

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

Diseño de los sistemas de posicionamiento y de calibración para un  
anemómetro de hilo caliente

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Jan Kristofer Mejia Rodriguez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

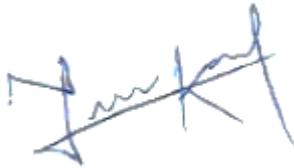
El presente proyecto lo dedico a mis padres y mi hermana, quienes me apoyaron durante su realización, y supieron motivarme a culminar mis estudios superiores.

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy mis sinceros agradecimientos a los profesores y tutores de la facultad de ingeniería mecánica de ESPOL, que supieron resolver mis dudas con paciencia y me dieron valiosos consejos en base a la experiencia de sus carreras como profesionales.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jan Kristofer Mejia Rodriguez* y doy mi 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”



---

Jan Kristofer  
Mejia Rodriguez

# EVALUADORES

.....  
**PhD. Francis Roderich Loayza Paredes**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**PhD. Jorge Francisco Silva Leon**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El laboratorio de termofluidos de ESPOLE ubicado en la facultad de ingeniería mecánica y ciencias de la producción no cuenta actualmente con un anemómetro de hilo caliente para el estudio de turbulencias en el túnel de viento, debido al elevado costo de su implementación y de los subsistemas necesarios para su operación, entre ellos el sistema de posicionamiento y el sistema de calibración. Debido a esto el objetivo de este proyecto es diseñar los sistemas de posicionamiento y de calibración para un anemómetro de hilo caliente, además estimar los costos de los materiales, elaborar manuales de operación y planos detallados. Se diseñó el sistema de posicionamiento usando un juego de tornillos de avance y motores paso a paso NEMA 17, el sistema de control para los motores paso a paso se lo diseñó usando Arduino y drivers A4988 para que la posición pueda ser ajustada mediante el ingreso de los datos al código Arduino en un ordenador. Se realizaron análisis estáticos y de flujo usando el software SolidWorks, y se demostró la autorretención del diseño, y que la estructura no influye en los datos obtenidos por el elemento sensor del anemómetro. Se seleccionó el calibrador Dantec 54H10 basándose en un procedimiento de calibración de sondas propuesto por Eguti et al. (2002), el cual se hace utilizando un flujo de aire comprimido. Se concluye que la estructura del sistema de posicionamiento es económicamente viable con un costo de 815,53\$, y con un peso de 5.93kg es fácil de montar y desmontar del túnel de viento del laboratorio.

**Palabras Clave:** Anemómetro, posicionamiento, calibración, túnel de viento, Motor paso a paso.

## **ABSTRACT**

*ESPOL's thermofluid laboratory located in the Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences does not currently have a hot-wire anemometer for the study of turbulence in the wind tunnel, due to the high cost of its implementation and the necessary subsystems for its operation, including the traversing system and the calibration system. Due to this, the objective of this project is to design the traverse and calibration systems for a hot wire anemometer, in addition to estimating the costs of the materials, preparing operation manuals and detailed plans. The traverse system was suggested using a set of lead screws and NEMA 17 stepper motors, the control system for the stepper motors was designed using Arduino and A4988 drivers so that the position can be adjusted by inputting the data to the Arduino code on a computer. Static and flow analyzes were performed using SolidWorks software, and the self-locking of the design was broken, and the data obtained by the anemometer sensing element was not influenced by the structure. Dantec 54H10 calibrator was selected, based in a probe calibration procedure proposed by Eguti et al. (2002), which is done using a flow of compressed air. It is concluded that the structure of the traverse system is economically viable with a cost of \$815.53, and with a weight of 5.93kg, it is easy to assemble and disassemble the laboratory wind tunnel.*

*Keywords: Anemometer, Traverse, Calibration, Wind Tunnel, Stepper Motor.*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Definición del Problema.....	2
1.2    Justificación del proyecto.....	3
1.3    Objetivos .....	4
1.3.1    Objetivo General .....	4
1.3.2    Objetivos Específicos.....	4
1.4    Marco teórico.....	5
1.4.1    Anemometría de hilo caliente.....	5
1.4.2    Principios físicos de la anemometría de hilo caliente .....	6
1.4.3    HWA: Método de corriente constante (CCA) .....	8
1.4.4    HWA: Método de temperatura constante (CTA) .....	9
1.4.5    Motor paso a paso .....	10
1.4.6    Calibración.....	12
CAPÍTULO 2 .....	13
2.    Metodología.....	13
2.1    Especificaciones generales del anemómetro.....	13
2.2    Sistema de posicionamiento.....	14

2.2.1	Requerimientos para el diseño del sistema de posicionamiento.....	15
2.2.2	Tabla morfológica.....	16
2.2.3	Alternativas de diseño .....	18
2.2.4	Criterios de selección.....	19
2.2.5	Ponderación de criterios de selección .....	19
2.2.6	Selección de mejor alternativa .....	20
2.3	Diseño de forma .....	21
2.4	Diseño detallado.....	23
2.4.1	Eje X – Dirección del flujo .....	23
2.4.2	Eje Y – vertical .....	32
2.4.3	Eje Z – Lateral.....	33
2.4.4	Sistema de control del ensamblaje.....	34
2.5	Sistema de calibración.....	36
2.6	Diseño de sistema de calibración .....	40
CAPÍTULO 3 .....		42
3.	Resultados.....	42
3.1	Sistema de posicionamiento.....	42
3.2	Dimensiones y portabilidad.....	43
3.3	Análisis estático.....	44
3.4	Análisis de flujo.....	46
3.5	Sistema de control.....	47
3.6	Sistema de calibración.....	48
3.7	Análisis de costos sistema de posicionamiento .....	50
3.7.1	Costos de materiales y componentes.....	50
3.8	Softwares utilizados.....	51
CAPÍTULO 4 .....		52

4.	Análisis de resultados, Conclusiones Y Recomendaciones .....	52
4.1	Conclusiones.....	53
4.2	Recomendaciones.....	54
	BIBLIOGRAFÍA .....	56
	APÉNDICES.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema físico anemómetro [IPN] .....	6
Figura 1.2	Circuito de corriente constante [Dr. Hui Hu ,Department of Aerospace Engineering Iowa State University] .....	8
Figura 1.3	Circuito de temperatura constante [Dr. Hui Hu ,Department of Aerospace Engineering Iowa State University] .....	9
Figura 1.4	Diagrama de un motor paso a paso [Oriental motor].....	10
Figura 1.5	Esquema de calibración típica para instrumentos [Tek] .....	12
Figura 2.1	Túnel subsónico de viento, Laboratorio de termofluidos ESPOL [Elaboración propia] .....	14
Figura 2.2	Cámara del túnel de viento [Elaboración propia].....	15
Figura 2.3	Cámara extraída del túnel de viento. [Elaboración propia] .....	22
Figura 2.4	Croquis a mano alzada de configuración para el sistema de posicionamiento [Elaboración propia].....	22
Figura 2.5	Diferentes alternativas que presenta el catálogo de movimiento lineal Bosch [Rexroth].....	24
Figura 2.6	Eje de transmisión de tipo abierto, catalogo [Rexroth] .....	24
Figura 2.7	Husillo de bolas [Balbino] .....	26
Figura 2.8	Especificaciones motor paso a paso NEMA17 [Technical conditions].....	31
Figura 2.9	Esquema básico del controlador de un stepper motor [Marker] .....	35
Figura 2.10	Disipadores de calor para controlador A4988 [Ryvelectronics] .....	36
Figura 2.11	Calibración usando aire comprimido [Eguti 2004] .....	37
Figura 2.12	Calibrador de hilo caliente Dantec [Dantec] .....	39

Figura 3.1 Sistema de posicionamiento para anemómetro hilo caliente, diseño final [Elaboración propia].....	43
Figura 3.2 Analisis estatico, escala de deformacion 10 [Elaboración propia] .....	45
Figura 3.3 Análisis de Velocidad del flujo [Elaboración propia] .....	46
Figura 3.4 Analisis de trayectoria del flujo de viento [Elaboración propia].....	46
Figura 3.5 Esquema final del circuito para el control de los motores paso a paso por medio de Arduino y controladores A4988. [Elaboración propia].....	47
Figura 3.6 Diseño sistema de calibración por flujo laminar [Elaboración propia].....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características túnel de viento Laboratorio de termofluidos ESPOL .....	14
Tabla 2.2 Tabla morfológica con posibles alternativas de diseño .....	17
Tabla 2.3 Comparación por pares de criterios de selección.....	19
Tabla 2.4 Orden de importancia criterios de selección .....	20
Tabla 2.5 Ponderacion de criterios de seleccion.....	20
Tabla 2.6 Matriz de decisión .....	21
Tabla 2.7 Componentes para el eje X del sistema de posicionamiento .....	25
Tabla 2.8 Datos husillo eje X .....	27
Tabla 3.1 Peso total estructura .....	44
Tabla 3.2 Componentes sistema de calibración diseñado .....	49
Tabla 3.3 Componentes calibrador Dantec 54H10 .....	49
Tabla 3.4 Análisis de costos .....	51



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde que Osborne Reynolds descubrió y caracterizó el fenómeno físico de la turbulencia (Osborne Reynolds, 1883), ha suscitado múltiples estudios. El flujo rápido de cualquier fluido que pasa por un obstáculo o un perfil aerodinámico crea turbulencia en las capas límite y desarrolla una estela turbulenta que generalmente aumentará la resistencia ejercida por el flujo sobre el obstáculo, por lo que la turbulencia debe evitarse para obtener un mejor rendimiento aerodinámico. En la ingeniería, el encuentro con la turbulencia de fluidos es constante, está presente en los intercambiadores de calor, tuberías de agua, aire y diversas sustancias, en reactores químicos, procesos de producción, etc.

Uno de los medios para estudiar experimentalmente la turbulencia es utilizando la anemometría de hilo caliente (HWA, por sus siglas en inglés). La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) actualmente no cuenta con un equipo de HWA en sus instalaciones. Si bien el Laboratorio de Termofluidos de ESPOL posee un túnel de viento no existen medios para estudiar el flujo turbulento dentro de este. Además, el coste de los subsistemas necesarios para su funcionamiento como son el calibrador y posicionador son una gran limitante para su adquisición.

En este proyecto se presenta el diseño de un sistema posicionamiento y de calibración para un anemómetro de hilo caliente, usado para estudios de turbulencia en el laboratorio de Termofluidos de ESPOL; además de los respectivos manuales de operación y mantenimiento básico.

## 1.1 Definición del Problema

El estudio de los fluidos es de gran importancia en una gran variedad de campos, desde el aire que nos rodea hasta su uso en diversos procesos industriales, por lo que es necesario tener herramientas para caracterizar las propiedades de un fluido no solo cuando se mueve de forma regular sino también cuando se comporta con turbulencia. La turbulencia es el movimiento irregular de los fluidos en donde sus moléculas no siguen una trayectoria fija, en muchos casos es de gran importancia conocer la dirección y la velocidad de fluidos turbulentos como en un campo de flujo sobre pista de aterrizaje en donde dichos parámetros podrán determinar si es segura la llegada de un helicóptero, y el instrumento por excelencia para realizar estos estudios es el anemómetro de hilo caliente.

En la actualidad el Laboratorio de Termofluidos de la ESPOL no cuenta un anemómetro de hilo caliente para estudiar la turbulencia. A pesar de lo relativamente sencillo de su principio de operación, por tratarse de un instrumento para fines de investigación no son producidos en masa por lo que su costo en el mercado es elevado.

Lo mismo sucede con los accesorios y subsistemas indispensables para su utilización como lo son el sistema de posicionamiento y el de calibración. Es por esto que se requiere diseñar y proyectar la construcción de un sistema de posicionamiento y el de calibración para un anemómetro de hilo caliente para que pueda ser utilizado para futuras investigaciones dentro de la ESPOL, con un costo inicial accesible, y que sea diseñado con alta tecnología, con componentes y materiales disponibles localmente, que permita un rápido, fácil y **económico** mantenimiento y reparación.

El presente diseño no tiene impactos en el área de la **salud pública, seguridad y bienestar** debido a que su implementación y uso dentro del laboratorio es seguro y no es perjudicial a la **salud** en ningún sentido ni atenta contra la **seguridad** del investigador. Tampoco es de interés su **impacto global o cultural**, el anemómetro de hilo caliente es un instrumento que se ha usado por años en diferentes laboratorios alrededor del mundo y su uso e implementación no genera un impacto global ni nada relacionado a lo cultural.

Este proyecto tendría impacto directo sobre la capacidad de investigación experimental de la universidad en general, por ejemplo: para investigaciones fundamentales de mecánica de fluidos, optimización de vehículos submarinos, aeronaves o drones, estudio de sistemas de recolección de energía eólica y otros relacionados. Además, de ser **económicamente viable**, generaría un ahorro para ESPOLE y la posibilidad de construir el anemómetro para otras instituciones educativas del país. En cuanto al aspecto **ambiental** es importante que el diseño no tenga impactos negativos en el medio ambiente, de hecho, el anemómetro de hilo caliente no genera residuos perjudiciales para el entorno y la cantidad de energía que utiliza no supone un problema ambiental.

## 1.2 Justificación del proyecto

Un anemómetro de hilo caliente es un instrumento que, por su alta capacidad de respuesta y sensibilidad a cambios de temperatura, permite medir fluctuaciones rápidas que ocurren en flujos turbulentos o no-estables comunes en aplicaciones industriales. El principio mecánico de funcionamiento es la transferencia de calor por convección forzada que provoca un descenso de temperatura de un hilo que es calentado. A su vez este instrumento cuenta con un sistema electrónico y un control que permite compensar ese cambio de temperatura de manera rápida, el cual luego es relacionado mediante calibraciones a la velocidad instantánea que percibe el instrumento. Por la alta sensibilidad de la calibración a la temperatura del medio y otros factores ambientales, es necesario realizar calibraciones diarias para tener mediciones confiables. Por ello un sistema de anemometría de hilo caliente requiere contar con una estación de calibración, la cual suele tratarse de un túnel de viento de escritorio con buena calidad de flujo, donde se pueda realizar pruebas y adquisición de datos para curvas de calibración.

Naturalmente para utilizar un anemómetro dentro de un túnel de viento se requiere el diseño de un sistema de soportes para desplazar el instrumento en diferentes direcciones dentro de la sección de trabajo. Todos estos componentes hacen que el sistema de anemometría de hilo caliente sea relativamente costoso, por tratarse de tecnología que la producen pocas empresas en el mundo pero que podrían ser producidos localmente. Por ello

es imperativo realizar los diseños y análisis económicos para mantener un costo bajo para estos sistemas.

Todos estos componentes hacen que el sistema de anemometría de hilo caliente sea relativamente costoso, bordeando al menos los \$35,000 más costos de importación por tratarse de tecnología que la producen pocas empresas en el mundo pero que podrían ser producidos localmente. Por ello es imperativo realizar los diseños y análisis económicos para mantener un costo bajo para el sistema

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar los sistemas de posicionamiento y de calibración para un anemómetro de hilo caliente mediante el proceso de diseño y el análisis de las alternativas disponibles, con el fin de ser usado en el laboratorio de termofluidos de la FIMCP.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar el sistema de posicionamiento del anemómetro.
2. Diseñar el sistema de calibración para el instrumento.
3. Elaborar planos de construcción detallados.
4. Estimar los costos de diseño, materiales, operación, mano de obra y tiempos requeridos para construir estos sistemas.
5. Elaborar manuales de operación y mantenimiento básico.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Anemometría de hilo caliente

Se conocen como anemómetros, históricamente, a los dispositivos que se utilizan para medir la velocidad del viento y son un instrumento común en estaciones meteorológicas. La palabra anemómetro proviene del término de origen griego "*anemos*", cuya traducción es "viento". Actualmente se utiliza para describir cualquier instrumento de medición de la velocidad del aire (mayoritariamente) utilizado en meteorología, aerodinámica y mecánica de fluidos.

Un anemómetro de hilo caliente es un tipo de instrumento que se utiliza para medir la dirección y la velocidad del fluido en donde un cable delgado se calienta eléctricamente a algún nivel de temperatura aproximadamente superior al rango de temperatura ambiente, de modo que cuando el fluido pasa por el anemómetro, enfría el cable removiendo energía térmica. Ya que la resistencia del hilo está relacionada con su temperatura, es posible formar una relación entre su resistencia y la velocidad del flujo de líquido a partir de ecuaciones balance de energía.

Aunque la medición de velocidad en fluidos con finalidad experimental esté actualmente dominada por LDV (Velocimetría de Láser Doppler por sus siglas en inglés) y PIV (Velocimetría de Imágenes de Partículas por sus siglas en inglés) (Discetti & Ianiro, 2017, Capítulo 9), HWA posee dos ventajas importantes. La primera consiste en que abarca un gran rango de velocidades, desde los flujos subsónicos bajos hasta supersónicos altos (Tropea et al., 2007, sec. 5.2). La segunda, y quizá la más importante, es la capacidad de medir fluctuaciones rápidas de velocidad manteniendo una buena resolución espacial y, alta resolución temporal debido a baja inercia térmica principalmente (Discetti & Ianiro, 2017, Capítulo 9; Tropea et al., 2007, sec. 5.2). Esto último lo convierte en un método ideal para flujos turbulentos (Discetti & Ianiro, 2017, Capítulo 9; Tropea et al., 2007, sec. 5.2), y de sobremanera para turbulencia de pared (Discetti & Ianiro, 2017, Capítulo 9).

### 1.4.2 Principios físicos de la anemometría de hilo caliente

Considere un cable delgado montado en soportes y expuesto a una velocidad  $U$ . Cuando pasa una corriente a través de un cable, se genera calor ( $I^2 R_W$ ). En equilibrio, esto debe ser equilibrado por la pérdida de calor (principalmente convectiva) al entorno.

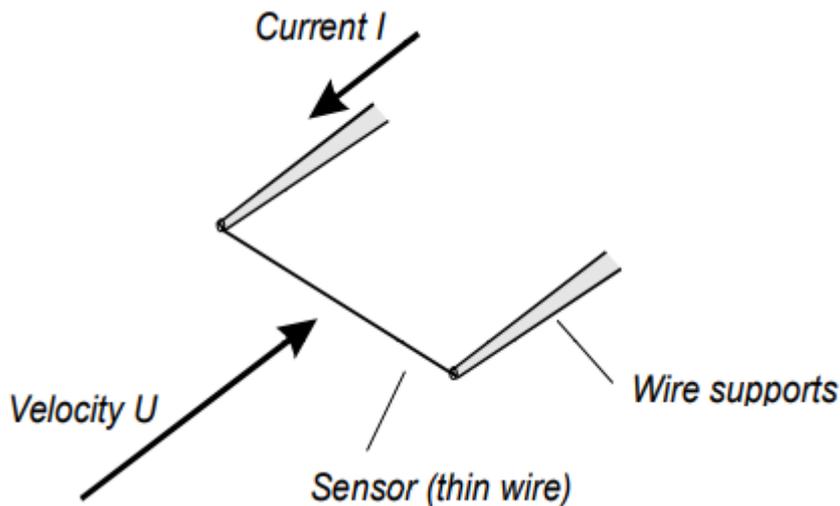


Figura 1.1 Esquema físico anemómetro [IPN]

Para comprender la relación entre la corriente y la velocidad del flujo, es necesario resolver la ecuación de balance de calor para el filamento de alambre. Para mantener el análisis simple, solo se considerarán las condiciones de estado estacionario. La ecuación general de balance de calor para el filamento de alambre es:

(1.1)

$$H_g = H_T + H_A$$

Donde  $H_T$  es el calor transferido al entorno. Para condiciones de estado estacionario, no hay acumulación de calor  $H_A$  en el cable, por lo que este término llega a cero. La generación de calor,  $H_g$  por calentamiento en Jules, es una función de la entrada de energía eléctrica al cable. Se define como:

(1.2)

$$H_g = I^2 R_W$$

Dónde,

I = corriente a través del circuito

$R_w$  = resistencia del hilo a una temperatura dada  $\Theta_w$

Para determinar HT, el valor del calor transferido al fluido (entorno), se deben analizar los tres tipos de transferencia de calor: convección, conducción y radiación. En este caso como se mencionó, solo se consideran condiciones de estado estacionario para mantener el análisis simple, además las pérdidas por radiación y la conducción son valores despreciables por lo que solo es importante analizar la convección:

(1.3)

$$Q_c = Nu * A (T_w - T)$$

Donde,

$Q_c$  = Pérdida de calor por convección

$Nu$  = Número de Nusselt, coeficiente de transferencia de calor adimensional

$A$  = Área de transferencia del cable, que puede ser definido longitud \* espesor \*  $\pi$

$T_w$  = Temperatura del cable

$T$  = Temperatura del entorno

Con las ecuaciones (1), (2), y (3), con las condiciones y valores a despreciar mencionados, se obtiene la relación:

(1.4)

$$H_g = H_T$$

$$I^2 R_w = Nu * A (T_w - T)$$

Esta última expresión, relaciona la corriente con la temperatura, pero para analizar la velocidad del flujo es necesario usar la "Ley de King" (1915) para el número de Nusselt en régimen de convección forzada, que indica que:

(1.5)

$$Nu = (A1 + BRe^n)$$

Donde,

$A1$ ,  $B$ ,  $n$  y son coeficientes que dependen del fluido y su valor de Reynolds  $Re$ , y el valor de Reynolds depende de la velocidad del flujo  $U$ .

Teniendo la relación de la ecuación 4, es fácil notar que para que la ecuación se pueda resolver es necesario que uno de los dos valores sea una constante: la corriente  $I$ , o la temperatura del cable sensor  $T_w$ .

Es por esto por lo que existen dos métodos principales para usar el anemómetro de hilo caliente: corriente constante y temperatura constante.

### 1.4.3 HWA: Método de corriente constante (CCA)

En un anemómetro de hilo caliente, en corriente constante, se pasa una corriente constante a través del cable sensor. Es decir, el voltaje a través del circuito del puente se mantiene constante, es decir, no varía.

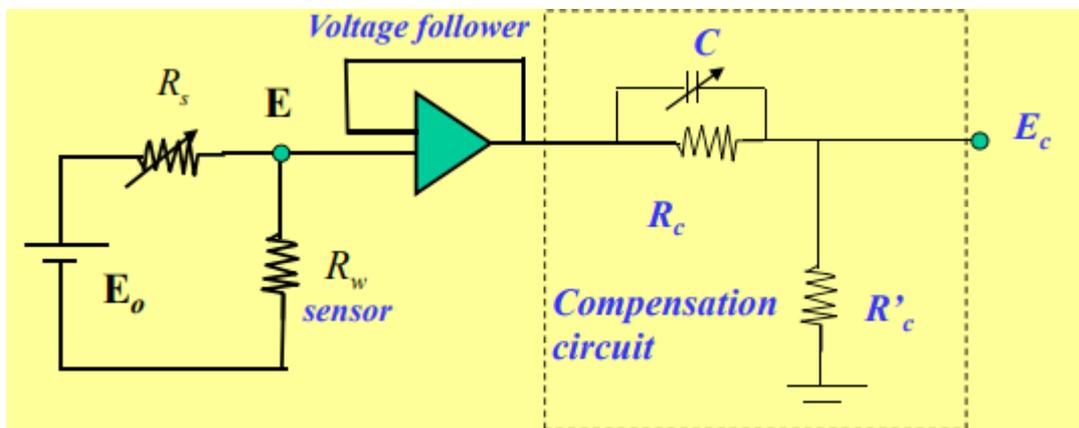


Figura 1.2 Circuito de corriente constante [Dr. Hui Hu ,Department of Aerospace Engineering Iowa State University]

Debido al flujo de gas, la transferencia de calor tiene lugar desde el cable sensor al gas que fluye y, por lo tanto, la temperatura del cable sensor se reduce provocando un cambio en la resistencia del cable sensor. (este cambio de resistencia se convierte en una medida del caudal).

Debido a esto, el galvanómetro que estaba inicialmente en la posición cero se desvía y esta desviación del galvanómetro se convierte en una medida del caudal del gas cuando se calibra.

#### 1.4.4 HWA: Método de temperatura constante (CTA)

En un anemómetro de hilo caliente, en temperatura constante, inicialmente se pasa una corriente a través del cable. Debido al flujo del fluido, la transferencia de calor tiene lugar desde el cable sensor al gas que fluye y esto tiende a cambiar la temperatura y, por lo tanto, la resistencia del cable.

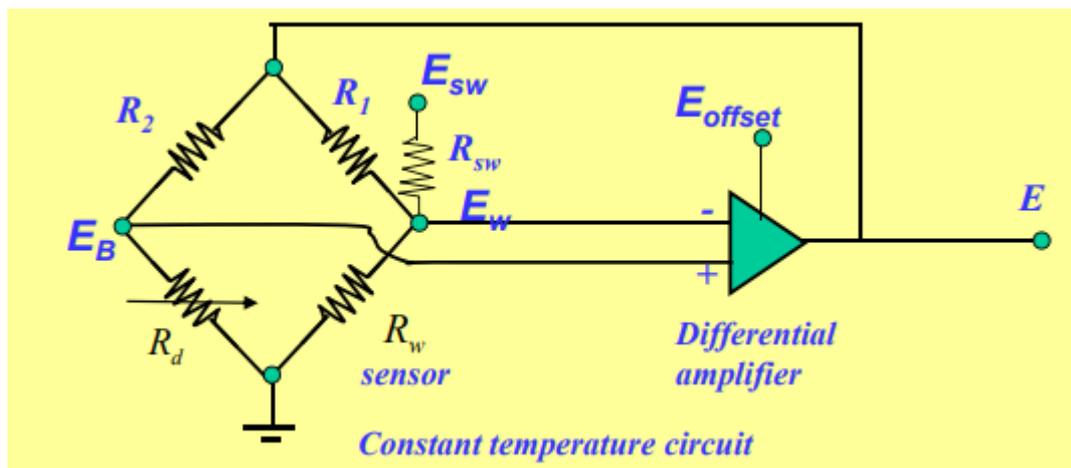


Figura 1.3 Circuito de temperatura constante [Dr. Hui Hu ,Department of Aerospace Engineering Iowa State University]

El principio de este método es mantener la temperatura y la resistencia del cable sensor a un nivel constante. Por lo tanto, la corriente a través del cable sensor aumenta para que el cable sensor tenga su resistencia y temperatura iniciales.

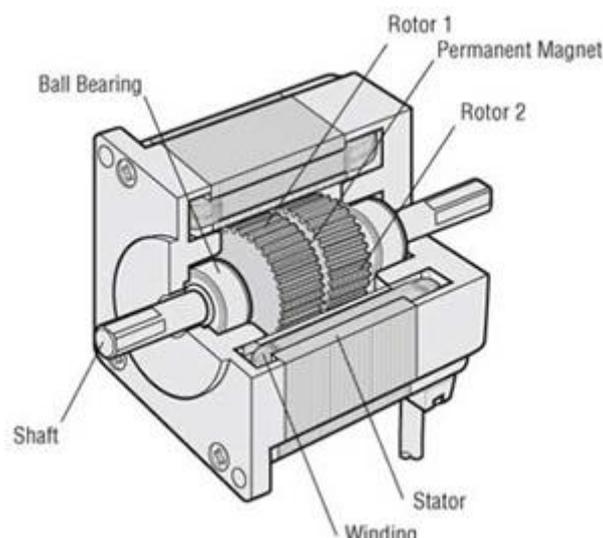
El anemómetro de temperatura constante utiliza un amplificador de retroalimentación para mantener el promedio constante de temperatura y resistencia del cable. La corriente eléctrica necesaria para devolver la resistencia y, por tanto, la temperatura del cable a su estado inicial se convierte en una medida del caudal del fluido cuando se calibra.

### 1.4.5 Motor paso a paso

En el diseño del sistema de posicionamiento para el anemómetro de hilo caliente se usaron motores paso a paso para el movimiento en los tres ejes. Un motor paso a paso es un sistema electromecánico que convierte una señal eléctrica en una mecánica. Está diseñado para realizar un movimiento discreto (noción de paso) y alcanzar una posición precisa.

El movimiento se logra mediante el uso de un campo magnético proporcionado por bobinas y detectado por imanes. De hecho, cuando se energiza una de las bobinas, se genera un campo magnético y, si la energía se suministra de forma cíclica (por medio de pulsos de entrada), entonces el campo magnético variará. Cuando se coloca un imán en este campo magnético variable, se posiciona en el estado de energía más bajo (equilibrio), proporcionando así movimiento.

Este principio se utiliza en el motor paso a paso, compuesto por una parte fija (el estator) hecha de bobinas energizadas cíclicamente y una parte móvil (el rotor) hecha de material ferromagnético o imanes.



**Figura 1.4 Diagrama de un motor paso a paso [Oriental motor]**

Por lo general, los motores paso a paso tienen 2 fases, pero algunos de ellos también pueden tener 3 o 5 fases. Los motores paso a paso bipolares generalmente usan un devanado por fase porque la corriente en el devanado puede circular en ambas

direcciones. Los motores paso a paso unipolares usan un devanado por fase con un grifo en el medio; por lo tanto, la mitad del devanado se usa para el flujo de corriente positiva y la otra mitad para el flujo de corriente negativa (correspondiente a dos bobinas separadas).

Los motores paso a paso se llaman así porque cada pulso de electricidad hace girar el motor un paso. Los motores paso a paso están controlados por un controlador, que envía los pulsos al motor y hace que gire. El número de pulsos que gira el motor es igual al número de pulsos alimentados al controlador. El motor girará a una velocidad que es igual a la frecuencia de esos mismos pulsos., el número de pulsos por vuelta se puede determinar con la siguiente expresión

(1.6)

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{vuelta}} = \frac{360^\circ}{\text{Resolucion}}$$

La resolución de los servosistemas que utilizan codificadores rotatorios como el motor paso a paso, es una función del paso del husillo y la resolución del codificador. Es una parte vital al momento de iniciar la elección de un motor, se puede expresar como la relación entre la precisión deseada y el avance del husillo como se muestra en la ecuación:

(1.7)

$$\text{Resolucion } \theta = 360^\circ * \frac{\Delta L}{L}$$

Donde:

$\Delta L$  es la precisión de movimiento deseada

L el avance del husillo

### 1.4.6 Calibración

La calibración de un instrumento es uno de los principales procesos utilizados para mantener la precisión del equipo. La calibración es el proceso de configurar un instrumento para proporcionar un resultado para una muestra dentro de un rango aceptable. Eliminar o minimizar los factores que causan mediciones inexactas es un aspecto fundamental en el diseño de un equipo de instrumentación.

La calibración garantiza la precisión y la consistencia de las herramientas de medición comparándolas con un equipo de calibración de referencia y luego haciendo los ajustes necesarios. La importancia principal de la calibración es que mantiene la precisión, la estandarización y la repetibilidad de las mediciones, lo que garantiza puntos de referencia y resultados fiables. Sin una calibración regular, los equipos o instrumentos pueden no cumplir con las especificaciones, proporcionar mediciones imprecisas y amenazar la calidad, la seguridad y la longevidad del equipo.

Aunque el procedimiento exacto puede variar según el instrumento, el proceso de calibración generalmente involucra el uso del instrumento para probar muestras de uno o más valores conocidos llamados "calibradores". Los resultados se utilizan para establecer una relación entre la técnica de medición utilizada por el instrumento y los valores conocidos. En esencia, el proceso "enseña" al instrumento a producir resultados que son más precisos que los que se producirían de otra manera. El instrumento puede entonces proporcionar resultados más precisos cuando se analizan muestras de valores desconocidos en el uso normal del producto.

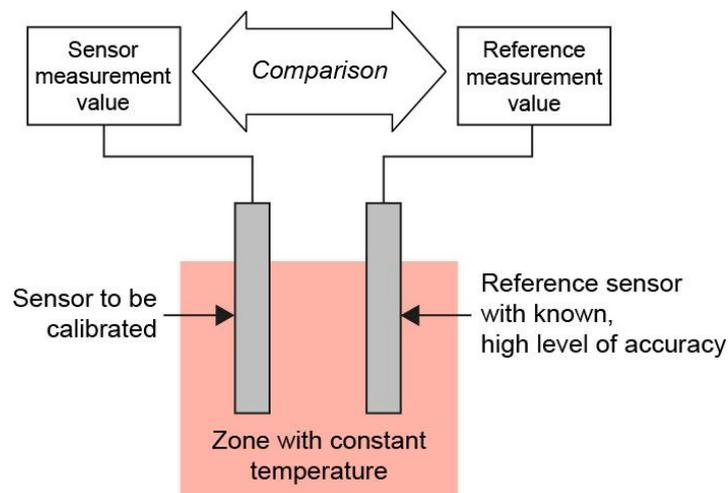


Figura 1.5 Esquema de calibración típica para instrumentos [Tek]

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El presente proyecto se centró en el diseño del sistema de posicionamiento y el sistema de calibración para el uso de un anemómetro de hilo caliente, por lo que fue necesario primero definir las características y requerimientos del anemómetro que será usado para el estudio de turbulencias en el laboratorio de termofluidos ubicado en la facultad de ingeniería mecánica y ciencias de la producción de ESPOL.

Una vez conocidos los requisitos del diseño se procedió a generar una tabla morfológica donde se obtuvieron las alternativas de diseño para el sistema de posicionamiento, de las cuales se seleccionó la mejor alternativa usando criterios de selección.

### 2.1 Especificaciones generales del anemómetro

Primero se definieron los factores y características que tienen mayor influencia en el proceso de diseño para el cliente tomando en cuenta las restricciones, siendo los principales factores que considerar:

- **Tipo de fluido a medir por el anemómetro:** Gas (principalmente aire)
- **Numero de componentes de velocidad de la medición:** Un componente de velocidad.
- **Rango de velocidad del fluido a medir:** Desde 1 m/s hasta 40 m/s
- **Temperatura de operación:** Temperatura ambiente, de 20 °C a 40 °C. Los experimentos en el túnel de viento se realizan isotérmicamente (temperatura constante).
- **Fabricación / manufactura:** Se debe tener conocimiento de los elementos, materiales y procesos de manufactura que están a la disposición en el mercado de la ciudad de Guayaquil.
- **Posicionamiento:** El anemómetro será ubicado dentro del túnel de viento, y tener la capacidad de moverse sobre los dos ejes horizontal y vertical
- **Reparación:** Facilidad de mantenimiento y reparación en las instalaciones de ESPOL, facilidad de encontrar repuestos.

- **Frecuencia de muestreo:** Mínimo 20 kHz, relacionado a fenómenos de turbulencia a estudiar
- **Costo:** Precios económicos para los sistemas a diseñar, tomando en cuenta la calidad.

## 2.2 Sistema de posicionamiento

El sistema de posicionamiento está ubicado dentro del túnel subsónico de viento que se puede apreciar en la figura 2.1, de las siguientes características:

Equipo	Túnel subsónico de viento
Marca	AEROVENT
Serie	1-70351
Modelo	TC222
Código ESPOL:	02689

**Tabla 2.1 Características túnel de viento Laboratorio de termofluidos ESPOL**



**Figura 2.1 Túnel subsónico de viento, Laboratorio de termofluidos ESPOL [Elaboración propia]**

## 2.2.1 Requerimientos para el diseño del sistema de posicionamiento

### 2.2.1.1 Costo

El diseño propuesto debe ser económicamente viable, usando componentes que se encuentren fácilmente en el mercado y de costos accesibles para el presupuesto.

### 2.2.1.2 Espacio

El diseño del sistema de posicionamiento debe tomar en cuenta las dimensiones de la cámara del túnel de viento del Laboratorio de termofluidos de ESPOL, la cual tiene unas dimensiones de 12" x 12"x 24", es decir largo 605 mm, ancho 305 mm, y alto 305 mm.



Figura 2.2 Cámara del túnel de viento [Elaboración propia]

### 2.2.1.3 Movilidad del sistema

El sistema debe ser capaz de mover el sensor del anemómetro en los tres ejes, vertical, horizontal, y en profundidad, dentro de la cámara del túnel de viento. El movimiento a lo largo de la cámara no necesita ser completo, con un movimiento mínimo de 60 mm

#### **2.2.1.4 Resistencia**

La estructura debe soportar mecánicamente la corriente del fluido, a una velocidad máxima de 40m/s, así como las posibles vibraciones causadas en los experimentos.

#### **2.2.1.5 Restricciones**

El diseño debe cumplir con dos condiciones importantes: que la estructura no altere las mediciones obtenidas por el anemómetro, en otras palabras, que no obstruya el flujo a medir para no perturbar su velocidad y que cumpla con la propiedad de estanqueidad (que no queden orificios que permitan el ingreso de partículas externas al interior del túnel).

#### **2.2.1.6 Portabilidad**

La portabilidad de la estructura es opcional, pero de ser posible la estructura debe contar con un método para montar y desmontar del túnel para no afectar otros experimentos realizados en el mismo túnel de viento que no incluyen al anemómetro.

### **2.2.2 Tabla morfológica**

Se procedió a realizar una tabla morfológica con las diferentes alternativas correspondientes al diseño de la sonda y elemento sensor, esta herramienta de diseño permite analizar las posibles opciones para generar las alternativas de diseño. Para esta se consideraron las siguientes variables:

- Posición del sistema
- Funcionamiento
- Control de movimiento
- Portabilidad

<b>Variable</b>	<b>Alternativas de diseño</b>	
Posición del sistema	Dentro de la cámara del túnel: Permite reducir cualquier influencia externa a la cámara de túnel.	Fuera de la cámara del túnel: Tiene la ventaja de no intervenir en gran medida en el experimento, reduciendo incertidumbres.
Funcionamiento	Funcionamiento para sistema dentro de la cámara:  Movimiento usando servomotores/ motores paso a paso a través de tornillos de avance.	Funcionamiento para sistema Fuera de la cámara:  Posiciones fijas, con orificios en el material de la cámara para el paso de husillos, posición deberá ser ajustada antes de cada experimento.
Control de movimiento	Computarizado Servomotores / motores paso a paso controlados por Arduino.	Manual Control de husillos con movimientos manuales, sin necesidad de componentes electrónicos.
Portabilidad	Sistema fijo	Sistema portable
	Sistema fijo en el túnel de viento sin capacidad de montar y desmontar, solo es necesario instalarlo la primera vez,	Capacidad de montar y desmontar el sistema según sea o no necesario su uso

**Tabla 2.2 Tabla morfológica con posibles alternativas de diseño**

## **2.2.3 Alternativas de diseño**

### **2.2.3.1 Diseño 1:**

Sistema de posicionamiento fuera de la cámara del túnel, con un funcionamiento mediante orificios para fijar la posición del anemómetro con husillos, sistema fijo sin opción a portabilidad. Controlado manualmente sin necesidad de componentes electrónicos.

La ventaja principal de este diseño es que no interviene (o interviene mínimamente) con los experimentos en el interior de la cámara del túnel de viento, y su funcionamiento y manejo son simples de implementar. Por otro lado, su falta de portabilidad y la cantidad de orificios necesarios para su implementación son parte de sus desventajas

### **2.2.3.2 Diseño 2:**

Sistema de posicionamiento dentro de la cámara del túnel de viento, con un funcionamiento mediante el movimiento de servomotores a través de tornillos de avance, sistema portable con capacidad de montar y desmontar según sea necesario. El desplazamiento de los servomotores es controlado por Arduino

Las ventajas de este diseño son su portabilidad y su capacidad de estanqueidad ya que los experimentos no son alterados por agentes externos debido a la poca necesidad de orificios de esta propuesta, además es un diseño que implementa un mejor uso de tecnología. Por otro lado, el sistema de posicionamiento al estar ubicado dentro de la cámara puede afectar u obstruir mínimamente los flujos de viento de los experimentos y por ende la posible causa de una incertidumbre.

## 2.2.4 Criterios de selección

Los criterios de selección son características que nos ayudan a tomar una decisión entre varias alternativas debido al destacamento del criterio. Se escogieron los siguientes criterios:

- Factibilidad: Factibilidad de encontrar en el mercado o de realizar la manufactura.
- Económico: Elementos de bajo costo teniendo en cuenta la calidad.
- Fácil de usar: Facilidad de uso para los experimentos del laboratorio.
- Movilidad: Rango de movilidad, precisión de movimiento del sistema.
- Durabilidad: Influenciado por la resistencia de sus elementos.
- Versatilidad: Características adicionales del diseño como la portabilidad.

## 2.2.5 Ponderación de criterios de selección

Se realizó una comparación por pares para poder ordenar los criterios en orden de importancia, se comparó cada criterio dándole un valor de 1 si se considera más importante o 0 en el caso contrario:

	Durabilidad	Fácil de usar	Versatilidad	Económico	Movilidad	Factibilidad
Durabilidad	-----	1	0	1	1	1
Fácil de usar	0	-----	0	1	1	1
Versatilidad	1	1	-----	1	1	1
Económico	0	0	0	-----	0	1
Movilidad	0	0	0	1	-----	1
Factibilidad	0	0	0	0	0	-----

**Tabla 2.3 Comparación por pares de criterios de selección**

<b>Criterio de selección</b>	<b>Orden de importancia</b>
Factibilidad	1
Económico	2
Movilidad	3
Fácil de usar	4
Durabilidad	5
Versatilidad	6

**Tabla 2.4 Orden de importancia criterios de selección**

A cada criterio se le dio una ponderación basada en su importancia para las necesidades del cliente:

**Criterio de selección de Ponderación**

<b>Factibilidad</b>	0.30
<b>Económico</b>	0.20
<b>Movilidad</b>	0.18
<b>Fácil de usar</b>	0.15
<b>Durabilidad</b>	0.10
<b>Versatilidad</b>	0.07

**Tabla 2.5 Ponderacion de criterios de seleccion**

### **2.2.6 Selección de mejor alternativa**

Se compararon las alternativas de diseño mediante la matriz de decisión, otorgando calificaciones (del 1 al 5) para los respectivos criterios de selección según la capacidad de cada alternativa de diseño para cumplir dicho criterio, la solución mejor puntuada es la mejor alternativa de diseño.

Criterios de selección	Peso	Diseño 1: Sistema fuera de la cámara del túnel		Diseño 2: Sistema dentro de la cámara del túnel	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
<b>Factibilidad</b>	0.30	4.00	1.20	3.00	0.90
<b>Económico</b>	0.20	3.00	0.60	3.00	0.60
<b>Movilidad</b>	0.18	3.00	0.54	2.00	0.36
<b>Fácil de usar</b>	0.15	2.00	0.3	4.00	0.60
<b>Durabilidad</b>	0.10	2.00	0.20	2.00	0.20
<b>Versatilidad</b>	0.07	1.00	0.07	4.00	0.28
		Total	2.91	Total	2.94

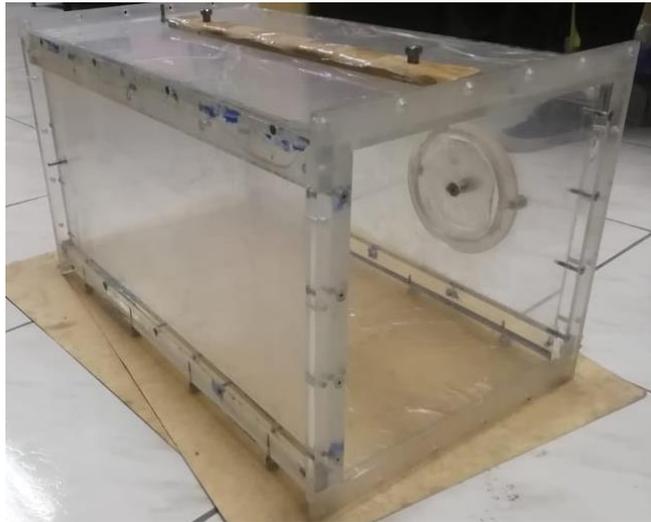
**Tabla 2.6 Matriz de decisión**

Como se puede observar en la matriz de decisión, la alternativa mejor puntuada es el diseño 2, siendo la mejor alternativa de diseño:

Sistema dentro de la cámara del túnel de viento accionado por servomotores y tornillos de potencia.

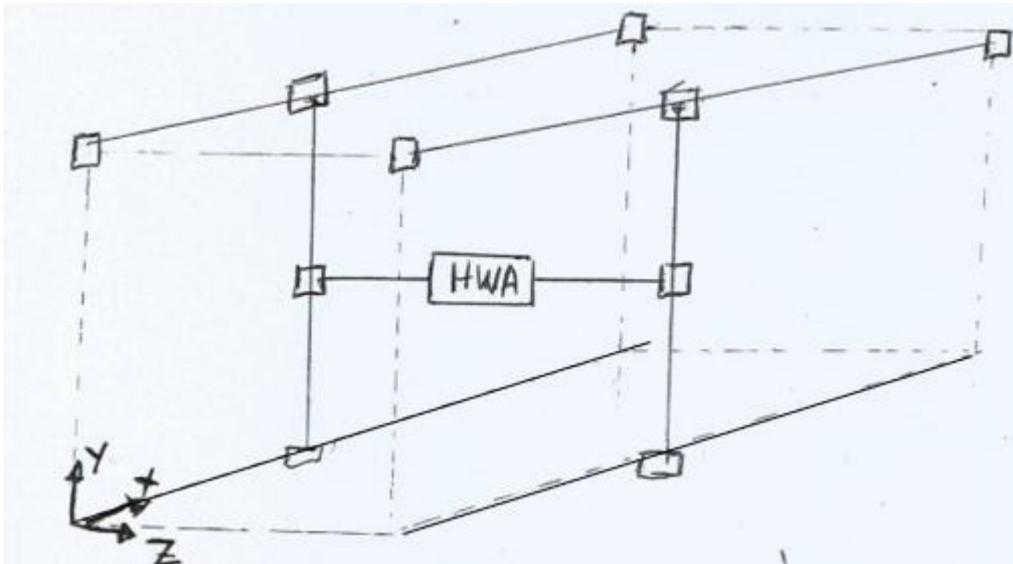
### **2.3 Diseño de forma**

El anemómetro de hilo caliente será ubicado dentro del túnel de viento, pero para el debido estudio de turbulencias el laboratorio de termofluidos de ESPOLE requiere que la sonda tenga la capacidad de moverse en los tres ejes horizontal, vertical, y profundidad dentro del túnel de viento. La figura 2.3 muestra la cámara del túnel de viento extraída, la base para el diseño del sistema de posicionamiento.



**Figura 2.3 Cámara extraída del túnel de viento. [Elaboración propia]**

Como se mostró en el proceso de selección de diseño, el diseño está conformado principalmente por tornillos de potencia y servomotores, debido a que el objetivo es colocar la sonda libremente en los tres ejes, se adoptó una configuración para los 3 ejes similar a la de una impresora 3D (x, y, z). La configuración se muestra dibujada a mano alzada (Figura 2.4). Cada eje se mueve usando una combinación de husillos (tornillos de potencia) y servomotores.



**Figura 2.4 Croquis a mano alzada de configuración para el sistema de posicionamiento [Elaboración propia]**

Para el movimiento en el eje X que es la dirección a la que corre el flujo de viento, se fijan los dos husillos a la tapa superior del túnel, que se accionan mediante motores sincronizados para mover el resto de la estructura de manera longitudinal.

El eje vertical Y, que se encuentra perpendicular a la dirección del flujo de viento, se mueve con una configuración similar al eje x, dos husillos accionados mediante motores sincronizados que al girar mueven la estructura donde está ubicada la sonda del anemómetro verticalmente.

Por último, el movimiento sobre el eje Z, que se mueve a lo ancho del túnel, usa el mismo mecanismo y misma configuración con la diferencia que sobre el motor de este husillo se encuentra instalada la sonda del anemómetro mediante un soporte.

## **2.4 Diseño detallado**

Se procedió a seleccionar los componentes para el sistema de posicionamiento, tomando en cuenta las alternativas tecnológicas que presenta el mercado, y realizando los cálculos necesarios para el dimensionamiento de estos, así como para las características de los servomotores. Se realizó el análisis de cada eje por separado

### **2.4.1 Eje X – Dirección del flujo**

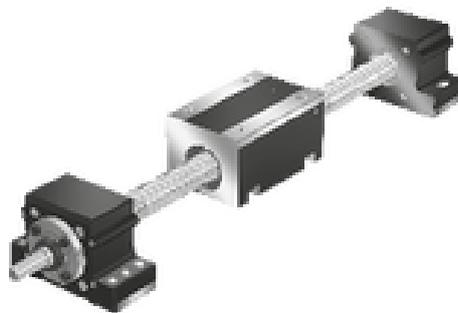
El primer eje que se diseñó es el superior, que se encarga del movimiento en la dirección X del flujo, puesto que es la base para los otros dos ejes.

Se utilizó el catálogo de tecnología de movimiento lineal de la empresa “Bosch Rexroth”, que se encarga de proyectos para la automatización industrial, con sedes en países latinoamericanos como Colombia y Perú, como referencia para analizar las opciones existentes en lo respecto a la tecnología lineal. Se analizaron los diferentes tipos de tecnología lineal para encontrar el óptimo a usar en el diseño.



**Figura 2.5 Diferentes alternativas que presenta el catálogo de movimiento lineal Bosch [Rexroth]**

Tomando en cuenta que la estructura se encuentra en el interior del túnel de viento, no es necesario usar rieles o patines de tipo cerrado que añaden costos innecesarios, por lo cual se buscaron opciones más sencillas que se acoplen a las necesidades y objetivos del diseño, y se optó por unidades de tipo abierto con accionamiento de husillos de bolas y tuercas de apoyo, que son ejes de transmisión listos para instalar que constan de un husillo de bolas con tuercas y bloques de apoyo, así como una carcasa de tuerca opcional.



**Figura 2.6 Eje de transmisión de tipo abierto, catalogo [Rexroth]**

Se necesitan dos ejes que funcionan sincronizadamente, para un solo eje los componentes son:

Tornillo de avance y tuercas	
Soportes de inicio y fin de husillo (anclado a la tapa superior del túnel de viento)	
Motor paso a paso	
Acoplamiento motor – husillo, con unión para el eje y	

**Tabla 2.7 Componentes para el eje X del sistema de posicionamiento**

#### **2.4.1.1 Tornillo de avance y motor paso a paso:**

También denominado husillo, el tornillo de avance es el principal componente para la transmisión de movimiento lineal de la estructura, sus características de ser resistente y rígido cumple con las necesidades del diseño, además de ser simples de usar e instalar. Existen dos tipos principales de husillos, los de fricción o trapecoidales y los de bolas. Por su facilidad de movimiento y bajo coeficiente de fricción se optó por los husillos de

bolas para el eje X, es importante que no exista mucha fricción debido a que estos ejes son los que soportan el resto de la estructura.



**Figura 2.7 Husillo de bolas [Balbino]**

La selección del tornillo de avance que se usó en el diseño fue de la mano con la selección del motor paso a paso, por lo que fue necesario primero calcular la resolución del motor requerida. Se usó la métrica comercial SFU para la selección de husillos, en el caso del eje X se empleó un husillo SFU de métrica 12.

Los tornillos de avance son generalmente de acero, por lo que se usó una densidad aproximada de 7850 kg /m<sup>3</sup> para el cálculo de los pesos, además la longitud a lo largo del eje de la cámara del túnel de viento es de 600 mm y tienen un diámetro aproximado de 10 mm para el eje X, se calculó un peso aproximado para empezar con el diseño y selección de motor:

$$Masa\ husillo = volumen * densidad = 0.6m * \pi * (0.01^2) * \frac{7850kg}{m^3} = 0.47\ kg \quad (2.1)$$

Para este eje, se obtuvo un peso aproximado de 0.47 kg para cada husillo, asumiendo, usando la longitud de 600 mm necesaria. Fue necesario aproximar el peso en conjunto de los tornillos de avance en los demás ejes debido a que el tornillo del eje X es la base de la estructura y tiene la tarea de sostener el peso de estos.

El diseño se planteó suponiendo que hay tres husillos de aproximadamente 500 mm y 300 mm de tamaño, con cinco motores paso a paso en total que pesan 1 kg en conjunto, tomando como referencia que los motores NEMA tienen un peso aproximado de 0.2 kg.

También se debe asumir el peso de los elementos de soporte de todo el sistema de posicionamiento, en especial los de anclaje para los tornillos de avance y los motores, que sumados se tiene un peso total del sistema de 3 kg aproximadamente, y como el diseño es simétrico, se estima que cada tornillo del eje X soporta 1.5kg de carga.

Una característica importante para analizar en los husillos es la resolución del movimiento, del cual depende la selección del paso del tornillo de potencia, la distancia longitudinal recorrida en una sola revolución. Se decidió una precisión de movimiento, de 0.1 mm por pulso, dato importante para el cálculo de la resolución del motor.

Masa aproximada de estructura		1.5 kg
Longitud Husillo		600 mm
Carrera husillo		750 mm
Diámetro medio husillo		12 mm
Avance husillo	L	8 mm
Coefficiente fricción husillo de bolas	$\mu$	0.25
Eficiencia husillo de bolas	n	0.45
Coefficiente de fricción precarga	$\mu_0$	0.3
Precisión		0.1 mm
Angulo (inclinación)		0°

**Tabla 2.8 Datos husillo eje X**

Usando estos datos se calcularon parámetros para la selección del motor.

(2.2)

$$\text{Resolución } \theta = 360^\circ * \frac{\Delta L}{L} = 360^\circ * \frac{0.1}{8} = 4.5^\circ$$

Donde:

$\Delta L$  es la precisión de movimiento deseada

L el avance del husillo

Se procedió a calcular la velocidad de operación necesaria del motor en rpm, para lo cual primero fue necesario obtener los pulsos por vuelta, pulsos para el husillo, tiempo de aceleración y frecuencia de operación del motor

Numero de pulsos del motor por vuelta:

(2.3)

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{vuelta}} = \frac{360^\circ}{\theta} = \frac{360^\circ}{4.5^\circ} = 80 \text{ pulsos/vuelta}$$

Pulsos necesarios para la carrera del husillo seleccionado:

(2.4)

$$\text{Pulsos} = \frac{\text{Carrera husillo}}{\text{Avance}} * \frac{360^\circ}{\theta}$$
$$\frac{750 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} * \frac{360^\circ}{4.5^\circ} = 7500 \text{ pulsos}$$

Tiempo de aceleración y desaceleración (se lo define como el 25% del tiempo de posicionamiento del motor el cual es de alrededor 30 segundos para motores paso a paso):

(2.5)

$$t_1 = 30 \text{ s} * 0.25 = 7.5 \text{ s}$$

Frecuencia de operación:

(2.6)

$$f = \frac{\text{Pulsos}}{t_p - t_1} = \frac{7500}{30 - 7.5} = 333.34 \text{ Hz}$$

Donde:

t1 tiempo de aceleración y tp tiempo de posicionamiento (30s)

Velocidad de operación:

(2.7)

$$N = \frac{\theta}{360^\circ} * f * 60$$
$$\frac{4.5^\circ}{360^\circ} * 333.34 * 60 = 249 \text{ rpm}$$

Con la velocidad de operación se obtuvo además el desplazamiento horizontal por unidad de tiempo a lo largo del eje x:

(2.8)

$$V = N * \frac{L}{60} = 249 * 0,00860 = 0,034 \frac{m}{s} = 0.3 \frac{mm}{s}$$

Finalmente se obtuvo el torque requerido para la selección del motor, calculando el par de carga y el par de aceleración:

(2.9)

$$F = m * g (\sin \lambda + \mu \cos \lambda)$$
$$1.5 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} (\sin 0^\circ + 0.25 \cos 0^\circ) = 3.67N$$

Par de carga:

(2.10)

$$T_{carga} = \frac{F * L}{2\pi * n} + \frac{\mu_0 * \frac{F}{3} * L}{2\pi}$$
$$\frac{3.67N * 0.008m}{2\pi * 0.45} + \frac{0.3 * 1.23N * 0.008m}{2\pi} = 0.0107 \text{ N} * m$$

Par de aceleración:

(2.11)

$$T_{acel} = (J_0 + J_{total}) * \frac{\pi * \theta}{180^\circ} * \frac{f}{t1}$$

Donde:

$J_0 = \text{inercia de rotacion del motor}$

$J_{total} = \text{Inercia total (inercia del husillo e inercia de la carga)}$

Inercia del husillo de bolas:

(2.12)

$$J_{husillo} = \frac{\pi}{32} * \rho * \text{Longitud husillo} * \text{diametro medio}^4$$

$$\frac{\pi}{32} * 7900 * 600 * 0,012^4 = 1.28 * 10^{-5} kg * m^2$$

Inercia de la carga:

(2.13)

$$J_{carga} = m * \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2$$

$$1.5 * \left(\frac{0.008}{2\pi}\right)^2 = 2.42 * 10^{-6} kg * m^2$$

Entonces la inercia total:

(2.14)

$$J_{total} = J_{husillo} + J_{carga} = 1.52 * 10^{-5} kg m^2$$

Reemplazando resultados en la ecuación (2.11) y resolviendo:

(2.15)

$$T_{acel} = (J_0 + J_{total}) * \frac{f}{t1} * \frac{\theta * \pi}{180^\circ} = 3.44 J_0 + 5.33 * 10^{-5} Nm$$

Sumando el par de aceleración y el par de carga de obtiene finalmente el torque total que necesita el motor:

(2.16)

$$T_{total} = T_{carga} + T_{acel} = 6.97 J_0 + 0.22 N * m$$

Además, la potencia del motor requerida estimada:

(2.17)

$$Potencia = Fuerza * \frac{carrera\ del\ husillo}{tp}$$

$$3.68N * \frac{0.750m}{30s} = 0.92W$$

Se seleccionó un motor NEMA, cuyas siglas provienen de “National Electrical Manufacturers Association”, ya que son el tipo de motor paso a paso más usado en sistemas de posicionamiento, como en maquinarias CNC e impresoras 3D. Los motores NEMA varían en dimensiones de motor, por lo que se enumeran según su medida en pulgadas, siendo el NEMA 13 por ejemplo un motor de 1.3 x 1.3 pulgadas.

Un modelo estándar y típico en este tipo de sistemas de movimiento es el motor NEMA 17, cuyas especificaciones se muestran en la figura 2.8 que se compararon con los requerimientos obtenidos para analizar si cumple con las necesidades del diseño

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	4
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1.2
Ambient temperature (°C)	-20~+50	Resistance Per Phase (±10%Ω)	3.3 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase (±20% mH)	2.8
Insulation Resistance	100MΩ, Min (500VDC)	Holding Torque (Kg.cm)	3.17
Insulation Class	Class B	Detent Torque (g.cm)	200
Max. radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	68
Max. axial force (N)	10	Weight (Kg)	0.365

**Figura 2.8 Especificaciones motor paso a paso NEMA17 [Technical conditions]**

Potencia del motor NEMA17:

(2.17)

$$Potencia = Voltaje * Corriente = 4V * 1.2A = 4.2W$$

Nótese que el step angle del NEMA17 es de  $1.8^\circ$ , mientras que el valor requerido es de  $4.5^\circ$  lo que significa que el NEMA17 cuenta con una mayor precisión, es decir tiene mayor precisión, la máxima fuerza axial es 10 N superando por casi el doble de lo que se necesita.

Usando los datos de voltaje y corriente en sus especificaciones eléctricas se observa que la potencia máxima es de 4.2W, y el mínimo requerido calculado es de 0.92W para mover el eje X por lo que se concluye que satisface todas las necesidades, además el “holding torque” o torque del motor es de 3,18 kg\*cm, que es igual a 0.318 N\*m, siendo mayor al par que se requiere de 0.22Nm.

Además, fue necesario incluir una guía lineal, la cual es conformada por un conjunto de patín y riel con el fin de evitar un exceso de desplazamiento de la estructura, debido al flujo del viento de los experimentos.

## **2.4.2 Eje Y – vertical**

El eje vertical, o eje Y se diseñó de manera similar al eje X, con un par de tornillos de avance y motores NEMA, pero con un funcionamiento distinto, siendo el motor el que se desplace a través de los tornillos los cuales permanecen inmóviles. La carga que deben sostener estos ejes es menor que en el Eje X, por lo cual los tornillos son de métrica inferior.

Componentes del para el sistema en el eje Y:

- motor non captive paso a paso
- Husillo trapezoidal
- placa fin de husillo
- anclaje para el eje z

### **2.4.2.1 Tornillo de avance y motor paso a paso**

Como se mencionó, en el eje Y los motores se desplazarán a lo largo del tornillo de avance, por lo cual se seleccionaron husillos trapezoidales, ideales para el uso con motores non captive.

La cámara del túnel de viento tiene una altura de 300mm, de los cuales se restan 20 mm que requieren los demás componentes del Eje X y los soportes, por lo tanto, la longitud del husillo trapezoidal es de 280mm

En este caso, se seleccionan conjuntamente motor y husillo. Siendo la carga menos demandante en este eje comparado al eje X, se optó por seguir con un modelo de motor NEMA17, pero en este caso, del tipo non-captive ya que cumple con los requerimientos. El peso que requiere soportar este eje es mucho menor al del eje X por lo cual el grosor de los husillos debe ser menor, con esto en mente la métrica seleccionada fue de

Sin embargo, las especificaciones superan en gran medida la demanda necesitada, pero los motores de menor dimensión como el NEMA14 son difíciles de encontrar para métricas superiores a 5 mm

Es importante que el husillo se mantenga estático, por lo cual fue necesario el diseño de placas roscadas para el acoplamiento así impedir su rotación, también se diseñaron los soportes necesarios para los motores, que se unen al eje Z

### **2.4.3 Eje Z – Lateral**

Se diseñó el eje Z de igual manera al eje Y , usando un motor paso a paso non captive que se desplaza horizontalmente a través del husillo trapezoidal.

Componentes del para el sistema en el eje Z:

- Husillo trapezoidal
- Motor non captive paso a paso
- Placas de soporte de husillo
- Anclaje motor-soporte elemento sensor
- Soporte para el elemento sensor

#### **2.4.3.1 Tornillo de avance y motor paso a paso**

Con el fin de mantener la simetría y facilitar el diseño, se usó el mismo motor NEMA 17, y husillo trapezoidal SFU 8 sin necesidad de realizar los mismos cálculos, ya que es el eje que menor carga necesita soportar y por ende al cumplirse las necesidades del eje Y también se cumplen las necesidades del eje Z que tiene las mismas características. El par de torque requerido es menor debido a la posición horizontal en que se encuentra el eje,

La cámara del túnel de viento tiene un ancho de 300mm, de los cuales se restan 20 mm que requieren los demás componentes del Eje Y con el espacio entre los motores y la pared. por lo tanto, la longitud del husillo trapezoidal es de 280mm, al igual que en el eje Y. De la misma manera se usaron las placas roscadas diseñadas para soportar los extremos del husillo y que se mantenga fijo.

Finalmente se diseñó el soporte que va acoplado al motor de este eje donde va ubicado el elemento sensor del anemómetro.

#### **2.4.4 Sistema de control del ensamblaje**

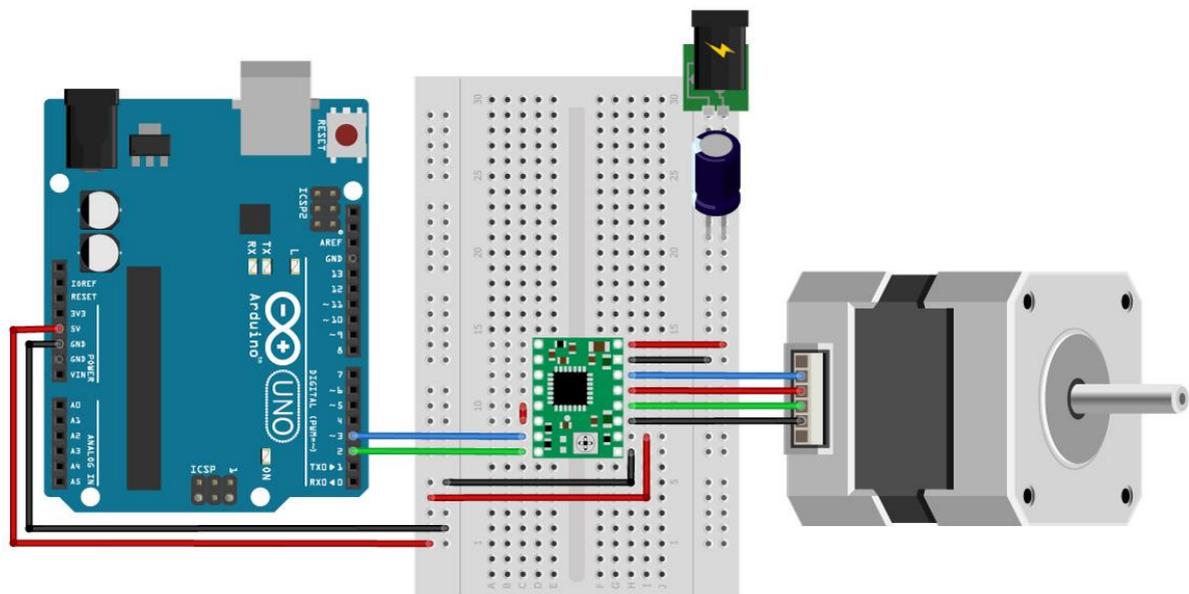
El sistema diseñado cuenta con un total de 5 motores NEMA 17, de los cuales los 2 del eje x, y los 2 del eje Y se tienen que mover simultáneamente para realizar la operación de movimiento correctamente.

Para lo cual, se diseñó un sistema basado en Arduino y el driver controlador para stepper motors A4988. El controlador de motor paso a paso A4988 tiene una capacidad de salida de hasta 35 V y  $\pm 2$  A y le permite controlar un motor paso a paso bipolar con una corriente de salida de hasta 2 A por bobina como NEMA 17.

El controlador tiene un traductor incorporado para una fácil operación. Esto reduce la cantidad de pines de control a solo 2, uno para controlar los pasos y otro para controlar la dirección de giro.

El controlador ofrece 5 resoluciones de paso diferentes, a saber. paso completo, medio paso, cuarto de paso, octavo paso y decimosexto paso.

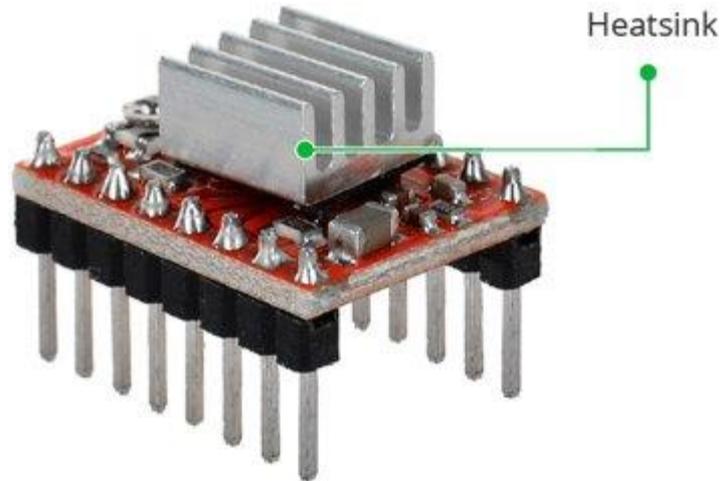
Recordando que el ángulo de paso del motor es de  $1.8^\circ$ , esto quiere decir que el motor cuenta con 100 pasos en  $180^\circ$ , o 200 pasos para una revolución completa.



**Figura 2.9 Esquema básico del controlador de un stepper motor [Marker]**

Se debe tomar en cuenta que el sistema está diseñado para ubicar una posición inicial usando el código Arduino, más no para realizar movimientos constantes y repetitivos, esto debido a la generación de calor.

Si se requieren generar movimientos constantes una recomendación es usar disipadores de calor. La disipación de energía excesiva del controlador IC A4988 da como resultado un aumento de la temperatura que puede ir más allá de la capacidad del IC, probablemente dañándose a sí mismo.



**Figura 2.10 Disipadores de calor para controlador A4988 [Ryvelectronics]**

Se generó el código Arduino tomando en cuenta una posición inicial, y que cada paso del motor, como fue calculado anteriormente, tiene una precisión de 0.1 mm

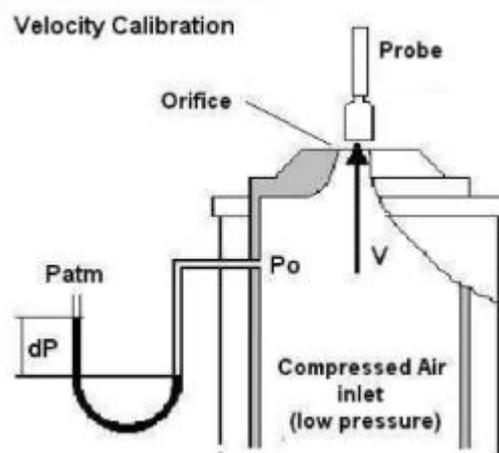
## **2.5 Sistema de calibración**

Todos los sistemas HWA deben calibrarse para que funcionen correctamente a fin de establecer una relación validada entre el voltaje de salida de CTA y la velocidad del flujo. Siguiendo a Bruun (1995), existen muchas técnicas diferentes para realizar una calibración adecuada. Se pueden encontrar muchas otras propuestas para calibrar sondas de película caliente / alambre en una extensa literatura sobre el tema, como en Lekakis (1996), Lomas (1986), Menut (1998), Möller (2000) y Persen y Sætran (1984).

Se compararon dos procedimientos de calibración de sondas de hilo caliente, uno propuesto por Eguti et al. (2002), el cual se hace utilizando un flujo de aire comprimido, y se realiza exponiendo la sonda a un conjunto de velocidades conocidas y luego registrando la salida de voltaje y otro método diseñando un flujo laminar de tubería. Un ajuste de curva a través de estos puntos representa la función de

transferencia o la curva de calibración y es válido para cada sonda específica. La figura muestra un diagrama de este procedimiento para flujos de gas incompresibles.

En la práctica, las sondas delicadas utilizadas en la investigación de la mecánica de fluidos deben calibrarse diariamente antes de su utilización. En muchos casos, la literatura relata varias dificultades de calibración de estos dispositivos y la pérdida de calibración se cita como el "talón de Aquiles" de la anemometría de hilo caliente, ver, por ejemplo, Perry (1982), Eguti et al. (2002) y Vieira (2000). Esta afirmación es compartida por varios investigadores de mecánica de fluidos, especialmente para flujos de agua y gases no limpios.



**Figura 2.11 Calibración usando aire comprimido [Eguti 2004]**

Se emplea un chorro de aire libre asimétrico que se descarga en un medio infinito (atmósfera) donde su velocidad podría obtenerse fácilmente mediante la ecuación de Bernoulli para flujos incompresibles, que se muestra en la ecuación. (2.18), donde ( $\rho$ ) es la densidad del aire. La temperatura debe controlarse cuidadosamente para garantizar buenos resultados y bajas variaciones de la señal adquirida

(2.18)

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P_{atm})}$$

La presión diferencial (dP) igual a (P0 – Patm) debe medirse con precisión con un manómetro diferencial. Se recomienda el uso de un manómetro de Betz o un micro manómetro electrónico equivalente capaz de medir variaciones de aproximadamente 1 Pa.

Esta calibración experimental de la velocidad del aire está bien documentada en Bruun et al. (1988). La curva de ajuste elegida para esta calibración se denomina ley de potencia o ley de potencia de exponente simple, según Bruun et al. (1988) es la mejor opción para casi todas las calibraciones HWA. Para obtener los coeficientes A, B y n de la Ecuación de “Kings Law” o ley de King: Es necesario un software de computadora que realice la gráfica.

(2.19)

$$E^2 = A + BU^N$$

La calibración de las sondas desarrolladas se ha realizado mediante un dispositivo tradicional de calibración de chorro libre. Varios proveedores comercializan un aparato de calibración de chorro libre, en este proyecto se ha seleccionado el equipo de calibración para hilos calientes de la empresa Dantec Dynamics.

El calibrador de hilo caliente Dantec Dynamics es un dispositivo simple pero preciso para la calibración de 2 puntos de la mayoría de las sondas de hilo caliente utilizadas con anemómetros de temperatura constante. El calibrador produce un chorro libre, donde se coloca la sonda durante la calibración. Requiere un suministro de aire presurizado normal y es capaz de configurar velocidades desde 0,5m/s a 60 m/s, se recuerda que el laboratorio trabaja con velocidades de hasta 40 m/s por lo cual cumple las necesidades.



**Figura 2.12 Calibrador de hilo caliente Dantec [Dantec]**

El Calibrador produce un chorro libre donde se coloca la sonda durante la calibración. Requiere un suministro de aire presurizado normal. Dos puntos fijos de velocidad cercanos a los límites de velocidad mínima y máxima, respectivamente, se establecen con alta precisión por medio de un regulador de presión interno.

La temperatura en la cámara se mide mediante un termistor de alto valor óhmico al que se accede a través de un conector exterior. Un manillar permite cambiar entre los dos puntos de ajuste utilizados en una calibración de dos puntos. Una válvula de aguja permite ajustes de velocidad individuales utilizados para calibraciones multipunto. Todas las piezas y componentes están contenidos en una carcasa de metal con la boquilla en la parte superior y un accesorio para aire comprimido en la parte inferior. El calibrador requiere un ohmímetro y un barómetro para medir la temperatura y la presión barométrica, respectivamente.

Para poder manejar todas las herramientas disponibles para la calibración es preferible, utilizar un software diseñado para trabajar en un laboratorio, esto es Labview. LabVIEW

es un entorno de programación gráfica; es el más utilizado por científicos e ingenieros de todo el mundo y cuenta con una edición “Community edition” totalmente gratis.

## 2.6 Diseño de sistema de calibración

Se planteó un diseño basado en el método de flujo laminar dentro de una tubería. Debido a que no se cuenta con datos acerca de la probeta/elemento sensor ni el sistema de adquisición, se asumió una probeta de platino de diámetro  $5\mu\text{m}$  y un DAQ de frecuencia 1kHz. Temperatura del laboratorio estimada de  $22\text{C}^\circ$ .

Partes del diseño:

- Compresor de aire 8 bar
- Secador
- Filtro de aire
- Válvula de alivio
- Unidad de control de flujo masico MFC

El compresor puede cargar el aire hasta 8 bar con un caudal máximo de  $4,85\text{ m}^3/\text{min}$  ( $0,08\text{ m}^3/\text{s}$ ). Se utilizaba para comprimir aire hasta 6 bar a través del secador y el filtro. Luego, la presión del aire comprimido se estableció en 4,5 bar por medio de una válvula de alivio para una operación segura de la unidad MFC de control de flujo másico. La unidad MFC puede controlar y medir las tasas de flujo de aire entre 0 y  $180\text{ l}/\text{min}$ . Se usó un acondicionador de flujo compuesto por un panel, una malla gruesa y una fina (Fig. 2a) para eliminar la falta de uniformidad del flujo en la entrada de la tubería.

La tubería de policloruro de vinilo (PVC) lisa y rígida tiene un diámetro interior de 26,6 mm. La longitud de entrada mínima requerida para un flujo de tubería laminar completamente desarrollado a un máximo de  $Re = 1590$  se encontró en  $x = 3,4$  m por medio de la siguiente ecuación :

(2.19)

$$L = 0.08DRe + 0.7D$$

donde  $L$  es longitud de entrada de la tubería,  $D$  diámetro interior de la tubería y  $Re$  es el número de Reynolds de flujo obtenido con la expresión:

(2.20)

$$Re = UD/\nu$$

Donde  $U$  es la velocidad media,  $\nu$  es la viscosidad cinemática). La estación de medición que es donde se encuentra el elemento sensor del anemómetro se ubicó a una distancia  $x_m$  a 3,9 m (146 veces el Diámetro) proporcionando un flujo completamente desarrollado para la prueba. Se utilizó un soporte de cilindro para sostener la sonda de hilo caliente a través de la sección transversal de la tubería.

El principio de funcionamiento del método se basa sobre la distribución de la velocidad del flujo laminar completamente desarrollado en una tubería tal que la velocidad máxima en el centro de la tubería es el doble de la velocidad media.

La sonda de hilo caliente está ubicada en el centro de la tubería. Se calibra con dos puntos un mínimo y un máximo: el caudal mínimo permisible producido depende de la unidad MFC, siendo de 4.9 l/min ( $8,17 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s) con una velocidad media correspondiente de 1,47 m/s. Por lo tanto, la velocidad de calibración en el centro de la tubería es de 2,9 m/s, siendo el doble de la velocidad media. Para el caudal máximo de 896,7 l/min ( $1.49 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s) correspondiente a la velocidad media de 8,9 m/s, con una velocidad de calibración de 53.7 m/s en el centro de la tubería.

Los datos obtenidos por el anemómetro en los 2 puntos son analizados en el DAQ y comparados con los valores teóricos para generar una curva de calibración.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Sistema de posicionamiento.

Componentes necesarios para el sistema del Eje X – en la dirección del flujo que va instalado en la tapa de la cámara de túnel:

- 2 stepper motors NEMA 17
- Soportes al inicio y final de cada husillo, de 10 mm diámetro.
- Soportes para los dos motores
- 2 tornillos de avance (de bolas) de métrica SFU12, con paso de 4mm, longitud 580mm
- 2 cajas de tuerca para husillo de bolas SFU1204
- Soportes de tornillo de avance BK10, al inicio y al final de cada husillo.

Componentes necesarios para el sistema del Eje Y – en la dirección vertical que va instalado sobre los soportes incluidos en el Eje X, y que permite el movimiento del Eje Z:

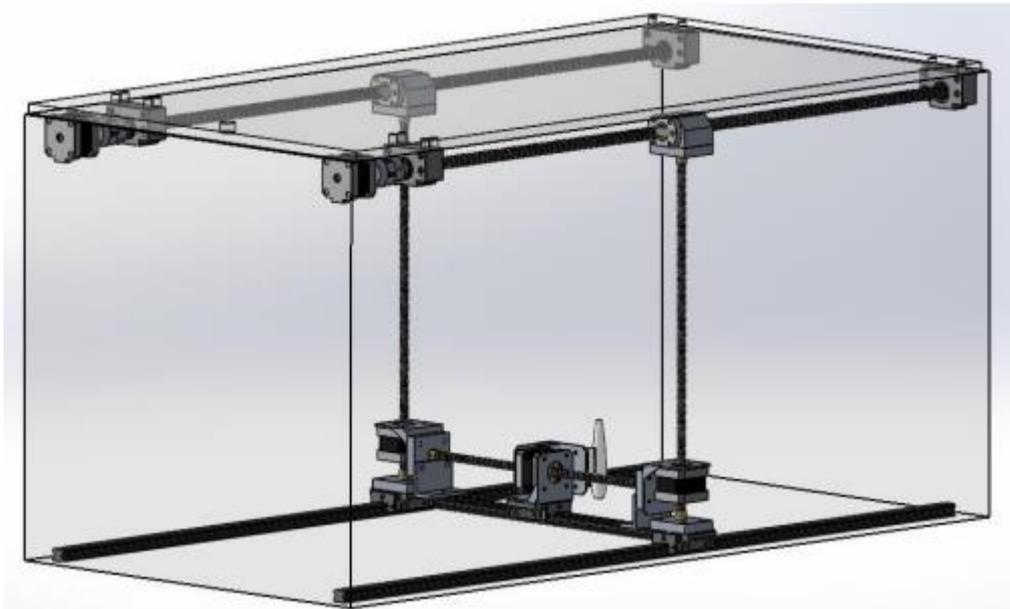
- 2 stepper motors NEMA 17, non-captive.
- 2 soportes NEMA17 (plano en anexos)
- Dos placas roscadas para el anclaje con el ejeX, material aluminio (planos en Anexos).
- Dos husillos trapezoidales con métrica de SFU8, con paso de 4mm, longitud 280mm

Componentes necesarios para el sistema del Eje Z – en la dirección vertical que va instalado sobre los soportes incluidos en el Eje Y, y que permite el movimiento horizontal del elemento sensor del anemómetro:

- 1 Stepper motor non-captive NEMA17
- 1 husillo trapezoidal con métrica de SFU8, con paso de 4mm, longitud 280mm
- Soporte para el elemento sensor

Además, en la parte inferior se deben incluir:

- 2 patines HIWIN(HGW15CC)
- 2 guías para le patín HIWIN(HGW15CC)



**Figura 3.1 Sistema de posicionamiento para anemómetro hilo caliente, diseño final**  
**[Elaboración propia]**

### **3.2 Dimensiones y portabilidad**

Se calculó el peso y volumen de todos los elementos y materiales especificados, para conocer qué tan portable (fácil de mover) es el sistema., el peso total es de 5.93 kg

<b>EJE LONGITUDINAL X</b>						
Componente	Descripción	Cantidad	Volumen/Unidad [m3]	Material	Densidad [kg/m3]	Masa[kg]
Husillo de bolas	SFU1204	2	0,00009048	Acero inoxidable	7980,00	1,44
Tuerca bolas	SFU1204-3	2	0,00001920	Acero	7850,00	0,30
Soporte y fin husillo	BK10 + BF10	2	0,00012870	Fundición Hierro	7800,00	2,01
Acoplamiento	CM25C	2	0,00000601	Aluminio	2700,00	0,03
Motor paso a paso	NEMA17	2	0,00007056			0,44
<b>EJE VERTICAL Z</b>						
Componente	Descripción	Cantidad	Volumen/Unidad [m3]	Material	Densidad [kg/m3]	Masa[kg]
Anclaje Eje X (placa)		2	0,00002000	Aluminio	2700,00	0,11
Caja de Tuerca Eje X	SFU1204	2	0,00004586	Aluminio	2700,00	0,25
Placa roscada inferior		2	0,00002000	Aluminio	2700,00	0,11
Tuercas		4		Acero	7850,00	0,16
Soporte motor	NEMA Holder	2	0,00001	Aluminio	2700,00	0,05
Husillo trapezoidal		2	0,00002011	Acero	7850,00	0,32
Motor NC	NEMA17	2	0,00007056			0,4
<b>EJE LATERAL Y</b>						
Componente	Descripción	Cantidad	Volumen/Unidad [m3]	Material	Densidad [kg/m3]	Masa[kg]
Placa roscada		2	0,00002000	Aluminio	2700,00	0,11
Tuercas		2		Acero	7850,00	0,08
Soporte motor	NEMA Holder	2	0,00001	Aluminio	2700,00	0,05
Husillo trapezoidal		1	0,00002011	Acero	7850,00	0,16
Motor NC	NEMA17	1				0,2
Patín	HGW15CC	1	0,00005508	Acero		0,17
Rail guía	HIWIN HGR15	1	0,00007875	Acero		0,51
Ángulos roscados		2	0,00001200	Aluminio	7851,00	0,09
Soporte sonda	Impresión 3D	1	0,00001977	ABS/PLA	1140,00	0,02
<b>TOTAL</b>						<b>5,93</b>

**Tabla 3.1 Peso total estructura**

### 3.3 Análisis estático

Se realizó un análisis estático, principalmente para verificar si la sonda se queda en su posición en el eje vertical Y. La siguiente expresión relaciona la fricción de autorretención con los datos del tornillo de avance:

$$f > \frac{L * \cos\alpha}{\pi * dm} \quad (3.1)$$

Donde L es el avance, alfa el ángulo de la rosca, y dm, el diámetro medio. Es necesario verificar esta relación para todos los ejes del sistema. Cabe mencionar que se asume un ángulo de 0 grados para realizar el análisis para el peor de los casos, haciendo máximo el término del coseno.

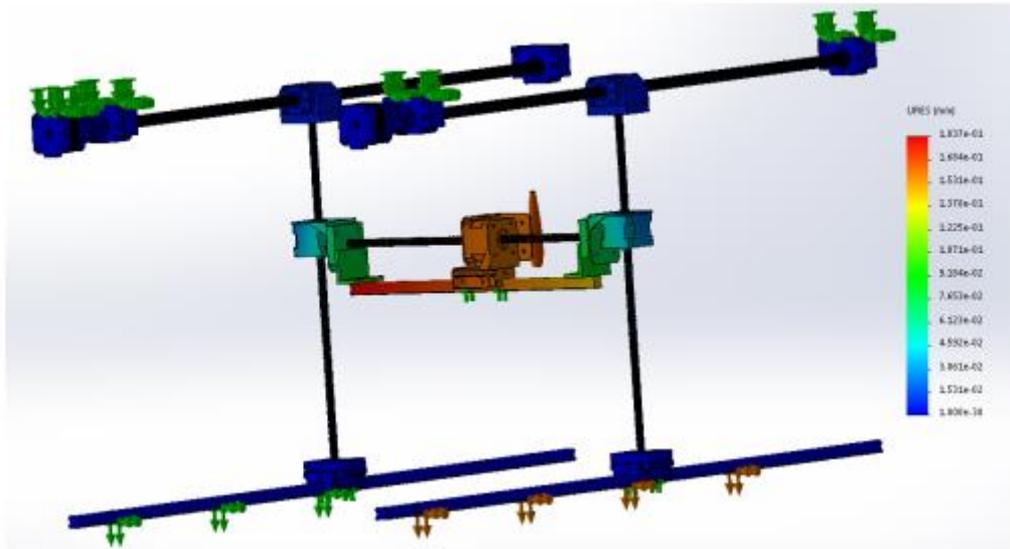


Figura 3.2 Analisis estatico, escala de deformacion 10 [Elaboración propia]

Para el eje X, el coeficiente de fricción del tornillo de avance (laminado) y sus respectivas tuercas (acero) es de 0.25

(3.2)

$$f > \frac{L * \cos \alpha}{\pi * dm} = \frac{0.008 * \cos 0}{\pi * 0.011} = 0.213$$

$$0.25 > 0.2112$$

Para el eje Y, el coeficiente de fricción del tornillo de avance (laminado) y sus respectivas tuercas (acero) es de 0.23.

(3.3)

$$f > \frac{L * \cos \alpha}{\pi * dm} = \frac{0.004 * \cos 0}{\pi * 0.007} = 0.161$$

$$0.22 > 0.161$$

Para el eje Z, el coeficiente de fricción del tornillo de avance (laminado) y sus respectivas tuercas (acero) es de 0.23.

(3.4)

$$f > \frac{L * \cos \alpha}{\pi * dm} = \frac{0.004 * \cos 0}{\pi * 0.007} = 0.161$$

$$0.22 > 0.161$$

### 3.4 Análisis de flujo

Se realizó un análisis de la trayectoria y de la velocidad del flujo a una velocidad promedio de 50 m/s (10 m/s mayor al máximo usado en los experimentos del laboratorio) para comprobar que el sistema no perturba o interviene en el dato adquirido por el elemento sensor del anemómetro. Como se puede observar en las figuras el color de las flechas es el indicador para comprobar la perturbación, si disminuye la velocidad o si varía la trayectoria.

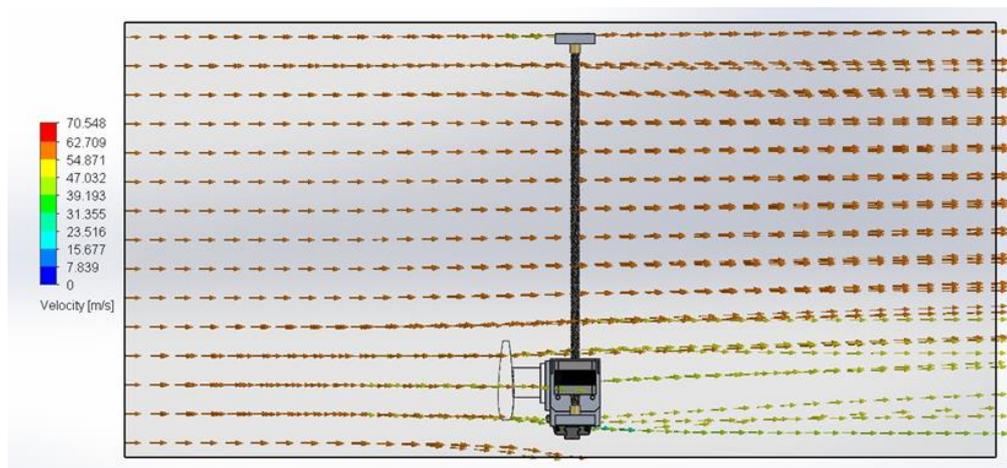


Figura 3.3 Análisis de Velocidad del flujo [Elaboración propia]

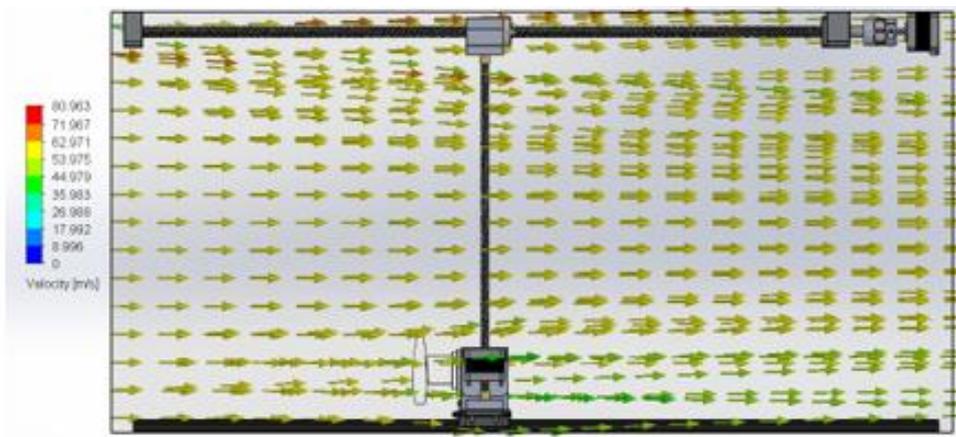


Figura 3.4 Analisis de trayectoria del flujo de viento [Elaboración propia]

### 3.5 Sistema de control

Se adjunta el respectivo código Arduino en la sección de Anexos. Los componentes electrónicos para el sistema de control de movimiento son los siguientes:

- 1 Arduino UNO
- 5 controladores A4988
- 1 Power supply de 12v 6<sup>a</sup>

A continuación, se muestra el esquema final del circuito para el control de los motores paso a paso por medio de Arduino y controladores A4988.

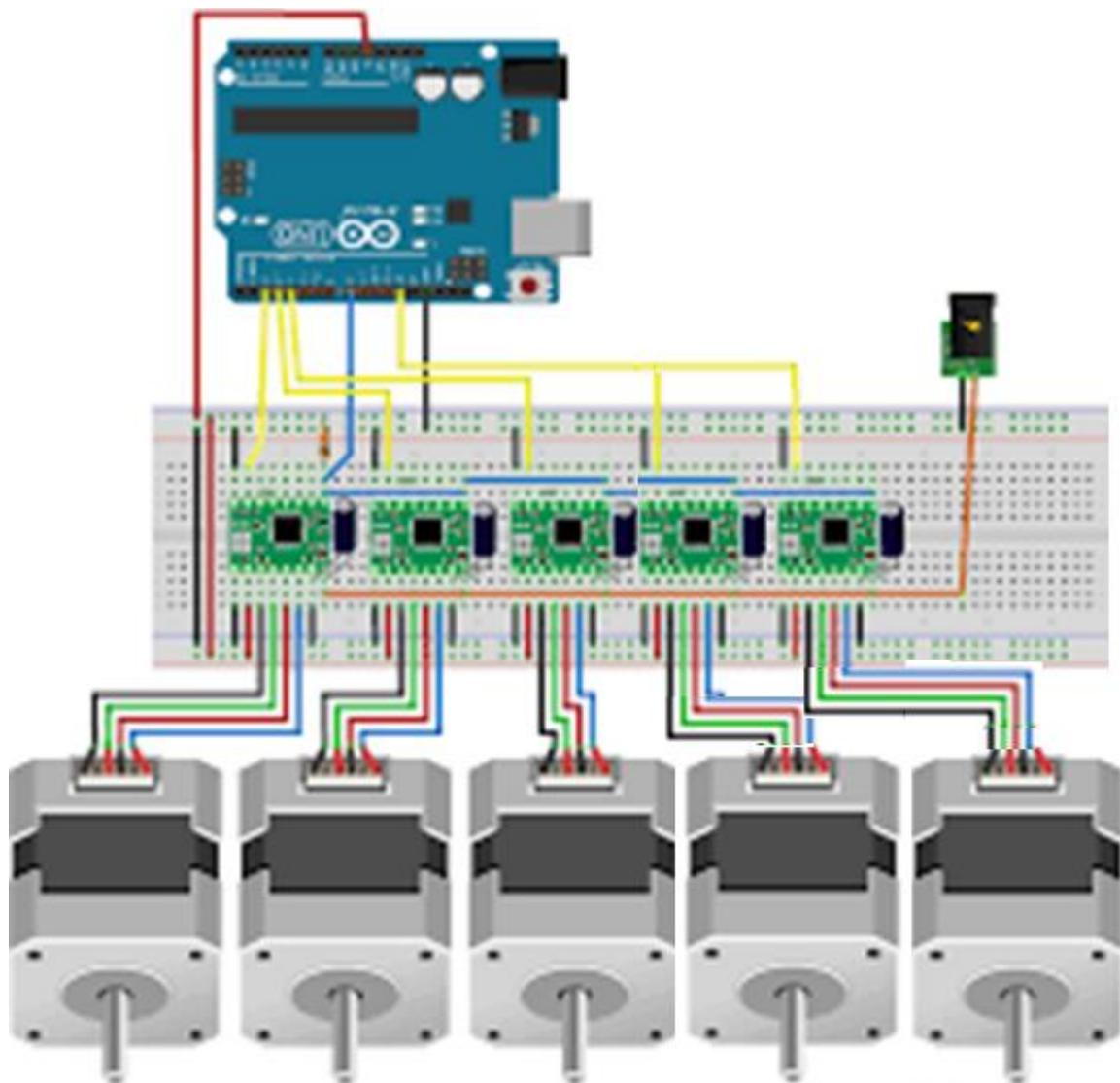
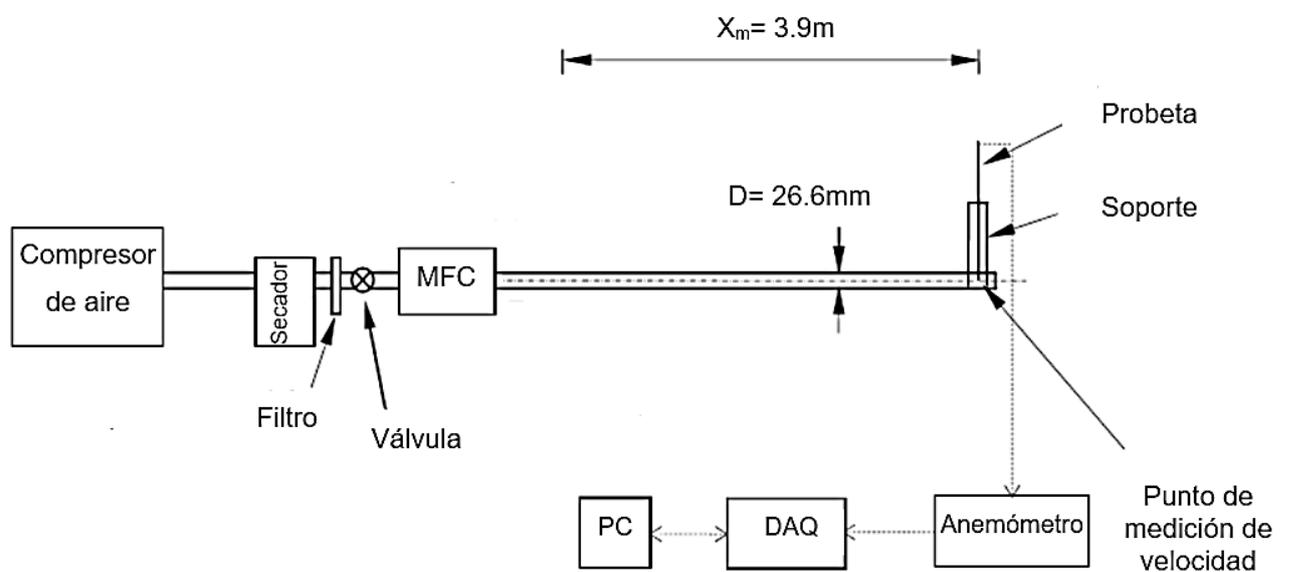


Figura 3.5 Esquema final del circuito para el control de los motores paso a paso por medio de Arduino y controladores A4988. [Elaboración propia]

El sistema es controlado mediante el código Arduino conectado por USB, con una precisión de 0.1 mm. El usuario debe cambiar el código para cuanta distancia desea mover, primero para el Eje X primero, luego para el Eje Y, y finalmente para el EjeZ. Es posible diseñar un Software con una interfaz sencilla donde permita al usuario escribir una posición deseada como input y que el sistema actualice el código Arduino automáticamente para moverlo a la posición deseada, pero para el alcance del presente proyecto no se realizó.

### 3.6 Sistema de calibración

Para el diseño planteado se presentan los componentes específicos:



**Figura 3.6 Diseño sistema de calibración por flujo laminar [Elaboración propia]**

- Compresor de aire 8 bar: Compresor de tornillo
- Secador
- Filtro de aire
- Válvula de alivio
- Unidad de control de flujo masico MFC

<i>Componente</i>	<i>Precio aproximado</i>
<i>Compresor De Tornillo 7.5 Hp Y Secador Fiac</i>	\$ 6950
<i>Filtro purificador de aire comprimido NANPU 1/4" NPT</i>	\$ 50
<i>Válvula de alivio</i>	\$ 10
<i>Controlador de flujo masico MFC marca Cole-Palmer</i>	\$ 1200
<i>Tuberías PVC y adaptadores</i>	\$ 50
<i>Total</i>	\$ 8260

**Tabla 3.2 Componentes sistema de calibración diseñado**

Calibrador de hilo caliente Dantec 53H10

<i>Componente</i>	<i>Precio</i>
<i>Calibrador Dantec</i>	\$ 10754
<i>Purificador de aire Dantec</i>	\$ 2435
<i>Total</i>	\$ 13180

**Tabla 3.3 Componentes calibrador Dantec 54H10**

Comparación:

El calibrador Dantec 54H10 ocupa menos espacio que el calibrador diseñado, siendo además de una mejor calidad pese a su precio muy elevado, la cámara del calibrador tiene enderezadores de flujo, silenciadores y redes que garantizan una baja turbulencia en la salida de la boquilla. El calibrador diseñado además depende aún tanto del DAQ como el elemento sensor del anemómetro, mientras que el calibrador Dantec tiene un uso más universal, pese a que su manual recomienda usar probetas de su misma marca. Aun así, el calibrador diseñado es una solución económica viable para su uso en el laboratorio.

### 3.7 Análisis de costos sistema de posicionamiento

#### 3.7.1 Costos de materiales y componentes

Los costos de los materiales y componentes se muestran en la siguiente tabla:

**EJE  
VERTICAL x**

Componente	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total	Precio Total \$
Husillo de bolas	SFU1204	2	34,50	69,00	69,00
Tuercas bolas	SFU1204-3	2	28	56,00	56,00
Soporte y fin husillo	BK10 + BF10	2	14,87	29,74	29,74
Acoplamiento	CM25C	2	4,95	9,90	8,51
Caja de Tuerca	SFU1204	2	17,85	35,70	35,70
Motor paso a paso	NEMA-17	2	14	28,00	24,08
Placa roscada		2	17,60	35,20	35,20
Patín	CNW15CA	2	20,00	40,00	40,00
Rail guía	CNR15R	2	26,90	53,80	53,80

**EJE  
VERTICAL Y**

Componente	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total	Precio Total \$
Placa roscada		2	17,90	35,80	35,80
Soporte motor	NEMA Holder	2	21,20	42,40	42,40
Motor NC + Husillo	NC17HS3001-400T84	2	40,00	\$ 80,00	68,80

**EJE LATERAL  
Z**

Componente	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total	Precio Total \$
Placa roscada		2	17,60	35,20	35,20
Soporte motor	NEMA Holder	2	21,20	42,40	42,40
Motor NC + Husillo	NC17HS3001-400T84	1	40,00	40,00	34,40
Patín	CNW15CA	1	20,00	20,00	20,00
Rail guía	CNR15R	1	13,70	13,70	13,70
Ángulos roscados		2	15,80	31,60	31,60

**ELECTRONICA**  
**3 EJES**

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio/Unidad</b>	<b>Precio Total</b>	<b>Precio Total</b>
Driver Motor	A4988	5		7,99	7,99
Placa de Arduino	Arduino Uno R3	1	23,20	23,20	23,20
<b>TOTAL:</b>	<b>815,53 \$</b>				

**Tabla 3.4 Análisis de costos**

Tomando en cuenta, que no se pueden encontrar sistemas de posicionamiento completos en el mercado con las dimensiones que se necesitan en menos de 2000\$, se puede concluir que es económicamente viable.

### **3.8 Softwares utilizados**

Se hizo uso del software Solidworks para las simulaciones realizadas, Licencia del producto:

9020 – 0067 – 0870 – 1296 - 6TWD – 3P9D

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo pertenece a un proyecto del laboratorio de termofluidos de ESPOL para el estudio de turbulencias en el aire mediante experimentos en el túnel de viento. El objetivo del proyecto es el diseño de un anemómetro de hilo caliente y todos sus subsistemas para el laboratorio, de los cuales este trabajo presentó el diseño del sistema de posicionamiento en los 3 ejes para el elemento sensor y el sistema de calibración del instrumento.

De los datos de dimensiones para el análisis de portabilidad, tomando en cuenta el material de los elementos usados para la estructura, se obtuvo un peso total de 5.93 kg, con lo cual se concluye que la estructura tiene un peso considerado liviano, y por lo tanto el sistema de posicionamiento es fácil de movilizar, montar y desmontar de la cámara de túnel de viento.

Del análisis estático, se comprobó la autorretención de los motores NEMA en sus respectivos ejes, debido a que la fricción de los elementos no sobrepasa, en ninguno de los 3 ejes. el límite de fricción establecido según los materiales usados en el diseño del sistema de posicionamiento, de llegar sobrepasar este límite debido a las dimensiones del tornillo de avance, significaría que se generaría un desplazamiento y movimiento lineal debido al empuje del flujo de viento en el caso del EJE X y EJE Z, o debido al peso de sus componentes en el caso del EJE Y. La fricción en el eje X de 0.23 no sobrepasa el límite de 0.25, la fricción en el eje Y.

Con el análisis de flujo realizado, se puede observar en la figura 3.3 que la velocidad inicial es captada por el elemento sensor no se ve alterada de manera, con la velocidad inicial promedio simulada de 50m/s. De la misma manera en la figura 3.4 se observa que la trayectoria del flujo tampoco es afectada por los componentes del sistema de posicionamiento, se observa que las flechas se mantienen en la

misma dirección al chocar con la sonda, y la trayectoria del flujo solo es afectada una vez que ya paso por el elemento sensor de modo que no interviene en gran medida en la medición tomada por la sonda.

En base al sistema de calibración propuesto por Eguti (2002) se seleccionó el calibrador de hilo caliente Dantec 54H10 sobre el calibrador diseñado debido a que cumple con las necesidades del laboratorio con una mayor calidad y requiriendo un menor espacio pese a su elevado precio.

El diseño presentado del sistema de posicionamiento debe fabricarse y ensamblarse usando las medidas y materiales especificados, se requieren análisis experimentales futuros para determinar la eficacia y precisión del diseño propuesto.

#### **4.1 Conclusiones**

- El sistema de posicionamiento diseñado tiene un peso total de su estructura de 5.93 kg, con lo cual se concluye que el sistema es liviano y fácil de portar, montar y desmontar de la cámara del túnel de viento del laboratorio.
- El análisis estático obtuvo los resultados siguientes: la fricción en el eje X de 0.23 no sobrepasa el límite de 0.25, la fricción en los ejes Y y Z de 0.161 no sobrepasa la fricción de 0.22, por lo que se concluye que el sistema cumple las características de autorretención, por lo cual los motores NEMA17 se mantendrán estáticos en sus posiciones finales y no serán desplazados durante los experimentos.
- El análisis de flujo realizado a la estructura demuestra que el flujo interno en la cámara del túnel de viento no se ve afectado de manera notable, concluyendo que la estructura no interviene en los datos que adquiere el elemento sensor del anemómetro.
- El análisis de costo concluye la viabilidad económica del proyecto, con un costo total de 815.53 \$, siendo más rentable que cualquier solución de posicionamiento externa.

- Se seleccionó el sistema de calibración para hilo caliente Dantec 54H10, el cual tiene un precio en conjunto a su purificador de aire de \$13.180 y puede calibrar velocidades desde 0.5 m/s a 60 m/s.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un proyecto multidisciplinario entre carreras de ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, y/o ingeniería mecatrónica para el diseño del anemómetro de hilo caliente, así como todos sus subsistemas y componentes, ya que el presente diseño se lo realizó sin tomar en cuenta el material, dimensiones y tipo de anemómetro.
- Se recomienda realizar un análisis de la estructura frente a turbulencias de flujo, para verificar como afectan las vibraciones al realizar experimentos al diseño propuesto.
- Es importante contar con todos los componentes listados antes de empezar el ensamblaje del sistema de posicionamiento. Si todos los elementos y componentes listados se encuentran listos para ser ensamblados, se estima que el proceso no debe tomar más 180 minutos.
- Será necesario realizar ciertos orificios en la cámara del túnel de viento para el paso y manejo de cables. Estos orificios, así como los orificios para los tornillos y pernos para la tapa superior deberán ser correctamente sellados para mantener la propiedad de estanqueidad del sistema y no permitir que partículas externas intervengan en los experimentos.
- Es posible mejorar el sistema de control de los motores paso a paso implementando un software donde se puedan ingresar coordenadas exactas para el elemento sensor del anemómetro.

- El motor paso a paso NEMA 17 no es el único motor que cumple y satisface las necesidades del diseño propuesto, es posible usar otros motores como el NEMA 14, pero se debe tomar en cuenta que los soportes están diseñados a la medida del NEMA 17.
- Se recomienda contactar, de ser posible, a otras universidades que cuenten con un sistema de anemómetro completo para verificar su funcionamiento y contar con más experiencia.
- Se recomienda conocer previamente el tipo de anemómetro, características, materiales, para diseñar un sistema de calibración acorde al que se va a adquirir en el laboratorio
- De preferir la viabilidad económica, se recomienda construir el diseño del calibrador presentado.

# BIBLIOGRAFÍA

- Franco Coradini, M., & Leal da Silva, R. (2018). Hot-Wire Anemometers: Design and Engineering Applications. *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- Watmuff, J. H. (1994). *A high-performance constant-temperature hot-wire anemometer* (Contractor Report NASA-CR-177645). Ames Research Center - NASA.
- Itsweire, E. C., & Helland, K. N. (1983). A high-performance low-cost constant-temperature hot-wire anemometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16(6), 549–553.
- Yue, Z., & Malmström, T. G. (1998). A simple method for low-speed hot-wire anemometer calibration. *Measurement Science and Technology*, 9(9), 1506–1510.
- Perry, A. E., & Morrison, G. L. (1971). A study of the constant-temperature hot-wire anemometer. *Journal of Fluid Mechanics*, 47(3), 577–599.
- Bourget, P.-L. (1976). Calibration method for a hot wire anemometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9(5), 353–358.
- Yang, J., Chen, X., & Dong, X. (2020). Hot-wire Anemometer Based on Frosted Fiber Bragg Grating Coated with Silver Film. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 711(1), 012112.
- Knoblock, Frederick Delbridge. (1939). *Investigations on the applications of the hot wire anemometer for turbulence measurements* (Final) [California Institute of Technology; PDF].

- Tsinober, A. (1995). Hot Wire Anemometry: (An Overview in Turbulence Research — Present and Future). In P. Tabeling & O. Cardoso (Eds.), *Turbulence* (Vol. 341, pp. 31–38). Springer US.
- Takahashi, H., Kurita, M., Iijima, H., & Koga, S. (2020). Simplified Calibration Method for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometry. *Applied Sciences*, *10*(24), 9058.
- Ardekani, M., Nafisi, V., & Farhani, F. (2012). Extrapolation of calibration curve of hot-wire spirometer using a novel neural network based approach. *Journal of Medical Signals & Sensors*, *2*(4), 185.
- Tsinober, A. (1995). Hot Wire Anemometry: (An Overview in Turbulence Research — Present and Future). In P. Tabeling & O. Cardoso (Eds.), *Turbulence* (Vol. 341, pp. 31–38). Springer US.
- Bruun, H. H. (1995). Hot-wire anemometry: Principles and signal analysis. Oxford university press.
- Manshadi, M. D., & Esfeh, M. K. (2012). A New Approach about Heat Transfer of Hot-Wire Anemometer. *Applied Mechanics and Materials*, *232*, 747–751.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: GUIA DE MONTAJE

Es importante tener todos los materiales especificados antes de empezar el montaje.

### A.1: Cables

Antes de empezar el ensamblaje se debe tomar en cuenta los cables y sus longitudes, con los motores afuera es necesario alargar los cables de los servomotores NEMA17 para ubicarlos con la placa Arduino, se recomienda alargar aproximadamente hasta los 3 metros la longitud de cada cable.

### A3: Tapa

Con un taladro, realizar los orificios en la tapa como se indica en el plano adjunto, a las dimensiones especificadas

### A3: EJEX

1. Atornillar a la tapa de la cámara del túnel, el soporte-fin BF-10 en los 4 orificios que corresponden.
2. Introducir los tornillos de avance en los rodamientos del soporte BF-10.
3. Introducir la tuerca con su porta tuercas en el tornillo de avance, y atornillar.
4. Introducir los rodamientos del soporte-inicio BK-10 en el tornillo de avance y desplazar hasta la posición adecuada para atornillar en los otros 4 orificios que corresponden
5. Introducir el eje del motor NEMA17 con el acoplamiento del plano “soporte motor” en el eje del tornillo de avance.

#### A4: EJEY

1. Atornilla al NEMA17 el soporte e introducirlo en el tornillo de avance
2. Enroscar el tornillo de avance en la placa del motor ubicado en el eje superior (X), introduciendo una tuerca para fijarlo.
3. Introducir otra tuerca al eje, y enroscar a la placa inferior, apretando la tuerca.

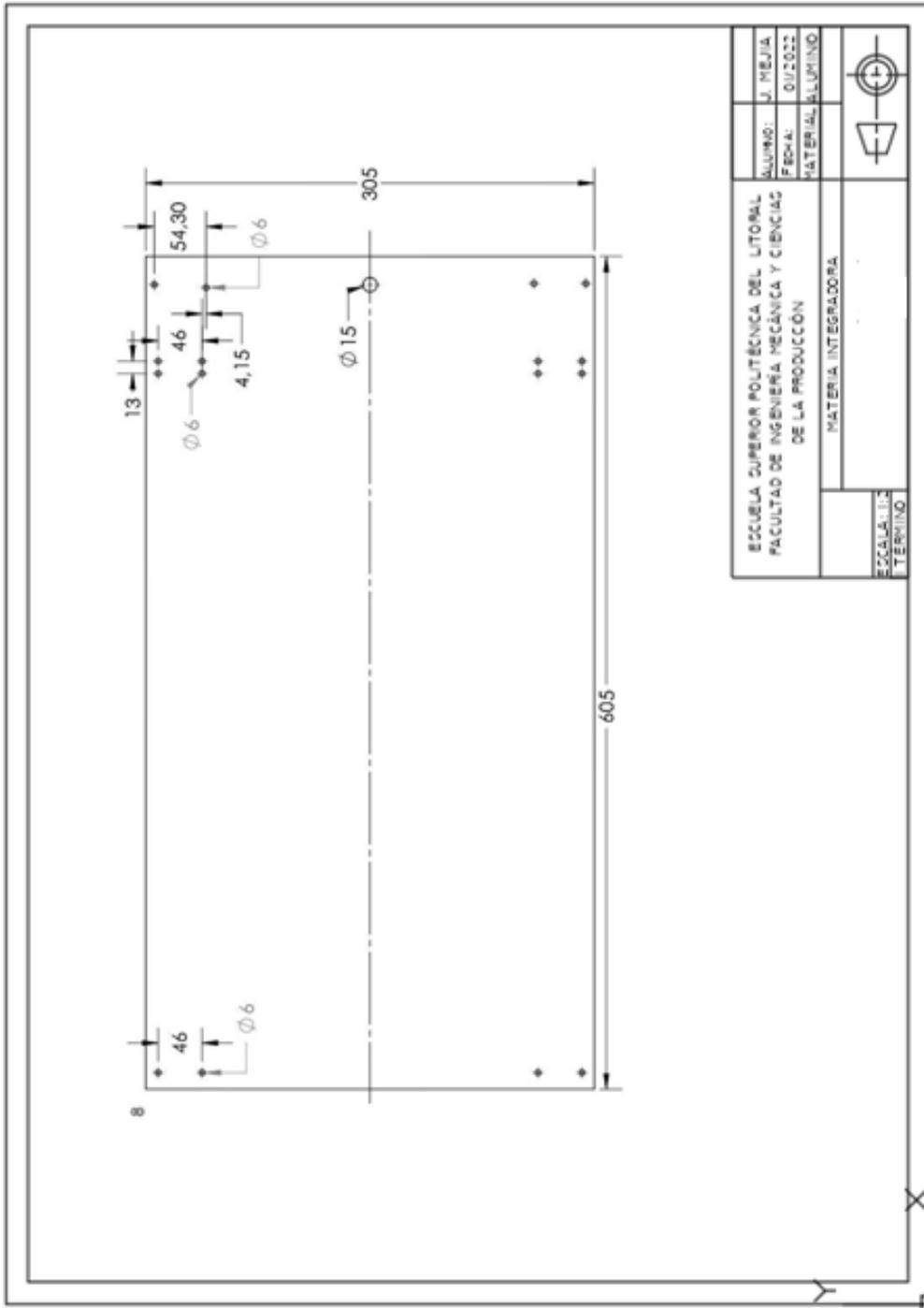
#### A5: EJEZ

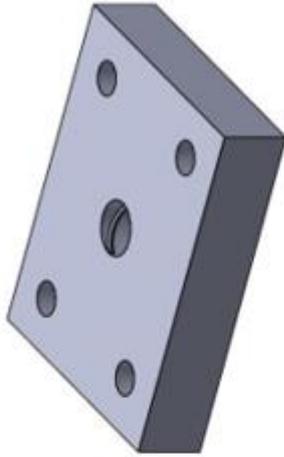
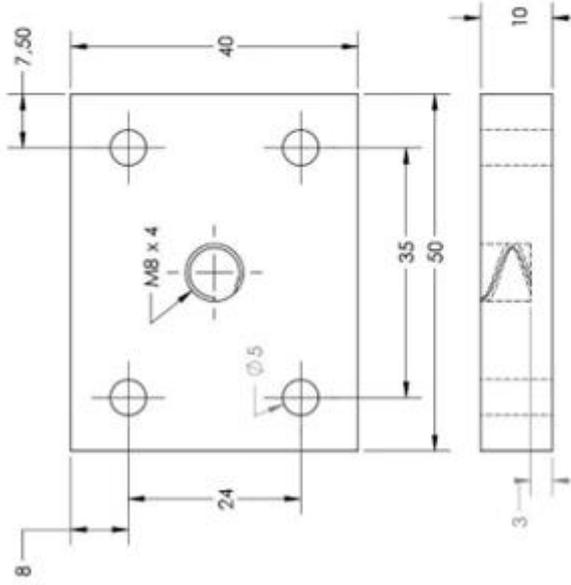
1. Enroscar el eje a la placa del motor del eje Y, e introducir tuerca para que quede fijo
2. Atornillar los 2 soportes al motor antes de introducirlo al eje del tornillo de avanceZ.
3. Enroscar el husillo en la otra placa del eje Y, introduciendo una tuerca para que quede fijo.
4. Atornillar el patín y los soportes del riel a las partes inferiores del EJEY.

Finalmente, para ensamblar se debe atornillar las placas de los ejes entre ellos, es decir, las placas superiores del tornillo Y a la de los ejes X, y las placas del eje Z a los ejes Y, luego atornillar los patines del riel a los ejes Y. Acoplar las ventosas de los rieles inferiores a la cámara del túnel.

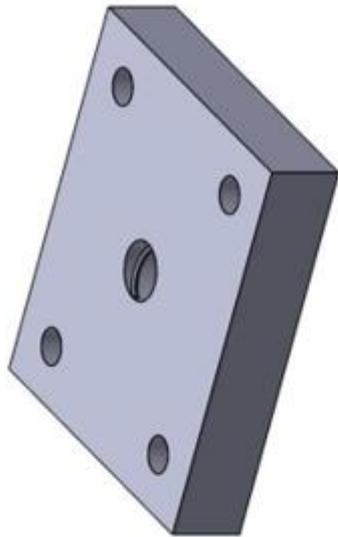
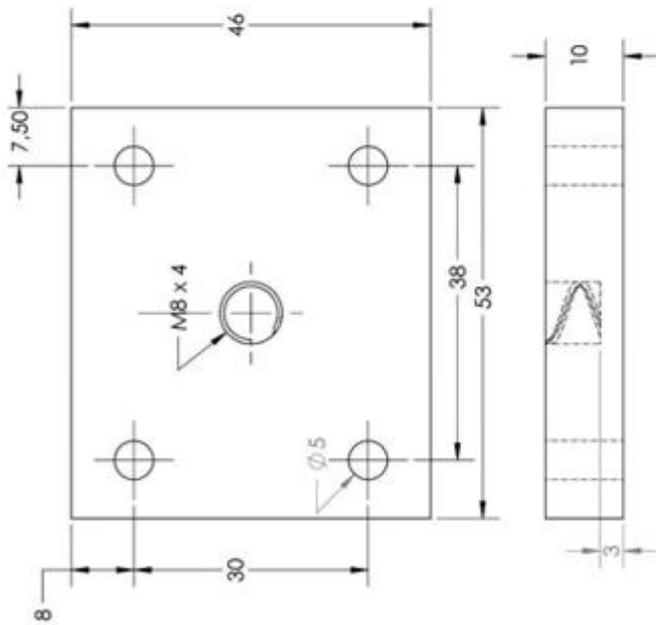
Se recomienda analizar que los orificios de la tapa queden correctamente sellados.

## APÉNDICE B: PLANOS

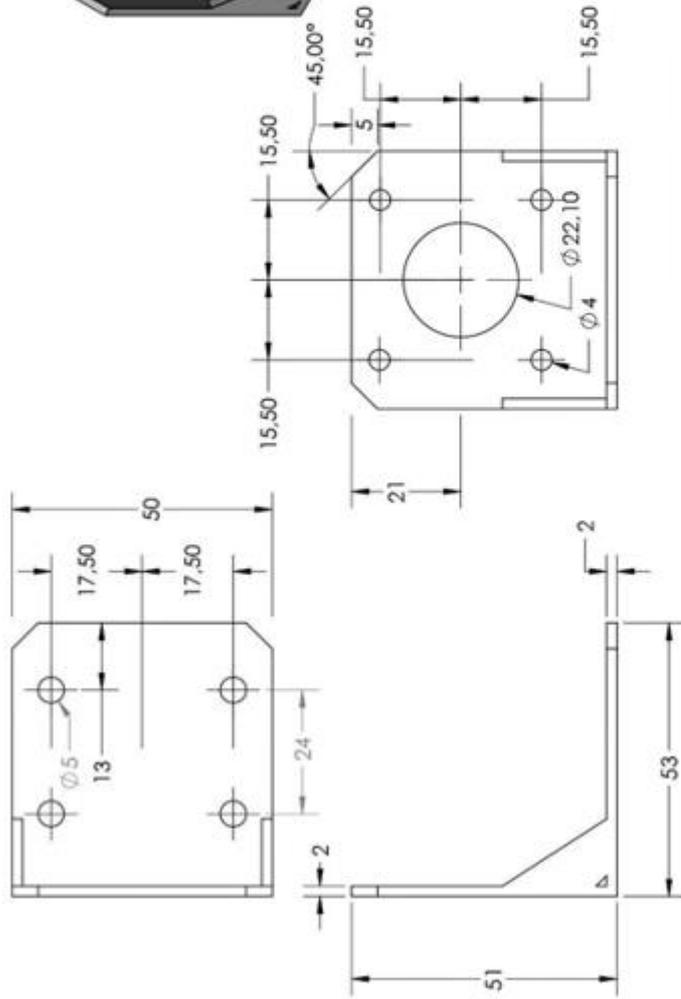




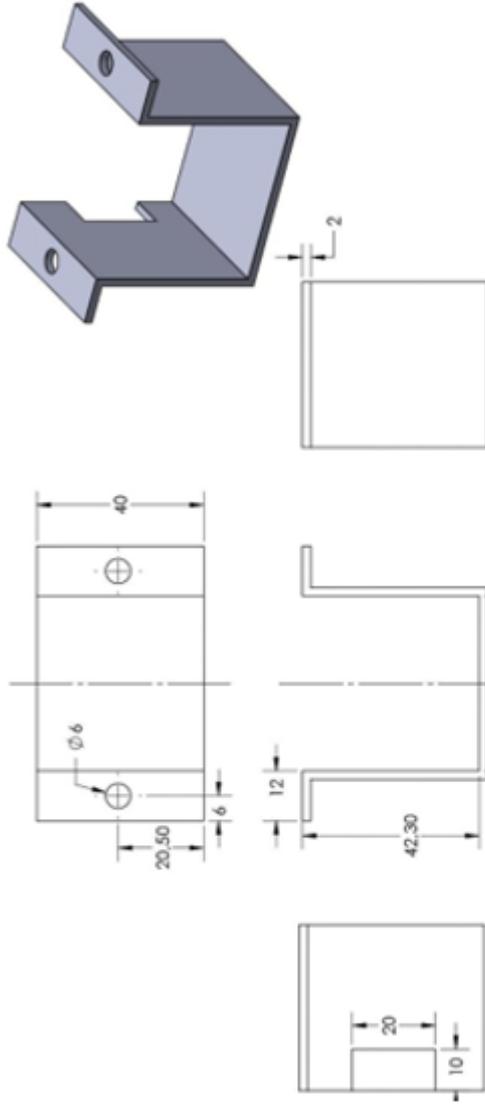
ECCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		ALUMNO:	J. MEJÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		FECHA:	01/2022
MATERIA INTEGRADORA		MATERIAL:	ALUMINO
ECCALALIC		SOPORTE HUSILLO	
TERMINO			



ECCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		ALUMNO: J. MEJIA	
MATERIA INTEGRADORA		FECHA: 07/2022	
SOPORTE HUSILLO 2		MATERIAL: ALUMINIO	
ESCALA: 1:2	TERMINO		



ECCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		ALUMNO:	J. MEJIA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		FECHA:	01/2022
MATERIA INTEGRADORA		MATERIAL ALUMINIO	
ECCALA: 1:1		TERMINO	
SOPORTE NEMAI7			



ECCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		ALUMNO: J. MEJIA	
MATERIA INTEGRADORA		FECHA: 01/2022	
ECCALAJE TERMINO		MATERIAL:	
SOPORTE MOTOR			

# APÉNDICE C: DATASHEETS

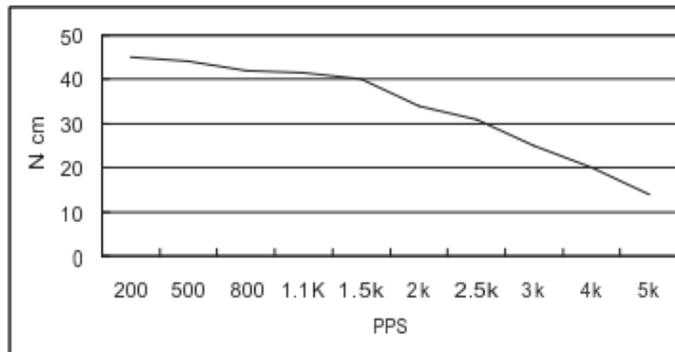
## Datasheet NEMA17

### HIGH TORQUE HYBRID STEPPING MOTOR SPECIFICATIONS

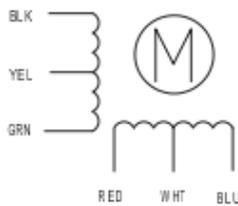
General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	4
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1.2
Ambient temperature (°C)	-20~+50	Resistance Per Phase ( $\pm 10\%$ )	3.3 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase ( $\pm 10\%$ mH)	2.8
Insulation Resistance	100M $\Omega$ , Min (500VDC)	Holding Torque (Kg.cm)	3.17
Insulation Class	Class B	Detent Torque (g.cm)	200
Max.radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	68
Max.axial force (N)	10	Weight (Kg)	0.365

#### ● Pull out torque curve:

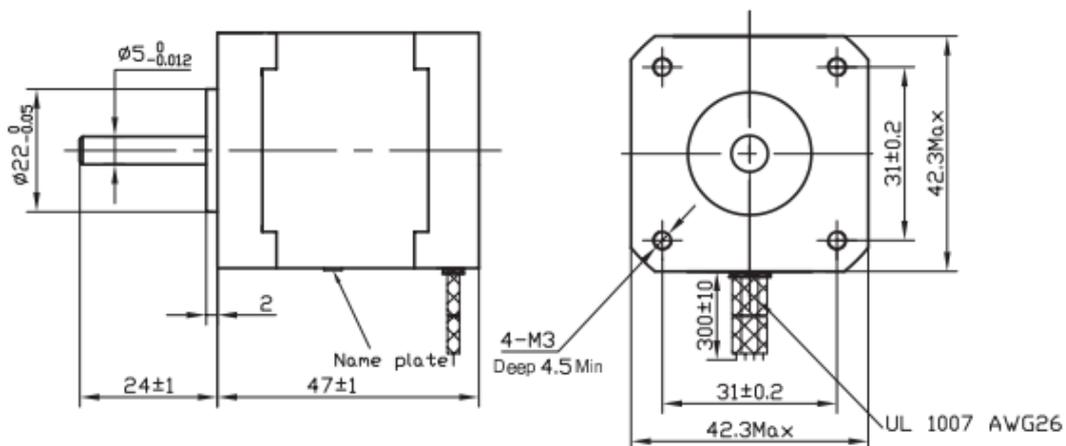
VOLTAGE: 24VDC, CONSTANT CURRENT: 1.2A, HALF STEP



#### ● Wiring Diagram:



#### ● Dimensions: (unit=mm)



					SY42STH47-1206A	TECHNICAL CONDITIONS
REV	REVISIONS	DESCRIPTION	BY	DATE		
DRAW	任飞	2010.06.29			CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE	060047000
CHECK						
APPROVE						

## Especificaciones calibrador DANTEC 54H10



Data Sheet 0682\_v1. Subject to change without notice. Copyright © 2020. Dantec Dynamics. All Rights Reserved. [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)



### Technical specifications

Specifications	
Velocity range	0.5 m/s to 60 m/s
Accuracy (2-point)	Typical $\pm 0.5\%$ OR, Maximum $\pm 2\%$ OR inclusive linearization error
Accuracy (multi-point)	Depends on pressure transducer, Differential manometer, full scale 2 kPa recommended
Test section	Free jet
Air supply	7-9 bars (absolute)
Input air quality	According to PNEUROP 6611 Class 1
Nozzle diameter & velocity range	12.4 mm, 0.5 to 60 m/s
Air supply	Compressed air at 0.7 to 0.9 MPa
Air consumption	0.2 to 26 m <sup>3</sup> /h
Dimensions	13.5 cm (w) x 33 cm (h) x 21,5 cm (d)

# Quotation SQ0907843-1

Page 1 / 1



Ecuador

Jan Kristofer Mejia Rodriguez

**Quote Date** 2022 February 11  
**Validity** 3 Months  
**Dantec Rep** Allan Perry  
**Shipping Terms** EXW- Holtsville NY, USA  
**Payment Terms** Prepayment

<u>Item</u>	<u>Description</u>	<u>Qty</u>	<u>Amount</u>
	<u>Hot-wire calibrator</u>		
9054H0101	Hot-wire calibrator Two point	1.0	10,745.00
9090H0041	Air purifier Filter Unit for Hot-wire Calibrators, 10 meter	1.0	2,435.00

**Total Price, Ex Works Holtsville NY** **USD** **13,180.00**

Lead Time- 4-6 weeks

Dantec Dynamics, Inc. 750 Blue Point Road Holtsville NY 11742 US	VA1 No. 22-2489714 Phone (631) 654-1290 Fax (631) 654-1293  www.dantecdynamics.com	Bank  SWIFT Account USD IBAN	Bank of America, N.A. 222 Broadway BOFAUS3N -466001404980 011000138
------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------

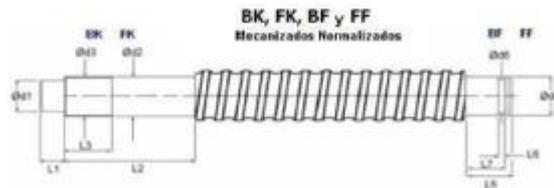
Partners for Progress

## Datasheet husillo de bolas SFU 12 - 04



Ref. CNC-Robotica	Type	$\phi$	#Balls mm	Adv. mm	Precision
CNC30081	1204	12	2.381	4	C7
CNC30082	1605	16	3.175	5	C7
CNC30083	1610	16	3.175	10	C7
CNC30084	1616	16	3.175	16	C7
CNC30085	2005	20	3.175	5	C7
CNC30086	2010	20	3.175	10	C7
CNC30087	2020	20	3.175	20	C7
CNC30088	2505	25	3.175	5	C7
CNC30089	2510	25	4.763	10	C7
CNC30090	2525	25	3.969	25	C7

## Mecanizado de husillo BK10/BF10

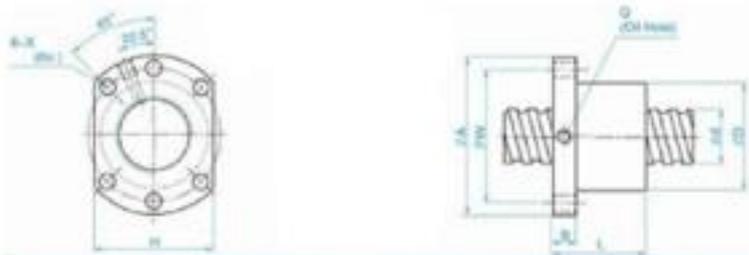


Spindle Ø	Fixed Ballcrew Support	Ø1	Ø2	L1	L2	Ø3	L3	Ballcrew Ø	Trapezoidal Ø
from to									
25mm to	BK12	FK12	10.0	12.0	15	20	H12x1.0	16	16.5/20
25mm to	BK15	FK15	11.0	14.0	20	41	H15x1.0	16	20

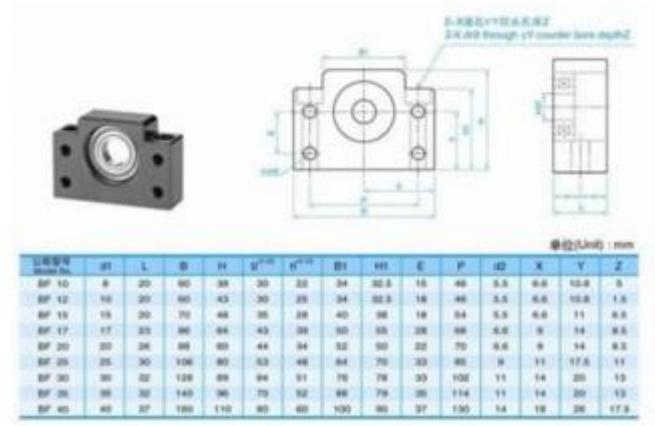
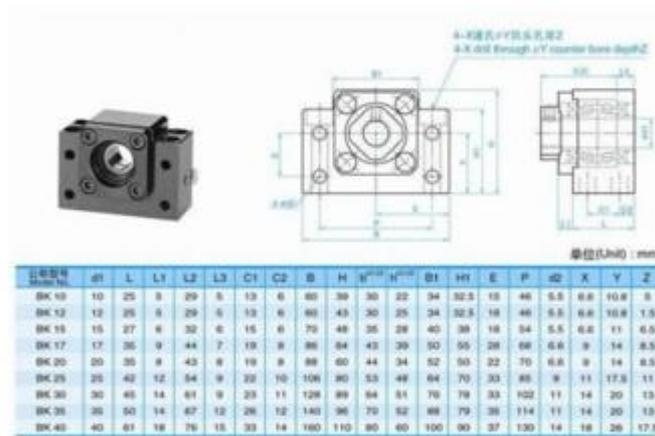
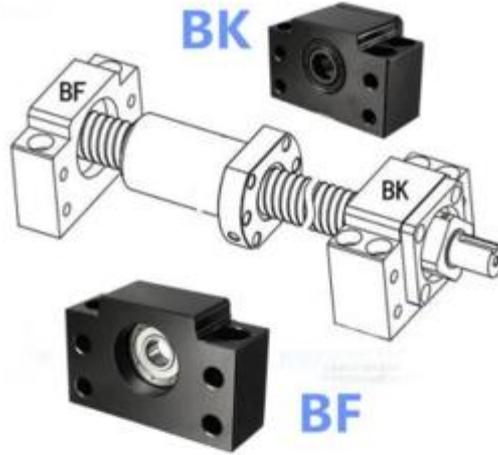
Spindle Ø	Floating Ballcrew Support	Ø1	L1	Ø2	L2	Ballcrew Ø	Trapezoidal Ø	
from to								
25mm to	BF12	FF12	10	12	3.5	3.15	16	16.5/20
25mm to	BF15	FF15	11	12	4.0	3.15	16	20

Datasheet Tuerca SFU 12 04

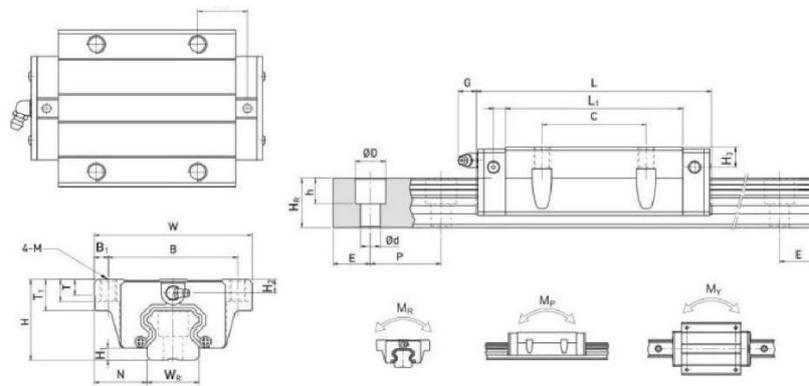
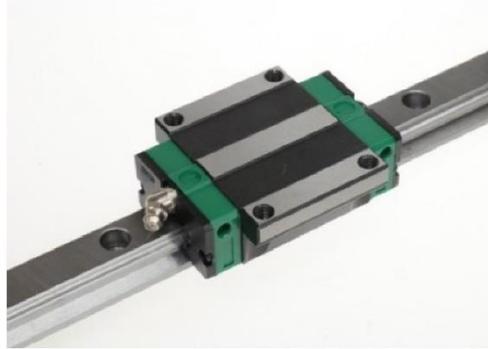


Model No.	t	Lead	Da	Ball Dia.	n	Number of Circuits	K	Stiffness (Kg/µm)	Dimensions						
									Ca	Ce	Ce				
SFU-1204-3 RED	12	4	2.5	24	40	10	40	32	4.5	30	M8x1	1x3	451	709	12.5
SFU-1605-3 RED	16	5	3,175	28	48	10	42	38	5.5	40	M8x1	1x3	656	1143	35
SFU-1610-4 RED	16	10	3,175	28	48	10	42	38	5.5	40	M8x1	1x4	716	1222	15
SFU-2010-4 RED	20	10	3,175	36	58	10	42	47	6.6	44	M8x1	1x4	749	1465	25
CFU-1605-4 OVAL	16	5	3,175	28	48	10	50	38	5.5	40	M8x1	1x4	888	1525	20
CFU-2005-4 OVAL	20	5	3,175	36	58	10	51	47	6.6	44	M8x1	1x4	959	1594	25
CFU-2505-4 OVAL	25	5	3,175	48	62	10	51	51	6.6	46	M8x1	1x4	1119	2561	35
SFS-1610-2.8	15	10	2,778	28	48	10	47	38	5.5	40	M8x1	1x2.8	829	1821	
SFS-2010-3.8	20	10	3,175	36	58	10	60	47	6.6	44	M8x1	1x3.8	1516	3833	
SFS-2510-3.8	25	10	3,175	48	62	12	62	51	6.6	48	M8x1	1x3.8	1638	4633	

# Datasheet soportes Machifit BK10 BF 10



## Datasheet - Patín Ancho Compatible Hiwin de 15mm



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)		Dimensions of Block										Dimensions of Rail					Mounting Bolt for Rail	Basic Dynamic Load Rating	Basic Static Load Rating	Static Rated Moment (kgf.m)			Weight							
	H	H <sub>1</sub>	N	W	B	B <sub>1</sub>	C	L <sub>1</sub>	L	K <sub>1</sub>	G	M	T	T <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>				H <sub>4</sub>	D	h	d	P	E	[mm]	C <sub>1</sub> (kN)	C <sub>0</sub> (kN)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
CNW15CA	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	5.3	M5	6	8.9	3.95	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45
CNW20CA	30	4.6	21.5	63	53	5	40	50.5	77.5	10.25	12	M6	8	10	6	6	20	17.5	9.5	8.5	6	60	20	M5x16	17.75	27.76	0.27	0.20	0.20	0.40	2.21
CNW25CA	36	5.5	23.5	70	57	6.5	45	58	84	10.7	12	M8	8	14	6	5	23	22	11	9	7	60	20	M6x20	26.48	36.49	0.42	0.33	0.33	0.59	3.21

## Datasheet Arduino UNO R3

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Más información en la página web de Arduino: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

## APÉNDICE D: CÓDIGO

\*Es necesario instalar la librería “AccelStepper.h” en el software de Arduino

\*Es necesario cambiar el numero en NX, NY, NZ según la posición deseada. Cada numero representa 1 mm, empezando desde 0. Por ejemplo, si se desea mover las del eje x a la posición 200mm se escribiría en NX=200. Se recomienda regresar todas a la posición 000 al terminar su uso

```
// Include the AccelStepper Library
#include <AccelStepper.h>
// Coordinates
NX=000
NY=000
NZ=000

// EJE X
// Define pin connections
const int dirPin = 2;
const int stepPin = 3;

// Define motor interface type
#define motorInterfaceType 1

// Creates an instance
AccelStepper myStepper(motorInterfaceType, stepPin, dirPin);

void setup() {
    // set the maximum speed, acceleration factor,
    // initial speed and the target position
    myStepper.setMaxSpeed(1000);
    myStepper.setAcceleration(50);
    myStepper.setSpeed(200);
    myStepper.moveTo(NX);
}

void loop() {
    // Change direction once the motor reaches target position
```

```

    if (myStepper.distanceToGo() == 0)
        myStepper.moveTo(-myStepper.currentPosition());

    // Move the motor one step
    myStepper.run();
}
// EJE Y
// Define pin connections
const int dirPin = 4;
const int stepPin = 5;

// Define motor interface type
#define motorInterfaceType 2

// Creates an instance
AccelStepper myStepper(motorInterfaceType, stepPin, dirPin);

void setup() {
    // set the maximum speed, acceleration factor,
    // initial speed and the target position
    myStepper.setMaxSpeed(1000);
    myStepper.setAcceleration(50);
    myStepper.setSpeed(200);
    myStepper.moveTo(NY);
}

void loop() {
    // Change direction once the motor reaches target position
    if (myStepper.distanceToGo() == 0)
        myStepper.moveTo(-myStepper.currentPosition());

    // Move the motor one step
    myStepper.run();

// Define pin connections
const int dirPin = 6;
const int stepPin = 7;

```

```
// Define motor interface type
#define motorInterfaceType 3

// Creates an instance
AccelStepper myStepper(motorInterfaceType, stepPin, dirPin);

void setup() {
    // set the maximum speed, acceleration factor,
    // initial speed and the target position
    myStepper.setMaxSpeed(1000);
    myStepper.setAcceleration(50);
    myStepper.setSpeed(200);
    myStepper.moveTo(NZ);
}

void loop() {
    // Change direction once the motor reaches target position
    if (myStepper.distanceToGo() == 0)
        myStepper.moveTo(-myStepper.currentPosition());

    // Move the motor one step
    myStepper.run();
}
```