos; esta herramienta tenga un costo muy elevado tal como se explica en el capítulo anterior, debido a ello en este capítulo se presenta la metodología implementada para realizar el diseño del circuito electrónico y sistema de adquisición de datos correspondiente a anemómetros de hilo caliente para estudios de laboratorio.

La metodología investigativa aplicada en el proyecto esta encamina a profundizar todo sobre el estudio de la parte electrónica, hasta el sistema de adquisición y tratamiento de datos del anemómetro de hilo caliente de forma teórico-práctica, proveyéndonos de leyes y conceptos aplicables al desarrollo del proyecto lo cual conlleva a dar una solución sobre la problemática planteada.

Para el diseño del proyecto se empleó el uso del software Proteus destinado al desarrollo de la parte electrónica, se seleccionó debido a que en él se realiza, el diseño del esquema electrónico y simulación del mismo, así también como la construcción de la placa de circuito impreso.

Por otra parte, para el sistema de adquisición y tratamiento de datos se usó el software Labview el cual utiliza programación gráfica y es esencial para “pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido” [16]. Otra de las razones para usar esta plataforma es que es una de las más eficaces en la adquisición de datos y versátil debido a que se puede conectar con diferentes sistemas adquirentes o DAQ.

2.1 Descripción de la metodología

El diseño metodológico propuesto para el diseño electrónico y sistema de adquisición y tratamiento de datos para un anemómetro de hilo caliente se presenta en la figura 2.1.



Figura 2.1 Planteamiento del desarrollo de la solución del problema

Tal como se observa en la figura recién vista, el desarrollo del problema contiene tres etapas y de forma breve se explicará sobre cada una de estas ya que más adelante se detalla más a fondo su explicación.

En la etapa inicial se trata acerca sensor que es colocado en el sistema electrónico y de cómo influye el material del que está compuesto y las dimensiones del mismo para obtener así la relación física y eléctrica del material.

En la segunda etapa se detalla el diseño electrónico del anemómetro, las consideraciones que se han tenido presente para que al disminuir la resistencia eléctrica del sensor a causa de estar sometido a un flujo; el sistema electrónico reaccione provocando un aumento de corriente que es enviado hasta donde se encuentra colocado el filamento, elevando así la temperatura del sensor y por ende incrementando su resistencia eléctrica.

Por último, se tiene a la etapa de adquisición y tratamiento de datos la cual consiste en la realización de dos programas, el uno es para realizar la calibración del sistema sometiendo al sensor a velocidades conocidas, además de proporcionar datos del sensor y del ambiente para así obtener la curva junto con las constantes calibración. El segundo programa es el encargado de realizar la medición de la velocidad del fluido, para el cual son necesarias las constantes de calibración obtenidas en el paso anterior y así obtener una lectura de la velocidad del flujo eficaz.

2.2 Análisis y definición de parámetros del sensor

Lo primordial en el diseño de anemómetros de hilo caliente es el tipo de sensor que se utilizara junto con sus características físicas, ya que de eso depende el encontrar la resistencia eléctrica y así sea posible modelar el circuito electrónico en el que va a estar conectado. Para este punto se analizó de forma superficial las características del hilo para encontrar la relación con la resistencia eléctrica.

De manera general, el filamento o sensor empleado en anemómetros de este tipo son construidos con un fino alambre que va de 0.5 a 20 μm de diámetro, mientras que su longitud está en el rango de 1-3mm. El material del que está compuesto el sensor empleado en anemómetros usualmente está hecho de tungsteno o platino. En la tabla 2.1 observamos las propiedades de los materiales generalmente empleados.

Tabla 2.1 Resistividad y coeficiente de temperatura de materiales [17]

| Material | Resistividad [$\Omega \cdot \text{m}$] | Coficiente de temperatura [$(^\circ\text{C})^{-1}$] |
|-----------|--|---|
| Tungsteno | $5,25 \times 10^{-8}$ | $4,5 \times 10^{-3}$ |
| Platino | 11×10^{-8} | $3,92 \times 10^{-3}$ |

En base al material que se elija para trabajar, diámetro y longitud es posible hallar la resistencia eléctrica del material, la cual se puede encontrar de la siguiente forma:

Fórmula de la resistencia eléctrica del material

$$R = \rho \frac{L}{A_S} \quad (2.1)$$

- R = resistencia del conductor [Ω].
- ρ = resistividad del material del que está hecho el conductor [$\Omega \cdot \text{m}$].
- L= longitud del conductor [m].
- A_S = área de la sección transversal del conductor [m^2].

El área de la sección transversal del sensor.

$$A_S = d^2 \frac{\pi}{4} \quad (2.2)$$

- $d =$ diámetro del conductor [m^2].

Una vez encontrada la resistencia eléctrica del material es necesario determinar cómo varia en relación con la temperatura, la cual se describe de la siguiente forma:

$$R_W = R_0[1 + \alpha(T_W - T_0)] \quad (2.3)$$

Donde:

- $R_W =$ resistencia del sensor a temperatura T_W [Ω].
- $R_0 =$ resistencia del sensor a la temperatura de referencia T_0 [Ω].
- $\alpha =$ coeficiente de temperatura de materiales [$(^\circ C)^{-1}$].
- $T_W =$ temperatura del filamento caliente [$^\circ C$].
- $T_0 =$ temperatura ambiente de referencia antes de la calibración [$^\circ C$].

2.3 Diseño del circuito electrónico y sistema de control

2.3.1 Configuración del diseño electrónico

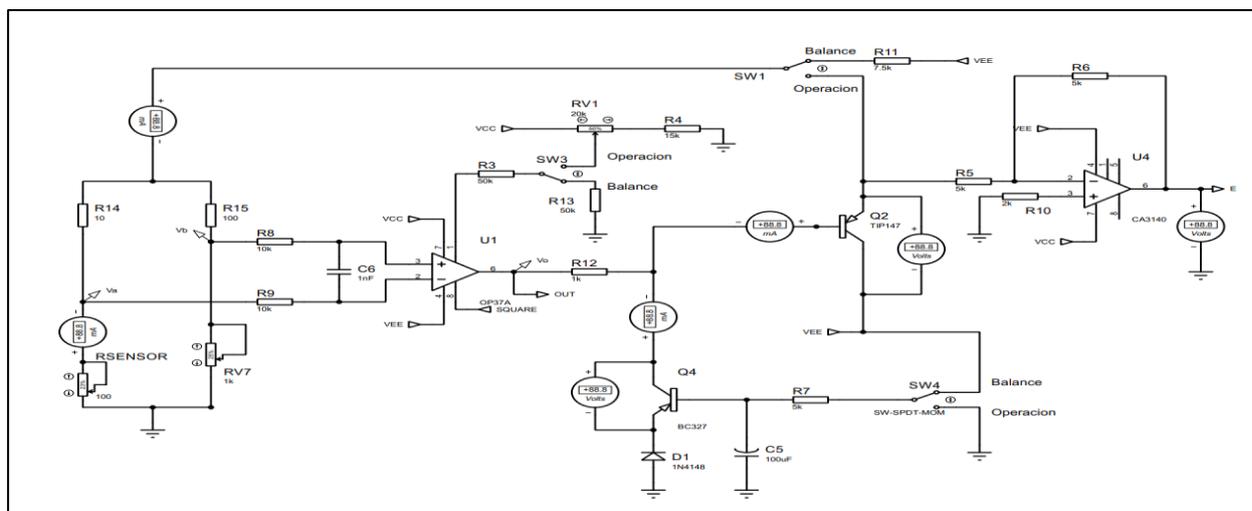


Figura 2.2 Diseño de circuito electrónico del anemómetro de hilo caliente

En primera instancia para nuestro circuito implementamos un puente de Wheatstone que es capaz de medir variaciones de resistencia con una alta precisión, es necesario establecer la relación de la configuración de las resistencias del puente según la ecuación 1.1 que para este caso será de 10:1; esta relación a la que llamaremos BR se da ya que con esto aseguramos estabilidad al sistema. Con esto último se determinó los valores de las resistencias fijas R_{14} y R_{15} los cuales pueden ser cualesquiera que brinden la relación antes mencionada, sin embargo, en esta ocasión se han elegido los valores de resistencias de 10 y 100Ω respectivamente. Una vez fijado estos valores y tomando en cuenta el valor de la resistencia del filamento, calculamos el valor del potenciómetro “ R_{set-up} ” que en el circuito corresponde al potenciómetro RV7 y despejando la resistencia variable de la ecuación 1.1 tenemos:

$$BR = \frac{R_{15}}{R_{14}} = 10$$

$$R_{set-up} = BR * R_0$$

$$R_{set-up} = 10 R_0 [\Omega]$$

El resultado de haber encontrado la resistencia de calibración R_{set-up} de la ecuación 1.1 se fijó en condiciones ideales, pero en la práctica se debe considerar otros parámetros como lo son: resistencia del cable, resistencia del filamento, resistencia del soporte del hilo, la relación del puente y la relación de sobrecalentamiento tal como se muestra en la ecuación 2.4. Con el resultado de esta ecuación definimos el punto de operación del anemómetro y a la vez ajustar el factor de sobrecalentamiento.

$$R_{set-up} = BR[(1 + \alpha)R_0 + R_{CABLE} + R_{PUNTAS}] \quad (2.4)$$

- BR = relación puente.
- R_0 = resistencia del sensor a la temperatura de referencia T_0 [Ω].
- R_{CABLE} = resistencia del cable [Ω].
- R_{PUNTAS} = resistencia del soporte del alambre [Ω].

- a = relación de sobrecalentamiento (fluido).

El puente nos entrega como salida dos valores de voltaje en los puntos V_a y V_b como se visualiza en la figura 2.2 los cuales son enviados a las entradas de un amplificador operacional OP37 que cumple la función de un amplificador de retroalimentación [28].

Este ha sido elegido debido a que es un integrado de alto rendimiento, proporciona un bajo offset, una elevada ganancia, mayor velocidad de respuesta y bajo ruido, estas características lo hacen el elemento ideal para este tipo de aplicaciones.

Luego el valor de salida del OpAmp activará la base de una configuración Darlington la cual es la encargada de realimentar el puente de Wheatstone, con el objetivo de realizar el control de corriente en relación a las variaciones de la resistencia del filamento a causa del flujo al que está sometido, de esta forma el circuito será capaz de mantener la temperatura constante en el punto de operación. Para este desarrollo se eligió el transistor BJT TIP147 del tipo PNP que internamente ya posee la configuración Darlington, este transistor se caracteriza por ser un semiconductor bipolar de alta potencia de juntura, controla dispositivos que consumen grandes cantidades de corriente de un aproximado hasta de 10 amperios, cuenta con un factor de amplificación (β_T) de 1000, este dispositivo está diseñado para la administración de potencia.

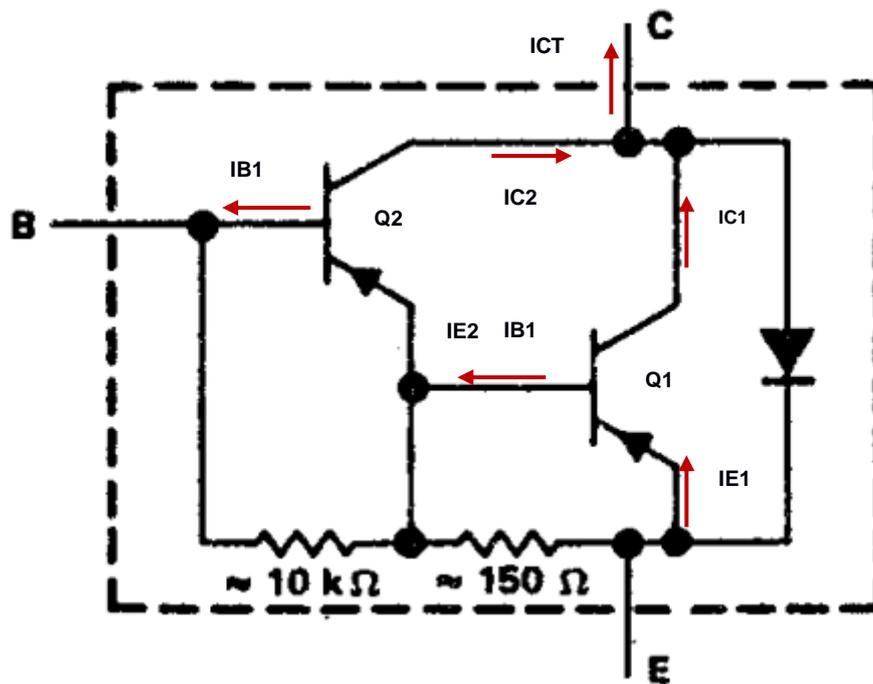


Figura 2.3 Configuración interna del TIP 147

El análisis es el mismo como si se emplearan dos transistores individuales para formar la configuración Darlington en lugar de uno compacto, por lo que la amplificación de corriente sigue las siguientes ecuaciones:

Para el transistor Q1 se tiene:

$$IE_1 = (\beta_1 + 1)IB_1 \quad (2.5)$$

$$IC_1 = \beta_1 \cdot IB_1 \quad (2.6)$$

Donde,

- IE_1 = corriente de emisor 1.
- IC_1 = corriente de colector 1.
- IB_1 = corriente de base 1.
- β_1 = factor de amplificación 1.

Para el transistor Q2 se tiene:

$$IE_2 = (\beta_2 + 1)IB_2 \quad (2.8)$$

$$IC_2 = \beta_2 \cdot IB_2 \quad (2.9)$$

Donde,

- IE_2 = corriente de emisor 2.
- IC_2 = corriente de colector 2.
- IB_2 = corriente de base 2.
- β_2 = factor de amplificación 2.

Generalmente las corrientes de emisor y colector se miden en mA y la corriente de la base en uA.

En base a la conexión de los transistores Q_1 y Q_2 para formar la configuración Darlington se tiene la siguiente relación de las corrientes:

$$IE_2 = IB_1 \quad (2.10)$$

De esta forma se tiene que la corriente amplificada es la siguiente:

$$\begin{aligned} IE_1 &= (\beta_1 + 1)IB_1 \\ IE_1 &= (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)IB_2 \\ IE_1 &\approx \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot IB_2 \\ IE_1 &\approx \beta_T \cdot IB_2 \end{aligned}$$

La ganancia β_T que suministra el TIP147 según la hoja de datos es de 1000, relacionando la corriente de base con la corriente del emisor tenemos:

$$IE_1 \approx 1000 \cdot IB_2 \quad [mA]$$

Las resistencias adicionales que poseen los modelos compactos como el que utilizamos sirven para una mayor rapidez en la conmutación de sus estados, ya que al tener dos transistores el tiempo de conmutación es mayor a diferencia de que se tuviera uno solo. Además de ello en la figura 2.3 también se observa que tiene un diodo conectado entre el emisor y colector del transistor Q_1 , este sirve de protección.

2.3.2 Modos del circuito

El diseño del circuito cuenta con dos modos de funcionamiento, modo balance y operación; y a estos se acceden mediante interruptores tal como se lo muestra en la figura 2.2.

Modo balance

Este es el modo inicial del sistema y debe ser accionado cada vez que se realicen cambios de sensor, la funcionalidad de este modo consiste en calibrar el puente de Wheatstone mediante la ecuación 1.1.

En caso de que las relaciones de las resistencias del puente (BR) sea de 1:1, se determina la resistencia del sensor a la temperatura de referencia T_0 .

$$BR = \frac{R_{15}}{R_{14}} = 1$$

$$R_{set-up} = BR * R_0$$

$$R_{set-up} = R_0 [\Omega]$$

La implementación de estos interruptores en el circuito hace que la etapa de amplificación de corriente no funcione, dejando en estado de corte al TIP147. De esta forma en este modo se encuentra en funcionamiento el puente de Wheatstone el mismo que esta alimentado con una fuente constante de -15v con el fin de suministrarle la corriente mínima necesaria para que no haya alteraciones en la resistencia del sensor y así ajustar el puente por medio de la resistencia R_{set-up} tal como se indicó la relación mencionada anteriormente.

Durante ese modo el amplificador OP37 opera como un comparador, por ello que a medida que se ajusta el puente mediante la R_{set-up} a la salida de este tendremos:

$$V_0 = V_{CC} ; V_+ > V_- \quad (2.11)$$

$$V_0 = V_{EE} ; V_+ < V_- \quad (2.12)$$

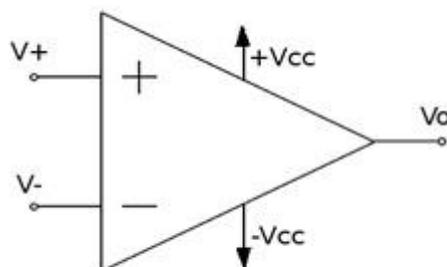


Figura 2.4 Esquema del amplificador comparador

Donde,

- V_+ y V_- corresponden a V_b y V_a respectivamente provenientes del puente.
- V_{CC} y V_{EE} es la alimentación del OpAmp que en nuestro circuito es 12v y -15v respectivamente.

Por consiguiente, a la salida del OpAmp tendremos los valores de alimentación del mismo lo que nos permite conocer en qué momento se equilibra el puente; ya que se implementó un pequeño circuito indicador observado en la figura 2.5 el cual es sensible a los cambios de voltaje, compuesto por un seguidor de voltaje y diodos colocados en sentidos diferentes para alertarnos el momento en que se calibra el puente.

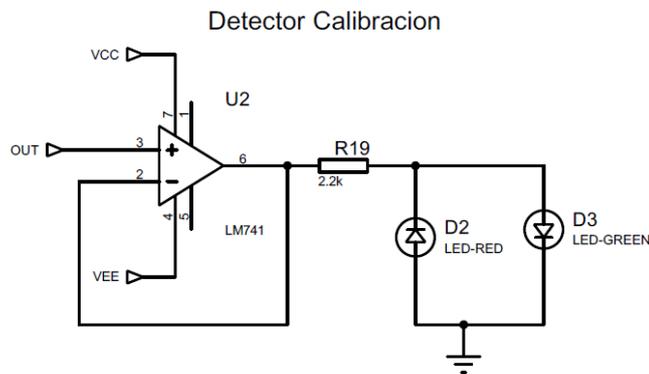


Figura 2.5 Circuito detector de calibración

Adicional en la figura 2.1 correspondiente al circuito, en la parte inferior se observa una configuración de un transistor, capacitor y diodo, esta también es puesta en funcionamiento en la actual etapa; ya que su función es tal que al variar el voltaje a la salida del OpAmp debido a la calibración, la configuración Darlington permanezca sin funcionamiento; es decir que con esto aseguramos que la corriente de base en la etapa Darlington sea cero y se mantenga en zona de corte. Mientras que el transistor de la configuración inferior trabajara en la zona de saturación, entregándonos una corriente según la ecuación 2.13.

$$I_{CQ4} = \frac{V_{EE}}{R_{12}} \text{ [mA]} \quad (2.13)$$

Modo operación

Este es el modo de trabajo principal para el cual se ha diseñado el sistema y en esta etapa funcionan: el puente de Wheatstone, el OpAmp OP37A y la configuración Darlington tal como se lo describió al inicio de este capítulo. En este modo la etapa baja del circuito que comprende al transistor BC327 queda sin efecto, es decir que se encuentra en corte.

A este modo se accede mediante los interruptores agregados en el circuito y solo si ya se ha realizado la calibración del sistema, de lo contrario obtendremos datos erróneos. Con el funcionamiento del sistema también es necesario conocer la respuesta de frecuencia del sensor, ya que al someter al mismo a flujos turbulentos es de vital importancia obtener una respuesta de frecuencia constante del sistema. Por ello en el diseño se ha agregado un circuito electrónico oscilador compuesto de un LM 555 como se muestra en la figura 2.6.

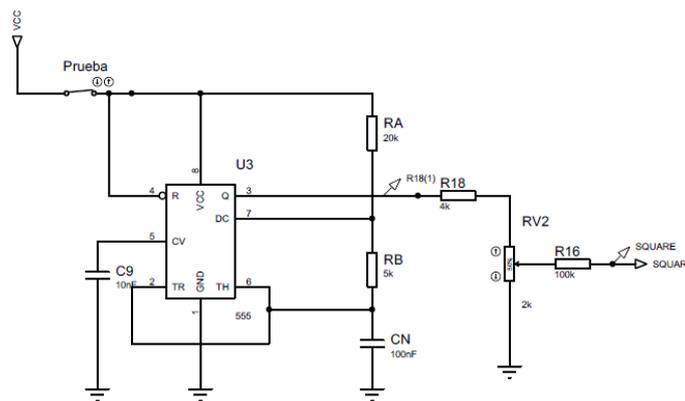


Figura 2.6 Circuito generador de onda cuadrada

Con este circuito se ajustará la respuesta del anemómetro Ya que este será el encargado de inyectar una señal paso u onda cuadrada al circuito y por consiguiente se evidencia la respuesta del mismo ante la señal cuadrada. Para el diseño se ha considerado trabajar al CI 555 en configuración astable, cuyos tiempos en el que la onda está en alta y baja son configurados de acorde a las siguientes ecuaciones:

$$t_L = \ln(2)(R_B)C_N \quad (2.14)$$

$$t_H = \ln(2)(R_A + R_B)C_N \quad (2.15)$$

Donde,

- R_A , R_B y C_N son los elementos electrónicos que componen el circuito generador de onda cuadrada mostrado en la figura 2.6.
- t_L =tiempo en baja [s].
- t_H =tiempo en alta [s].
- $\ln(2)$ = logaritmo natural.

De tal modo que la frecuencia del oscilador se la obtiene mediante:

$$F_C = \frac{1}{T_C} = \frac{1}{t_L + t_H} \quad [Hz] \quad (2.16)$$

Así mismo el ciclo de trabajo C_T lo hallamos con la ecuación 2.17.

$$C_T = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \quad (2.17)$$

Para examinar la respuesta frecuencia del circuito se consideró que el generador trabaje a un periodo T_C de aproximadamente 2 ms, con un ciclo de trabajo de 83%. A la salida de la onda cuadra se tiene una configuración de resistencia potenciómetro con el cual regulamos la amplitud de la onda cuadrada.

Esta prueba se realiza de forma práctica, y es necesario tener expuesto al sensor a un flujo debido a que la respuesta del circuito se relaciona con las variaciones de la velocidad del fluido. Para acceder a la prueba de onda cuadrada se ha colocado un interruptor al cual denominamos "Prueba" tal como se observa en la figura 2.6, y una vez activado se observa el funcionamiento del circuito generador.

Según Osorio, Silin y Converti [7] una vez realizada la prueba se debe medir la constante τ , que es el tiempo donde se estabiliza la repuesta del anemómetro y mediante la ecuación 2.18 se obtiene la frecuencia de corte del circuito.

$$f_{corte} = \frac{1}{1.3\tau} \quad [Hz] \quad (2.18)$$

2.4 Adquisición y tratamiento de datos

2.4.1 Herramientas empleadas

Para esta última parte del diseño del anemómetro de hilo caliente se realizó la adquisición de la tensión de salida del circuito electrónico del anemómetro, esta señal varía en el tiempo en relación a las fluctuaciones del fluido, por lo tanto, se analiza una señal analógica y continua. Sin embargo, para realizar el tratamiento de esta señal mediante herramientas computacionales (Labview), fue necesario el uso de una tarjeta de adquisición de datos capaz de realizar la conversión analógico a digital (A/D) y con el requerimiento de que esta posea una frecuencia de muestreo mínima de 40 KHz. Para el desarrollo del proyecto se ha trabajado con la tarjeta NI USB-6009 de National instrument, la cual tiene una frecuencia de muestreo de aproximadamente 50KHz. El diseño es completamente simulado, por lo tanto, es posible emplear una tarjeta de mayores características, no obstante, se ha elegido la antes mencionada debido a que cumple con los requerimientos y es de bajo costo.



Figura 2.7 Tarjeta DAQ NI USB 6009 [18]

En la figura se observa la tarjeta DAQ NI USB 6009 la cual es usada para de realizar la conversión analógica a digital (A/D) del sistema y cuenta con 8 entradas analógicas con una resolución de 14 bits, 2 salidas analógicas estáticas con una resolución de 12 bits, 12 entradas y salidas digitales, además cuenta con un contador de 32 bits. Se energiza mediante bus y para la fácil conexión posee con conectividad de terminal de tornillo [18].

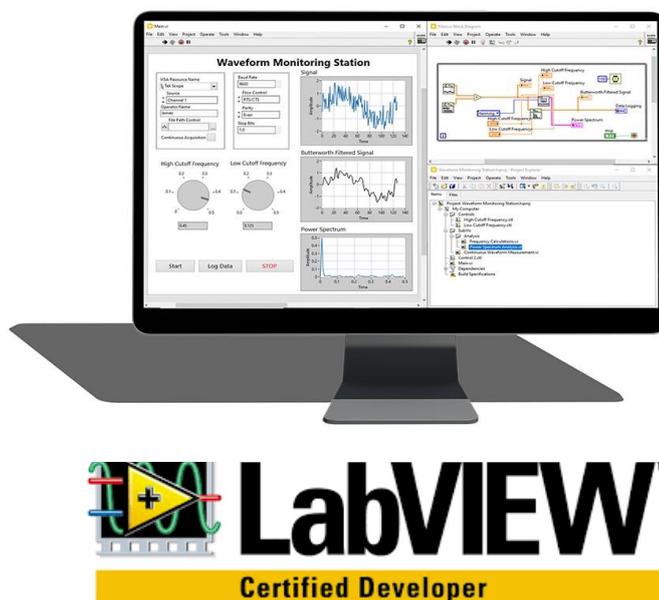


Figura 2.8 Herramienta computacional [16]

Así mismo fue necesario el uso de una herramienta computacional para realizar los programas requeridos en los sistemas de anemometría, por lo cual empleamos el software Labview, que al igual que la DAQ a ser usada es de National Instruments. Este software emplea programación grafica para el diseño de programas y aplicaciones con un especial énfasis en adquisición y tratamiento de datos, y para desarrollar sistemas de pruebas automatizadas. [16]

2.4.2 Relación física eléctrica en el proceso de calibración

Es imprescindible que todos los sistemas de anemometría de hilo caliente antes de efectuar el cálculo de velocidad de un fluido deban realizar la calibración del sistema, de esta forma se establece la correcta relación entre la velocidad del flujo con el voltaje del circuito electrónico del anemómetro [19]. El método más empleado en estos sistemas y del cual nos basamos para la elaboración del programa es exponer el sensor a velocidades conocidas o que sea posible realizar su cálculo a partir de la aplicación de la ecuación de Bernoulli para flujos:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho_F} (P_o - P_{atm})} \quad (2.19)$$

$(P_o - P_{atm})$, es la presión diferencial la cual debe medirse con gran precisión utilizando un manómetro diferencial.

Donde:

- P_{atm} = presión atmosférica [Bar].
- P_o = presión dentro del sistema de calibración [Bar].
- ρ_F = corresponde a la densidad del fluido [Kg/m³].

Esto es posible ya que usualmente a los anemómetros se les diseña una estación de calibración, en la siguiente imagen se observa de forma general como es una estación de calibración de anemómetros de hilo caliente.

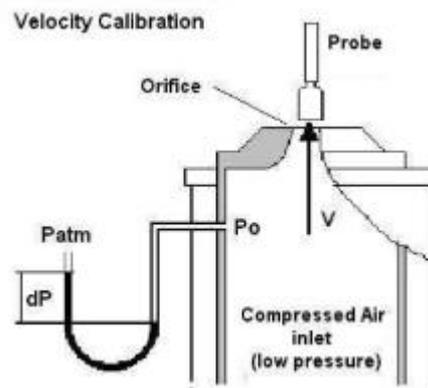


Figura 2.9 Estación de calibración general [19]

Por consiguiente, ahora para relacionar la tensión en el hilo y la velocidad del flujo empleamos una de las leyes más conocidas y de mayor aplicación en cuanto a estudios de velocidad de fluidos, que es la ley de calibración de King [4], [20].

$$E^2 = A + Bu^n \quad (2.20)$$

Donde,

- E = voltaje proveniente del circuito electrónico del anemómetro [v].
- u = velocidad del fluido [m/s].
- A, B y n = contantes de calibración.

El análisis realizado por King [4], [20] para encontrar esta relación se obtuvo a partir de la ecuación que gobierna al sistema que es la de balance de calor.

$$\frac{dQ}{dt} = W - H \quad (2.21)$$

Donde,

- Q= representa la acumulación de calor en el cable.
- H= calor transferido a los alrededores.
- W= potencia generada por calentamiento joule.

Para el caso de análisis en cuestión y comprender la relación requerida, según lo estipulado por [21], [8] y [22]; solo se considerarán las condiciones de estado estacionario, es decir en condiciones de equilibrio no existe acumulación de calor Q en el cable, por lo que ahora tenemos:

$$W = \sum H \quad (2.22)$$

Además, asumiendo que; las pérdidas por radiación, conducción en los soportes del hilo y convección natural son constantes, se tiene que la potencia generada por calentamiento Joule W es igual a la transferencia de calor por convección H_T .

$$W = H_T \quad (2.23)$$

Las cuales están definidas de la siguiente forma:

$$W = I^2 * R_W \quad (2.24)$$

$$H_T = h * A_S * (T_W - T_0) \quad (2.25)$$

Por lo cual, a partir de las ecuaciones mencionadas se establece el comportamiento de transferencia de calor entre el sensor y el flujo a su alrededor. Reescribiendo la ecuación 2.23 se tiene:

$$I^2 * R_W = h * A_S * (T_W - T_0)$$

Donde,

- I = corriente que atraviesa al sensor [mA].
- R_w = resistencia del hilo a la temperatura T_w [Ω].
- h = coeficiente de transferencia eléctrica por convección [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
- A_s = área de la sección transversal del conductor [m^2].
- T_w = temperatura del filamento caliente [$^\circ C$].
- T_0 = temperatura ambiente de referencia antes de la calibración [$^\circ C$].

La ecuación resultante hace referencia a la relación entre la potencia eléctrica que se disipa en el filamento del anemómetro al interactuar con el fluido con el cual existe transferencia de calor por convección.

2.4.3 Programa implementado en el proceso de calibración

La implementación del programa de calibración se realizó principalmente en base a "A practical guide" de Dantec Dynamics [5], junto con el método para realizar la calibración de anemómetros presentado por Perry y Morrison [23]. Además de otros varios artículos que han aportado con la resolución de la problemática del proyecto.

Inicialmente requerimos de los datos del sensor, así también como los del fluido al que es expuesto, para este caso se habla acerca de la relación de sobrecalentamiento al cual se lo denomina "a" (Sobrecalentamiento).

La relación de sobrecalentamiento para:

- Aire, es de $a = 0.8$
- Agua, $a = 0.1$

Sin embargo, esta puede ser encontrada según Dantec [5] mediante:

$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad (2.26)$$

Donde,

R_w = resistencia del sensor a la temperatura T_w

R_0 = resistencia a una temperatura de referencia T_0

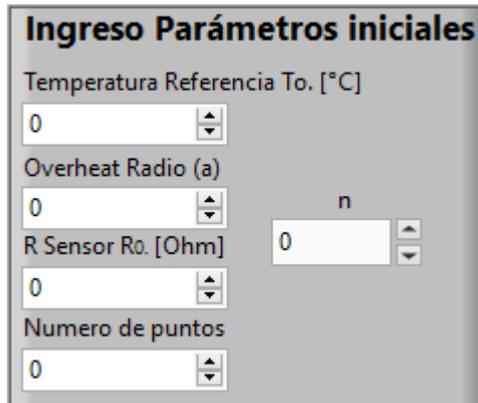


Figura 2.10 Ingreso de parámetros iniciales al sistema de calibración

En la figura adjunta se muestra la pantalla de la parte inicial del sistema de calibración realizada en Labview, en la cual deben ingresarse los parámetros que se piden en la misma.

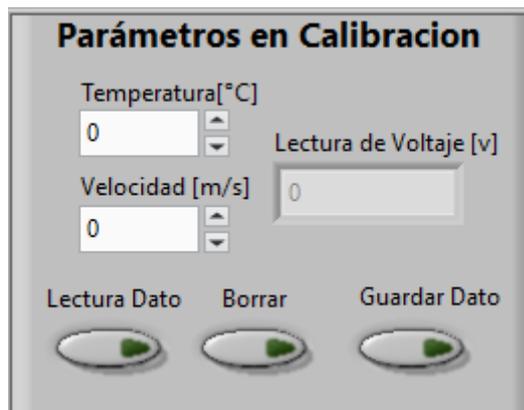


Figura 2.11 Ingreso de parámetros durante la adquisición de voltaje

Así mismo en la imagen correspondiente a la figura 2.11 se ingresa la velocidad conocida, la cual es mencionada en el punto 2.4.2 junto con la temperatura actual a la que se adquiere cada velocidad. Además, se colocaron botones relacionados a la lectura de dato, al presionar este se observa la adquisición del voltaje del anemómetro correspondiente a la velocidad indicada, el botón borrar funciona de tal manera que borra los datos colocados de velocidad y temperatura para que estos vuelvan a ser ingresados en caso de haber sido ingresados erróneamente y por último se tiene a guardar dato, cada que se presione este botón se encargará

de almacenar el dato punto por punto en un archivo del tipo texto (txt) y por ende hace disminuir al número de puntos ingresados en la pantalla inicial.

Se debe tener en cuenta que este archivo debe ser elegido desde la pantalla de calibración, según se observa en la figura 2.12.

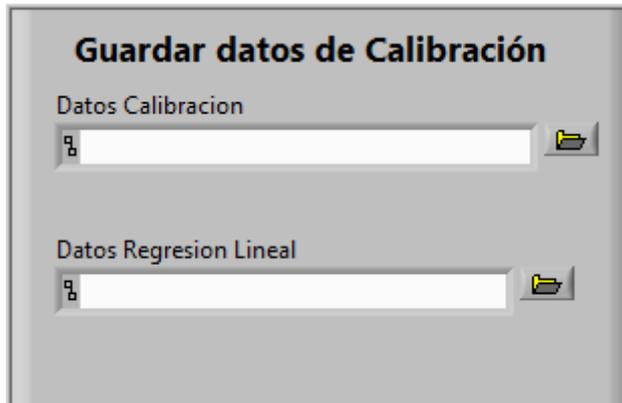


Figura 2.12 Elección de ruta para guardar datos de calibración

Adicional al igual que los datos de calibración, se debe guardar en alguna ruta del computador los datos de regresión lineal, ya que estos son necesarios para el cálculo de las constantes de calibración.

Una vez que el número de puntos se haya completado y llegue a cero, inmediatamente se grafica la curva de calibración, así también todos los datos adquiridos se los muestra en el archivo txt el cual se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, hasta este punto solo se tiene la curva de calibración en la cual solo se adquieren y grafican los datos E vs u.

Entonces aplicando el método convencional para encontrar las constantes de calibración según Perry y Morrison [23] definimos:

$$u^n = x \quad (2.27)$$

$$E^2 = y \quad (2.28)$$

De esta forma estamos manifestamos que los datos adquiridos de voltaje van a estar elevados al cuadrado, mientras que la velocidad a la n.

Luego empleando un ajuste de mínimos cuadrados que al definir las relaciones en las ecuaciones 2.27 y 2.28 se convierte en regresión lineal encontramos las

constantes de calibración A y B, de este modo tenemos relacionadas la ecuación de King 2.20 con su equivalente que sería la ecuación de la recta.

$$y = b + mx \quad (2.29)$$

En consecuencia, ahora tendremos una recta de regresión lineal por ajuste de mínimos cuadrados correspondiente a la ecuación 2.29, con la cual se hace posible encontrar las constantes de calibración que en este caso debido a la relación hecha anteriormente estarán asociadas de la siguiente forma:

$$A = b$$

$$B = m$$

Cabe mencionar que el valor de n es colocado de forma manual y se lo emplea mediante los estudios que se han realizado, los cuales manifiestan que este valor está en el rango de 0.4 a 0.5 [22]-[24]. King [5] nos recomienda aplicar 0.5, sin embargo, Collins y Williams [25] obtuvieron un mejor ajuste en sus experimentaciones empleando 0.45.

Por lo que es conveniente realizar pruebas variando n alrededor del rango indicado para así evidenciar cual nos otorga el mejor resultado.

Algo importante a mencionar es que para comprobar el funcionamiento del sistema fue necesario guiarnos de otro proceso de calibración [22]-[26], ya que necesitamos establecer la relación de la velocidad con el voltaje del anemómetro de un procedimiento real; por lo que se ingresaron los valores de velocidad de la investigación de la cual nos guiamos y que de forma real este dato debe ser conocido en la etapa de calibración. En cuanto a los valores de voltaje se tuvo inconvenientes para realizar simulaciones ya que estos los obtenemos directamente de la adquisición y al utilizar una DAQ simulada en Labview no era posible controlar los valores adquiridos. Por lo tanto, para poder controlar este dato y evidenciar a la vez el proceso de calibración se colocó el elemento adjunto

en la imagen 2.13 con el cual podemos simular el proceso de adquisición de voltaje.

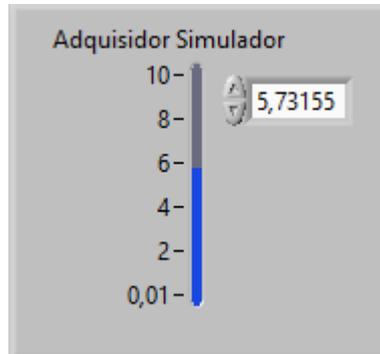


Figura 2.13 Simulador de adquisición de datos

Además, hay que mencionar que existen otros métodos de calibración, pero todos estos se basan en la ley King. Los demás métodos existentes son de forma extendida y requieren de pruebas físicas con los instrumentos ya que son necesarias excelentes estimaciones iniciales, tal como lo indica Swaminathan, Bacic, Rankin y Sridhar [27] en sus estudios los cuales desarrollan un método utilizando inicialmente las aproximaciones de las constantes con el método que hemos desarrollado, para luego aplicar una expansión en serie de Taylor y finalmente emplear la técnica de Newton-Raphson encontrando así las constantes de calibración.

2.4.4 Interacción fluido sensor en el cálculo de la velocidad

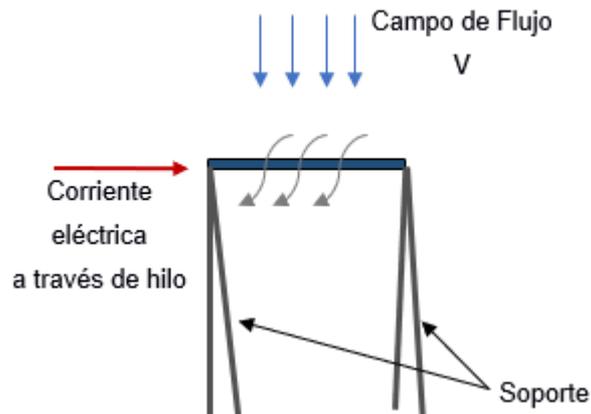


Figura 2.14 Anemómetro con afectación de un flujo

En la figura 2.15 detallamos como interactúa el sensor expuesto a un flujo, cuando la velocidad presenta variaciones a la alza se inyecta corriente eléctrica a través del alambre, tal como se lo representa. Esto conlleva a un aumento de temperatura en el filamento, por lo que la transferencia de calor por convección también se altera lo que conduce a un estado de equilibrio.

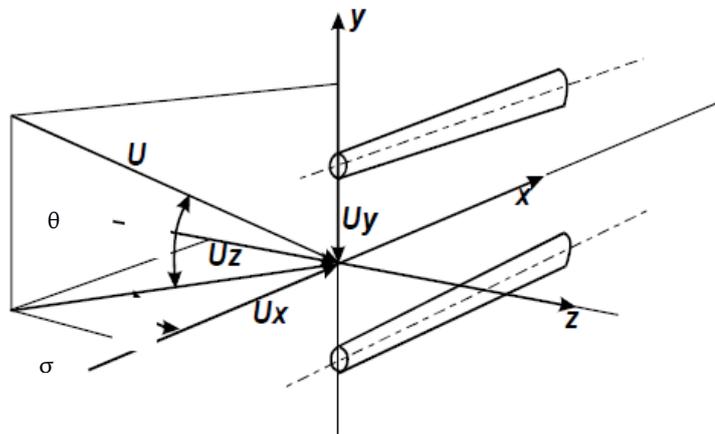


Figura 2.15 Descomposición de vector de velocidad U. [22]

Así también analizando cuales son los efectos de la dirección de la velocidad sobre el sensor encontramos que fue necesario realizar una descomposición de la velocidad en relación al ángulo de inclinación que incide en el sensor, de esta manera y como se observa en la imagen la velocidad se descompuso en las

componentes normal U_x , tangencial U_y y no debemos olvidar a la binormal U_z , la cual es transversal al sensor.

Por lo tanto, el sensor es sensible a cada una de las variaciones de las componentes de la velocidad y ahora no se hablará simplemente de velocidad; sino de una composición de cada una de sus componentes que afectan en la toma de mediciones de flujo del anemómetro a la que denominamos a la velocidad efectiva y la cual se debe analizar en cada plano.

El análisis realizado en cada componente en una sola expresión que descrito en la siguiente ecuación [6]:

$$Ve^2 = (U_N^2 + k^2 U_T^2 + j^2 U_B^2) \quad (2.30)$$

Donde,

- V_e = velocidad efectiva.
- U_N = componente normal.
- U_T = componente tangencial.
- U_B = componente binormal.
- k , este parámetro depende específicamente de cada sensor, aunque por lo general su valor esta alrededor de 0.05 y 0.2 [21]-[22].
- j , al igual que k también depende del sensor, específicamente a las puntas provocando variación en el flujo debido al ángulo incidente del fluido. Generalmente su valor esta alrededor de 1 a 1.1 [21]-[22].

Para poder encontrar la velocidad efectiva es imprescindible la realización de pruebas experimentales que nos permitan variar el ángulo de la velocidad con el que incide en el sensor.

2.4.5 Programa para calcular la velocidad

Para el cálculo de la velocidad del fluido son necesarias las constantes de calibración que fueron halladas en el punto anterior, de esta forma y mediante la utilización de la ley de King, ecuación 2.20 fue posible realizar esta tarea.

The image shows a software interface with two main sections. The top section is titled "Constantes de Calibracion" and contains three input fields labeled "A", "B", and "n", each with a value of "0" and up/down arrow controls. The bottom section is titled "Configuracion de Muestreo" and contains two input fields: "Rate [Hz]" with a value of "1000" and "Number of samples" with a value of "1000", both with up/down arrow controls.

Figura 2.16 Ingreso de constante de calibración y frecuencia de muestreo

En la figura 2.17 observamos una parte de la programación desarrollada en la que se observan el menú para ingresar las constantes de calibración, como también la frecuencia de muestreo y número de muestras. Además, se tiene la variable n que integra a la ecuación de King en la cual debe ingresarse el dato correspondiente con el que se obtuvo el mejor ajuste para obtener las constantes de calibración.

De esta forma con todos los datos completados apropiadamente, se realiza la adquisición de datos a la frecuencia indicada y por consiguiente se remplazan las constantes halladas y cada dato adquirido en la ecuación 2.20, la cual se ha insertado en el programa otorgando como resultado la velocidad del fluido.

Así también el programa fue diseñado para realizar el cálculo de la velocidad media, visualizar de forma gráfica el espectro de potencia calculado por medio de análisis de Fourier y la intensidad de turbulencia, esta última se consiguió mediante la relación entre la desviación estándar y la velocidad media, todo esto se logró con el uso de bloques y funciones proporcionados por el software Labview. Las pantallas que se han programado para evidenciar el cálculo de velocidad, la adquisición de voltaje proveniente del circuito del anemómetro, así como también la intensidad de turbulencia y espectro de potencia están en constante actualización hasta que se detenga el programa.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Una vez concluida la elaboración del sistema de anemometría se demuestra la efectividad del diseño mostrando los resultados obtenidos de la parte electrónica y la adquisición y tratamiento de datos, logrando así evidenciar el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

Se presentan los resultados en el orden desarrollado del proyecto, partiendo del diseño del sistema electrónico, luego el sistema de adquisición y tratamiento de datos, el cual consta del sistema de calibración y el sistema de cálculo de la velocidad del fluido.

3.1 Circuito electrónico

A partir del diseño del circuito electrónico del anemómetro obtuvimos los datos de interés en este estudio, los cuales son la corriente y resistencia del sensor tal como se muestran en la tabla 3.1

Con ello se logró evidenciar que la relación existente entre estos es de manera lineal e inversamente proporcional; es decir que a medida que la resistencia del sensor disminuye a causa del incremento de la velocidad de un fluido, en consecuencia, el circuito de retroalimentación respondió de manera inmediata entregando un aumento de corriente hacia el sensor lo que causa que este recupere su temperatura y por ende mantenga constante su resistencia. Para efectos de simulación la resistencia del sensor fue seteada en 70Ω .

Tabla 2.1 Relación resistencia y corriente

| Resistencia [Ω] | Corriente [mA] |
|--------------------------|----------------|
| 70 | 147 |
| 65 | 157 |
| 60 | 168 |
| 55 | 181 |
| 50 | 196 |
| 45 | 214 |
| 40 | 235 |
| 35 | 261 |

| | |
|----|-----|
| 30 | 293 |
| 25 | 355 |

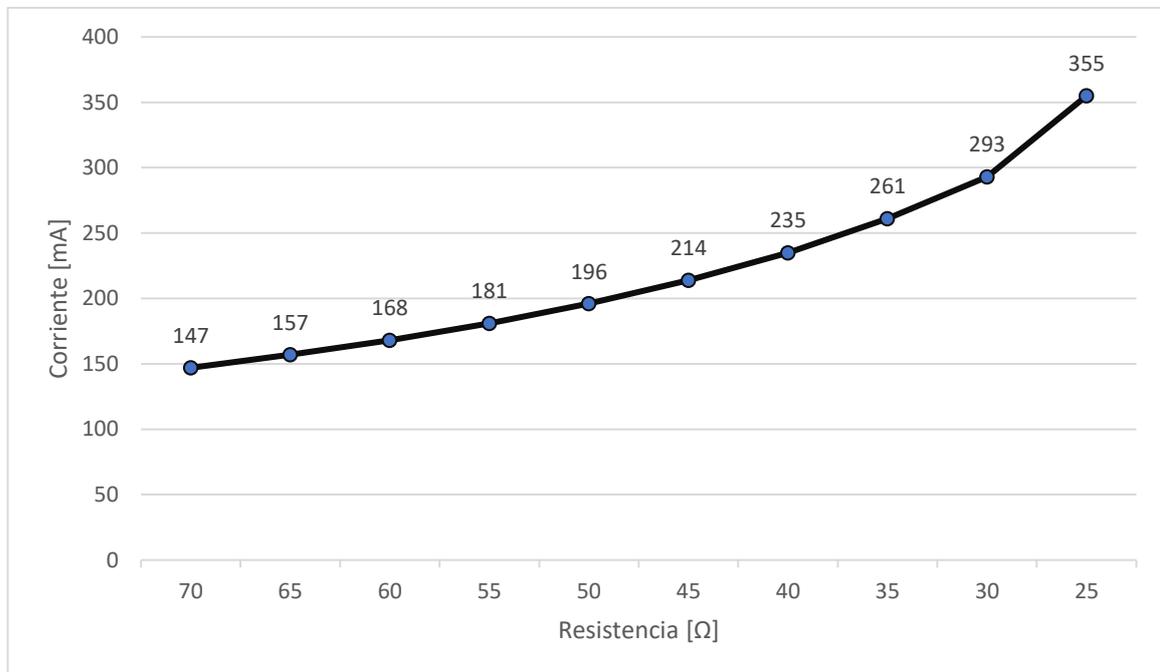


Figura 3.1 Valores de simulación resistencia vs corriente

Así mismo se encontró la relación entre la resistencia del sensor con la caída de potencia del mismo al que denominamos V_a en el circuito mostrado en la figura 2.2 y se observó que, a medida que cambia el valor de la resistencia por la variación de temperatura al atravesar un flujo por el filamento este cambiará el voltaje V_a , teniendo la misma relación que posee con la corriente tal como se muestra en la tabla 3.2.

Por lo tanto, se demuestra la relación directamente proporcional entre el voltaje y corriente que atraviesa el filamento.

Tabla 3.2 Relación resistencia y voltaje

| Resistencia [Ω] | Voltaje [v] |
|-----------------|-------------|
| 70 | -10.29 |
| 65 | -10.21 |
| 60 | -10.09 |
| 55 | -9.96 |
| 50 | -9.80 |
| 45 | -9.61 |
| 40 | -9.39 |

| | |
|----|-------|
| 35 | -9.12 |
| 30 | -8.78 |
| 25 | -8.36 |

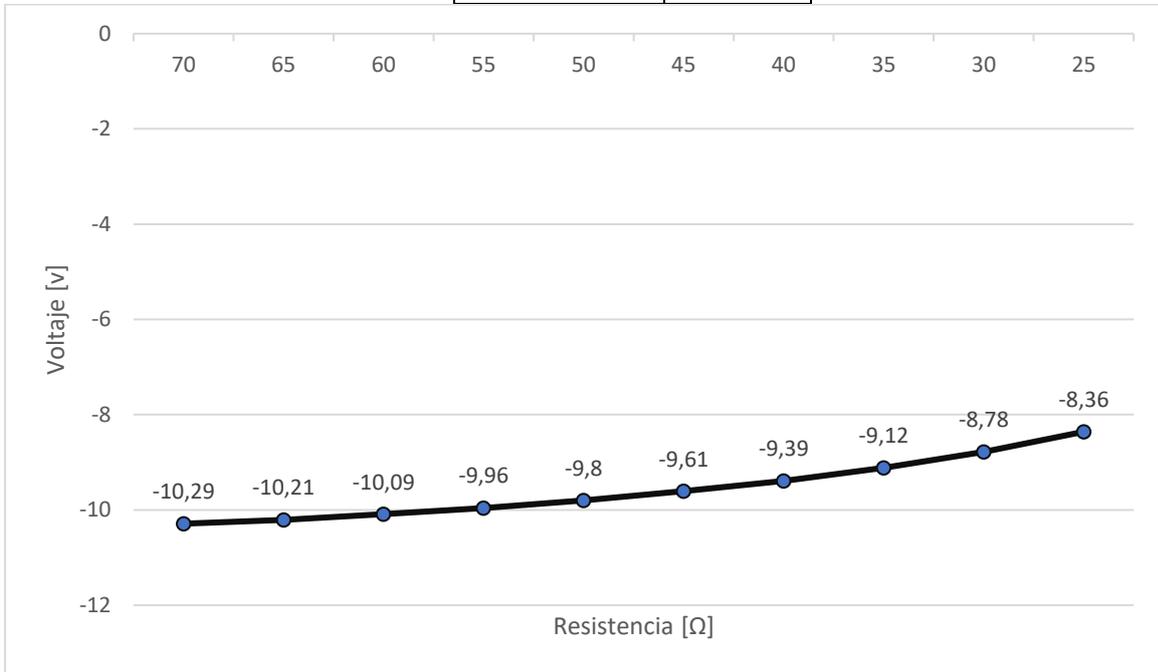


Figura 3.2 Valores de simulación resistencia vs voltaje Va

3.2 Calibración

El sistema de calibración es el primer punto de la etapa de adquisición y tratamiento de datos, para el cual fue fundamental hallar las constantes de calibración para proceder con la siguiente etapa que es obtener resultados de velocidad del fluido.

A partir de la metodología aplicada y explicada en el capítulo anterior se obtuvo la curva de calibración tal como se observa en la figura 3.3, la cual es característica del tipo de sensor a utilizar, debido a ello se debe realizar este paso cada vez que se requiera conocer la velocidad del fluido a la que está sometido el filamento. Cabe mencionar que la curva de calibración no es lineal, se aproxima a una logarítmica, y este es el resultado estándar que se sigue para evidenciar que se está realizando una correcta calibración.

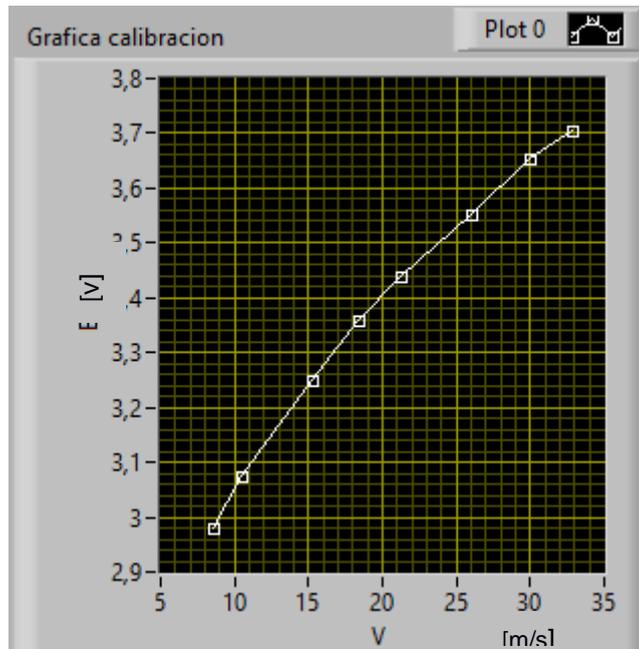


Figura 3.3 Gráfica de calibración

Tal como se lo mencionó en el capítulo anterior, se efectuó la simulación de calibración con datos de velocidad y voltaje aportados de una referencia de investigación [21] y [22]. Según la metodología implementada se realizó simulaciones variando el parámetro n de la ecuación de King, para el cual se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 3.3 en los que se observa como varían las constantes de calibración a medida que la variable n cambia, la relación es tal que a medida que n incrementa se registró un aumento en la constante A, sin embargo, para la constante B se tuvo una disminución.

Tabla 4.3 Constantes de calibración con variación de n

| Constantes de calibración | $n=0.42$ | $n=0.45$ | $n=0.5$ |
|---------------------------|----------|----------|---------|
| A | 2.364 | 3.003 | 3.808 |
| B | 2.626 | 2.233 | 1.738 |

3.3 Cálculo de la velocidad del fluido

Configurando los parámetros de muestreo como, frecuencia de muestreo y número de muestras a tomar, se logró adquirir la señal analógica de voltaje proveniente del circuito electrónico tal como se observa en la figura 3.4. En esta prueba se usó una frecuencia de muestreo de 25kHz adquiriendo 200 muestras por segundo, teniendo una excelente adquisición de datos, sin embargo, los parámetros del sistema pueden cambiarse para así lograr obtener datos más precisos.

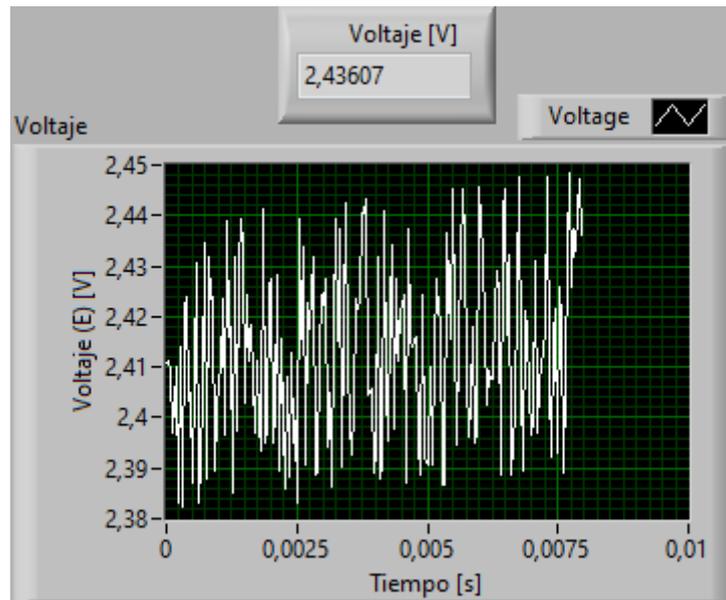


Figura 3.4 Adquisición de voltaje

En consecuencia, de haber encontrado las constantes de calibración e ingresado las mismas en la aplicación se obtuvo a detalle las mediciones de velocidad del fluido a lo largo del tiempo, esto se logró mediante el ajuste de los valores simulados a la ley de potencia de King. Además, de la gráfica adjunta también es posible extraer la velocidad media del fluido con la ayuda de la traza de una línea recta en la mitad de la curva adquirida del voltaje, no obstante, esta se consiguió de forma más exacta con la aplicación de una herramienta del software tal como se evidencia en la figura 3.5.

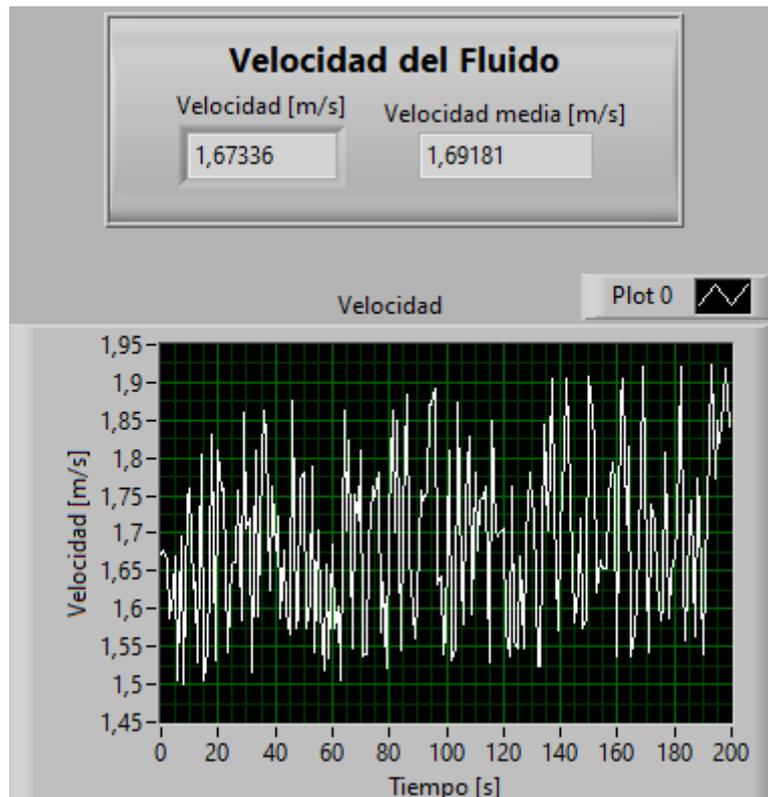


Figura 3.5 Cálculo de la velocidad y velocidad media

Otro factor importante en el estudio de anemómetros es la intensidad de turbulencia del fluido, la cual se observa en la figura adjunta y se la obtuvo mediante la relación entre la desviación estándar de la velocidad y la velocidad media; por lo tanto, se observa de forma representativa la intensidad de la fluctuación de la velocidad del viento en cada intervalo de tiempo, la misma que hace referencia a la energía proveniente de las fluctuaciones del viento. De esta manera se logró analizar el patrón de variación de la intensidad de la turbulencia evidenciando así en que momentos se tuvo una alta o baja intensidad. Algo a tener en claro es que una alta o baja intensidad no se relaciona con una mayor o menor velocidad del fluido sino en cuan fluctuantes son estas, es decir son independientes de la magnitud de la velocidad del viento.

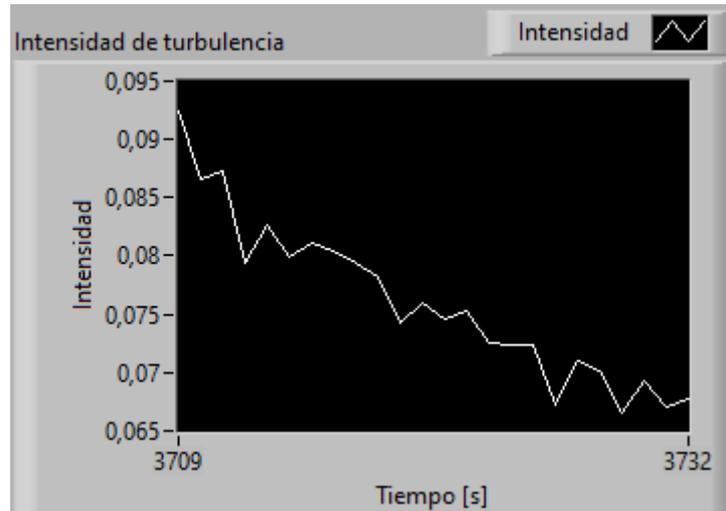


Figura 3.6 Intensidad de turbulencia

Finalmente, se tiene la curva que representa al espectro de potencia en la cual se obtuvo la distribución de la potencia de la señal correspondiente a la velocidad a lo largo del tiempo. Este resultado fue producto de un análisis en transformadas de Fourier proporcionado por una herramienta del software con el que desarrollamos la aplicación.

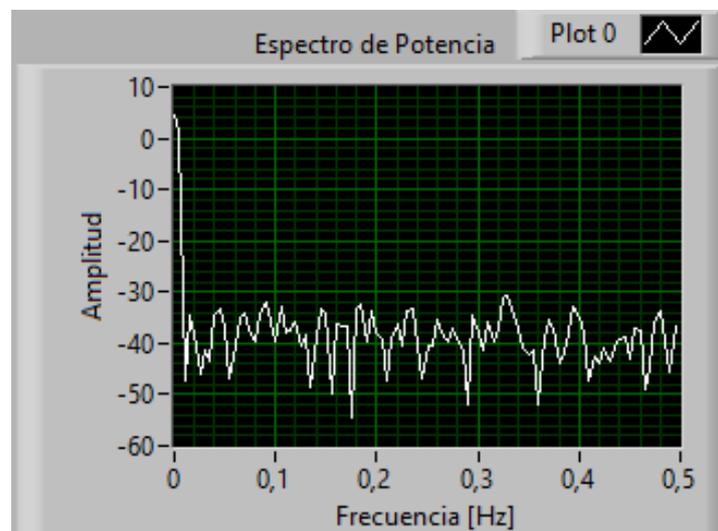


Figura 3.7 Espectro de potencia

3.4 Análisis de costos

Tabla 5.4 Costos de componentes

| Cantidad | Detalles | Proveedor | Precio C/U [\$] | Total [\$] |
|----------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------|
| 1 | TIP147 (Transistor Darlington) | Castroelectronic | 1.50 | 1.50 |
| 1 | Transistor BC327 | Tecmikro | 6.00 | 6.00 |
| 1 | OP37 (Amplificador Operacional) | Castroelectronic | 2.00 | 2.00 |
| 1 | CA3140 (Amplificador Operacional) | Mouser | 3.46 | 3.46 |
| 1 | LM741 (Amplificador Operacional) | Tecmikro | 0.40 | 0.40 |
| 1 | LM 555 | Tecmikro | 1.00 | 1.00 |
| 1 | Fuente dual 15v | Castroelectronic | 25.00 | 25.00 |
| 1 | Fuente 12v | Castroelectronic | 15.00 | 15.00 |
| 1 | Diodo 1N4148 | Tecmikro | 0.40 | 0.40 |
| 2 | Diodos led | Electromundo | 0.20 | 0.40 |
| 3 | interruptores 3 pin | Electromundo | 1.50 | 4.50 |
| 1 | interruptores 2 pin | Electromundo | 1.00 | 1.00 |
| 1 | Filamento de Tungsteno 1Kg | Luoyang combat tungsten ltd. | 170.00 | 170.00 |
| 18 | Resistencia de ½ watts | Castroelectronic | 0.40 | 7.20 |
| 3 | Potenciómetro | Castroelectronic | 0.50 | 1.50 |
| 1 | Impresión de placa PCB 20X15X10° | PCB WAY | 20.00 | 20.00 |
| 4 | Capacitores electrolíticos | Castroelectronic | 2.00 | 8.00 |
| 1 | Tarjeta DAQ 6009 | Ecuaplus | 400.00 | 400.00 |
| 1 | Cables de adquisición de datos | Ecuaplus | 50.00 | 50.00 |
| Total | | | | 717.36 |

Para implementar el proyecto se requiere una base de \$717,36 adicional se debe tomar en cuenta gastos de mano de obra y movilización, cabe recalcar que estos valores solo consideran la construcción de la parte electrónica y sistema de adquisición y tratamiento de datos, para la parte mecánica del túnel de viento para un laboratorio es necesario realizar otro análisis e investigación.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño del circuito electrónico de un anemómetro de hilo caliente CTA demostrando el bajo costo, facilidad del diseño y comprensión del circuito, capaz de ser implementado y replicado por estudiantes y profesores para los laboratorios de Termofluidos de la Facultad de Mecánica y Ciencias de la Producción.
- Se estableció las relaciones físicas y eléctricas del circuito electrónico evidenciando la relación entre la resistencia del filamento y el voltaje del puente, así como también el voltaje del puente y la corriente que suministra el transistor Darlington, por último, se evidencio la relación directa entre las variaciones de resistencia del filamento con la corriente que suministra el transistor por medio de la realimentación del puente.
- Mediante el programa Labview se elaboró la aplicación encargada de realizar el cálculo de la velocidad de un flujo, así como también su sistema de calibración, el cual es necesario ya que con este logramos obtener mediciones precisas y confiables.
- El análisis teórico realizado para elaborar la adquisición y tratamiento de datos nos muestra lo complejo de las aplicaciones encargadas de la adquisición, calibración y cálculo de la velocidad del fluido mediante anemómetros de hilo caliente y que existe la necesidad de realizar experimentación para considerar detalles más precisos en el diseño.

4.2 Recomendaciones

- En ese proyecto se tomó en cuenta las propiedades físicas de filamentos con materiales conocidos como el Tungsteno y el platino, sin embargo, se recomienda realizar un estudio bibliográfico sobre otros posibles materiales que sean capaces

de cumplir con los requerimientos del proyecto y así mismo el precio y proveedores que faciliten su compra.

- Tener en consideración todas las variables que influyen en el diseño de calibración ya que de esto depende cuan preciso sea el sistema.
- En este caso y debido al método de calibración empleado es conveniente realizar varias pruebas variando n alrededor del rango indicado para así evidenciar cual nos otorga el mejor resultado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yu. L. Shekhter, "HOT-WIRE AND HOT-FILM ANEMOMETERS," in A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering, Febrero. 2011. [Online]. Disponible: <https://www.thermopedia.com/content/853/>
- [2] J. Echavarria, "Estudios de anemómetros de varilla caliente," Tesis de grado, Dept. Ing. Mec., Univ. de los Andes, Bogota, 2007.
- [3] G. A. Mendoza, "MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DE VIENTO INTEGRADO A UN SISTEMA DE INTERNET DE LAS COSAS," Ing. Elect. Rep. Tec. Res. Prof., Inst. Tec. Tuxtla Gutierrez, Chiapas. Dic. 2018
- [4] L. V. King, "On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires with applications to Hot-Wire Anemometry," Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 90, pp. 563-570, Sep. 1914, doi: 10.1098/rspa.1914.0089.
- [5] F. E. Jorgensen. How to measure turbulence with hot wire anemometers- a practical guide. (2002). Accedido: Oct. 29, 2021. [Online]. Disponible en: <https://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/hotwire2.pdf>
- [6] P. Martín, E. Martín, A. Mércio y E. B. Camano, "Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento," RIELAC, vol. 35, pp. 78-92, Abr. 2014.
- [7] O.D. Osorio, N. Silin y J. Converti, "Fabrication of hot-wire probes and electronics for constant temperature anemometers," in Latin American applied research, Jul. 2010. [Online]. Disponible: http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932010003300006&lng=pt&nrm=iso
- [8] "Understanding Hot-Wire Anemometry," in QATS, 2007. [Online].

Disponible

en:

https://www.mouser.com/catalog/additional/ATS_Qpedia_Dec07_Understanding%20hot%20wire%20amemometry9.pdf

[9] I. R. Puente de Wheatstone (5ta ed.) [Online]. Disponible en:

https://www.academia.edu/34700165/Puente_de_Wheatstone

[10] J. R. Velarde Brito, "El OpAmp y sus aplicaciones," Tesis de grado, Univ. Nac. de educación, Lima, Perú, 2019.

[11] R. Coughlin y F. Driscoll. (1999). "Primeras experiencias con un amplificador operacional, amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales". Naucalpan de Juárez, 2000.

[12] Universidad De Vigo. (2011). Dispositivos Electrónicos I. [Online]. Disponible en: <http://mdgomez.webs.uvigo.es/DEI/Guias/tema5.pdf>

[13] G. M. Smith, "¿Qué es adquisición de datos DAQ?", Mar. 1, 2021.

<https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>

[14] G M. Smith, "¿Qué es el acondicionamiento de señal o acondicionador de señal?"

<https://dewesoft.com/es/daq/que-es-acondicionamiento-de-seal>

[15] J. A. Cortes, H. B. CANO y J. A. Chaves. "FUNDAMENTOS Y APLICACIÓN DEL MUESTREO EN SEÑALES UBICADAS EN LAS BANDAS ALTAS DEL ESPECTRO," Scientia Et Technica, vol. XIV, núm. 39, pp. 37-42 Sep. 2008. Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia

[16]. Labview. (2021). National Instruments. Accedido: Dic. 1, 2021. [Online].

Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>

[17] SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, FREEDMAN: "Física Universitaria," Vol. I y II, Pearson, 1999

[18] National Instruments, "SPECIFICATIONS USB-6009." Septiembre 1, 2017. Distribuido por National Instruments. <https://www.ni.com/pdf/manuals/375296c.pdf>

[19] C. Eguti & E. Vieira, "DEVELOPMENT OF A BASIC CIRCUIT OF A HOT-WIRE ANEMOMETER," Proceedings of the 10mo Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 -- Dec. 03, 2004

[20] W. K. George, P. D. Bauther y A. Shamir, "Polynomial Calibrations for Hot Wires in Thermally Varying Flows," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 2, pp 230-235, 1989.

[21] H. Hu. (2014). Lecture 6 Hotwire anemometry: Fundamentals and instrumentation. Iowa State University. [Online]. Disponible en: <https://www.aere.iastate.edu/~huhui/teaching/2014Sx/class-notes/AerE344-Lecture-06-Hotwire-Anemomtry-and-Airfoil-Pressure-Lab.pdf>

[22] Purdue University. (1996). Constant Temperature Anemometer. [PowerPoint slides]. Disponible en: <https://engineering.purdue.edu/~aae520/lectures/lecture%20hot%20wires.ppt>

[23] A. E. Perry & G. L. Morrison, "Static and dynamic calibrations of constant-temperature hot-wire systems," Journal of Fluid Mechanics, 1971, vol. 47, pp 765 – 777, doi: 10.1017/S0022112071001356.

[24] H. H. Bruun, M. A. Khan, H. H. Al-Kayiem y A. A. Fardad, "Velocity calibration relationships for hot-wire anemometry," Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 21, no. 2, pp. 225-232, Julio 1987.

[25] D. C. Collis y M. J. Williams, "Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers," Journal of Fluid Mechanics, vol. 6, no. 3, pp. 357–384, 1959.

[26] Virginia Tech-Aerospace and Ocean Engineering. HOT-WIRE AND HOT-FILM ANEMOMETRY. [Documento PDF]. Disponible en: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~simpson/aoe4154/hotwirelab.pdf>

[27] M. K. Swaminathan, R. Bacic, G. W. Rankin y K. Sridhar, "Improved calibration of hot-wire anemometers," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 16, pp. 335-338.

[28] E. C. Itsweire y K. N. Helland, "A high-performance low-cost constant temperature hot-wire anemometer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 16, pp. 549–553.

APÉNDICE

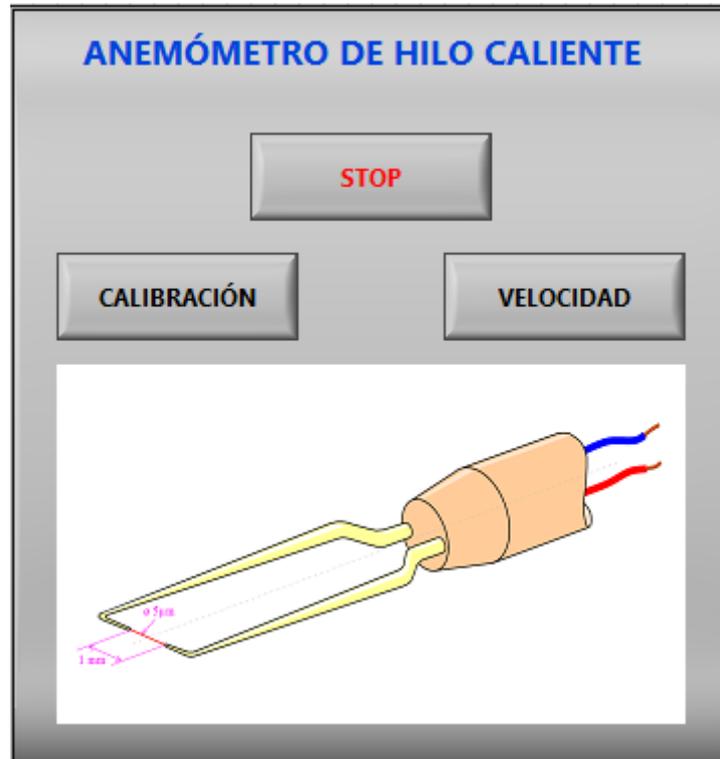


Figura 4.1 Pantalla inicial del sistema



Figura 4.2 Pantalla de calibración

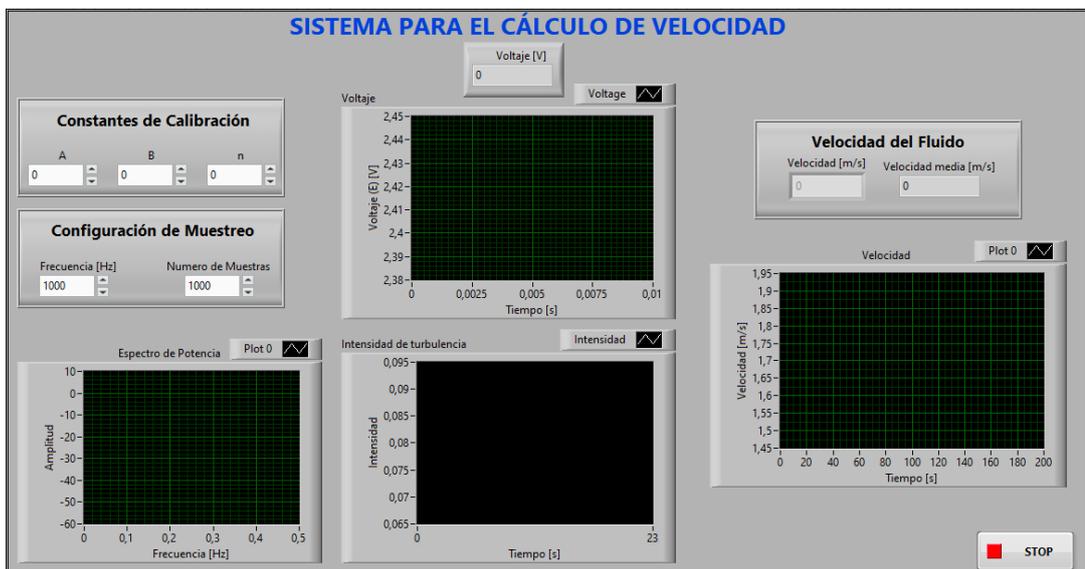


Figura 4.3 Pantalla del cálculo de la velocidad

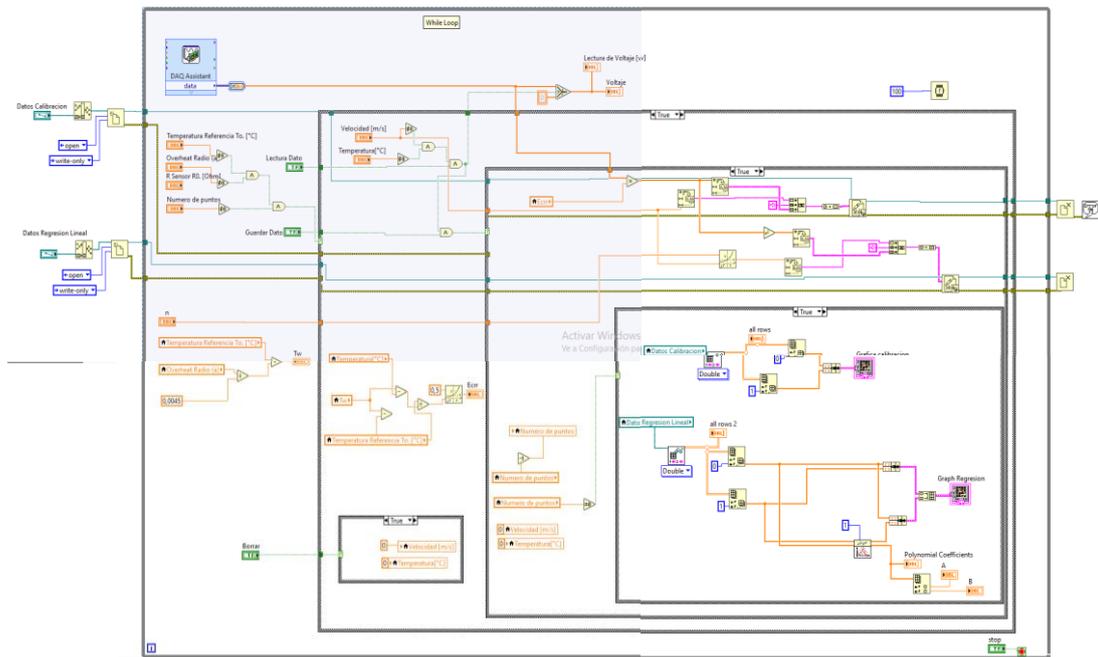


Figura 4.4 Programación en Labview de la pantalla de calibración

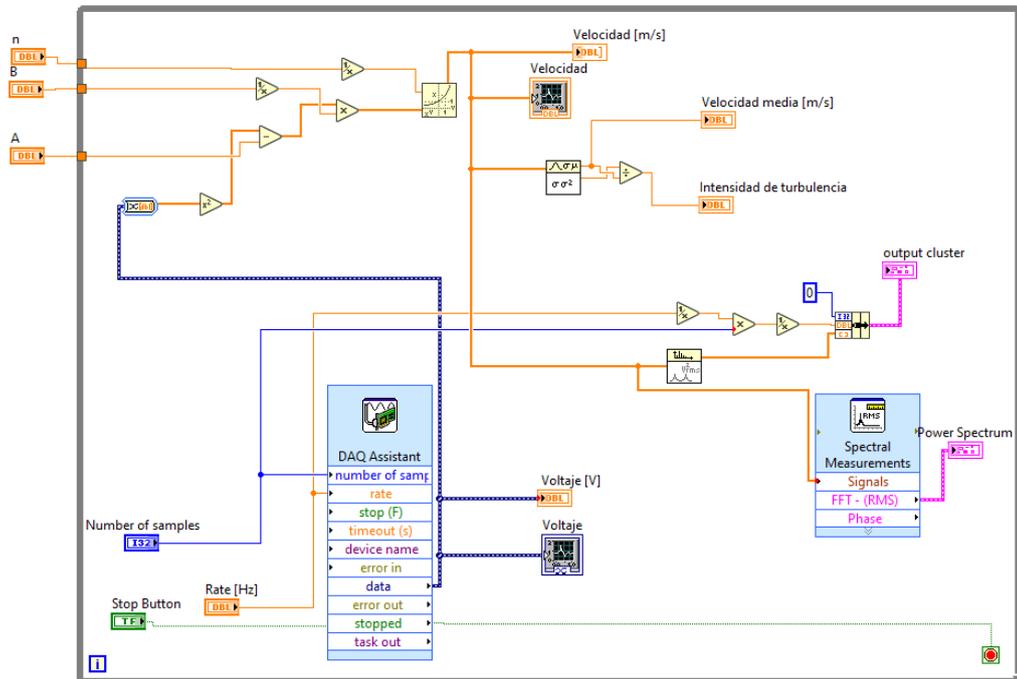


Figura 4.5 Programación en Labview de la pantalla de velocidad

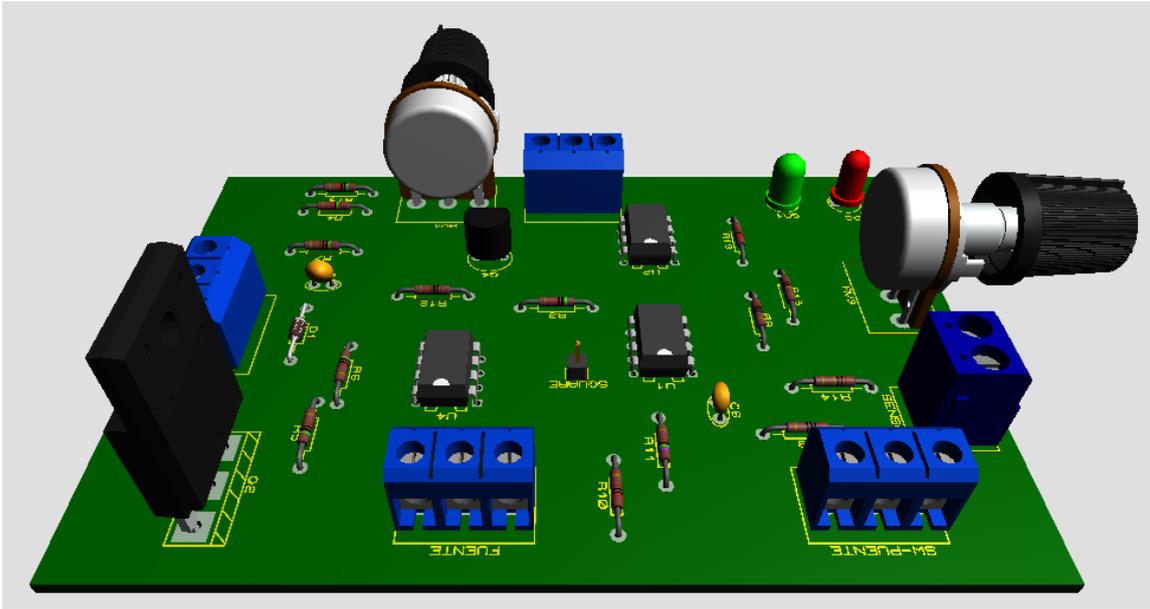


Figura 4.6 Diseño en 3D del circuito

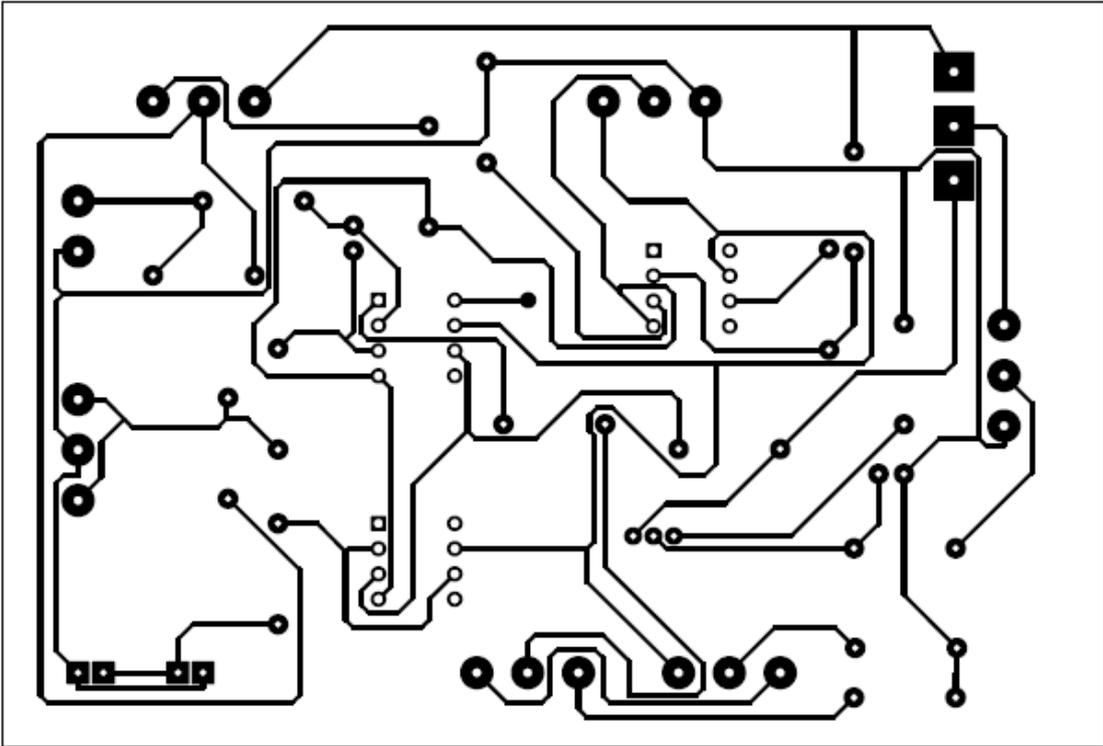


Figura 4.7 PCB del circuito