

# **SISTEMA DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS DE AEROGENERADORES**

**OSCAR CONTRERAS TORRES**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,  
MECATRONICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA, diciembre 7 de 2020**

# **SISTEMA DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS DE AEROGENERADORES**

**OSCAR CONTRERAS TORRES**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director: ELKIN GREGORIO FLOREZ SERRANO**

Doctor en Ingeniería Mecánica

[eflorez@unipamplona.edu.co](mailto:eflorez@unipamplona.edu.co)

**Codirector: JUAN CARLOS SERRANO RICO**

Doctor en Ingeniería Mecánica

[jcserrano@unipamplona.edu.co](mailto:jcserrano@unipamplona.edu.co)

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,**  
**MECATRONICA E INDUSTRIAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**  
**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, diciembre 7 de 2020

Dedicatoria

Como una mano invisible que estuvo dirigiendo levemente, sé que intervino e interviene mis actos, como una idea, sin forma ni presencia física, como un recuerdo recurrente en mi cabeza, tal vez muchos se olvidaron de ti, pero en mi aún queda la presencia y el recuerdo antiguo, el qué hubiera sido si... me invade a menudo, hoy como memoria solo dejo esto a tú nombre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo va dedicado a todos los que intervinieron de alguna manera durante mi formación, familiares, docente y amigos, realmente no es un objetivo individual y sin el apoyo de los que me rodean se hubiera hecho muy complicado cumplir con este objetivo.

Un agradecimiento a mis tutores, los profesores Juan Carlos Serrano Rico y Elkin Gregorio Florez Serrano por su gran ayuda en cada momento de consulta y soporte en este proyecto, me motivaron a culminar este último peldaño de mi formación.

Al programa de ingeniería mecánica de la universidad de Pamplona por ampliar mi visión del mundo, por darme la satisfacción de superarme a mí mismo, y de rodearme de excelentes personas mientras lo hacía.

A mis hermanos por la paciencia, el respaldo invaluable en momentos de necesidad, y por acompañarme a la hora de superar los obstáculos, todos son un ejemplo de perseverancia y dedicación.

Principalmente y con mucho cariño agradezco a los seres más importantes de mi formación, ellos no me han educado 5 años sino desde que nací, a mis padres por afrontar las dificultades con tal de darme la oportunidad de adquirir educación, me quedo con sus principios y su ejemplo.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
JUSTIFICACIÓN .....	15
OBJETIVOS.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos .....	16
2. TUNELES DE VIENTO Y ENERGIA EOLICA.....	19
2.1    Túnel de viento .....	19
2.1.1    Tipos de túnel de viento.....	19
2.1.1.1    Túnel abierto .....	19
2.1.1.2    Túnel cerrado .....	20
2.2    DETERMINACION TEORICA DE LAS VARIABLES IMPORTANTES EN LOS TÚNELES DE VIENTO .....	21
2.2.1    Ley de Bernoulli.....	21
2.2.2    Presión de estancamiento: .....	22
2.2.3    Conservación de la masa: la ecuación de continuidad .....	22
2.2.4    Humedad del aire.....	23
2.2.5    Medición del ruido .....	27
2.3    SIMILARIDAD, CONCEPTOS DE SIMILARIDAD Y NÚMEROS ADIMENSIONALES .....	27
2.3.1    Análisis dimensional.....	27
2.3.2    Similaridad?.....	28
2.3.3    Números adimensionales.....	31
2.3.3.1    Número de Reynolds, $Re$ .....	31
2.3.3.2    Número de Nusselt, $Nu$ .....	34
2.3.3.3    Numero de Prandtl, $Pr$ .....	35
2.3.3.4    Numero de Euler, $Eu$ .....	35
2.3.4    Viscosidad dinámica de los gases.....	35
2.3.5    Viscosidad cinemática de los gases.....	36
2.3.6    Densidad del aire .....	36
2.4    TEORÍA DE AEROGENERADORES.....	37
2.4.1    Ley de BETZ .....	38

2.4.1.1	Potencia del aerogenerador .....	40
2.4.1.2	Determinación de la velocidad de rotación .....	41
2.4.1.3	Fuerza centrífuga .....	41
2.4.1.4	Torque de Turbina.....	41
2.4.1.5	Coeficiente de potencia .....	42
2.4.1.6	Angulo de ataque .....	44
2.4.2	Selección de la turbina eólica .....	44
2.4.2.1	Perfiles naca .....	45
3.	INSTRUMENTACIÓN .....	48
3.1	INSTRUMENTOS DE POTENCIA .....	48
3.1.1	Motor eléctrico .....	48
3.1.1.1	Potencia del motor.....	49
3.1.1.2	Motor asincrónico trifásico .....	49
3.1.1.3	Determinación de la potencia del motor trifásico .....	50
3.1.2	Ventiladores .....	51
3.1.3	Variador de frecuencia.....	53
3.1.4	Interruptor automático.....	54
3.1.5	Guarda motor.....	54
3.1.6	Tarjeta de adquisición de datos .....	55
3.2	SENSORES.....	55
3.2.1	Determinación de la presión.....	56
3.2.2	Determinación de la temperatura .....	57
3.2.3	Determinación de la humedad relativa .....	60
3.2.3.1	Determinación de la humedad .....	61
3.2.4	Determinación de la velocidad del viento .....	61
3.2.5	Determinación de la intensidad sonora .....	62
3.2.6	Determinación de velocidad de giro .....	63
3.2.6.1	Efecto hall.....	63
3.2.6.2	Determinación de la velocidad del tacómetro.....	64
3.2.7	Determinación del voltaje.....	65
3.2.7.1	Determinación del voltaje.....	65
3.2.8	Determinación de la corriente .....	65

3.2.8.1	Amperímetro de gancho .....	65
3.2.8.2	Determinación de la corriente .....	66
4.	CONTROL DEL TÚNEL DE VIENTO.....	67
4.1	Diseño del sistema de control.....	67
4.2	Diseño eléctrico .....	67
4.2.1	Entradas y salidas del sistema de control .....	67
4.2.2	Sistema de recepción de energía .....	68
4.2.3	Diagrama eléctrico de potencia .....	69
4.2.4	Diagrama electrico de control.....	70
4.3	TEORÍA DE CONTROL.....	72
4.3.1	Adquisición de datos.....	72
4.4	Programación en LabVIEW.....	73
4.4.1	Botones de mando .....	74
4.4.2	Entradas analógicas de los sensores .....	75
4.4.3	Procesamiento de entradas analógicas .....	76
4.4.4	Salida analógica de la velocidad del motor.....	77
4.5	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL .....	78
4.5.1	Gráficos de variables en el tiempo histórico.....	79
5.	SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SENSORES .....	80
5.1	SELECCIÓN DE LOS SENSORES.....	80
5.1.1	Selección del sensor de presión .....	80
5.1.2	Selección del sensor de temperatura y humedad relativa .....	80
5.1.3	Selección del sensor de velocidad .....	81
5.1.4	Selección del sensor de ruido .....	82
5.1.5	Selección del tacómetro.....	83
5.1.6	Selección del voltímetro .....	84
5.1.7	Selección del amperímetro .....	85
5.2	CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES .....	86
5.2.1	Configuración de un sensor analógico en un PLC .....	87
5.3	SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL.....	88
5.3.1	Selección de la tarjeta DAQ.....	88
5.3.2	Bloque de acondicionamiento de señal SC-2345.....	89

5.4	SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FUERZA.....	90
5.4.1	Selección del motor .....	90
5.4.2	Selección del transformador .....	92
5.4.3	Selección del variador de frecuencia .....	93
5.4.4	Selección del interruptor magnetotérmico .....	94
5.4.5	Selección del disyuntor general .....	95
5.4.6	Selección del relé térmico.....	96
5.4.7	Selección del motor sin escobillas .....	97
5.4.8	Selección la turbina.....	98
5.4.8.1	Perfiles naca .....	98
6.	CONCLUSIONES.....	101
6.1	Limitaciones del sistema de control .....	101
6.2	Ventajas del sistema de control y de potencia .....	101
6.3	Recomendaciones y trabajos futuros .....	102
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104
8.	ANEXOS .....	108
8.1	Pantalla principal de la interfaz de control .....	108
8.2	Diagrama de bloques en logo soft confort .....	109
8.3	Diagrama eléctrico de control y de fuerza.....	110
8.4	Cotizaciones de dispositivos con empresas.....	110
8.5	TABLA DE COTIZACIÓN DE DISPOSITIVOS.....	111

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de turbina .....	45
Tabla 2. Propiedades del aire .....	60
Tabla 3. Entradas y salidas para el sistema de control del túnel de viento .....	68
Tabla 4. Características técnicas del motor trifásico.....	91
Tabla 5. Tabla de selección de variadores de velocidad para motores asíncronos .....	94
Tabla 6. Ficha técnica del motor sin escobillas.....	98
Tabla 7. Tabla de cotización de dispositivos .....	112

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un túnel de viento abierto .....	20
Figura 2. Túnel de viento cerrado .....	20
Figura 3. Presión estática, dinámica y de estancamiento .....	22
Figura 4: Método para la medición de temperatura de bulbo húmedo.....	25
Figura 5: Psicrómetro giratorio .....	25
Figura 6. Experimento de Reynolds.....	32
Figura 7. El diámetro hidráulico .....	33
Figura 8. Estructura de un perfil alar .....	34
Figura 9. Tubo de corriente en un aerogenerador .....	37
Figura 10. Distribución de presiones y velocidades aguas arriba y aguas debajo de las aspas.....	38
Figura 11. $P/P_0$ en función de $V_2/V_1$ .....	39
Figura 12. Comportamiento del coeficiente de potencia $C_p$ para turbinas eólicas .....	43
Figura 13. Ángulos de un perfil alar .....	44
Figura 14. Modelo NACA 4412 recomendado en el proyecto .....	46
Figura 15: Modelo del cubo para la turbina eólica .....	46
Figura 16. Motor eléctrico asíncrono trifásico.....	48
Figura 17. Representación del funcionamiento del motor asíncrono.....	50
Figura 18. Clasificación de ventiladores.....	53
Figura 19. Estructura general de un variador de frecuencia.....	54
Figura 20. Dispositivo USB de E/S Multifunción de National Instruments .....	55
Figura 21. Tubo de Pitot .....	56
Figura 22. Funda típica montada en sonda RTD .....	57
Figura 23. Zonas de aporte y pérdida de energía en el túnel de viento.....	58
Figura 24. Anemómetro de hilo caliente.....	62
Figura 25. Efecto hall.....	64
Figura 26. Amperímetro de gancho .....	66
Figura 27. Sensores necesarios en el sistema de recepción de energía .....	69

Figura 28. Diagrama eléctrico de potencia .....	70
Figura 29. Diagrama eléctrico de control.....	71
Figura 30. Pirámide de la automatización.....	72
Figura 31. Programación grafica en LabVIEW .....	73
Figura 32. Mandos del túnel de viento.....	74
Figura 33. 8.3.2 Entradas analógicas de los sensores.....	75
Figura 34. Procesamiento de entradas analógicas.....	76
Figura 35. Salida analógica de la velocidad del motor .....	77
Figura 36. Interfaz de control para el mando del usuario .....	78
Figura 37. Gráfica de las variables capturadas por los sensores .....	79
Figura 38. Tubo Pitot y transmisor de presión diferencial.....	80
Figura 39. Sensor multifunción de humedad relativa y temperatura .....	81
Figura 40. Código del artículo de la serie de sensores de velocidad del viento.....	82
Figura 41. Sensor de ruido industrial .....	83
Figura 42. Sensor de velocidad del eje .....	84
Figura 43. Transmisor de voltaje .....	85
Figura 44. Sensor de corriente .....	85
Figura 45. Esquema de conversión de una señal en un transmisor de sensor .....	86
Figura 46. Tolerancia de medida de una señal.....	87
Figura 47. Bloque de acondicionamiento de señal.....	90
Figura 48. Motor trifásico seleccionado .....	91
Figura 49. Transformador trifásico .....	93
Figura 50. interruptor magnetotérmico .....	95
Figura 51. Contactor seleccionado.....	96
Figura 52. relé térmico para protección de motores trifásicos .....	97
Figura 53. Motor sin escobillas seleccionado .....	97
Figura 54. Aplicación del método científico en la investigación.....	102
Figura 55. Interfaz de control.....	108
Figura 56. Diagrama de bloques en logo soft .....	109

Figura 57. Diagrama eléctrico de control.....	110
Figura 58. Diagrama eléctrico de control y de fuerza.....	111

|

## 1. INTRODUCCIÓN

El programa de INGENIERÍA MECÁNICA de la universidad de Pamplona se ha visto en la necesidad de instalar un laboratorio de experimentación en el área de aerodinámica, equipado con instrumentos estandarizados y de tecnología apropiada para obtener datos confiables en el área de mecánica de fluidos, por lo cual, se desea implementar un túnel de viento para pruebas de aerogeneradores como herramienta de experimentación e investigación en energía eólica.

Para suplir esta necesidad se diseña e instrumenta un sistema de control robusto y confiable, con dispositivos de tipo industrial que permiten desarrollar pruebas con alto grado de confiabilidad. Para ello, se implementa una tarjeta DAQ (*data acquisition* por sus siglas en ingles) que permite, entre otras acciones, controlar la velocidad de giro del ventilador y recolectar los datos experimentales de las principales variables que intervienen en los ensayos y que son recopilados por sensores de presión, temperatura, velocidad de flujo, humedad relativa, torque, entre otros.

Eléctricamente el sistema del túnel de viento se puede dividir en dos partes, la primera es el circuito eléctrico de potencia, que es encargado de proporcionar la energía eléctrica al sistema y también está el circuito eléctrico de control que es el encargado de regular el sistema de potencia y de almacenar los datos de las variables, obtenidos de los sensores.

La teoría para el funcionamiento de este túnel de viento considera el estudio de modelos a escala, números adimensionales, principios físicos de funcionamiento, según la dinámica de los fluidos y, también principios eléctricos y de control.

## JUSTIFICACIÓN

En el estudio del movimiento de fluidos sobre un sólido se deben considerar una gran cantidad de variables que ayudan a caracterizar el comportamiento del fenómeno fluido-dinámico, variables como; la velocidad, la temperatura, la densidad del fluido, la presión ejercida por el fluido sobre el sólido, entre otras. Además, los datos de estas variables deben de ser adquiridos para poder realizar el respectivo análisis ingenieril. Por lo tanto, los dispositivos (sensores) implementados para adquirir dichos datos deben proporcionar una gran exactitud, con el fin de reducir la incertidumbre en los cálculos y generar un análisis fluido-dinámico confiable.

La implementación de un sistema de control automatizado para un túnel de viento beneficiaría a los ingenieros en formación, y a los docentes de ingeniería de la universidad de Pamplona, pues permitirá validar los conceptos teóricos vistos en los cursos de mecánica de fluidos, termofluidos y demás, relacionados con el movimiento de fluidos e interacción fluido-estructura. Algunos de los conceptos que podrán ser validados son; la ley de la conservación de la energía, la ley de la conservación de la masa, Ley de conservación del momentum, el principio de Bernoulli, análisis dimensional y similaridad, números adimensionales como el número de Reynolds, y numero de Euler, entre otros, según sea el enfoque del experimento realizado (Cimbala & Cengel, 2001).

El diseño de un sistema de control automatizado, robusto, confiable e intuitivo para el usuario se alcanza con la utilización de sensores y actuadores controlados por el usuario desde una interfaz HMI (interfaz hombre maquina), en el que se integran y sistematizan las variables adquiridas por los sensores., debido a que los dispositivos DAQ están normalizados, su durabilidad, confiabilidad y mantenibilidad son garantizados por estándares internacionales (Marwati, 2008)

## **OBJETIVOS**

### Objetivo general

- ✓ Diseñar un sistema de control e instrumentación para un túnel de viento subsónico.

### Objetivos específicos

- ✓ Definir las variables y los instrumentos de detección de las señales en el túnel de viento
- ✓ Establecer la instrumentación necesaria para construir el sistema de control del túnel de viento.
- ✓ Diseñar un sistema de control para un túnel de viento.
- ✓ Diseñar un sistema de adquisición de datos que permita guardar los datos de la prueba realizada en el túnel de viento.

## ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento describe el proceso para la instrumentación y control de un túnel de viento para prueba de aerogeneradores. Se ha dividido el documento en 6 capítulos. El primer capítulo es introductorio y describe a grandes rasgos las ideas principales del proyecto y porqué es imperante su desarrollo.

En el segundo capítulo se trata la teoría de los túneles de viento, se inicia hablando acerca de la clasificación de estos, posteriormente se describen las variables más relevantes que se involucran en un túnel de viento para pruebas de aerogeneradores, variables como; la presión, la temperatura, la humedad, la velocidad del aire y el ruido, entre otras. Seguidamente, se muestran las leyes físicas que respaldan la teoría para la elección de esas variables. Teniendo en cuenta que, el túnel de viento es un dispositivo que trabaja con modelos a escala, también se mencionan, en este capítulo, los principios de similitud y los números adimensionales que intervienen en el proceso. Por último, se describen las posibles fuentes de error a la hora de realizar una prueba, efectos como los causados por la variación de la temperatura sobre la densidad y viscosidad del aire, que pueden alterar los resultados de las pruebas.

De acuerdo con los conceptos adquiridos en el capítulo 2, se continua con el tercer capítulo, éste inicia con el estudio de los criterios más importantes en la elección de la instrumentación de los equipos para el desarrollo del sistema de control del túnel de viento. Además, se realizan los cálculos de los parámetros de acuerdo con el diseño, es decir, se establece el rango de valores en los que van a desempeñarse los sensores de las variables antes mencionadas. También, se definen los equipos de fuerza que intervienen en el túnel, tales como; el motor, el ventilador, el variador de frecuencia, dispositivo DAQ, entre otros.

Seguidamente, en el cuarto capítulo, se desarrolla el diseño del sistema de control, teniendo en cuenta los parámetros de los equipos elegidos en el capítulo anterior. Se seleccionan las entradas y salidas del dispositivo de control, se diseñan los circuitos de fuerza y de control. Además, se realiza un programa de mando en lenguaje de bloques y se explica su respectivo funcionamiento. Como el sistema de control debe de estar enfocado al usuario del dispositivo, se crea una interfaz de control intuitiva que consta de dos modos de operación, uno manual y otro automático, esta interfaz muestra graficas en tiempo real del comportamiento de cada una de las variables y guarda los valores con el fin de que el usuario pueda analizar los datos.

En el quinto capítulo se describe la etapa de selección de los equipos que componen el túnel de viento, esto de acuerdo con parámetros, tales como; costo, calidad y facilidad de adquisición. Además, se describe la forma de seleccionar los sensores, ya que son equipos especializados que requieren de características específicas. También se describe la forma de elegir los demás equipos que conforman el sistema de fuerza y los equipos de control.

Por último, en el sexto capítulo se dan las conclusiones del proyecto, se evalúan los aspectos positivos del proyecto y las oportunidades de mejora.

## 2. TUNELES DE VIENTO Y ENERGIA EOLICA

### 2.1 TÚNEL DE VIENTO

Existen varias clasificaciones para los túneles del viento, y cada uno funciona de acuerdo con el fenómeno físico que se desea estudiar, sin embargo, puede definirse como un conducto en cuyo interior fluye aire que es empujado gracias a la energía proporcionada por un ventilador ubicado en el trayecto del túnel, el cual permite simular un flujo de viento que es utilizado para realizar pruebas aerodinámicas sobre distintos elementos, tales como perfiles aerodinámicos, estructuras a escala y ejes, entre otros.

Las pruebas se realizan en una sección llamada cámara de pruebas, la cual, por lo general, tiene paredes transparentes que permiten visualizar el experimento desde el exterior. Al interior de la cámara de pruebas se ubican los dispositivos de medición que permiten medir las magnitudes de las variables de interés.

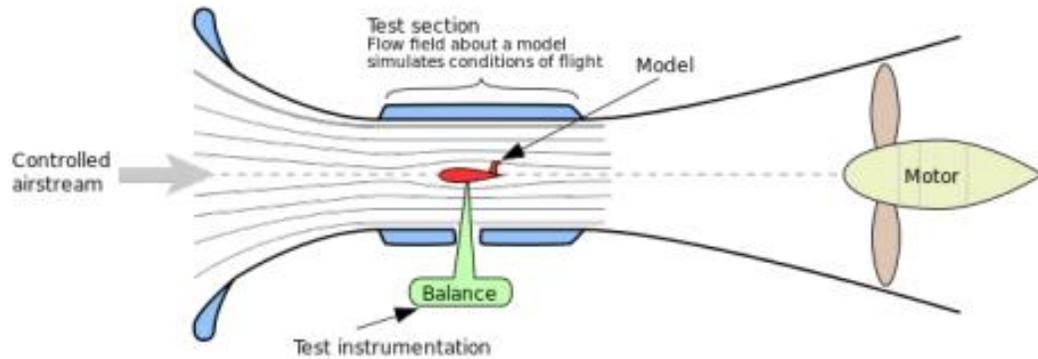
La cámara de pruebas es una sección sé que caracteriza por la reducción de área, esta reducción se hace con el fin de incrementar la velocidad del flujo, además de reducir perdidas por fricción con las paredes del túnel (Llamas Cerrato, 2005).

#### 2.1.1 Tipos de túnel de viento

Para clasificar los túneles de viento se pueden dar dos formas: la primera es por la velocidad del viento, es decir, subsónico o supersónico y la segunda es por la forma como circula el aire al interior del túnel de viento, es decir, túnel de viento de circuito abierto; donde el aire se succiona pasa por la cámara de prueba y retorna a la atmosfera, o túnel de viento de circuito cerrado; donde le aire se mantiene en circulación dentro del túnel, sin salir a la atmosfera. En este caso se utilizará la segunda clasificación (F1, 2010).

##### 2.1.1.1 Túnel abierto

En los túneles de circuito abierto el ventilador puede ir antes de la sección de pruebas (soplado el aire), o después de la cámara de pruebas (aspirando el aire), en el interior del conducto el fluido no se presuriza, y tampoco existen variaciones térmicas lo que significa que la densidad no cambia. (F1, 2010)



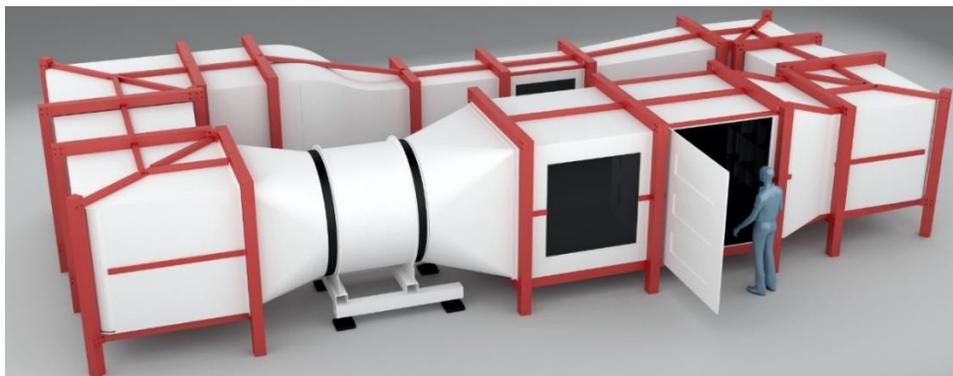
**Figura 1. Estructura de un túnel de viento abierto**

**Fuente: (Cremades Botella, 2019)**

En la Figura 1 se puede observar el funcionamiento de un túnel de viento abierto, el aire es succionado por el ventilador a través de la entrada, la sección transversal se reduce hasta llegar a la cámara de ensayos aumentando la velocidad del viento, posteriormente la sección transversal aumenta en el difusor, cada partícula de aire entra y sale en un solo recorrido hacia el exterior del túnel de viento.

#### 2.1.1.2 Túnel cerrado

Estos túneles de viento funcionan con un circuito cerrado, en el cual el aire es forzado a circular indefinidamente, en este tipo de túnel de viento, por ser cerrado, se puede mantener constante la presión y la temperatura (Hernández, 2008)



**Figura 2. Túnel de viento cerrado**

**Fuente: (Caballero Montes, 2018)**

En la Figura 2 se muestra un túnel de viento de ciclo cerrado, en este túnel de viento el fluido es más estable al aprovechar la energía del viento, ya que el fluido de trabajo es siempre el mismo en los conductos del túnel.

## 2.2 DETERMINACION TEORICA DE LAS VARIABLES IMPORTANTES EN LOS TÚNELES DE VIENTO

Para determinar las principales variables a ser medidas en un túnel de viento se utilizan conceptos básicos de la dinámica de fluidos, como lo son la ley de la conservación de la masa, la ley de la conservación de la energía y la ley de conservación del momentum. Estas permiten estudiar la mayor cantidad de variables involucradas en el fenómeno fluidodinámico.

### 2.2.1 Ley de Bernoulli

Mediante la ley de Bernoulli se establece que la energía de una partícula que se mueve en una línea de corriente es constante, y esta energía es la suma de la energía potencial y la energía cinética. Esto permite afirmar que la proporción de energía cinética y potencial pueden variar durante el recorrido, pero la suma de estas energías se mantiene constante (Carlos et al., 2019). La ecuación de Bernoulli se escribe (Ecuación 1):

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante} \quad \text{Ecuación 1}$$

Como  $1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$ , la Ecuación 1 corresponde a la energía por unidad de masas cuando se divide entre la gravedad

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constante}$$

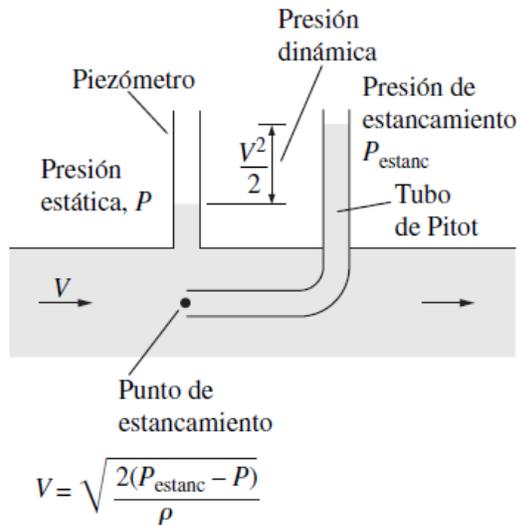
La que se puede interpretar como energía por unidad de peso, si se multiplica por la densidad queda:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \gamma z = \text{constante}$$

Esta forma de la ecuación de Bernoulli es conveniente para el flujo de gases, y la altura  $z$  se puede despreciar, cada uno de los términos de esta ecuación se puede interpretar como una forma de energía presente en el fluido

Donde  $\frac{P}{\rho}$  es el trabajo del flujo o energía del flujo por unidad de masa,  $\frac{V^2}{2}$  es la energía cinética de una partícula de masa  $m$ ,  $gz$  es la energía potencial por unidad de masa (Potter et al., 2015).

La ecuación de Bernoulli también se puede interpretar en términos de presión, es decir, la suma de la presión estática, la dinámica y la hidrostática se llama presión total. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli expresa que la *presión total a lo largo de una línea de corriente es constante*.



**Figura 3. Presión estática, dinámica y de estancamiento**

Fuente: (Cimbala & Cengel, 2001)

### 2.2.2 Presión de estancamiento:

La presión de estancamiento representa la presión en un punto en donde el fluido se detiene totalmente de manera isentrópica. En la Figura 3 se muestran la presión estática, la dinámica y de estancamiento de un flujo en un punto específico. Cuando la presión estática y de estancamiento se miden en un lugar especificado, puede calcularse la velocidad del fluido en ese lugar. La suma de la presión estática y la dinámica se llama presión de estancamiento y se expresa como lo muestra la Ecuación 2.

$$P_{\text{estancamiento}} = P + \frac{\rho V^2}{2} \text{ (kPa)} \quad \text{Ecuación 2}$$

### 2.2.3 Conservación de la masa: la ecuación de continuidad

La ley de conservación de la masa dice que la razón neta de cambio de masa dentro del volumen de control es igual a la razón a la que fluye la masa hacia el volumen de control menos la razón a la que

fluye la masa hacia afuera del volumen de control (Sataloff et al., 1995) , esto se expresa en la Ecuación 3:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_{Ent} \dot{m} - \sum_{Sal} \dot{m} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde el flujo masico  $\dot{m}$  en [Kg/s] puede expresarse como:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $\dot{V}$  es el flujo volumétrico y se puede expresar como:

$$\dot{V} = vA \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $v$  es la velocidad promedio del flujo y  $A$  es el área transversal por donde pasa el flujo en [ $m^2$ ]. Al remplazar la Ecuación 4 en la Ecuación 3 se obtiene la ecuación de la continuidad en función del flujo volumétrico del fluido:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_{Ent} \rho \dot{V} - \sum_{Sal} \rho \dot{V} \quad \text{Ecuación 4}$$

La Ecuación 4 también se puede expresar en términos de la velocidad del fluido ( $v$ ) como se muestra en la Ecuación 5:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_{Ent} \rho v A - \sum_{Sal} \rho v A \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $\rho$  es la densidad en [ $kg/m^3$ ].

#### 2.2.4 Humedad del aire

La humedad del aire tiene una relación con la densidad del mismo, cuando la temperatura aumenta las partículas del aire reciben energía y se separan entre si causando una reducción en la densidad.

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse conociendo directamente la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, (se denomina humedad absoluta o específica, o también conocida como relación de humedad) y que se representa por medio de  $w$ , como se observa en la Ecuación 6:

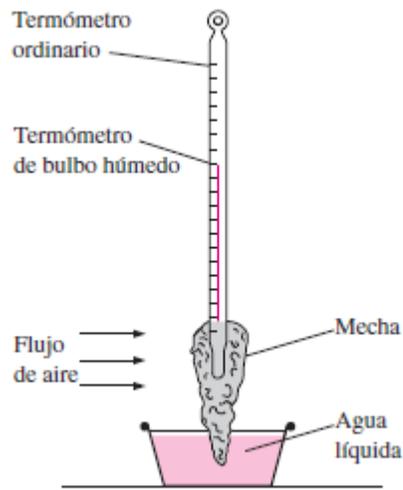
$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $m_v$  [kg vapor de agua] es la masa de agua en forma de vapor, y  $m_a$  [kg aire seco] es la masa de aire seco. La humedad específica también se puede expresar como:

$$w = 0.662 \frac{P_v}{P_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $P_v$  [kPa] es la presión de agua en forma de vapor, y  $P_a$  [kPa] es la presión del aire seco (Cimbala & Cengel, 2001).

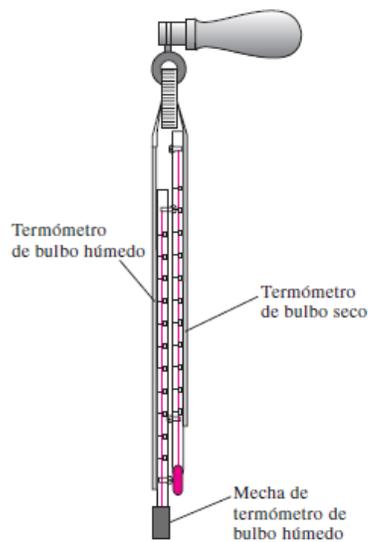
Una de las formas más prácticas para determinar la cantidad de humedad de aire, es mediante el bulbo húmedo y seco. El método consiste en utilizar un algodón húmedo, colocado en el bulbo de un termómetro, mediante un flujo de aire a través de éste, se puede obtener una lectura de temperatura, como se muestra en la Figura 4, dicho valor es comparado con el obtenido mediante la lectura del bulbo seco. Por medio de las tablas psicométricas y los valores de temperatura puede determinarse cuál es el valor de humedad presente en el aire (ÇENGEL, 2011).



**Figura 4: Método para la medición de temperatura de bulbo húmedo**

**Fuente:** (ÇENGEL, 2011)

El dispositivo más común para medir la temperatura de bulbo húmedo es un psicrómetro. Este dispositivo consiste en un termómetro giratorio generalmente accionado por una manivela, la que permite darle rotación al termómetro en vez del aire, este dispositivo se denomina psicrómetro giratorio (Figura 5) (ÇENGEL, 2011).



**Figura 5: Psicrómetro giratorio**

**Fuente:** (ÇENGEL, 2011)

Este tipo de dispositivos son muy utilizados actualmente en estaciones meteorológicas, donde la lectura de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo se da al mismo tiempo. Sin embargo, con los avances tecnológicos, ya pueden darse estas estimaciones de forma más rápida y eficaz. Por medio del uso de una capa polimérica que absorber la humedad, produce un cambio de su capacitancia, que puede llegar a dar una lectura de valores de humedad incluso muy pequeños y en tiempo real (ÇENGEL, 2011).

Sabiendo que la presión total es la suma de la presión del vapor de aire con la presión del aire seco, la Ecuación 7 también se puede expresar como:

$$w = \frac{0.662 P_v}{P - P_v} \text{ (kg vapor de agua /kg aire seco)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde P es la presión total en [kPa].

La cantidad de humedad en el aire tiene un efecto definitivo en las condiciones del ambiente. Sin embargo, las condiciones de la prueba dependen más de la cantidad de humedad que el aire contiene ( $m_v$ ) respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura ( $m_g$ ). La relación entre estas dos cantidades se conoce como humedad relativa  $\varphi$ , que se mide en porcentaje de vapor de agua en el gas [%] (Mueller, 2001).

$$\varphi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde la presión del gas ( $P_g$ ) es igual a la presión de saturación a la temperatura del aire ( $P_{sat@T}$ )

También la humedad relativa se puede expresar como:

$$\varphi = \frac{w * P}{(0.622 + w) * P_g} \quad \text{Ecuación 10}$$

Al despejar la humedad especifica de la anterior expresión, se obtiene:

$$w = \frac{0.622 * \varphi * P_g}{P - \varphi * P_g} \quad \text{Ecuación 11}$$

### 2.2.5 Medición del ruido

La mayoría de los túneles de viento subsónicos funcionan con ventiladores axiales de una etapa que generan ruido y tonos de banda ancha, aleatorios, en la frecuencia del paso del alabe (número de álabes por revoluciones por segundo) y sus armónicos. La mayoría de los ventiladores axiales se operan a baja velocidad para mayor eficiencia, por lo que los armónicos tonales del ventilador generalmente dominan las bajas frecuencias del espectro de ruido de fondo. Generalmente, los tonos alcanzan su punto máximo en el primer o segundo armónico, luego decaen rápidamente y se enmascaran por el ruido de banda ancha en frecuencias más allá del cuarto o quinto armónico. Aunque la intensidad del ruido del ventilador depende en gran medida de las perturbaciones de entrada, una estimación del nivel de potencia acústica del ventilador (tonal y de banda ancha) en una banda de un tercio de octava se puede hacer usando la siguiente ecuación empírica (Mueller, 2001):

$$\begin{aligned} L_w(f) = & -58.2 - 10 \log_{10}[1 + (4.4x)^2] + 10 \log_{10}(f) \\ & + 40 \log_{10}N + 70 \log_{10}D_t + 10 \log_{10}Q \\ & + 10 \log_{10}F_n + 0,3\beta(\text{dB rel } 10^{-12} \text{ watts}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde  $x = \frac{Qf}{N}$ ,  $Q = 1 - \left(\frac{D_H}{D_t}\right)^3$ ,  $D_H$  = diámetro del cubo en metros [m],  $D_t$  = diámetro desde el centro de la turbina hasta la punta del aspa en [m],  $f$  = frecuencia central de la banda de un tercio de octava, Hz,  $N$  = velocidad de rotación en rpm,  $F_n$  = número de ventiladores,  $\beta$  = ángulo de inclinación de las palas a 3/4 de radio con respecto al plano del ventilador (Dimensional, 2014).

## 2.3 SIMILARIDAD, CONCEPTOS DE SIMILARIDAD Y NÚMEROS ADIMENSIONALES

La teoría matemática y los resultados experimentales han desarrollado soluciones prácticas de muchos problemas, muchas estructuras se proyectan y construyen solo después de haber efectuado un amplio estudio sobre modelos, la aplicación del análisis dimensional y de semejanza permite al ingeniero organizar y simplificar las experiencias, así como el análisis de los resultados obtenidos (Giles, 2009)

### 2.3.1 Análisis dimensional

El análisis dimensional trata de las relaciones matemáticas de las dimensiones que cuantifican las magnitudes físicas. En toda ecuación que exprese una relación física entre magnitudes debe verificarse la igualdad a sustituirse las magnitudes por valores numéricos y también por sus dimensiones. En general todas las magnitudes físicas pueden reducirse a una relación entre las

magnitudes fundamentales, tales como; fuerza  $F$ , longitud  $T$ , y Masa  $M$ . Entre las aplicaciones se incluyen conversión de un sistema de unidades en otro, desarrollo de ecuaciones, reducción del número de variables requeridas en un programa experimental, y establecimiento de los principios para el diseño de modelos (Giles, 2009).

Los modelos pueden ser verdaderos o distorsionados, los modelos verdaderos tienen todas las características significativas del prototipo real, transformadas a escala ( semejanza geométrica) y que satisfacen todas las restricciones del diseño ( semejanza cinemática y dinámica (Cimbala & Cengel, 2001).

### 2.3.2 Similaridad?

La similaridad es predecir las condiciones de un prototipo basándose en la observación de modelos a escala del mismo (Potter et al., 2015). Para ayudar al diseñador frecuentemente se realizan estudios con modelos de estructuras y diseños, lo cual permiten una observación visual del flujo y hace posible obtener datos numéricos, si se desea obtener datos cuantitativos correctos de un estudio con un modelo y prototipo esta similaridad requiere (1) que haya similitud geométrica exacta, por ejemplo, la rugosidad de las superficies (2) que la razón de las presiones dinámicas en puntos correspondientes sea una constante. Este segundo requerimiento se puede expresar como similitud cinemática, por ejemplo, que las corrientes de flujo sean geoméricamente similares (Streeter & Victor L, 2000).

Existen tres condiciones necesarias para la similitud completa entre un modelo y un prototipo, éstas son; la similitud geométrica, la similitud cinemática y la similitud dinámica.

#### Similitud geométrica

El modelo debe tener la misma forma que el prototipo, pero se le puede escalar por algún factor de escala constante (Giles, 2009). Entre el modelo y el prototipo existe similitud geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homologas en modelo y prototipo son iguales (Cimbala & Cengel, 2001). La similitud geométrica entre el modelo y el prototipo debe de cumplirse de acuerdo a las siguientes similitudes:

- Similitud de longitudes

Para tener similitud longitudinal entre el modelo de la turbina eólica y el prototipo se puede elegir una de las distancias más destacadas en su funcionamiento, como podría serlo el diámetro de la turbina.

$$\frac{L_m}{L_p} = L_r$$

**Ecuación 13**

Donde  $L_m$  es una longitud característica del modelo y se mide en [m],  $L_p$  es una longitud característica del prototipo y se mide en [m], y  $L_r$  es la longitud relativa adimensional que relaciona a longitud del modelo y del prototipo.

- Similitud de áreas

Para cumplir con la similitud de áreas entre el modelo de la turbina y el prototipo se puede elegir el área de la circunferencia que forma la turbina al girar

$$\frac{A_{modelo}}{A_{prototipo}} = \frac{L_{modelo}^2}{L_{prototipo}^2} = L_{rel}^2 = L_r^2$$

**Ecuación 14**

Donde  $A_{modelo}$  ó  $L_{modelo}^2$  es un área característica del modelo y se mide en [ $m^2$ ],  $A_{prototipo}$  ó  $L_{prototipo}^2$  es un área característica del prototipo y se mide en [ $m^2$ ],  $L_{rel}^2$  y  $L_r^2$  es el área relativa adimensional que relaciona las áreas del modelo y del prototipo.

### Similitud cinemática

Específicamente, para que se dé la similitud cinemática, la velocidad en puntos correspondientes del modelo y el prototipo debe escalar en magnitud y dirección relativa. La similitud geométrica se puede considerar como equivalencia en escala de longitud y la similitud cinemática como equivalencia en escala de tiempo. La similitud geométrica es un requisito para la similitud cinemática (Giles, 2009).

Entre el modelo y el prototipo existe semejanza cinemática si: (1) las trayectorias de las partículas móviles son geoméricamente semejantes y (2) las relaciones entre las velocidades de las partículas son iguales, a continuación, se dan las siguientes relaciones (Giles, 2009):

- *Similitud de velocidad*

Para cumplir con la semejanza cinemática se puede establecer la velocidad a la que gira la turbina del modelo y a la que gira el prototipo

$$\text{Velocidad: } \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m/T_m}{L_p/T_p} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_m}{T_p} = \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_r}{T_r} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde  $V_m$  es la velocidad del modelo y se mide en  $[m/s]$ ,  $V_p$  es la velocidad del prototipo y se mide en  $[m/s]$ ,  $L_m$  es una longitud característica del modelo y se mide en  $[m]$ ,  $L_p$  es una longitud característica del prototipo y se mide en  $[m]$ ,  $T_m$  es un tiempo característico del modelo y se mide en  $[s]$ ,  $T_p$  es un tiempo característico del prototipo y se mide en  $[s]$ ,  $L_r$  es la longitud relativa adimensional que relaciona a longitud del modelo y del prototipo, y  $T_r$  es el tiempo relativo adimensional que relaciona al tiempo del modelo y al del prototipo.

- *Similitud de aceleración*

$$\text{Aceleración: } \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m/T_m^2}{L_p/T_p^2} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_m^2}{T_p^2} = \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde  $a_m$  es la aceleración del modelo en  $[m/s^2]$ ,  $a_p$  es la aceleración del modelo en  $[m/s^2]$ ,  $T_m^2$  es el tiempo al cuadrado del modelo y se mide en  $[s^2]$ , Donde  $T_p^2$  es el tiempo al cuadrado del prototipo y se mide en  $[s^2]$ .

- *Similitud de caudal*

El caudal de aire que fluye en la turbina modelo y en el prototipo deben de ser semejantes

$$\text{Caudal: } \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} \cdot \frac{T_m}{T_p} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $Q_m$  es el caudal del modelo y se mide en  $[m^3/s]$ ,  $Q_p$  es el caudal del prototipo y se mide en  $[m^3/s]$

### Similitud dinámica

Entre dos sistemas semejantes, geométrica y cinemáticamente, existe semejanza dinámica si las relaciones entre fuerzas Homólogas entre el modelo y el prototipo son las mismas.

Las condiciones requeridas para la semejanza completa se obtienen a partir del segundo principio de movimiento de Newton,  $\sum F = ma$ . Las fuerzas que actúan pueden ser cualquiera de las siguientes o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a las presiones, fuerzas gravitatorias, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas. Entre modelo y prototipo se desarrolla la siguiente relación de fuerza (Ecuación 18) (Ramos, 2011)

$$\frac{\sum F(\text{viscosas} \rightarrow \text{de presión} \rightarrow \text{gravitatorias} \rightarrow \text{tens. superf} \rightarrow \text{elásticas})_m}{\sum F(\text{viscosas} \rightarrow \text{de presión} \rightarrow \text{gravitatorias} \rightarrow \text{tens. superf} \rightarrow \text{elásticas})_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde  $M_m$  es la masa del modelo en [kg] y  $M_p$  es la masa de prototipo en [kg].

### 2.3.3 Números adimensionales

Un número adimensional en la mecánica de los fluidos es una expresión matemática que relaciona de forma concisa las distintas fuerzas que afectan el flujo, el resultado de esta expresión es un valor adimensional, la magnitud de un número adimensional representa las condiciones en las que se encuentra el sistema analizado.

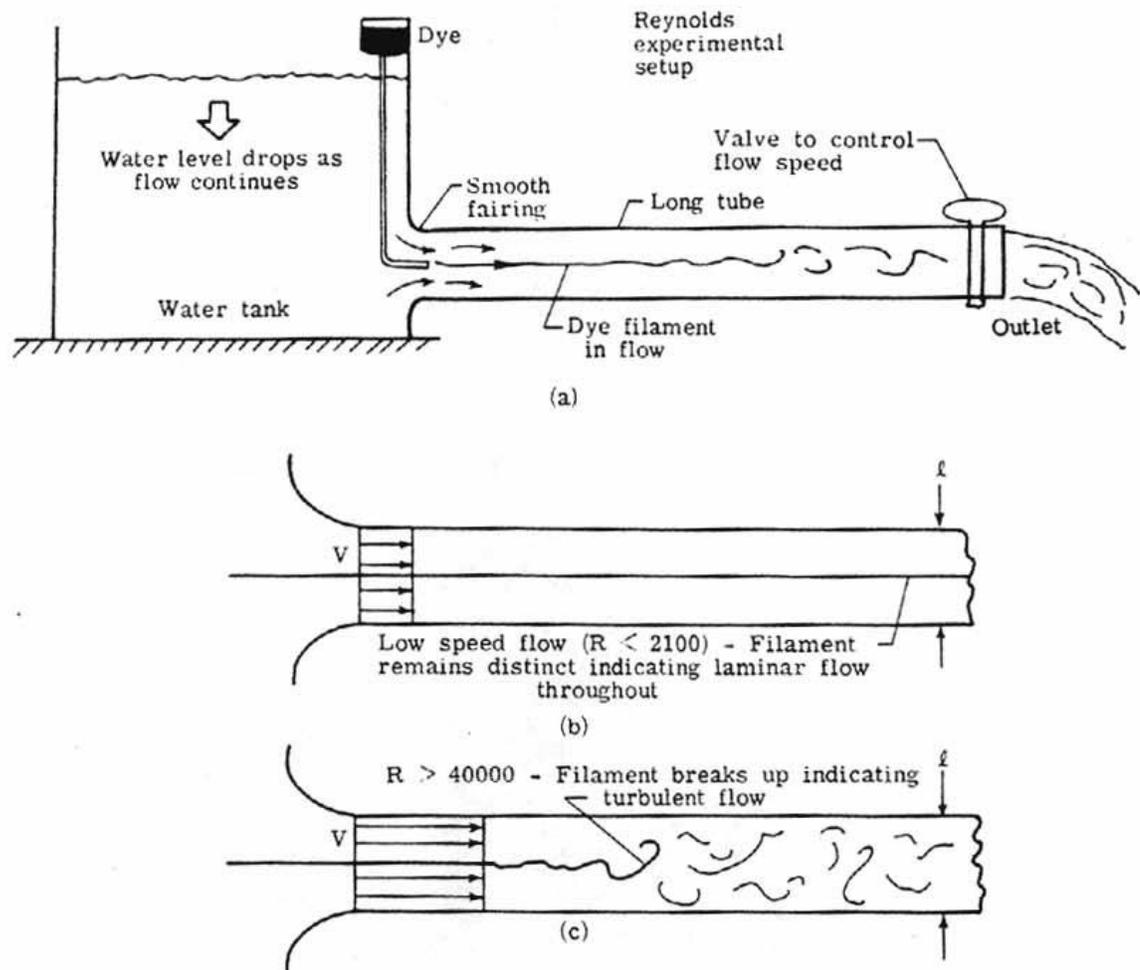
Los números adimensionales sirven para minimizar la cantidad de variables y compactar el resultado, agrupando las variables más representativas del proceso o fenómeno físico y haciéndolo aplicable para otras situaciones similares (Potter et al., 2015).

#### 2.3.3.1 Número de Reynolds, Re

El número de Reynolds es una cantidad adimensional, y es el parámetro adimensional más útil y conocido en toda la mecánica de fluidos, el cual relaciona la densidad, la viscosidad dinámica, la velocidad del flujo y una dimensión característica por donde el flujo circula. Mediante el número de Reynolds se puede caracterizar el flujo en laminar o turbulento

- Flujo laminar:

Se puede definir como el comportamiento ordenado de las partículas del fluido, donde las capas del fluido se deslizan una sobre otra (Sataloff et al., 1995).



**Figura 6. Experimento de Reynolds**

**Fuente:** (Sataloff et al., 1995)

En la Figura 6 se muestra el experimento de Reynolds el cual se basa en dejar fluir tinta en una corriente de agua con el fin de visualizar el comportamiento del fluido, cuando la tinta no presenta mayores alteraciones y su movimiento es lineal se considera que el flujo es laminar, en caso contrario se considera un fluido turbulento (Sataloff et al., 1995).

- Flujo turbulento:

Al contrario del flujo laminar, el flujo turbulento es el que describe un comportamiento desordenado de las partículas del fluido, en este tipo de flujo no se logra establecer un movimiento ordenado de las capas de fluido. Este tipo de flujo se presenta cuando el número de Reynolds alcanza valores altos y se crean fluctuaciones en el fluido (Sataloff et al., 1995).

El comportamiento de un fluido en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Por esta razón, se necesita un medio para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo en realidad (Cimbala & Cengel, 2001), El número de Reynolds se define con la siguiente ecuación:

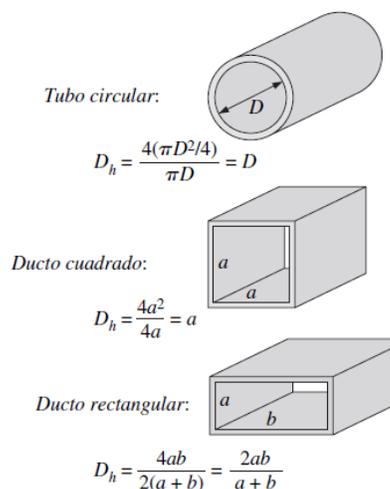
$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\rho * V_{prom} * D}{\mu} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde  $V_{prom}$  es la velocidad promedio del flujo en [m/s],  $D$  es la longitud característica de la geometría por donde se desplaza el flujo, y  $\nu = \mu/\rho$  es la viscosidad cinemática del fluido [m<sup>2</sup>/s],  $\mu$  es la viscosidad dinámica [N\*s/ m<sup>2</sup>] o, [kg/m\*s], y  $\rho$  es la densidad en [kg/ m<sup>3</sup>].

Para flujo a través de tuberías no-circulares, la longitud característica, representada por el diámetro ( $D$ ) en la ecuación 19, se conoce como el diámetro hidráulico  $D_h$ , que se define de la siguiente forma.

$$D_h = \frac{4Ac}{p} \quad \text{Ecuación 20. Diámetro hidráulico}$$

Donde  $Ac$  es el área de sección transversal de la tubería y  $p$  es su perímetro húmedo, como se observa en la Figura 7

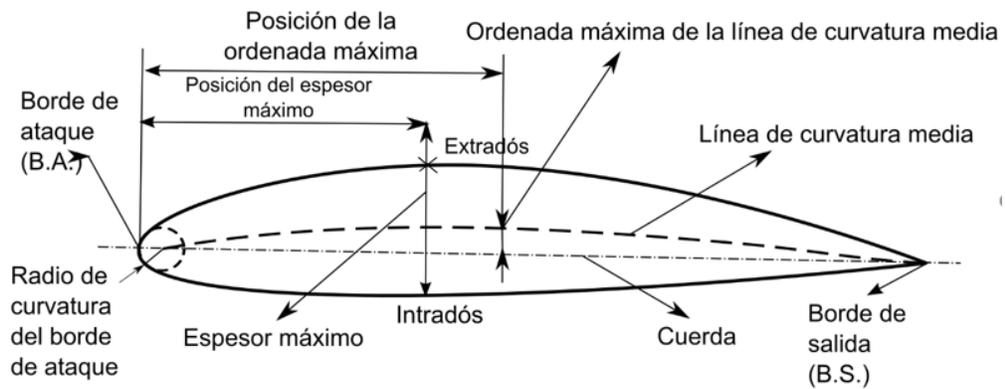


**Figura 7. El diámetro hidráulico**

**Fuente:** (Connor, 2009)

En la Figura 7 se tiene el diámetro hidráulico  $D_h$  para diferentes áreas transversales, para nuestro caso, se espera que la sección transversal del área de pruebas sea cuadrada.

Para el desarrollo de la presente tesis, podemos decir que el diámetro hidráulico (o longitud característica) cambia según la forma de la pieza que se está poniendo a prueba en el túnel de viento, en este caso como se trata de una turbina eólica, por lo tanto, el diámetro hidráulico será el diámetro de la turbina, y en caso de que se ponga a prueba un perfil aerodinámico de una de las aletas su longitud característica será la longitud la cuerda, como se puede ver en la Figura 8 (Pinzón Paz, 2013).



**Figura 8. Estructura de un perfil alar**

Fuente: (Pinzón Paz, 2013)

### 2.3.3.2 Número de Nusselt, Nu

El número de Nusselt es el cociente entre el calor transmitido por convección y el calor transmitido por conducción, es decir, este número es la forma matemática de comparar qué tan eficiente es la transferencia de calor cuando el aire se mueve alrededor de un sólido (convección) y cuando el aire se encuentra estático (conducción). (Cimbala & Cengel, 2001). El número de Nusselt se define como:

$$Nu = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} = \frac{L * h}{k} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde L es longitud característica en [m], h es coeficiente de transferencia de calor por convección en [W/m<sup>2</sup> K] y, k es la conductividad térmica en [W/m K]

### 2.3.3.3 Numero de Prandtl, Pr

El número de Prandtl relaciona la disipación de energía dinámica o cinemática con la disipación de energía por conducción de calor. El número de Pr expresa la relación entre la capacidad de disipar calor por los efectos viscosos y la capacidad de transmitir calor por los efectos moleculares (Domingo, 2011).

$$Pr = \frac{\text{Difusión viscosa}}{\text{Difusión termica}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu * Cp}{k} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde  $\mu$  es viscosidad dinámica en [kg/m\*s], Cp es calor específico en [J/kg K], y k es conductividad térmica en [W/m K]

### 2.3.3.4 Numero de Euler, Eu

El número de Euler es la relación entre la energía asociada a un gradiente de presión y la energía cinética de un flujo. Por ejemplo, en flujos confinados que trabajan a alta presión, se tiene un Eu grande, en cambio en flujo con superficie libre el Eu es pequeño (Oulad, 2010).

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho V^2} = \frac{\text{Diferencia de presión}}{\text{Presión dinámica}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde  $\Delta P$  es el cambio de presión en [Pa],  $\rho$  es la densidad del aire en [kg/m<sup>3</sup>], y V es la velocidad del fluido en [m/s].

### 2.3.4 Viscosidad dinámica de los gases

Para el caso del aire, las moléculas tienen mayor movilidad y la viscosidad se define por el paso de moléculas entre las distintas capas del fluido. Es decir, entre dos capas con distintas velocidades de circulación, la capa más rápida se desacelera, mientras que la más lenta es acelerada por la más rápida, este comportamiento entre las dos capas da un comportamiento viscoso en el gas. Este movimiento está determinado por la temperatura del gas, pasaran moléculas de la capa rápida a la más lenta y viceversa, este paso es más rápido a medida que la temperatura aumenta, lo que aumenta la relación de aceleración o frenado entre capas aumentando la viscosidad con la temperatura (Domingo, 2011).

En los gases la viscosidad se expresa como función de la temperatura por medio de la correlación de Sutherland.

$$\mu = \frac{aT^{\frac{1}{2}}}{1 + b/T}$$

**Ecuación 24**

Donde  $T$  es la temperatura absoluta (K),  $a$  y  $b$  son constantes halladas experimentalmente (es suficiente con medir las viscosidades a dos temperaturas diferentes para determinar estas constantes). Para el aire  $a = 1.458 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m} * \text{s} * ^\circ\text{K}^{1/2})$  y  $b = 110.4 \text{ }^\circ\text{K}$  en condiciones atmosféricas estándar. La viscosidad de los gases es independiente de la presión cuando ésta es baja (desde un pequeño porcentaje de 1 atm hasta varias atm), pero al aumentar la presión la viscosidad también aumenta debido al incremento de la densidad del aire y al incremento en la densidad (Cimbala & Cengel, 2001).

### 2.3.5 Viscosidad cinemática de los gases

La relación entre la viscosidad dinámica y la densidad es definida mediante la viscosidad cinemática de un fluido, esta es una medida de la oposición que ofrece un fluido a ser cortado por fuerzas gravitacionales, o resistencia a fluir. Se determina midiendo el tiempo en segundos requerido para que un volumen fijo de fluido fluya por gravedad una distancia conocida (Jaramillo, 2007).

$$v = \frac{\text{viscosidad dinamica}}{\text{densidad}} = \frac{\mu}{\rho}$$

**Ecuación 25**

La viscosidad expresa en unidades llamadas poise. La viscosidad a temperatura ambiente del aire es 0.018 cP.

La viscosidad de un gas se mide determinando la razón de flujo a través de un tubo de vidrio de diámetro pequeño. En 1844 Jean Louis Marie Poiseuille demostró que el volumen del líquido ( $V$ ) que fluye en un tubo capilar por la unidad del tiempo ( $t$ ) es proporcional al radio del tubo ( $R$ ), de la presión que empuja al líquido en del tubo ( $P$ ), de la longitud del tubo ( $L$ ), y de la viscosidad del líquido ( $\mu$ ). El volumen de líquido que fluye a través de una sección transversal dada en un tiempo según Ecuación 26, es:

$$V = \frac{\pi * R^4 * P}{8 \mu * L} t$$

**Ecuación 26**

### 2.3.6 Densidad del aire

Las mediciones para determinar la masa de un cuerpo se realizan con instrumentos para pesar, (balanzas o básculas). Estos instrumentos miden la fuerza que ejerce la aceleración de la gravedad sobre el cuerpo. Salvo en algunas aplicaciones muy específicas, las mediciones con las balanzas o básculas se realizan inmersas en un fluido, el aire. Por el principio de Arquímedes, el aire ejerce una

fuerza de empuje verticalmente hacia arriba, en dirección contraria a la fuerza que ejerce la aceleración de la gravedad. Esta fuerza, conocida como fuerza de flotación, se obtiene a partir del volumen del cuerpo y la densidad del aire. La densidad del aire se expresa mediante la Ecuación 27 que se muestra a continuación.

$$\rho_a = \frac{P M_a}{ZRT} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $\text{kg/m}^3$ ,  $P$  es la presión atmosférica, Pa,  $T$  es la temperatura termodinámica del aire, K,  $M_a$  es la masa molar del aire seco,  $\text{kg mol}^{-1}$ ,  $M_v$  es la masa molar del agua,  $\text{kg mol}^{-1}$ ,  $R$  es la constante molar de los gases,  $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $Z$  es el factor de compresibilidad,  $X_v$  es la fracción molar del vapor de agua  $X_v$  (Manuel et al., 2010)

## 2.4 TEORÍA DE AEROGENERADORES

Un aerogenerador extrae energía cinética del viento, cuando la turbina del aerogenerador gana energía el viento pierde velocidad, y sólo se ve afectada la masa de aire que atraviesa aguas arriba y aguas abajo el rotor. En la Figura 9 se asume una separación entre la masa del aire que entra a la turbina y el aire circundante, esto permite esquematizar el flujo de corriente en un tubo con una sección transversal circular, si se considera que el fluido permanece constante y que el aire no se comprime, el área del mismo debe expandirse para adaptarse a la corriente con menor velocidad (Uribe et al., 2016).

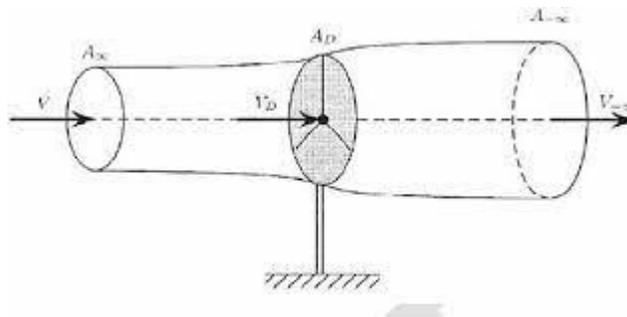
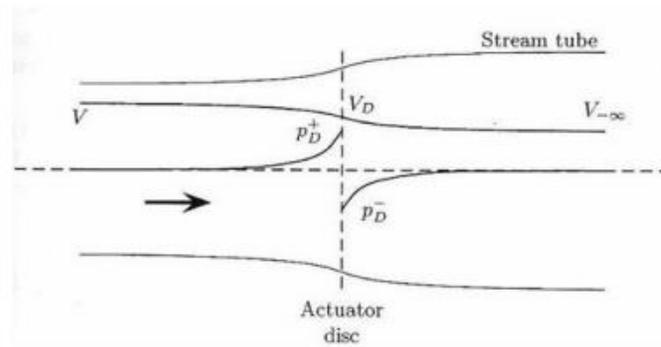


Figura 9. Tubo de corriente en un aerogenerador

Fuente: (Oulad, 2010)

La velocidad disminuye y la presión aumenta en virtud del principio de Bernoulli, hasta alcanzar una velocidad ( $V_D$ ) justo en el plano del rotor y un valor mínimo  $V_{-\infty}$ , después de alejarse del rotor como

se muestra en la Figura 10. Entre tanto, la presión parte de un valor mínimo  $P_D^-$  después de cruzar el rotor hasta alcanzar un valor  $P_{-\infty}$  igual a  $P_v$ . En resumen, la presión recupera su valor, sin embargo, la velocidad del viento no lo hace como consecuencia de transformar la energía cinética en energía mecánica (Oulad, 2010).



**Figura 10. Distribución de presiones y velocidades aguas arriba y aguas debajo de las aspas**

**Fuente:(Oulad, 2010)**

#### 2.4.1 Ley de BETZ

La ley de Betz es una relación matemática que sirve para establecer un valor máximo de la potencia alcanzada por un aerogenerador, esta ley surge a partir del estudio de los principios de la conservación de la energía que entra y sale cuando el aire fluye por una turbina, el coeficiente de Betz es de  $16/27$  (0,593) (actualmente, las turbinas más modernas y eficientes superan ligeramente el 50%) (Uribe et al., 2016).

#### **Determinación matemática de la ley de Betz:**

Se tiene la Ecuación 28, que representa la potencia ideal de un aerogenerador, se observa que esta ecuación no posee un coeficiente de potencia ni una eficiencia, con lo cual se estaría diciendo que toda la energía del viento es ganada por las aspas de aerogenerador, lo que físicamente es imposible, ya que esto significaría que la velocidad del viento al pasar la turbina es igual a cero, pues toda la energía es ganada por el aerogenerador

$$P_0 = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad \text{Ecuación 28}$$

Para determinar la potencia real se tienen las energías cinéticas de entrada y salida al aerogenerador

$$E_{c1} = \frac{1}{2} * m * v_1^2, E_{c2} = \frac{1}{2} * m * v_2^2 \quad \text{Ecuación 29}$$

Haciendo balance de energía en el sistema del aerogenerador, la potencia ganada por el generador o energía cinética transferida al aerogenerador ( $E_{cT}$ ) es la resta de la energía cinética que entra menos la energía cinética que sale.

$$E_{cT} = E_{c1} - E_{c2} \quad \text{Ecuación 30}$$

Es decir:

$$E_{cT} = \frac{1}{2} * m * v_1^2 - \frac{1}{2} * m * v_2^2 = \frac{1}{2} * m(v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Ecuación 31}$$

Asumiendo la masa como un flujo másico ( $m$  se expresa como  $m'$ )

$$E_{cT} = \frac{1}{2} * m' * (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Ecuación 32}$$

El flujo másico ( $m' = \rho * v * A$ ), y asumiendo la velocidad  $v$  como el promedio entre la velocidad de entrada y de salida del aerogenerador ( $v = (v_1 + v_2)/2$ ), la Ecuación 32 se puede expresar como:

$$P = E_{cT} = \frac{1}{4} * (v_1 + v_2) * (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Ecuación 33}$$

Se tiene que la eficiencia es el cociente entre el valor ideal y el valor real  $\eta = \frac{P}{P_0}$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right\} \left\{ 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right\} \quad \text{Ecuación 34}$$

Si presentamos en una gráfica a  $\frac{P}{P_0}$  es función de  $\frac{v_2}{v_1}$  tenemos:

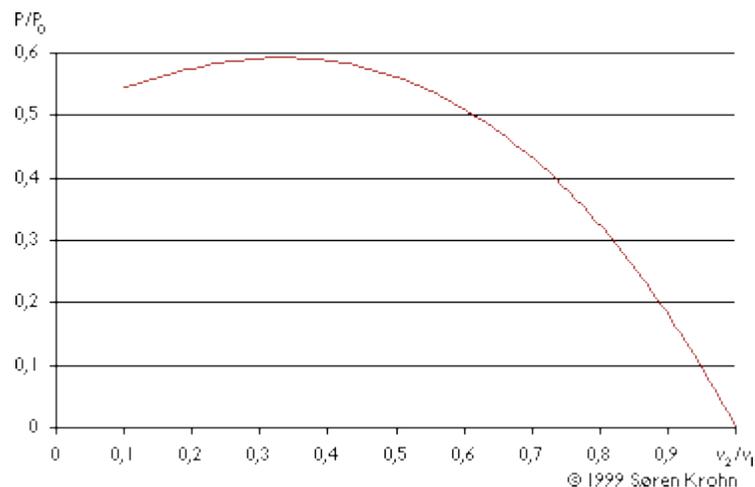


Figura 11.  $P/P_0$  en función de  $V_2/V_1$

Fuente:(Andreu Sanchez, 2003)

Podemos ver que la función alcanza su máximo para  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ , y que el valor máximo de la potencia extraída del viento es de 0,59 veces ó 16/27 de la potencia total del viento, lo que indica que este es el límite teórico máximo al cual se puede aspirar al momento de captar energía del viento con un aerogenerador (Andreu Sanchez, 2003).

#### 2.4.1.1 Potencia del aerogenerador

La potencia de un aerogenerador, depende del área del barrido del rotor, la velocidad del viento y la densidad del fluido que incide sobre el rotor, para este caso es el aire. La relación de estos parámetros está expresada por la Ecuación 35, donde además se tiene en cuenta el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) y la eficiencia del aerogenerador (Uribe et al., 2016).

La potencia alcanzada por un aerogenerador se define como:

$$P_L = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * \eta \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde  $P_L$  es la potencia límite del aerogenerador,  $C_p$  es el coeficiente de potencia,  $\rho$  densidad del aire,  $A$  es el área de barrido de las aspas del aerogenerador,  $v$  es la velocidad de entrada del aire y  $\eta$  es la eficiencia de un aerogenerador.

Determinación de la potencia del aerogenerador:

$$P = C_p * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi}{4} * d^2 * v^3 * \eta$$

$$P = C_p * \frac{\pi}{8} * \rho * d^2 * v^3 * \eta$$

Donde:

$$C_p \leq 0.593, \eta \leq 0.3, \rho = 1.3 \text{ kg/m}^3, d = 0.6 \text{ m}$$

Como parámetro de diseño se ha establecido que la velocidad máxima del viento en la cámara de prueba será de 30 m/s

$$P = 0.592 * \frac{\pi}{8} * 1.3 \text{ kg/m}^3 * 0.6^2 * \left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 * 0.3$$

$$P = 881.3 \text{ W}$$

#### 2.4.1.2 Determinación de la velocidad de rotación

Para obtener la velocidad a la que gira el rotor del aerogenerador se utiliza la Ecuación 36 de la velocidad específica y se despeja la velocidad angular  $w$ .

$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde  $\lambda$  es la velocidad específica (velocidad tangencial de la pala/velocidad del viento),  $w$  es la velocidad angular en [rad/s],  $R$  es el radio de la turbina [m],  $v$  velocidad de diseño del viento [m/s]

Para transformar la velocidad angular en rpm se tiene:

$$w = \frac{60\lambda v}{2\pi R} \quad \text{Ecuación 37}$$

#### 2.4.1.3 Fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga se debe a la rotación del equipo y es la que tiende a alejar las palas del eje de rotación. Tiene la siguiente forma:

$$F = mw^2R \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde  $m$  es la masa del elemento en rotación.

#### 2.4.1.4 Torque de Turbina

El torque en el eje de la turbina eólica ( $\tau$ ) se calcula a partir de la potencia rotacional:

$$P = \tau * w \quad \text{Ecuación 39}$$

Incorporando la potencia de la Ecuación 27 en la Ecuación 31, mediante:

$$\tau = \frac{C_p \rho \pi R^2 v^3}{2 w} \quad \text{Ecuación 40}$$

Considerando (Ecuación 36) y sustituyendo en (Ecuación 40) se tiene:

$$\tau = \frac{C_p}{\lambda} * \frac{1}{2} * \rho \pi R^3 v^3 \quad \text{Ecuación 41}$$

De donde se establece que:

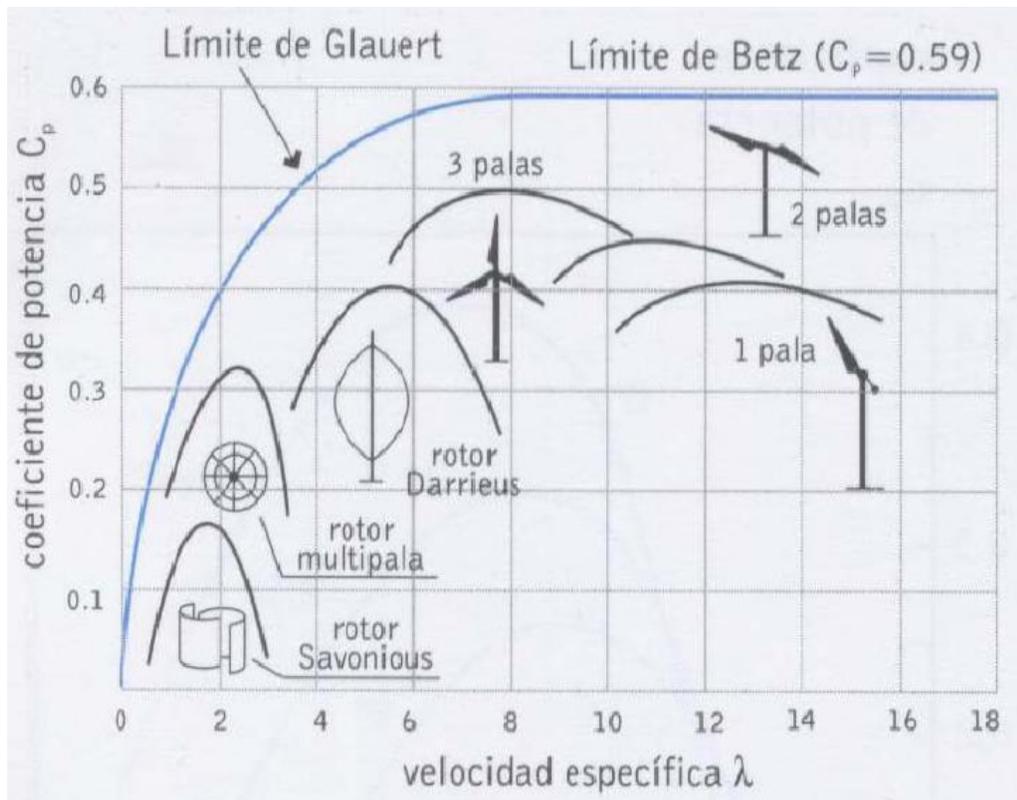
$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde  $C_t$  es el Coeficiente de torque, con lo que Ecuación 41 se expresa como:

$$\tau = C_t * \frac{1}{2} * \rho \pi R^3 v^3 \quad \text{Ecuación 43}$$

#### 2.4.1.5 Coeficiente de potencia

Para determinar el número adecuado de aspas para una turbina para baja potencia se puede observar el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) de una turbina eólica en gráficos similares al de la Figura 12.



**Figura 12. Comportamiento del coeficiente de potencia  $C_p$  para turbinas eólicas con diferente número de pala**

**Fuente: (MIREZ TARRILLO, 2014)**

Considerando que nuestra turbina tiene una velocidad de viento de máximo 30 m/s, un diámetro de las aspas de 0.6 m y una velocidad angular máxima de 50 rad/s aproximadamente, según la Ecuación 36 se tiene que:

$$\lambda = \frac{100 \text{ rad/s} * 0.3\text{m}}{30 \text{ m/s}} = 1$$

Para un modelo ideal con infinito número de elipses se tendría un generador con un coeficiente de potencia con una curva como la que se muestra cubriendo la parte superior de la Figura 13, la cual se llama límite de Glavert (53%) que es la eficiencia máxima alcanzada en un modelo de turbina ideal, pero como se sabe eso significaría el desarrollo de un diseño de una turbina que aún no se ha obtenido, por lo tanto, se consideran los coeficientes de potencia para los diseños de aerogeneradores más comunes en la industria, obtenido que la turbina que más se acerca al  $C_p$  ideal es la de rotor de tres palas.

#### 2.4.1.6 Ángulo de ataque

Este coeficiente de potencia se puede interpretar como el rendimiento que presenta el rotor eólico y depende fundamentalmente de la velocidad del viento, de la velocidad de giro de la turbina y del ángulo de calado de las palas. De forma más concisa, esta dependencia se puede sintetizar en dos parámetros adimensionales: el ángulo de paso de pala,  $\theta$ , y el coeficiente de velocidad específica,  $\lambda$ , que es la relación entre la velocidad lineal en la punta de la pala y la velocidad del viento incidente.

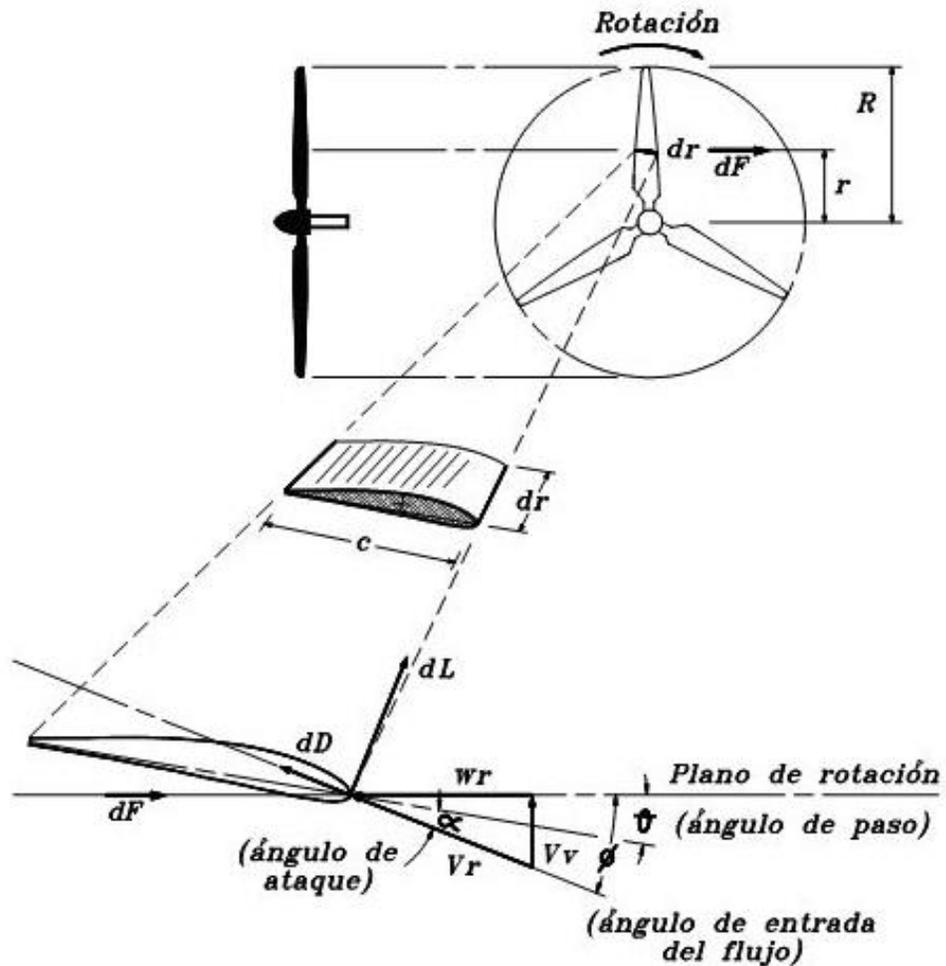


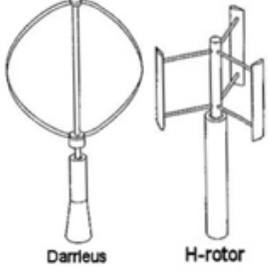
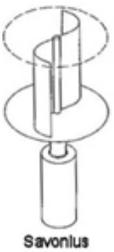
Figura 13. Ángulos de un perfil alar

Fuente: (Jaramillo, 2003)

#### 2.4.2 Selección de la turbina eólica

Para seleccionar la turbina se consideran aspectos como; la facilidad de adquisición en el mercado, el costo y que sea un modelo típicamente utilizado en aerogeneradores, se emplea la Tabla 1 para ayudar a definir las características de cada tipo de turbina:

**Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de turbina**

	Eje Horizontal	Eje Vertical Sustentación	Eje Vertical Arrastre
			
<b>Ventajas</b>	Eficiente Ampliamente probado Muy utilizado Más económico Muchos modelos	Eficiencia aceptable Indiferente a la dirección del viento Menos sensibilidad a turbulencia Crea pocas vibraciones	Producto probado Silencioso Robusto y fiable Indiferente a la dirección del viento Puede aprovechar flujos turbulentos Crea pocas vibraciones
<b>Desventajas</b>	No soporta adecuadamente cambios frecuentes en la dirección del viento No tolera bien vientos racheados	No muy probado Más sensible a la turbulencia que el Savonius	Baja eficiencia Económicamente costoso

(Fuente: Randall 2003, Timmers 2001, and Clear Skies 2003)

**Fuente:** (Lanzarote, 2003)

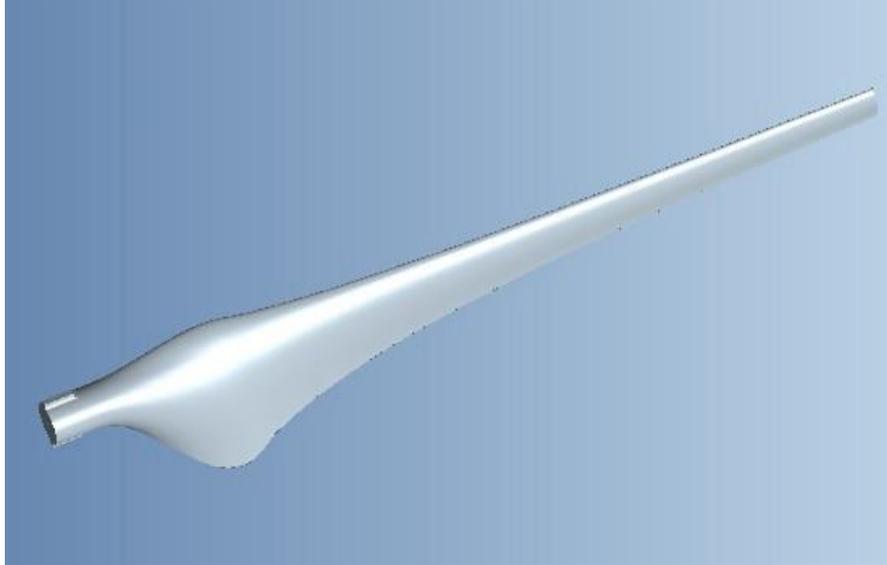
Según lo anterior, el modelo de turbina de eje horizontal es ampliamente utilizado, probado, económico, con gran variedad de modelos comerciales típicamente utilizados en aerogeneradores.

Debido a que el tamaño de la turbina juega un papel importante ya que la sección de prueba tiene un área cuadrada con un metro de lado, debe de buscarse en el mercado la turbina de tamaño ideal, se elige una turbina de tres aspas de 61 cm de diámetro reducida de un aerogenerador comercial de 20 metros de diámetro. El perfil aerodinámico es un NACA 4412, que es típico para aerogeneradores (Albayrak, 2000).

#### 2.4.2.1 Perfiles naca

La nomenclatura NACA sirve para definir la geometría de un perfil alar a partir de un código alfanumérico, para este caso se ha utilizado un perfil de 4 dígitos tipo NACA ABCD(*El Código NACA de 4 y 5 Dígitos*, 2021), el cual se puede explicar cómo sigue (ver Figura 8):

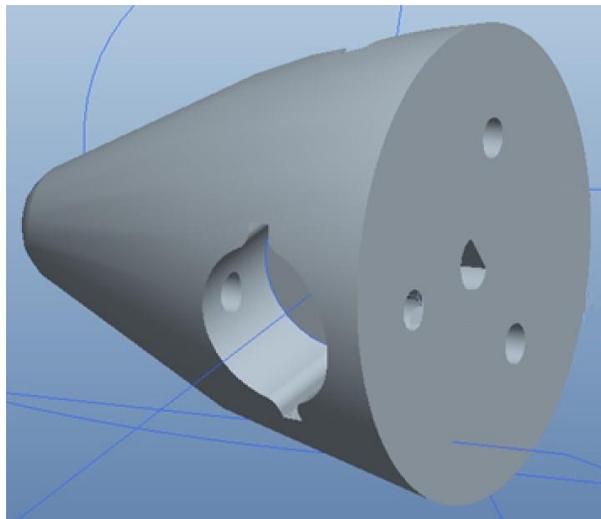
- A: ordenada máxima de la línea media en porcentaje de la cuerda
- B: posición de la ordenada máxima en decimas de la cuerda
- CD: Espesor máximo en porcentaje de la cuerda



**Figura 14. Modelo NACA 4412 recomendado en el proyecto**

**Fuente:** (Albayrak, 2000)

Las aspas (Figura 14) están soportadas en el cubo (hub en inglés) son Modelo NACA 4412 recomendado en el proyecto, a continuación, se observa el modelo del cubo (Figura 15):



**Figura 15: Modelo del cubo para la turbina eólica**

**Fuente:** (Albayrak, 2000)



### 3. INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se brindan las descripciones de los instrumentos más importantes del túnel de viento y se establecen las magnitudes de trabajo a las que estos funcionarán, de acuerdo con algunos parámetros de diseño preestablecidos

#### Parámetros preestablecidos

Como parámetros de diseño se ha establecido que la velocidad del viento que se debe de alcanzar en la cámara de ensayos tiene un tope máximo de 30 m/s, y que la sección de pruebas tiene un área de sección transversal de  $1\text{ m}^2$  (1m de cada lado), a partir de estos datos se puede elegir los instrumentos del sistema de control.

#### 3.1 INSTRUMENTOS DE POTENCIA

##### 3.1.1 Motor eléctrico

Un motor eléctrico es aquel dispositivo capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica, y generalmente está conformado por tres partes principales; La carcasa, la cual es una caparazón de hierro fundido que soporta los demás elementos móviles y estáticos del motor en, el rotor, el cual es la parte móvil que gira por efecto del cambio de polaridad en su embobinado (rotatorio) y en cuyo centro se encuentra el eje encargado de transmitir la potencia, y estator que es el embobinado estático por el cual fluye la corriente con carga que interactúa con el bobinado rotatorio ocasionando el movimiento del eje, como se observa en la Figura 16:

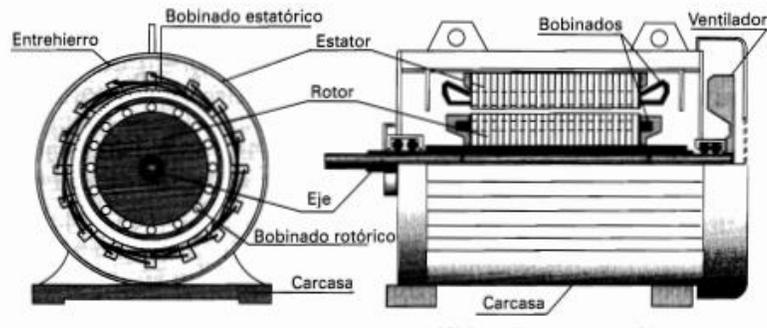


Figura 16. Motor eléctrico asincrónico trifásico

**Fuente:** (Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, 2001)

- Carcasa, es la parte envolvente del motor y está construida de acero, hierro fundido u otra aleación metálica
- Estator o también llamado inductor en los motores de corriente continua, es la parte que está fija a la carcasa
- Rotor o inducido para motores de corriente continua, es la parte que gira y sobre la cual está fija el eje del motor

Los motores trifásicos son los más utilizados en la industria debido a que son los que alcanzan potencias más elevadas, ocasionan menos ruido y vibración, estos motores pueden ser síncronos, asíncronos, asíncrono sincronizados (Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, 2001)

#### 3.1.1.1 Potencia del motor

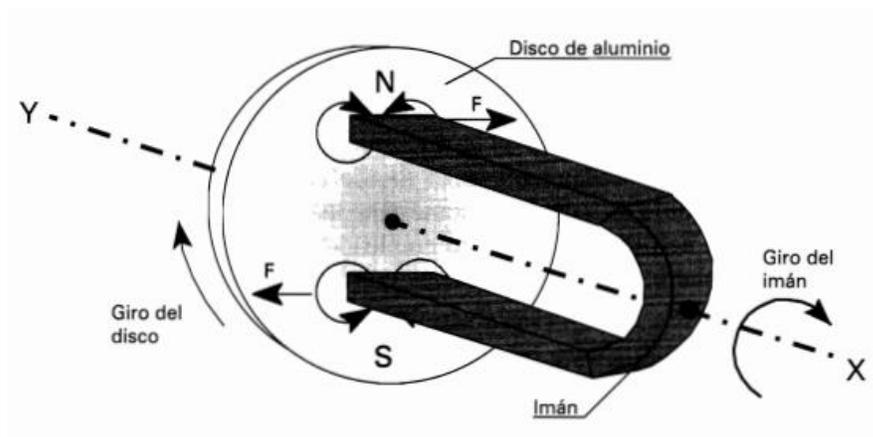
La potencia eléctrica para un motor trifásico está dada por la Ecuación 44

$$P_e = \sqrt{3} * V_S * I_S * \cos(\phi) \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde  $P_e$  es la Potencia eléctrica [W],  $V_S$  Voltaje de línea [V],  $I_S$  Corriente de línea [A],  $\cos(\phi)$  Factor de potencia [Adimensional] (Benalcázar Venegas, 2015a).

#### 3.1.1.2 Motor asíncrono trifásico

El principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico se basa en la producción de un campo magnético giratorio,



**Figura 17. Representación del funcionamiento del motor asíncrono**

**Fuente: (Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, 2001)**

Si consideramos el imán de la Figura 17, sus polos norte y sur (N-S) giran sobre el eje que va desde X hasta Y, además de un disco que está influenciado por el campo magnético del imán y que también gira sobre el eje X-Y, por lo cual, si se gira el imán, su campo magnético también lo hará, y actuará sobre el disco arrastrándolo con él, como el campo magnético también es variable se provocan unas corrientes inducidas en el disco que dan lugar a una fuerza electromotriz que tiene el fin de vencer la resistencia del eje del motor y de hacerlo girar (Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, 2001)

El sentido de rotación del disco trata siempre de oponerse al giro del imán pero aun así es arrastrado por el mismo, por lo cual el disco gira en la misma dirección del imán pero con una velocidad inferior (esta diferencia de velocidades es el llamado deslizamiento), como las velocidades del disco y del imán son diferentes a este tipo de motor se le llama asíncrono (Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, 2001)

### 3.1.1.3 Determinación de la potencia del motor trifásico

Como parámetro de este proyecto se ha establecido la velocidad en la cámara de ensayos del túnel de viento será de 30 m/s, y el área de la cámara de ensayos es de  $1 \text{ m}^2$ , a partir de esto se tiene que la energía cinética que debe de aportarse al viento para alcanzar esta velocidad es:

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2$$

Donde  $m$  es la masa [kg] y  $V$  es la velocidad del viento [m/s], como el flujo es estacionario existirá un flujo de masa ( $F_m$ ), por lo tanto, la Ecuación 45 se reescribe como:

$$E_k = \frac{1}{2} F_m * V^2$$

Se tiene que el flujo masico es:

$$F_m = \rho * V * A$$

Remplazando:

$$E_k = \frac{1}{2} (\rho * V * A) V^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho * A * V^3$$

Se tiene que el área transversal de la cámara de ensayos es de  $1 \text{ m}^2$ , la velocidad de 30 m/s y la densidad promedio es de  $1 \text{ kg/m}^3$ , al remplazar:

$$E_k = \frac{1}{2} * 1 \text{ kg/m}^3 * 1 \text{ m}^2 * (30 \text{ m/s})^3$$

$$E_k = P = 13500 \text{ W}$$

Por motivos de diseño este valor debe de sobrepasarse para evitar que por algún motivo no se alcance la velocidad del viento esperada, por lo tanto, se establece que la potencia del motor trifásico debe de ser de **15 kW**.

### 3.1.2 Ventiladores

Un ventilador es una máquina compuesta por aspas, que mediante su rotación, provocan el movimiento (impulso) de un fluido, como el aire o un gas determinado. Un ventilador puede ser definido como una turbomáquina, el cual genera un cambio de presión para originar un flujo continuo, por medio de la transmisión de energía.

Un ventilador se compone de diferentes elementos entre los cuales se encuentran: El propulsor de giratorio en contacto con el aire, que actúa como transmisor de la energía y el motor de accionamiento (generalmente eléctrico), junto con sus respectivos dispositivos de control como lo son: arranque, regulador de velocidad, conmutación de polaridad, etc.

Según la sobrepresión alcanzada, un ventilador genera valores inferiores a 700 mm c.d.a. Para valores entre 700 y 2000 mm c.d.a. se denominan Soplantes y para valores superiores Turbocompresor. (Sobrecorrientes, 2015)

#### Clasificación de los ventiladores

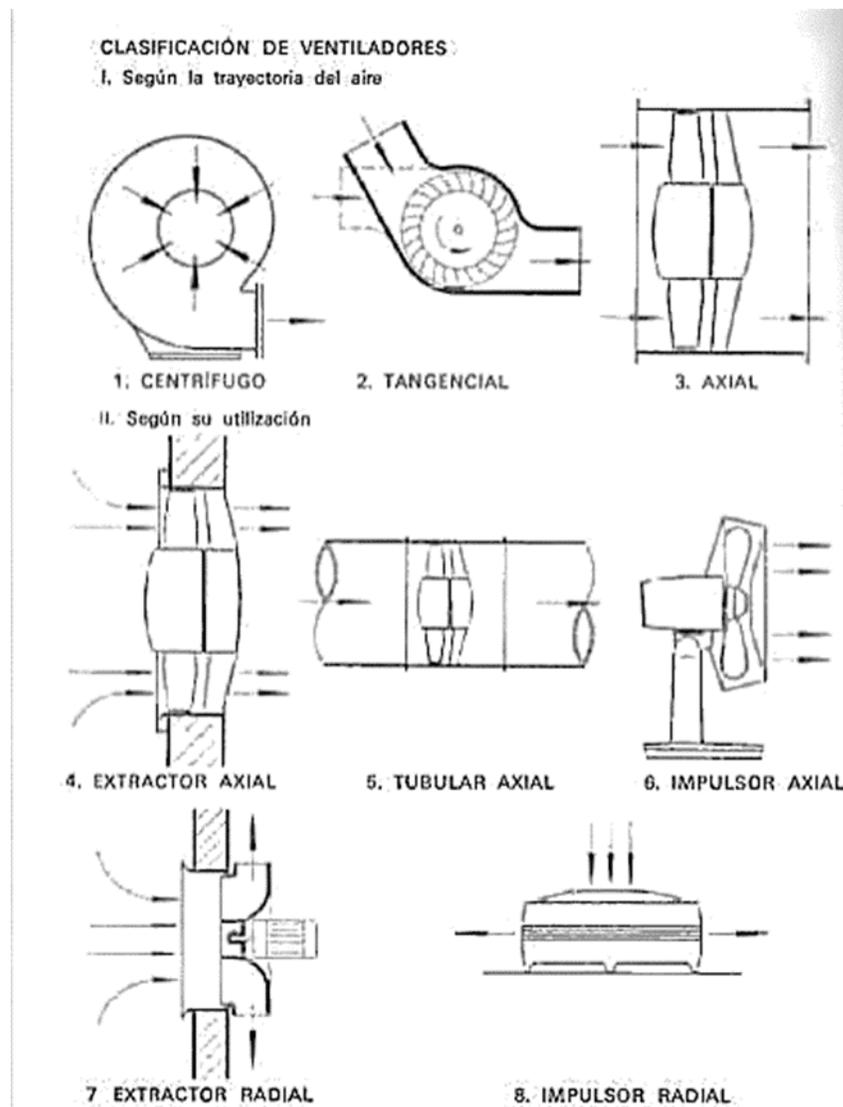
La primera clasificación de los ventiladores aparece al atender a la trayectoria que sigue el fluido al pasar por ellos. Según este concepto se agrupan en:

- Ventiladores Axiales
- Ventiladores Centrífugos
- Ventiladores Tangenciales

Otra forma de clasificación de a cuarto a si utilidad y son

- Extractores
- Tubulares
- Impulsores

En la Figura 18 se presenta gráficos de la clasificación expuesta.



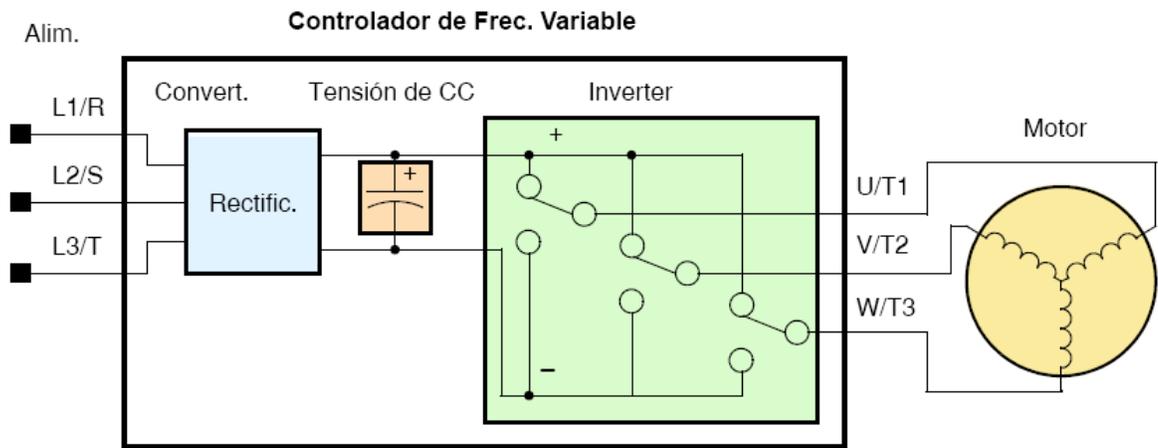
**Figura 18. Clasificación de ventiladores**

**Fuente:** (Benalcázar Venegas, 2015a)

### 3.1.3 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un dispositivo que permite controlar la velocidad de rotación de un motor eléctrico, esto se logra mediante el control de la variación de la frecuencia de la energía proporcionada al motor, un variador también puede ser llamado, inversor, drive, etcétera.

Los variadores de frecuencia constan de tres etapas primordiales para convertir de la energía eléctrica, estas son; la rectificación, es la conversión de corriente alterna a directa, la segunda es la filtración, suaviza la señal de salida del rectificador, que es llevada a la tercera etapa de inversión, que transforma la corriente directa en corriente alterna (Rodrigo et al., 2017).



**Figura 19. Estructura general de un variador de frecuencia**

**Fuente:** (Rodrigo et al., 2017)

### 3.1.4 Interruptor automático

Es un dispositivo mecánico de conexión que sirve para establecer, soportar e interrumpir corrientes bajo condiciones normales de operación. también pueden soportar sobrecargas durante un tiempo determinado e interrumpir corrientes abruptas, como las de cortocircuito.

En un interruptor, el dispositivo disparador de sobrecorriente cuenta con un sistema magnético de respuesta rápida ante sobrecorrientes abruptas (cortocircuitos), y una protección térmica basada en un bimetálico que desconecta ante sobrecorrientes de ocurrencia más lenta (Benalcázar Venegas, 2015b)

### 3.1.5 Guarda motor

Un guardamotor es un interruptor magnetotérmico, especialmente diseñado para la protección de motores eléctricos. Este diseño especial proporciona al dispositivo una curva de disparo que lo hace más robusto frente a las sobreintensidades transitorias típicas de los arranques de los motores. El disparo magnético es equivalente al de otros interruptores automáticos pero el disparo térmico se produce con una intensidad y tiempo mayores.

Las características principales de los guardamotors, al igual que de otros interruptores automáticos magnetotérmicos, son la capacidad de ruptura, la intensidad nominal y la curva de disparo. Proporciona protección frente a sobrecargas del motor y cortocircuitos, así como, en algunos casos, frente a falta de fase. (Benalcázar Venegas, 2015b)

### 3.1.6 Tarjeta de adquisición de datos

DAQ (DATA ACQUISITION) es el proceso de medir mediante una computadora un fenómeno físico o eléctrico que se adquiere mediante una señal de corriente o voltaje emitida por un sensor, con esta señal puede cuantificar la magnitud de alguna propiedad como la presión, la temperatura, el sonido, etc. un sistema DAQ está conformado por hardware de medida (sensores), una tarjeta DAQ para acondicionar las señales y una computadora con un software programable, esto se aprovecha de la capacidad de procesamiento de una computadora para procesar los datos. (Instruments, 2021).



**Figura 20. Dispositivo USB de E/S Multifunción de National Instruments**

Fuente: (Instruments, 2021)

## 3.2 SENSORES

Una de las clasificaciones de los sensores es según el tipo de señal eléctrica que generan, estos son; sensores digitales, sensores analógicos y sensores temporales

- Sensor analógico: estos sensores generan una señal eléctrica con un valor que varía dentro de un margen, como por ejemplo un sensor de temperatura con salida de 4-20 mA para temperaturas que van de 0 a 100 °C

- Sensor digital: este tipo de sensor genera una señal binaria que solo toma un valor finito de niveles o valore
- Sensores temporales: Proporcionan a su salida señales eléctricas en las que la información está asociada al parámetro tiempo: senoidales o cuadradas (Calderón Godoy, 2017)

Según lo anterior, las magnitudes las magnitudes que se desean medir en el túnel de viento requiere de sensores analógicos, pues sus magnitudes se encuentran en un rango determinado de valores. Se ha establecido implementar 8 sensores, estos son; sensor de presión (sensor de presión diferencial), sensor de temperatura (termocupla pt100), sensor de humedad relativa, sensor de velocidad del viento (anemómetro de hilo caliente), sensor de sonido, tacómetro (de efecto hall), y, voltímetro y amperímetro (para hallar la potencia eléctrica en la turbina).

### 3.2.1 Determinación de la presión

#### Tubo Pitot

El tubo de Pitot es un dispositivo utilizado para la medición del caudal, velocidad o presión de un fluido o gas, mediante la diferencia entre la presión total y la presión estática, denominada presión diferencial, la cual es directamente proporcional a la velocidad. Se compone de dos tubos en ángulo recto, los cuales son colocados en un sector donde no se genere disturbios, que al ser insertado presentan una diferencia de altura. (Benalcázar Venegas, 2015b). La presión diferencial medida a través del tubo Pitot puede calcularse utilizando la ecuación de Bernoulli, y resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido (Spark, 2019)



**Figura 21. Tubo de Pitot**

**Fuente:** (Jimenez et al., 2013)

Determinación de la presión:

$$\Delta P = \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

Ecuación 46

$$\Delta P = \frac{(30 \frac{m}{s})^2 \cdot 1.3 \text{ kg/m}^3}{2}$$

$$\Delta P = 585 \text{ Pa}$$

Es decir, se requiere un medidor de presión que esté en el rango de 0 a 750 Pa, suponiendo que la máxima lectura se dé en el 80% de la escala del instrumento.

### 3.2.2 Determinación de la temperatura

#### Sensor de la temperatura

Los sensores de temperatura pueden adoptar muchas formas, los sensores RTD, funcionan por medio de la variación de la conductividad eléctrica, causada por la temperatura en un material conductor, entre los principales materiales utilizados se encuentran platino cobre y níquel, donde el platino ofrece un mayor rango de medición. En la Figura 22- se observa un transmisor de 4-20 mA, en la mayoría de las aplicaciones industriales y comerciales, el actual elemento sensor está dentro de una funda sellada de acero inoxidable, unido a la cabeza ensamblada con forma de tornillo, para unir con cable el sensor a aparato a medir, la cabeza del sensor puede también contener electrónica para interconectar el sensor al sistema de medida. (Spark, 2019).

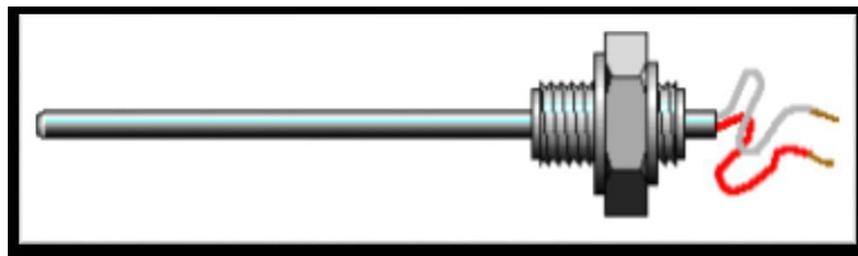
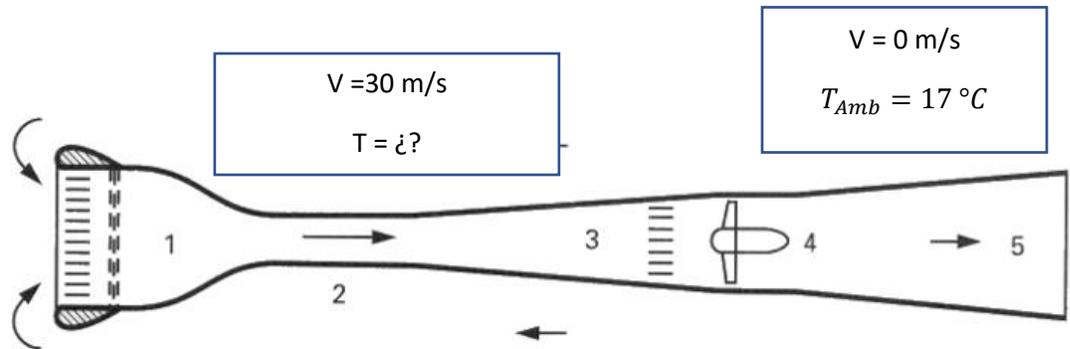


Figura 22. Funda típica montada en sonda RTD

Fuente: (Spark, 2019)

Para establecer la temperatura alcanzada en la cámara de pruebas que es ocasionada por el aporte de energía del ventilador, se utiliza el principio de la primera ley de la termodinámica y se hacen las siguientes consideraciones partir de la Figura 23:



**Figura 23. Zonas de aporte y pérdida de energía en el túnel de viento**

Para este ejercicio se van a analizar las zonas 2 y 5 de la figura:

- Zona 1: El fluido entra impulsado por el ventilador con una velocidad de 30 m/s.
- Zona 2: El modelo de turbina gana energía del fluido.
- Zona 5: La energía restante en el fluido es liberada

Se hacen las siguientes asunciones:

- El flujo es estacionario
- Las pérdidas de energía en las paredes tienden a cero
- En la zona 5 la temperatura es ambiente, la velocidad del viento es cero y la presión es atmosférica

En Pamplona la temperatura generalmente varía de 8 °C a 17 °C y rara vez baja a menos de 6 °C o sube a más de 18 °C (Martín Rodríguez et al., 2014).

Al realizar un balance de energía entre la zona 2 y la zona 5, se tiene que:

$$E_{Ent} - E_{Sal} = dE_{sist}/dt$$

Como el flujo es estacionario  $\frac{dE_{sist}}{dt} = 0$ , por lo cual;

$$E_{Ent} = E_{Sal}$$

Las energías

$$W_{ventilador} + (\dot{m} * h_2) = W_{Turbina} + (\dot{m} * h_5)$$

$$W_{ventilador} - W_{Turbina} = \dot{m}(h_2 - h_5)$$

$$W_{ventilador} - W_{Turbina} = \dot{m}(h_2 - h_5)$$

De una tabla de propiedades del aire se obtiene que:

$$h_5 = 290.16 \text{ kJ/kg}$$

Reemplazando:

$$13.5 \text{ kW} - 881.3 \text{ W} = \rho * V * A(h_2 - h_5)$$

$$12.62 \text{ kW} = (1 \text{ kg/m}^3) * (30 \text{ m/s}) * (1 \text{ m}^2)(h_2 - 290.16 \text{ kJ/kg})$$

$$h_2 = 290.55 \text{ kJ/kg}$$

Interpolando según una tabla de propiedades se puede obtener la temperatura a partir de la entalpia en el punto 2:

**Tabla 2. Propiedades del aire**

Propiedades de gas ideal del aire											
$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K	$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

De la Tabla 2 se tiene que la temperatura en el punto 2 es  $T_2 = 292.3 \text{ K} = 19.3 \text{ }^\circ\text{C}$

Considerando que el cambio de temperatura va a ser bajo, se debe de tener un sensor con una sensibilidad alta que pueda proporcionar datos de entre cero y uno, desde una temperatura mínima de  $6^\circ\text{C}$  hasta una temperatura máxima de  $50^\circ\text{C}$  (común en el mercado), pues también es posible que el calentamiento de los equipos afecte la temperatura del ambiente, el sensor debe de tener una tolerancia inferior a 0.1 %, debido a que el cambio de temperatura generado por la entrega de energía del ventilador al viento es muy pequeño.

### 3.2.3 Determinación de la humedad relativa

#### Sensor de humedad relativa

La morfología del elemento sensible utilizado en la fabricación de los sensores de humedad determina la absorción y desorción de vapor de agua. El comportamiento de la condensación de vapor de agua es una función del tamaño del poro y de su distribución. En los sensores de tipo resistivo, la absorción de vapor de agua origina la disociación de los grupos funcionales iónicos, dando lugar al aumento de la conductividad eléctrica. El tiempo de respuesta característico para la mayoría de sensores de tipo resistivo es de 10 a 30 s.

Para los sensores de tipo capacitivo, la absorción de vapor de agua produce un aumento de la permitividad dieléctrica, produciendo de esta manera un aumento en los valores de la capacidad. Los cambios en la capacidad dependen del área de los electrodos, espesor y propiedades dieléctricas del elemento sensible. En general la relación entre la constante dieléctrica del material  $\epsilon_r$  y la polarizabilidad  $\alpha$  está determinada por la relación de Clausius Mosotti (Martín Rodríguez et al., 2014), la cual se expresa mediante la siguiente ecuación

$$\frac{(\epsilon_r - 1)}{(\epsilon_r + 2)} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$

**Ecuación 47. relación de Clausius Mosotti**

Donde  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ,  $\epsilon$  es la permitividad del medio y  $\epsilon_0$  la permitividad del espacio libre, estas constantes son adimensionales,  $\alpha$  la polarizabilidad con unidades [ $C \cdot m^2 \cdot V^{-1} = A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1}$ ], y N (densidad de dipolos) es el número de átomos por unidad de volumen

### 3.2.3.1 Determinación de la humedad

En Pamplona, el promedio del porcentaje del cielo cubierto con nubes varía considerablemente en el transcurso del año.

La parte más despejada del año en Pamplona comienza aproximadamente el 10 de diciembre; dura 3,2 meses y se termina aproximadamente el 16 de marzo. El 12 de enero, el día más despejado del año, el cielo está despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 28 % del tiempo y nublado o mayormente nublado el 72 % del tiempo. La parte más nublada del año comienza aproximadamente el 16 de marzo; dura 8,8 meses y se termina aproximadamente el 10 de diciembre. El 5 de mayo, el día más nublado del año, el cielo está nublado o mayormente nublado el 92 % del tiempo y despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 8 % del tiempo (Eraso-Checa et al., 2017).

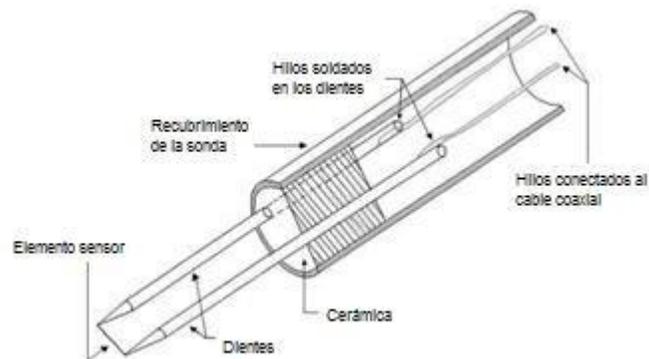
La humedad relativa de la ciudad de pamplona está en un rango de 66% a 95% (Luis & Sexto, n.d.).

El sensor de humedad puede cubrir todo el rango de humedad relativa, es decir de 0 – 100%

### 3.2.4 Determinación de la velocidad del viento

#### **Anemómetro de hilo caliente**

El anemómetro de hilo caliente consta de un filamento metálico fluye una corriente eléctrica que le proporciona energía y aumenta su temperatura, al exponer este filamento a un fluido que se mueve a una velocidad determinada este sufre una pérdida de energía por convección, la pérdida de energía es medida y escalizada con el fin de saber cuánta energía se pierde dependiendo de las diferentes velocidades del fluido (Luis & Sexto, n.d.)



**Figura 24. Anemómetro de hilo caliente**

**Fuente:** (Marbán & Pellecer C, 2002)

### 3.2.5 Determinación de la intensidad sonora

#### **Sonómetro**

El sonómetro permite la medición de la presión sonora. Este dispositivo consta de un sensor (micrófono), circuitos de conversión de señal, manipulación y transmisión de variables (módulo de procesamiento electrónico) y una interfaz para la lectura. (Orts & Ronda Peñacoba, 2012).

Existen diferentes tipos de ruido, tales como lo son: continuo, impulsivo, aleatorio, eventual, y se utilizan dispositivos con diferentes especificaciones propias según el equipamiento y sus características para la medición de cada uno de ellos. Los parámetros de selección del dispositivo tales como la precisión, rango dinámico, fiabilidad, etc. (Orts & Ronda Peñacoba, 2012).

La norma CEI 60651 y la norma CEI 60804 de la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) o también conocida por sus siglas en inglés IEC (International Electrotechnical Commission), IEC 60651 (1979) y la IEC 60804 (1985), definen los procedimientos para la correcta fabricación de los

sonómetros, donde se establece que todas las marcas y modelos permitan la misma medición de un sonido. Dichas normas fueron unificadas a partir del año 2003, mediante la norma IEC 61672 (Pérez Porto & Gardey, 2015).

**Clase del instrumento:** Puede ser de clase 0, 1, 2, 3. Depende de la precisión buscada en las mediciones y del uso que se requiera del instrumento.

Clase 0: se utiliza en laboratorios. Sirve como referencia.

Clase 1: empleo en mediciones de precisión en el terreno.

Clase 2: utilización en mediciones generales de campo.

Clase 3: empleado para realizar reconocimientos. Mediciones aproximadas

### 3.2.6 Determinación de velocidad de giro

#### **Tacómetro**

El tacómetro tiene un mecanismo de funcionamiento, basado en los campos magnéticos proporcionados por un imán. Pues, dentro de la estructura del tacómetro se encuentra un imán, que se activa una vez que el elemento rotatorio comienza a girar.

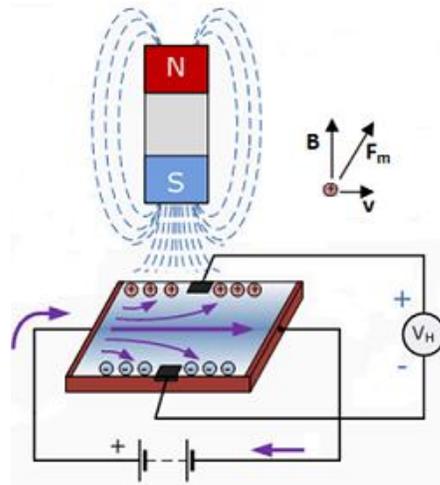
Ese imán va a trabajar de manera conjunta con un transmisor, que envía las señales tomadas por el imán. Al mismo tiempo, se encuentra girando un anillo que es capaz de generar otro campo magnético.

Son los campos magnéticos, con su fuerza los que mueven a las agujas en una escala de numeración de las revoluciones por minuto o envían la información y ésta se refleja de manera digital en una pantalla (Mecafenix, 2018).

El tacómetro utilizado en este trabajo es un sensor de efecto hall, a continuación, se muestra cómo funciona el principio del efecto hall.

#### 3.2.6.1 Efecto hall

El efecto Hall se produce cuando se ejerce un campo magnético transversal sobre un cable por el que circulan cargas. Como la fuerza magnética ejercida sobre ellas es perpendicular al campo magnético y a su velocidad (ley de la fuerza de Lorentz), las cargas son impulsadas hacia un lado del conductor y se genera en él un voltaje transversal o voltaje Hall (VH).



**Figura 25. Efecto hall**

**Fuente:** (Febriyanto et al., 2019)

En la Figura 25 se ve como sobre una corriente eléctrica actúa un imán que produce un campo magnético (B). La fuerza magnética ( $F_m$ ) desvía a las cargas móviles hacia uno de los lados del cable, lo que implica que dicho lado queda con carga de ese signo y el opuesto queda con carga del signo contrario. En consecuencia, entre ambos se establece un campo eléctrico y su correspondiente diferencia de potencial o voltaje Hall (Cort et al., 2012).

### 3.2.6.2 Determinación de la velocidad del tacómetro

La velocidad de giro del tacómetro, y la velocidad angular del generador está definida según la velocidad alcanzada por la turbina

#### ***Velocidad angular de la turbina eólica***

Se considera el caso extremo en el que la velocidad máxima lineal del viento (30 m/s) se transmite directamente la turbina, y que el diámetro de la turbina será de 60 cm, por lo tanto:

$$w = \frac{v}{r}$$

**Ecuación 48**

$$w = \frac{30 \text{ m/s}}{0.3 \text{ m}}$$

$$w = 100 \text{ rad/s (954,929 RPM} \approx 1000 \text{ RPM)}$$

### 3.2.7 Determinación del voltaje

Se llama voltímetro al dispositivo que permite realizar la medición de la diferencia de potencial o tensión que existe entre dos puntos pertenecientes a un circuito eléctrico. El voltímetro, por lo tanto, revela el voltaje (la cantidad de voltios).

Los voltímetros tienen que contar con una resistencia eléctrica elevada para que, al ser conectados al circuito para realizar la medición, no generen un consumo que lleve a medir la tensión de manera errónea (TECH, 2020).

#### 3.2.7.1 Determinación del voltaje

Según los datos técnicos del motor sin escobillas se tiene que:

Potencia = 1000W

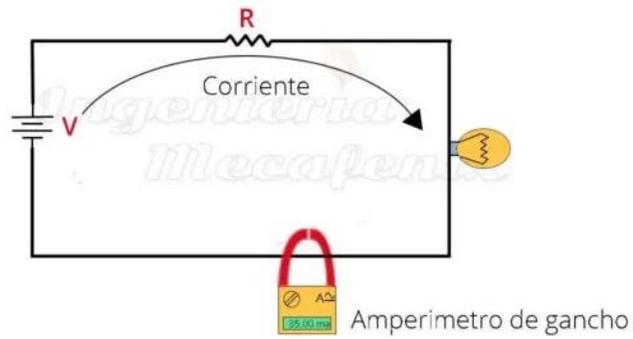
Voltaje = 48V / 96V

### 3.2.8 Determinación de la corriente

Un amperímetro es un instrumento de medición que se utiliza para medir la corriente eléctrica que pasa por un circuito. Estos instrumentos están compuestos por un galvanómetro y una serie de resistencias en paralelo llamadas shunt

#### 3.2.8.1 Amperímetro de gancho

Con este tipo de amperímetro hacer una medición de corriente es bastante sencilla, ya que solo es necesario poner el cable que se quiere medir dentro de las pinzas



**Figura 26. Amperímetro de gancho**

**Fuente:** (Cort et al., 2012)

En la Figura 26 se muestra un amperímetro de gancho el cual cubre el cable en cual se desea medir la corriente de manera sencilla

### 3.2.8.2 Determinación de la corriente

Según las características del motor, la potencia de 1000W y el voltaje máximo es de 96V, por lo que la corriente es:

$$P = \sqrt{3} * v * I$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * v} = \frac{1000W}{\sqrt{3} * 96V} = 6.01A$$

## 4. CONTROL DEL TÚNEL DE VIENTO

### 4.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

#### DISEÑO DE LOS ELEMENTOS MECANICOS Y ELÉCTRICOS

Se implementará una interfaz gráfica para controlar el desarrollo de las pruebas en el túnel de viento, los datos serán modulados mediante una tarjeta de adquisición de datos conectada a una computadora.

#### *Parámetros de diseño:*

Las magnitudes más importantes que queremos conocer serán la velocidad, la presión, la temperatura, la humedad relativa, el ruido y la potencia generada en la turbina del generador. Para conseguir esto será necesario tener controladas todas las variables termodinámicas: temperatura, presión, volumen y densidad. El nivel de control de estas variables depende de la calidad del túnel y evidentemente influirá en los resultados.

- Área de la sección de pruebas de  $1m^2$
- Velocidades variables de 0 a 30 m/s
- Niveles de ruido inferiores a 115 dB(A)
- Potencia de motor del ventilador 15 kW
- Captura y almacenamiento de los datos

### 4.2 DISEÑO ELÉCTRICO

Para establecer el sistema de control se establecen las variables enfocadas en la construcción de un túnel de viento para prueba de aerogeneradores:

#### 4.2.1 Entradas y salidas del sistema de control

En la Tabla 3 se han establecido cuáles serán las entradas y las salidas digitales y analógicas del sistema de control del túnel de viento

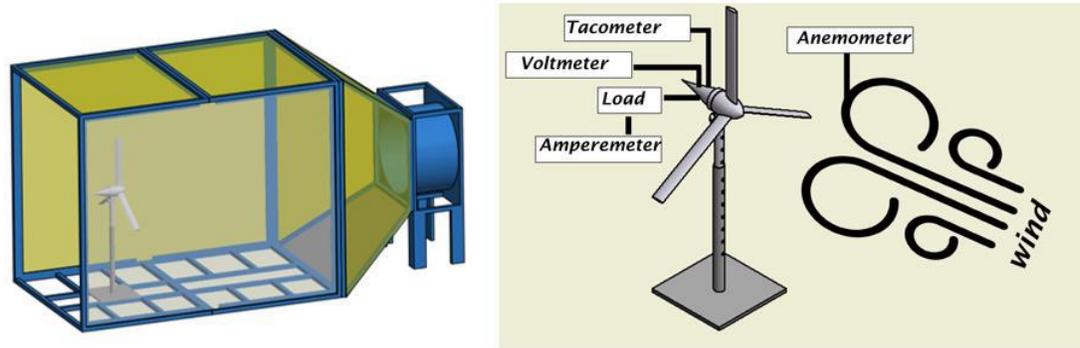
**Tabla 3. Entradas y salidas para el sistema de control del túnel de viento**

<b>Entradas analógicas</b>	<b>Entradas digitales</b>
<p><b>Para medir las propiedades del ambiente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor de presión</li> <li>• Sensor de ruido</li> <li>• Sensor de velocidad del aire (anemómetro)</li> <li>• Sensor de temperatura</li> <li>• Sensor de humedad relativa</li> </ul> <p><b>Para medir la energía ganada en el aerogenerador</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tacómetro</li> <li>• Voltímetro</li> <li>• Amperímetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encendido</li> <li>• Marcha</li> <li>• Paro</li> </ul>
<b>Salidas analógicas</b>	<b>Salidas digitales</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad del motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luz de encendido</li> <li>• Luz de paro</li> <li>• Luz de marcha</li> <li>• Parada de emergencia</li> </ul>

Nota: En la tabla anterior se determinan las salidas y las entradas necesarias para el dispositivo que controlará el túnel de viento

#### 4.2.2 Sistema de recepción de energía

Es llamado sistema de recepción de energía a la parte conformada por el motor sin escobillas el cual recibe la energía del viento, esta energía debe de ser medida y recopilada para la muestra de los datos.



**Figura 27. Sensores necesarios en el sistema de recepción de energía**

**Fuente:** (TECH, 2020)

Como se puede observar en la Figura 27 , es necesario implementar los siguientes sensores en el sistema de recepción de energía; un sensor tacómetro, un voltímetro y un amperímetro, estos con el fin de medir la potencia ganada por la turbina y la velocidad que puede desarrollar dependiendo de la velocidad del ventilador

#### 4.2.3 Diagrama eléctrico de potencia

En la siguiente figura hace parte de una simulación en el software Cade Simu, la simulación muestra el funcionamiento del sistema de arranque del motor, la distribución de los dispositivos de protección además del transformador, el variador de frecuencia, el guardamotor y el motor en el diagrama eléctrico de potencia

En la Figura 28 se puede ver como el proceso inicia tomando la energía de una línea de tensión trifásica de 220VAC, para alcanzar las mejores condiciones de operación del motor es necesario aumentar el voltaje a 460V para reducir la corriente de trabajo, esto se hace a través de un transformador elevador, posteriormente se activa un variador de frecuencia que controla la velocidad del motor.

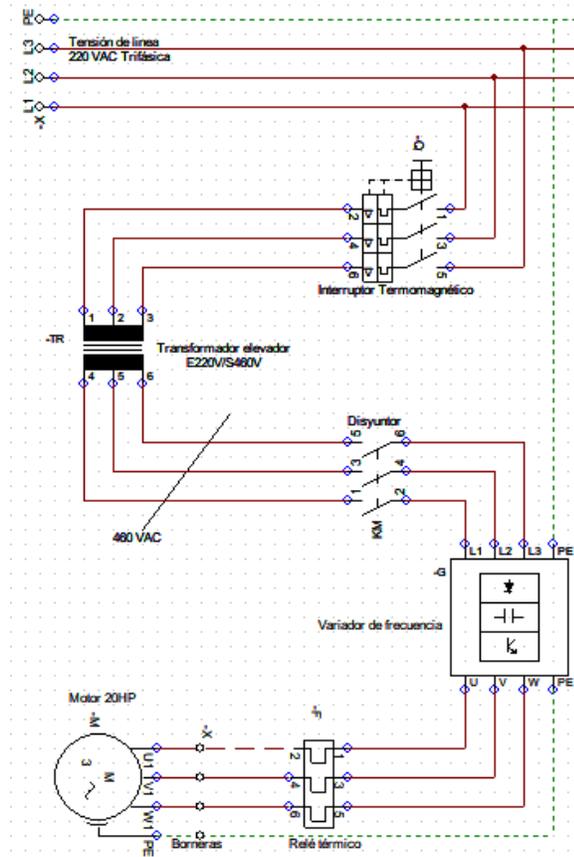


Figura 28. Diagrama eléctrico de potencia

#### 4.2.4 Diagrama electrico de control

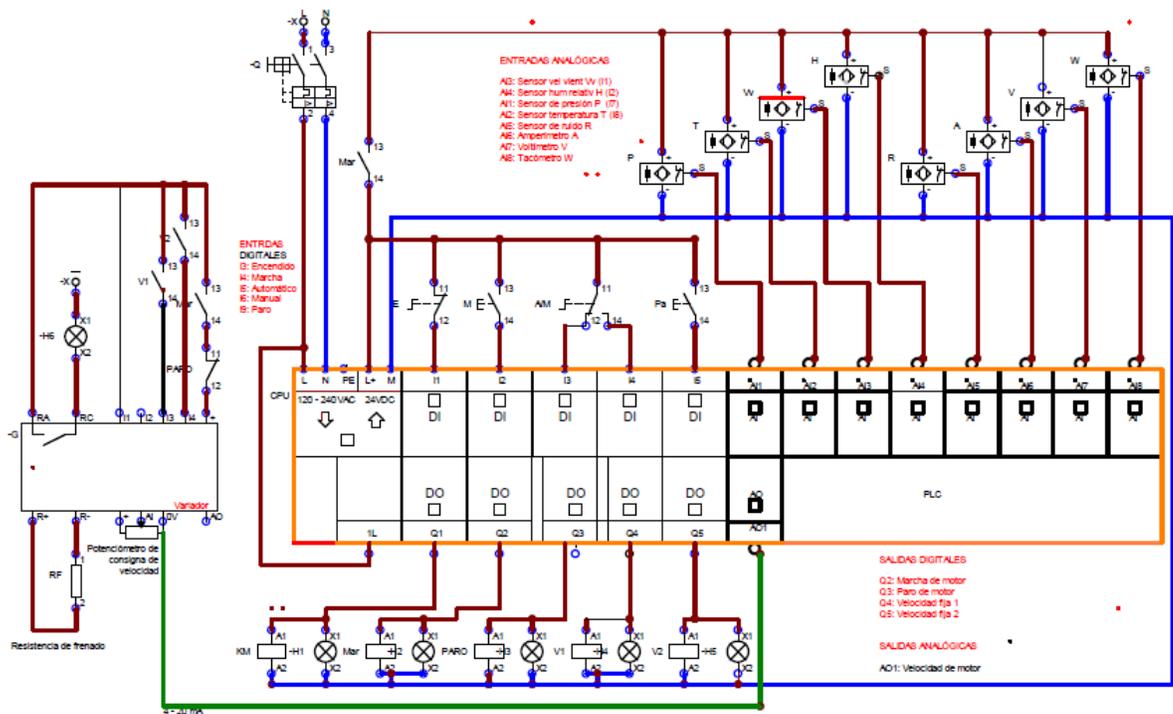


Figura 29. Diagrama eléctrico de control

En la Figura 29 se visualiza el conexionado del dispositivo de control y el variador de frecuencia:

- En la parte superior se encuentran las entradas analógicas, es decir los 8 sensores
- Más abajo se encuentran los accionamientos de encendido, marcha, paro, manual y automático
- La zona encerrada en un recuadro naranja es el esquema del dispositivo de control, que consta de 5 entradas digitales, 8 entradas analógicas, 5 salidas digitales y una salida analógica
- En las salidas del dispositivo de control se puede ver las bobinas de accionamiento de las entradas del variador y de encendido de los sensores
- En la izquierda se encuentra el Variador de frecuencia y sus conexiones

### 4.3 TEORÍA DE CONTROL

Cuando se plantea una tarea de control, es necesario pensar en la interacción fluida de los componentes de la pirámide de la automatización, como se observa en la Figura 30, en este caso específico se trata de la relacionar en los tres (3) primeros estadios de dicha pirámide; ya que se plantea a lo largo de este documento, el control de un sistema que posee sensores, y equipo de fuerza (motores); controlados por medio de un dispositivo de control y su supervisión se efectúa mediante el empleo de un sistema SCADA. (Villacampa, n.d.)(Febriyanto et al., 2019).



Figura 30. Pirámide de la automatización

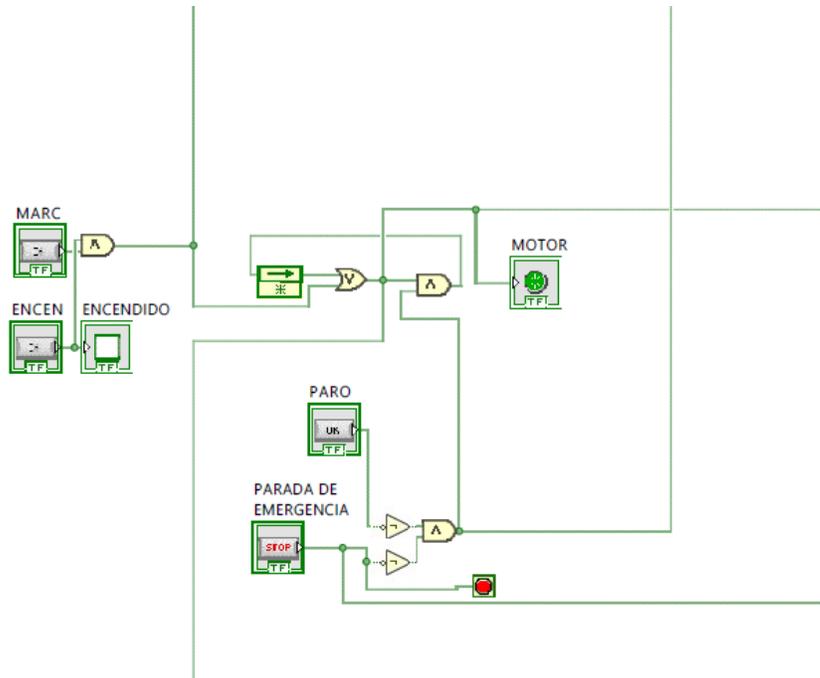
Fuente: (TECH, 2020)(Specialist et al., n.d.)

#### 4.3.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos y el control transversal es programado en LabVIEW. LabVIEW es un lenguaje visual de programación que permite al usuario eliminar comandos de texto y manipulación de programa gráficamente (Albayrak, 2000).



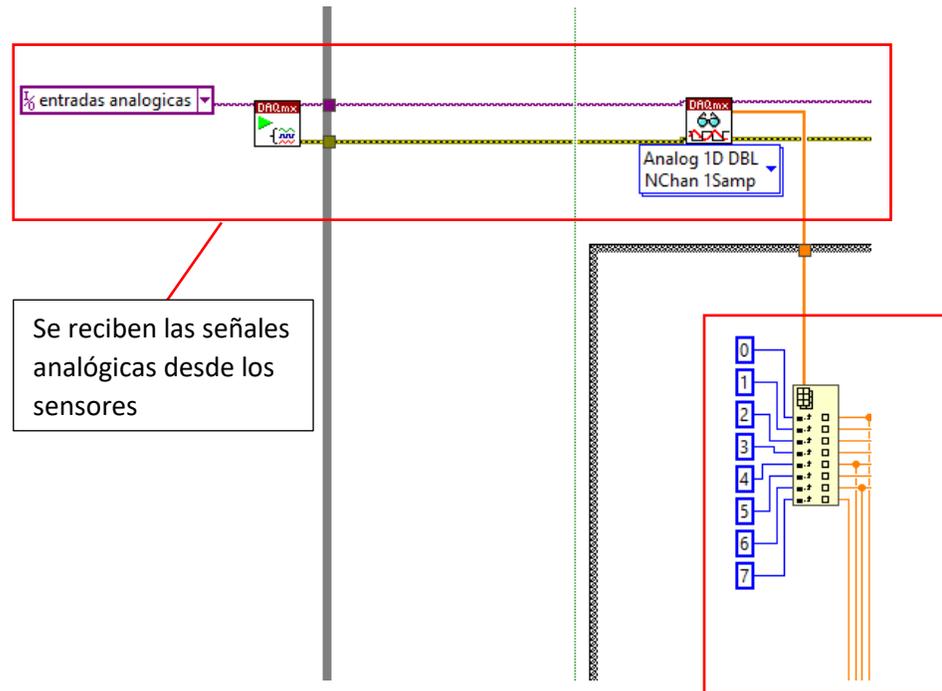
#### 4.4.1 Botones de mando



**Figura 32. Mandos del túnel de viento**

En esta imagen se aprecia la programación de los mandos de encendido, marcha, paro y paro de emergencia, mediante estos mandos se controla el funcionamiento del motor.

#### 4.4.2 Entradas analógicas de los sensores



Se reciben las señales analógicas desde los sensores

Figura 33. 8.3.2 Entradas analógicas de los sensores

Este bloque ordena las entradas analógicas, de acuerdo a las entradas físicas

#### 4.4.3 Procesamiento de entradas analógicas

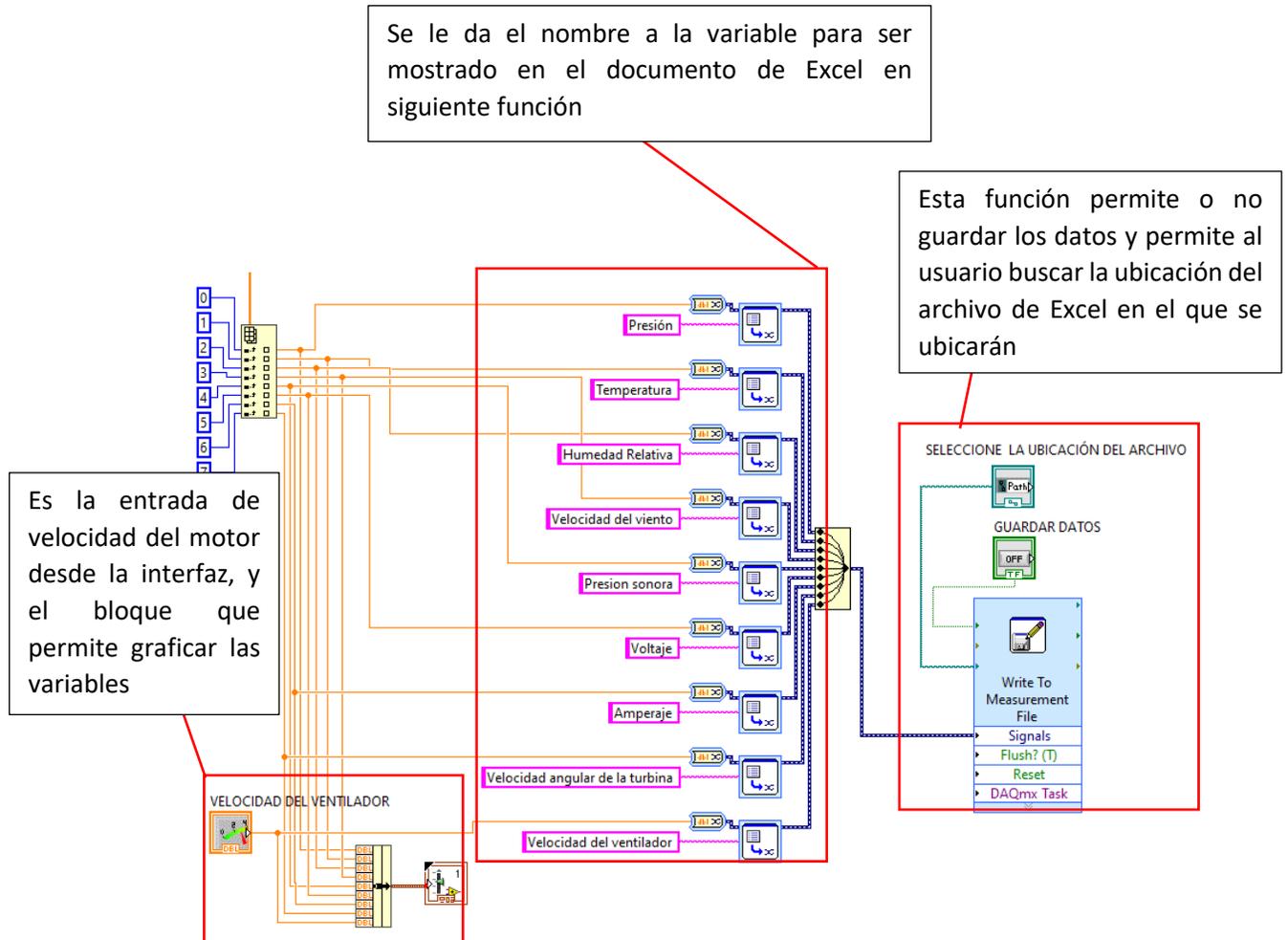


Figura 34. Procesamiento de entradas analógicas

4.4.4 Salida analógica de la velocidad del motor

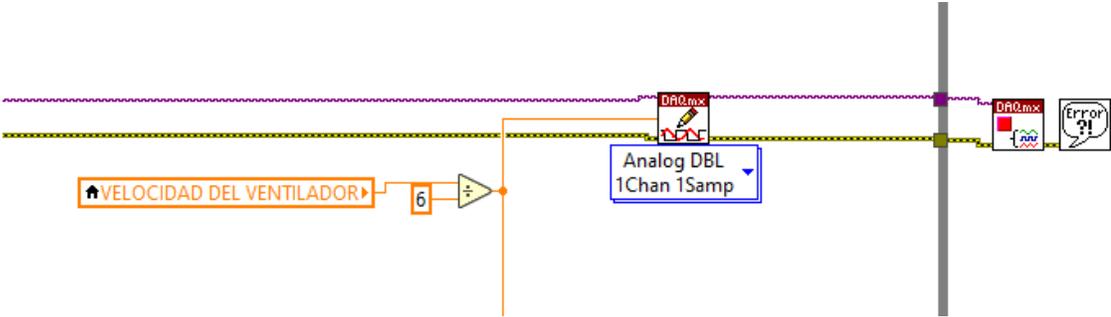


Figura 35. Salida analógica de la velocidad del motor

Se emite una salida de voltaje de 0 a 5 V, para el rango de velocidad de 0 a 30 m/s

## 4.5 DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL

La interfaz de control es la plataforma visual desde la cual el usuario puede controlar el funcionamiento del túnel de viento, además de guardar, visualizar y sistematizar las variables medidas en los sensores, es importante que esta interfaz sea fácil de manejar, intuitiva y precisa a la hora de realizar alguna practica con el túnel de viento, se presenta el siguiente modelo de interfaz creado en LabView como esquema para el proyecto.

- Ventana de mando

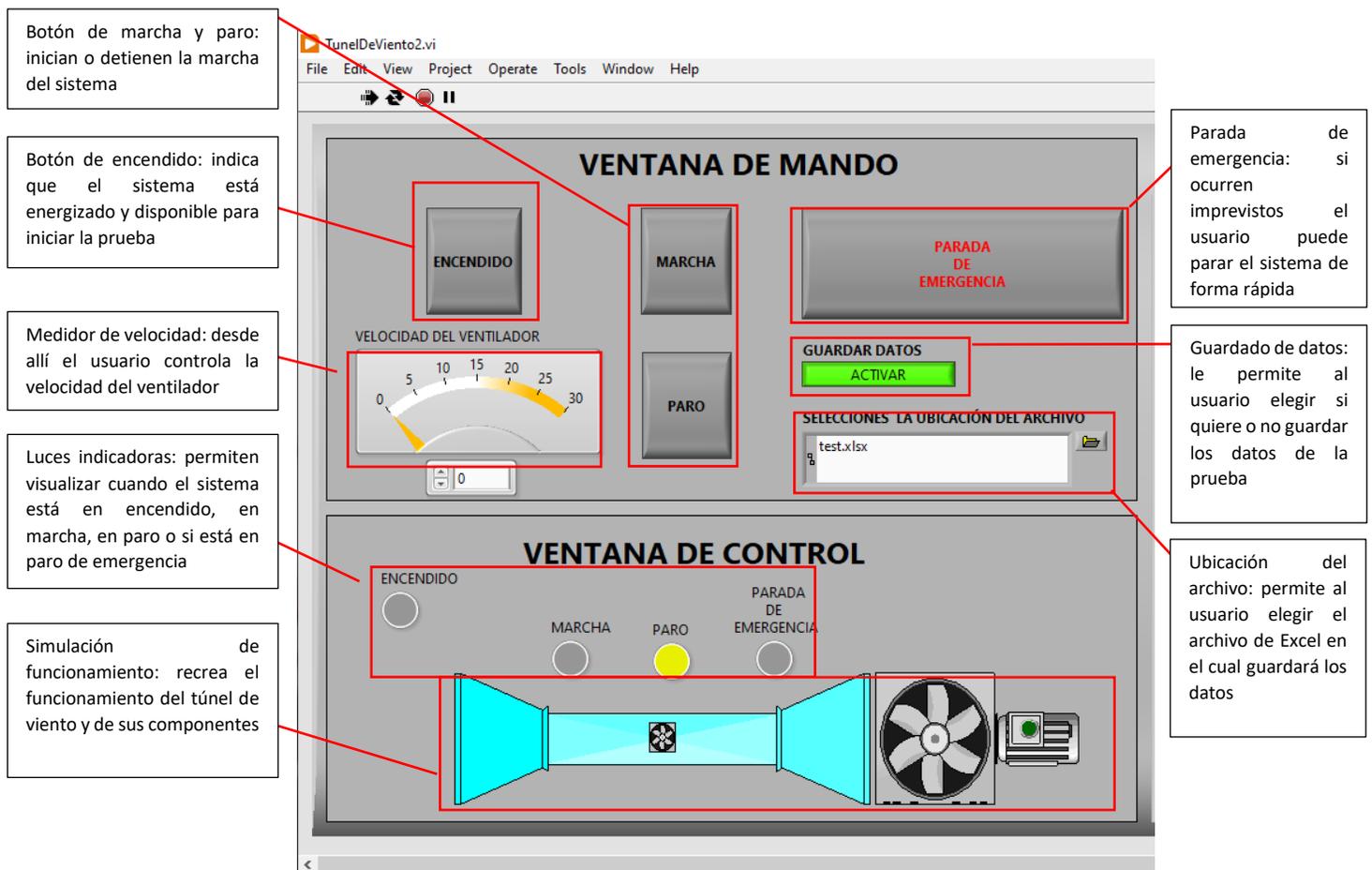


Figura 36. Interfaz de control para el mando del usuario

#### 4.5.1 Gráficos de variables en el tiempo histórico

Se requiere poder visualizar el comportamiento de las variables en tiempo real con el fin de analizar el fenómeno físico al interior del túnel de viento

- Gráficos de variables en el tiempo

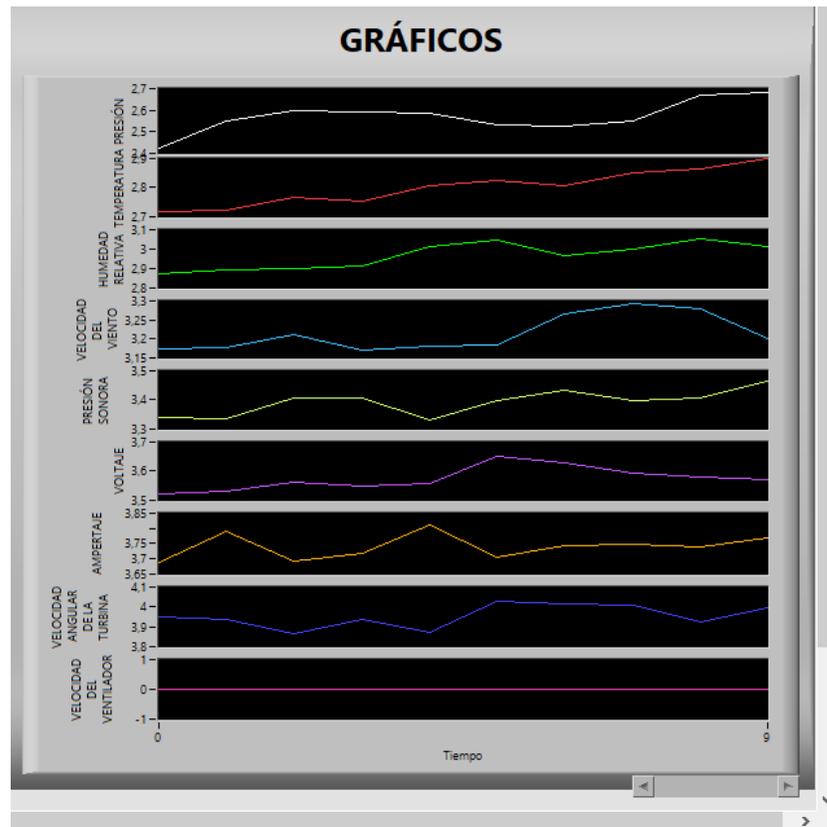


Figura 37. Gráfica de las variables capturadas por los sensores

## 5. SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SENSORES

### 5.1 SELECCIÓN DE LOS SENSORES

#### 5.1.1 Selección del sensor de presión

El sensor de presión es un tubo Pitot que mide la diferencia de presión estática y dinámica, este sensor requiere un transmisor de presión para ajustar la señal a una señal estandarizada de 4-20mA, para lo cual se usa un transmisor de presión diferencial como se observa en la Figura 38. Tubo Pitot y transmisor de presión diferencial Figura 38.



**Figura 38. Tubo Pitot y transmisor de presión diferencial**

Fuente: (Sensors, n.d.)

Se requiere el tubo Pitot AFMT y el transmisor diferencial PMD33

#### 5.1.2 Selección del sensor de temperatura y humedad relativa

En la industria es común encontrar el sensor de humedad y el sensor de temperatura como un solo dispositivo, en la Figura 39 se conserva un sensor que sirve para detectar dos variables al mismo tiempo (temperatura y humedad relativa).



**Figura 39. Sensor multifunción de humedad relativa y temperatura**

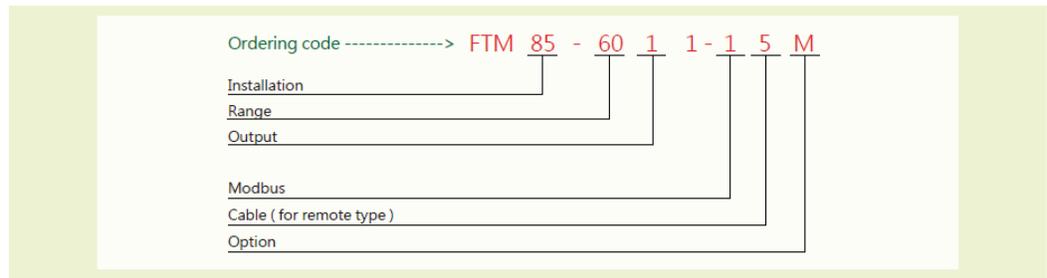
Fuente: (alibaba, 2020)

#### **Características técnicas**

- Transmisor multifunción de temperatura y humedad
- Solo para uso en interiores
- Rango de temperatura: 0 - 50 ° C
- Humedad: 0 - 100% RH
- Salida eléctrica:
- Pantalla LCD de 4-20 mA
- Conexión eléctrica: Conector M12 con cable de 2 m
- Filtro de membrana para PC

#### **5.1.3 Selección del sensor de velocidad**

Se elige el sensor de la serie FTM84/85



**【Ordering Item】**

Installation	code	Range	code	Output	code	Modbus	code	Cable	code	Option	code
duct	84	1 m/s	01	4~20mA	1	analogue	0	2 m cable	2	M12 metal connector	M
remote	85	2 m/s	02	0~20mA	2	RS-485	1	5 m cable	5	( with 2 m electrical cable )	
		5 m/s	05	0~10V	6	RS-485 & analogue	2	customize	W	metal cable gland	N
		10 m/s	10	0~5V	7	※ M type - M12 (8P)				display	D
		20 m/s	20	0~1V	8	metal connector or				other request	W
		40 m/s	40	RS-485	9	N type - M16 cable					
		60 m/s	60			gland					
		90 m/s	H90								
		120m/s	H120								

**Figura 40. Código del artículo de la serie de sensores de velocidad del viento**

Fuente: (alibaba, 2020)

Según la Figura 40 para elegir el sensor de velocidad del viento de acuerdo a las necesidades de nuestro dispositivo se requiere un sensor con las siguientes características:

- Instalación: ducto
- Rango: 40 m/s
- Salida: 4 - 20 mA
- Modbus: análogo
- Cable: 5m
- Opción: Conector de metal M12

De acuerdo a lo anterior la referencia del sensor de velocidad según este fabricante es la siguiente:

❖ **FMT 84 – 40 1 0 - 5 M**

**5.1.4 Selección del sensor de ruido**

Para realizar pruebas de ruido de aerogeneradores se requiere un sensor de ruido capaz de eliminar la interferencia de ruidos externos al campo de prueba, y con gran precisión en las pruebas, por lo tanto, se eligió el sensor tipo micrófono con capuchón para viento que soporte un ruido medio de 105 dB de la Figura 41.



#### Detalles rápidos

Lugar del origen: Beijing, China

Número de Modelo: BGT-WZS

Teoría: Sensor óptico

Palabra clave: Ruido de Sensor

Rango de medición: 30 ~ 130dB (A)

Precisión: ± 3dB

Protección de entr... IP55

Rango de frecuen... 20Hz --- 12,5 kHz

Marca: BGT

Aplicación: Sensor de vibracion

Salida: Sensor digital

Nombre del produ... Sensor de decibelio de ruido para exteriores transductor de...

Sensible: -DB (o mV/Pa)

Señal de salida: RS485 (protocolo Modbus) RS232 4-20mA 0-5 V 0-2,5 V

Fuente de aliment... 5 v CC o 9-30VDC

Tiempo de respue... &le;200ms

**Figura 41. Sensor de ruido industrial**

Fuente: (Cadenas, 2019)

#### 5.1.5 Selección del tacómetro

#### Sensor de velocidad del eje de efecto Hall ST420

Se requiere un sensor de velocidad de rotación de eje de hasta para detectar a velocidad desarrollada por el eje de la turbina a momento de recibir la energía del viento arrojada por el ventilador

El sensor ST420 de la **Figura 42** detecta los imanes que pasan de un disco impulsor o envoltorio montado en el eje y emite una señal analógica suave y continua de 4-20 mA en proporción directa a la velocidad de rotación del eje.



**Figura 42. Sensor de velocidad del eje**

Fuente: (Lorenzo, 2017)

#### 5.1.6 Selección del voltímetro

El voltímetro es uno de los instrumentos utilizados para determinar la potencia ganada por la turbina del aerogenerador (junto con el amperímetro), según los cálculos de se ha establecido que el voltaje ganado por el aerogenerador es de máximo, por lo tanto, el voltímetro seleccionado debe de cubrir una cantidad mayor

Según las características del motor sin escobillas el voltaje máximo que puede producirse es de **48V/96V**, por lo tanto, el voltímetro debe de estar por arriba de este valor, para esta aplicación se elige el siguiente voltímetro

Se selecciona el transmisor de voltaje **HDH-20** (Figura 43)

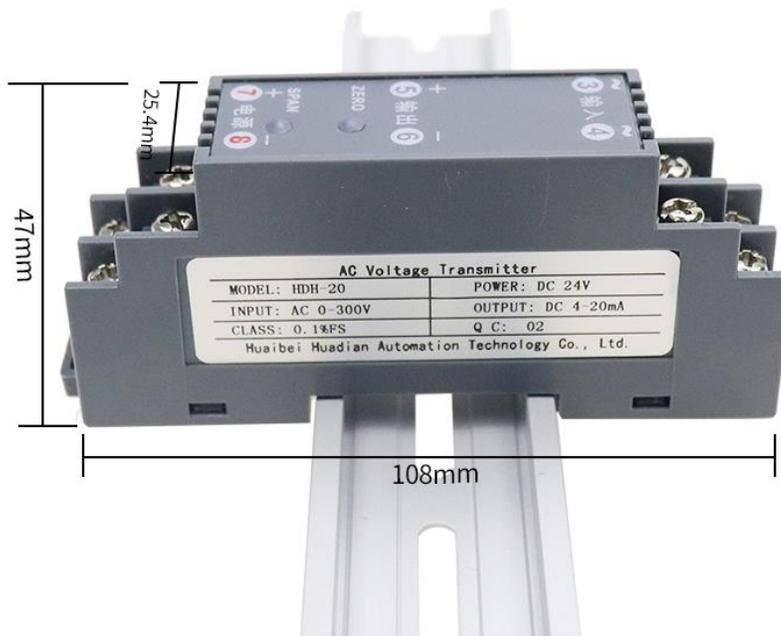


Figura 43. Transmisor de voltaje

Fuente: (Lorenzo, 2017)

### 5.1.7 Selección del amperímetro

El amperímetro seleccionado es el sensor de corriente serie HD-T41 de 20 A (Figura 44):



Figura 44. Sensor de corriente

Fuente: Fuente: (Lorenzo, 2017)

## 5.2 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES

Se hace indispensable conocer algún procedimiento de calibración para cada uno de los sensores que se van a implementar en el túnel de viento, a continuación, se establecen los argumentos teóricos para la calibración de los sensores elegidos en el proyecto.

Un sensor transforma una señal física en una señal eléctrica a través de un instrumento de conversión que acondiciona la señal.

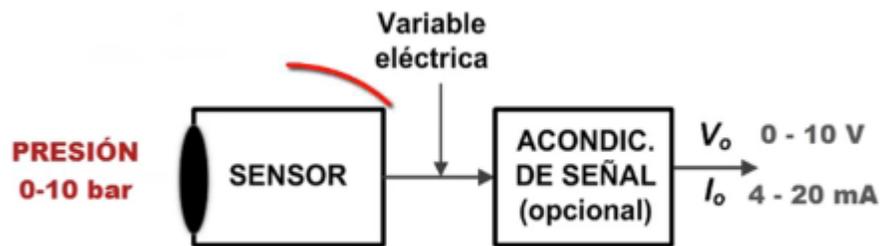


Figura 45. Esquema de conversión de una señal en un transmisor de sensor

Fuente: (Leyva & Mexico, 2017)

El esquema de la Figura 45 da una explicación de cómo se transforma una la de presión como una magnitud física a una señal eléctrica estandarizada. A través de la implementación de un sensor que transforma la cantidad física en una variable eléctrica la cual debe de ser ajustada mediante un acondicionador de señal para arrojar una señal de corriente o voltaje ya estandarizada (4-20 mA o 0-10V)

Los instrumentos pueden medir, transmitir o controlar una variable. Para realizar esto hay una relación entre la variable de entrada y la salida del instrumento. En la práctica esta relación se aleja de la real en mayor o menor grado constituyendo el error de la medida.

$$Error\ relativo = \frac{V_m - V_R}{V_m} \times 100$$

Ecuación 49. Error relativo de los instrumentos de medición

Un instrumento está bien calibrado cuando en todos los puntos de medida el error está comprendido en límites de tolerancia (Cadenas, 2019)



Figura 46. Tolerancia de medida de una señal

FUENTE: (Siemens, 2020b)

La exactitud de las medidas de un sensor está limitada por la tolerancia del instrumento, en la Figura 46 se esquematiza el margen de error existente en la medición de alguna cantidad física, lo que quiere decir que siempre existe una diferencia entre la cantidad real que mide el sensor y la cantidad ideal que arroja la teoría o el fabricante del instrumento, esto es inevitable y lo único que se puede hacer al respecto es reducir al máximo el margen de error tratando de acercarlo a algún estándar teórico (Siemens, 2020a).

### 5.2.1 Configuración de un sensor analógico en un PLC

2. El primer paso es conocer la señal eléctrica que entrega el sensor y su conexión al PLC, esta información se obtiene de las hojas de especificaciones del fabricante del sensor (0 – 10 V o 4 - 20 mA)
3. El segundo paso es saber si la relación que existe entre la variable a medir y la señal eléctrica que entrega el sensor es lineal o no lineal
  - Si la relación entre la variable y la señal es lineal, basta con dividir su rango de presión entre la resolución del convertidor, esto sirve para hallar el incremento de a variable por cada bit en el convertidor ( $Ib$ ).

Por ejemplo, un sensor de presión que tiene un rango de presión de 10 bar y una resolución de convertidor de 12 bits, se realiza el siguiente cálculo

$$Ib = \frac{P}{2^{Bits}}$$

**Ecuación 50. Relación entre una variable y una señal del sensor**

$$I_b = \frac{10 \text{ bar}}{2^{12} \text{ bits}} = 0.00244 \text{ bar}$$

Esto quiere decir que por cada bit de información que pasa por el convertidor son representados 0.00244 bar de presión, por lo tanto, para hallar la lectura en bares solo se multiplica el valor en bits por este factor (Siemens, 2014).

La calibración de los sensores se realiza de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Siemens, 2014)

### **5.3 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL**

#### **5.3.1 Selección de la tarjeta DAQ**

Como se observa en la Tabla 3 el dispositivo DAQ debe de tener las siguientes características para cumplir con los requerimientos del túnel de viento

- 8 entradas analógicas (presión, temperatura, sonido, humedad relativa, velocidad del viento, velocidad del motor generador, voltaje, amperaje)
- 5 entradas digitales (en caso de implementar un tablero de control)
- 1 salida analógica (velocidad del motor)
- 4 salidas a relé (encendido, marcha, paro, paro de emergencia)

Considerando un dispositivo que cuente con el número de entradas y salidas indicado, un costo asequible, y además confiables se establece



La USB DAQ 6009 consta de 8 canales de entrada analógica enumerados de 0 a 7: para un solo extremo mediciones, cada señal es una entrada analógica de voltaje. Para medidas diferenciales, también consta de entradas analógicas AI 0 y AI 4 son las entradas positivas y negativas del canal 0 de entrada analógica diferencial. Los siguientes pares de señales también forman una entrada diferencial. canales: AI <1, 5>, AI <2, 6> y AI <3, 7>.

Para entrada analógica, voltajes de salida analógica, señales digitales, el suministro es de +5 VCC y +2,5 VCC en el conector de E / S (Instruments, 2015).

### 5.3.2 Bloque de acondicionamiento de señal SC-2345

Algunos transmisores que proporcionan una señal de salida normalizada (de 4-20 mA; 0-10 V; etc.). estos transductores necesitan de acondicionamiento de la señal para su lectura en el dispositivo DAQ (Adquisición & Datos, 2018), por lo tanto, se implementa un bloque de acondicionamiento de señal.

#### - Descripción

El bloque de acondicionamiento de señal seleccionado, es el modelo SC-2345. Es de tipo portátil a bajo costo y bajo conteo de canales para sistemas de medición y automatización basados en PC que requieren acondicionamiento y conectividad por canal. El sistema SCC condiciona una variedad de entradas analógicas y señales digitales de E/S (Adquisición & Datos, 2018)..



**Figura 47. Bloque de acondicionamiento de señal**

Fuente: (DAQ-SC-2345 | *Técnicas de Transductores*, n.d.)

## 5.4 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FUERZA

### 5.4.1 Selección del motor

Se requiere un motor con las siguientes características:

**Tipo:** Motor trifásico AC

**Potencia:** 20 Hp = 14,914 kW  $\approx$  15 kW

**Frecuencia:** 60 Hz

**Velocidad angular:** 1800 RPM

Con posibilidad de conectar con variador de frecuencia

Para seleccionar el motor se usa el catalogo de precios de motores siemens en colombia para el año 2019, la cual arroja como resultado el **MOTOR TRIFÁSICO NEMA PREMIUM GP100** con numero de referencia **1LE2225-2BB21-4AA3-Z B09+D05+D80** (Figura 48)



Figura 48. Motor trifásico seleccionado

Fuente: (Sobrecorrientes, 2015)

En la Tabla 4 se pueden observar las características técnicas del motor

Tabla 4. Características técnicas del motor trifásico

<i>Electrical Data / Datos Eléctricos</i>			
Rated motor voltage	230 V	N/A	460 V
Tensión nominal	YY	N/A	Y
Frequency	60Hz		
Frecuencia	60Hz		
Rated power	20 HP		
Potencia Nominal	20 HP		
Rated motor speed	1770 rpm		
Velocidad Nominal	1770 rpm		
Rated motor torque	80.46 Nm		
Torque Nominal	80.46 Nm		
Nominal current	50 A	-	25 A
Corriente Nominal	50 A	-	25 A
Starting / rated motor current (Ia/In)	5.8		
Corriente de arranque	5.8		
Starting / rated motor torque (Ta/Tn)	1.83		
Torque de arranque	1.83		
Efficiency class	Premium (IE3)		
Efficiency:	4/4 93		
Eficiencia	4/4 93		
Power factor	0.805		
Factor de potencia	0.805		
Service factor	1.15		
Factor de servicio	1.15		
Motor protection :			
Protección del motor			

Fuente: (Otzen et al., 2017)

#### 5.4.2 Selección del transformador

Como se puede observar en la ficha técnica del motor existen dos corrientes de operación:

*Motor a 230V conectado en YY 50 A*

*Motor a 460V conectado en Y 25 A*

Con el fin de proteger el motor es necesario utilizar un transformador elevador de voltaje que lleve el voltaje de línea de 220Vac a 460Vac con el objetivo de reducir al máximo la corriente nominal de operación, es decir para que el motor trabaje a 25 A.

Los laboratorios de la universidad de Pamplona cuentan con una comedita trifásica 220V por lo que es necesario contar con un transformador para el funcionamiento del motor donde la potencia activa es igual a:

$$P = \sqrt{3} * I * V$$

**Ecuación 51. Potencia eléctrica trifásica**

Donde P es la potencia aparente en kilovoltamperio [kVA], I es la intensidad de la corriente en [A], y V es la tensión de línea, siendo la corriente igual a

$$I = I_n * F_s$$

**Ecuación 52. Corriente de trabajo**

Donde **I** Corriente de trabajo [A], **I<sub>n</sub>** Corriente nominal [A] y **F<sub>s</sub>** Factor de servicio [Adimensional]

Según los datos del motor el corriente nominal en estrella es de 25 A, y el factor de servicio es de 1.15

$$I = 25 A * 1,15$$

$$I = 28,75 A$$

Donde la potencia de trabajo es:

$$P = \sqrt{3} * I * V$$

$$P = \sqrt{3} * 28,75 A * 460V$$

$$P = 22906,4 \text{ kVA}$$

Por cuestiones de seguridad se recomienda un 20% de holgura, por lo tanto

$$P = 22,91 \text{ kVA} + 0.2 * 22,91 \text{ kVA}$$

$$P = 27,5 \text{ kVA}$$

Por lo tanto, las características del transformador son las siguientes:

- Potencia comercial: 30 kVA
- Voltaje de entrada: 220 V
- Voltaje de salida: 460 V
- Frecuencia: 60 Hz

El transformador que cumple todos los requerimientos deseados que fue encontrado en el mercado es:



**Figura 49. Transformador trifásico**

(Otzen et al., 2017)

La Figura 49 muestra el transformador trifásico elegido con potencia de 30kva Entrada 208v-220v y salida de 380v/440v/460v/480v

#### 5.4.3 Selección del variador de frecuencia

El variador de velocidad se selecciona de acuerdo a la potencia requerida por el motor, en este caso 15 kW, utilizando un catálogo de variadores de siemens se selecciona de acuerdo a la Tabla 5 el variador:

SINAMICS V20 es una gama de convertidores diseñados para regular la velocidad de motores asíncronos trifásicos.

**Tabla 5. Tabla de selección de variadores de velocidad para motores asíncronos**



Componente	Potencia nominal de salida	Corriente nominal de entrada	Corriente nominal de salida	Corriente de salida a 480 V a 4 kHz/40 °C	Referencia	
					No filtrado	Filtrado
Tamaño de bastidor A (sin ventilador)	0,37 kW	1,7 A	1,3 A	1,3 A	6SL3210-5BE13-7UV0	6SL3210-5BE13-7CV0
	0,55 kW	2,1 A	1,7 A	1,6 A	6SL3210-5BE15-5UV0	6SL3210-5BE15-5CV0
	0,75 kW	2,6 A	2,2 A	2,2 A	6SL3210-5BE17-5UV0	6SL3210-5BE17-5CV0
	0,75 kW <sup>1)</sup>	2,6 A	2,2 A	2,2 A	-	6SL3216-5BE17-5CV0
Tamaño de bastidor A (con un ventilador)	1,1 kW	4,0 A	3,1 A	3,1 A	6SL3210-5BE21-1UV0	6SL3210-5BE21-1CV0
	1,5 kW	5,0 A	4,1 A	4,1 A	6SL3210-5BE21-5UV0	6SL3210-5BE21-5CV0
	2,2 kW	6,4 A	5,6 A	4,8 A	6SL3210-5BE22-2UV0	6SL3210-5BE22-2CV0
Tamaño de bastidor B (con un ventilador)	3,0 kW	8,6 A	7,3 A	-	6SL3210-5BE23-0UV0	6SL3210-5BE23-0CV0
	4,0 kW	11,3 A	8,8 A	8,24 A	6SL3210-5BE24-0UV0	6SL3210-5BE24-0CV0
Tamaño de bastidor C (con un ventilador)	5,5 kW	15,2 A	12,5 A	11 A	6SL3210-5BE25-5UV0	6SL3210-5BE25-5CV0
Tamaño de bastidor D (con dos ventiladores)	7,5 kW	20,7 A	16,5 A	16,5 A	6SL3210-5BE27-5UV0	6SL3210-5BE27-5CV0
	11 kW	30,4 A	25 A	21 A	6SL3210-5BE31-1UV0	6SL3210-5BE31-1CV0
	15 kW	38,1 A	31 A	31 A	6SL3210-5BE31-5UV0	6SL3210-5BE31-5CV0

FUENTE: (Alibaba, 2020)

En la Tabla 5. Tabla de selección de variadores de velocidad para motores asíncronosTabla 5 se selecciona el variador de frecuencia para el motor de 15 kW, como se resalta en amarillo en la tabla, se elige un variador con bastidor tipo D

#### 5.4.4 Selección del interruptor magnetotérmico

Son dispositivos de protección contra cortocircuito, de corte tripolar. Los interruptores termomagnéticos cumplen la función de protección contra cortocircuitos, cumpliendo adicionalmente la función de seccionamiento. Los requisitos para que cumplan con la función de protección contra cortocircuito son básicamente una pronta detección de la corriente de defecto y una rápida apertura de los contactos. Esto conduce a que los guardamotors magnéticos sean aparatos limitadores (Otzen et al., 2017).

El interruptor magnetotérmico abre el circuito de potencia y está ubicado en la sección de cable con un voltaje de 220V;

La corriente a la entrada del transformador

$$I1 = \frac{P}{\sqrt{30} * V1}$$

$$I1 = 30000VA/(\sqrt{3} * 220V)$$

$$I1 = 78.3 A$$

Se elige el interruptor magnetotérmico con referencia 3VT1708-2DC36-0AA0 (ver Figura 50):



**Figura 50. interruptor magnetotérmico**

Fuente: (Otzen et al., 2017)

#### CARACTERITICAS TECNICAS:

Interruptor de circuito 3VT1 capacidad de interrupción estándar uci = 25kA, 415 V ca 3 polos, protección del sistema liberación de sobrecorriente TM, LI IN = 100A corriente clasificada IR = 80 ... 100A protección de sobrecarga. II = 500 ... 1000A, protección de cortocircuito sin liberación auxiliar sin interruptor auxiliar / alarma (Alibaba, 2020)

#### 5.4.5 Selección del disyuntor general

Un disyuntor es un aparato capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que por él circula excede de un determinado valor o, en el que se ha producido un corto circuito, con el objetivo de no causar daños a los equipos eléctricos. A diferencia de los fusibles, que deben ser reemplazados tras un único uso, el disyuntor puede ser rearmado una vez localizado y reparado el daño que causó el disparo o desactivación automática (Alibaba, 2020).

El disyunto va a proteger principalmente al variador de frecuencia, el cual tienen una corriente nominal de entrada de  **$I_n = 38,1 \text{ A}$**

Se elige el disyuntor siemens con referencia 3RT2035-1AN20 (ver Figura 51), con  $I_n: 40\text{A}/ 400\text{V } 50\text{Hz}$ , 18.5kW, S2, bob.220VAC 50/60Hz



**Figura 51. Contactor seleccionado**

Fuente: (Otzen et al., 2017)

#### 5.4.6 Selección del relé térmico

El motor tiene una corriente nominal de 25 amperios, pero puede alcanzar un factor de servicio de 1.15

$$I = I_n * F_s$$

$$I = 25 \text{ A} * 1,15$$

$$I = 28,75 \text{ A}$$

Relé de sobrecarga 27...32 A térmico para protección de motores tamaño S0, clase 10 para montar en contactor Circuito principal: atornillable circuito auxiliar: atornillable Rearme manual/automático



**Figura 52. relé térmico para protección de motores trifásicos**

Fuente: (Otzen et al., 2017)

#### 5.4.7 Selección del motor sin escobillas

Se selecciona un motor sin escobillas (Figura 53) que funcionará como generador eléctrico al recibir la energía a través de la turbina eólica.



**Figura 53. Motor sin escobillas seleccionado**

Fuente: (Otzen et al., 2017)

En la Tabla 6 se muestran las características técnicas del motor sin escobillas:

**Tabla 6. Ficha técnica del motor sin escobillas**

Lugar del origen:	Shandong, China	Marca:	KEYA
Número de Modelo:	KY110AS0410-15	Voltaje (V):	48VDC
De potencia de sali...	1000 W	Aplicación:	Barco, Coche, Bicicleta eléctrica, Ventilador, AGV, Robot, coch...
Certificación:	CE	Tipo:	SERVO MOTOR
Torsión:	6.3N.M	Construcción:	Imán permanente
Conmutación:	Sin escobillas	Característica de pr...A prueba de goteo	
Velocidad (RMP):	1500r/min	Corriente Continuo...	40A
Eficiencia:	IE 1	Nombre del produc...	Bldc MOTOR 200 W 24 V
Tipo de Motor:	MOTOR BLDC con codificador	Palabras clave:	MOTOR bldc
Tensión nominal:	48VDC	Color:	Negro
Diámetro:	80mm	Peso:	10 kg
Nombre del artículo:	1.1kw motor dc sin escobillas		

Fuente: (Otzen et al., 2017)

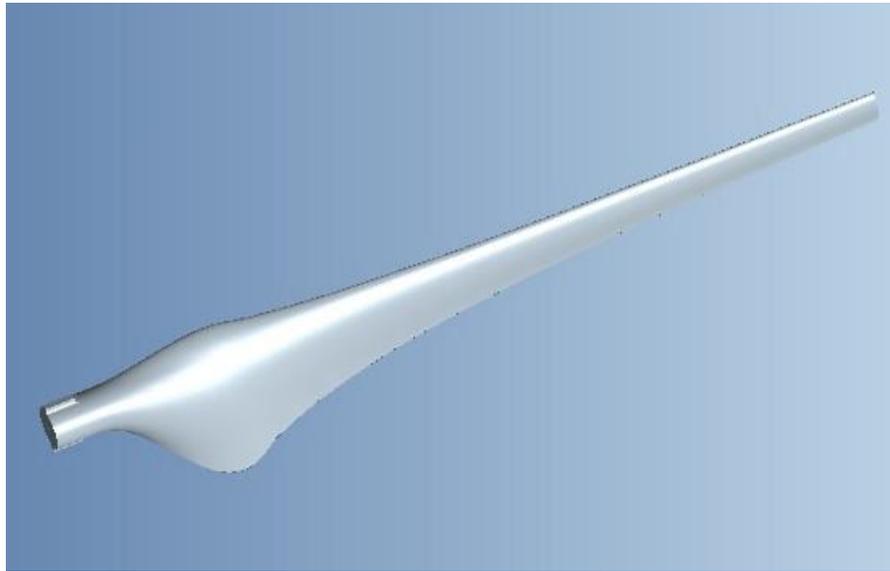
#### 5.4.8 Selección la turbina

Debido a que el tamaño de la turbina juega un papel importante ya que la sección de prueba tiene un área cuadrada con un metro de lado, debe de buscarse en el mercado la turbina de tamaño ideal, se elige una turbina de tres aspas de 61 cm de diámetro reducida de un aerogenerador comercial de 20 metros de diámetro. El perfil aerodinámico es un NACA 4412, que es típico para aerogeneradores (Albayrak, 2000).

##### 5.4.8.1 Perfiles naca

La nomenclatura NACA sirve para definir la geometría de un perfil alar a partir de un código alfanumérico, para este caso se ha utilizado un perfil de 4 dígitos tipo NACA ABCD(*El Código NACA de 4 y 5 Dígitos*, 2021), el cual se puede explicar cómo sigue (ver Figura 8):

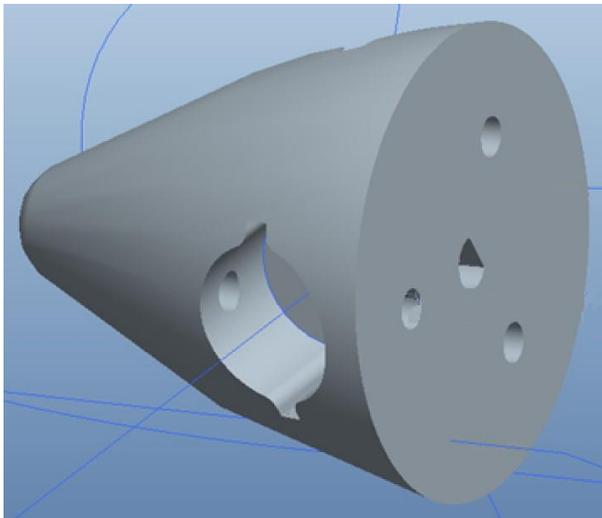
- A: ordenada máxima de la línea media en porcentaje de la cuerda
- B: posición de la ordenada máxima en decimas de la cuerda
- CD: Espesor máximo en porcentaje de la cuerda



**Figura 14. Modelo NACA 4412 recomendado en el proyecto**

Fuente: (Albayrak, 2000)

Las aspas (Figura 14) están soportadas en el cubo (hub en inglés) son Modelo NACA 4412 recomendado en el proyecto, a continuación, se observa el modelo del cubo (Figura 15):



**Figura 15: Modelo del cubo para la turbina eólica**

Fuente: (Albayrak, 2000)

## INSTRUMENTACIÓN

## **6. CONCLUSIONES**

### **6.1 LIMITACIONES DEL SISTEMA DE CONTROL**

- Este sistema de control está creado específicamente para pruebas de aerogeneradores, tiene una velocidad máxima del viento de 30 m/s, la potencia del ventilador es de 20 Hp, y la potencia del generador es de 1000W, el dispositivo cuenta con 8 sensores de tipo analógico, si se deseara implementar otro tipo de pruebas se haría necesario modificar el sistema de acuerdo a la aplicación requerida
- La adquisición de los equipos es difícil debido a la especialidad de cada dispositivo, lo que involucra un costo alto en transporte, aduna y de envío. Por lo tanto, lo más recomendable es buscar primero los dispositivos en el mercado nacional y si no queda opción se debe recurrir el mercado internacional
- El motor sin escobillas de generación de energía podría ser más económico si se pudiera conseguir con los sensores de efecto hall integrados, para este proyecto se consiguieron los dispositivos por separado
- Las cotizaciones de este proyecto involucran únicamente a la parte de control, lo que significa que aun hacen falta algunos equipos para completar todo el sistema del túnel de viento para pruebas de aerogeneradores
- La turbina del motor sin escobillas de generación de energía debe de fabricarse a la medida requerida (60 cm de diámetro)

### **6.2 VENTAJAS DEL SISTEMA DE CONTROL Y DE POTENCIA**

- El sistema de control es robusto y preciso para realizar laboratorios de prueba de aerogeneradores en la universidad de Pamplona
- Se estableció un sistema de control fácil de usar, intuitivo y eficiente que da la posibilidad de implementar dos modos de operación
- Se estableció un sistema de potencia robusto y seguro que promueve el cuidado del motor eléctrico y previene daños por corto circuito, y por sobrecarga

### 6.3 Recomendaciones y trabajos futuros

La metodología de la investigación científica constituye un conjunto de métodos, leyes y procedimientos que orientan los esfuerzos de la investigación hacia la solución de los problemas científicos con un máximo de eficiencia. El método se basa en el desarrollo de distintas etapas que conducen al establecimiento de una conclusión válida sustentada en la verificación de una hipótesis y supuestos de la investigación realizada (Otzen et al., 2017), para desarrollar un proyecto de este tipo es necesario tener un orden específico para no derrochar tiempo, los pasos implementados podrían ser según la Figura 54:

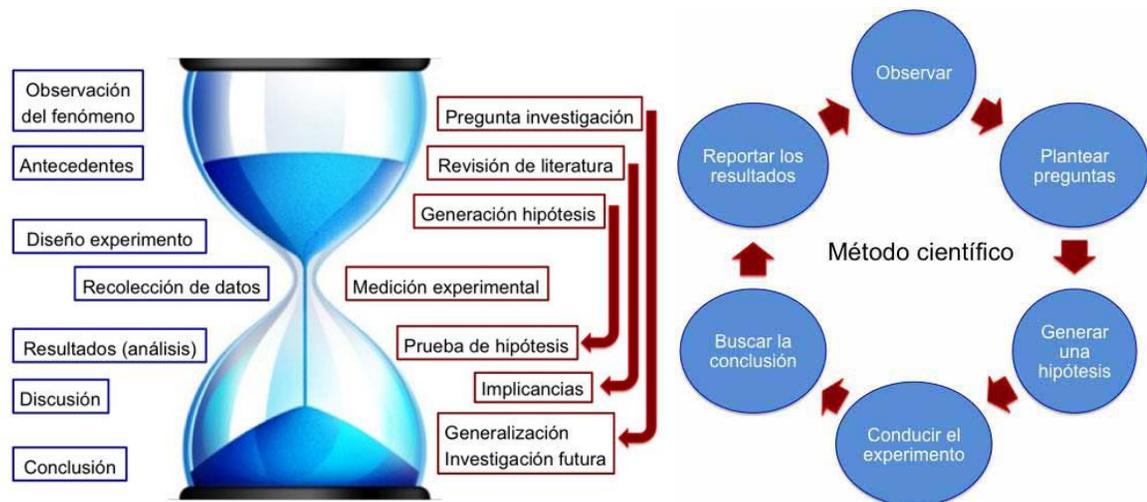


Figura 54. Aplicación del método científico en la investigación

Fuente: (Otzen et al., 2017)

1. Observación: Se observa la necesidad de implementar un sistema de control para el túnel de viento, esto con el fin de generar datos precisos al momento de la experimentación
2. Plantear preguntas: Documentarse a cerca del funcionamiento general del sistema que está diseñando y establecer cómo debería de funcionar para nuestra aplicación
3. Generar una hipótesis: Establecer los componentes principales del sistema, es necesario informarse del funcionamiento, de las variables que involucra cada uno de ellos y tener una visión general del funcionamiento de cada componente del sistema
4. Conducir el experimento: Simular el circuito eléctrico en un software para esquematizar y tener una idea del papel que cumple cada componente en él, esto afianzara el conocimiento que alcanzó en el paso 2 y estimulará la búsqueda de información de calidad

5. Buscar la conclusión: A partir de los resultados de la simulación y de la documentación empezar a establecer las características técnicas de cada dispositivo, estas características deben de irse agregando a los diagramas y a las simulaciones para no olvidarlas
6. Resultados: Elaborar un balance de todos los instrumentos necesarios enfatizando en las variables que desea destacar en cada dispositivo
7. Consultar los dispositivos según el mercado, es posible que muchas de las especificaciones deban de ser modificadas y adecuadas a los productos encontrados, si es necesario repita alguno de los pasos para adecuarse a las condiciones

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adquisición, L. A., & Datos, D. E. (2018). *DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA*.
- Albayrak, K. (2000). Low turbulence wind tunnel design. *Modelling, Measurement and Control B*, 69(1–2), 61–72.
- Alibaba. (2020). *1 Kw Dc Sin Escobillas Motor De 1 Hp 1.1kw Motor Dc Sin Escobillas*.  
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/1-kw-brushless-dc-motor-1-hp-1-1kw-brushless-dc-motor-60820835329.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.382c38b9dBU4iD>
- alibaba. (2020). *Transductores de corriente, Amperimetro de efecto Hall*.  
[https://www.alibaba.com/product-detail/4-20mA-output-0-500A-dc\\_62151201962.html?spm=a2700.md\\_es\\_ES.pronpeci14.5.3a182016Yt1w4q](https://www.alibaba.com/product-detail/4-20mA-output-0-500A-dc_62151201962.html?spm=a2700.md_es_ES.pronpeci14.5.3a182016Yt1w4q)
- Benalcázar Venegas, J. F. (2015a). *Departamento de ciencias de la energía y mecánica*.
- Benalcázar Venegas, J. F. (2015b). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO CERRADO PARA CALIBRACIÓN DE SENSORES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)*.
- Cadenas, A. (2019). *Lo que debes saber Transmisores de presión (sondas de presión) - YouTube*.  
[https://www.youtube.com/watch?v=YTn5HHZQkQE&t=160s&ab\\_channel=ACADENAS](https://www.youtube.com/watch?v=YTn5HHZQkQE&t=160s&ab_channel=ACADENAS)
- Calderón Godoy, A. J. (2017). *Sensores y actuadores industriales*.
- ÇENGEL, Y. A. (2011, March 30). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edici%C3%B3n.pdf>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS GENERAL DE ENERGÍA. Termodinámica*, 92–94.
- Cimbala, J. M., & Cengel, Y. a. (2001). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGrawHill, Primera Ed*, 10–11. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Connor, N. (2009, September 17). *¿Qué es el número de Nusselt?* <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-nusselt-definicion/>
- Cort, J. A., Alberto, J., Vargas, M., & Escobar, M. (2012). *neumático a través de un PLC y un sistema SCADA system*. 50, 141–146.
- Cremades Botella, A. (2019). *Implementación de nuevas técnicas de medida en un túnel de viento subsónico para bajo número de Reynolds*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/126294>
- DAQ-SC-2345 | *Técnicas de transductores*. (n.d.). Retrieved April 15, 2021, from <https://www.transducertechniques.com/daq-scc-2345.aspx>

- Dimensional, A. (2014). *ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA HIDRAULICA*.  
<https://www.coursehero.com/file/64094074/22Cap7-AnalisisDimensionalYSemenjanzaHidraulicadoc/>
- Domingo, M. A. (2011). Agustín Martín Domingo. *Apuntes de Mecánica de Fluidos*.  
<http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- El código NACA de 4 y 5 dígitos*. (2021). <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2017/01/el-codigo-naca-de-4-y-5-digitos.html>
- Eraso-Checa, F., Escobar-Rosero, E., Paz, D. F., & Morales, C. (2017). *Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño Methodology for the determination of wind characteristics and assessment of wind energy potential in Túquerres-Nariño Metodologia para a determinação das características do vento e a avaliação do potencial de energia eólica em Túquerres-Nariño*.  
<https://doi.org/10.14483/23448350.12304>
- F1. (2010). *Túneles de viento (II) - F1 al día*. <https://www.f1aldia.com/10680/tuneles-de-viento-ii/>
- Febriyanto, R., Rudiyanto, B., Pambudi, N. A., Widiastuti, I., Wibowo, K. M., Riyanto, & Setyawan, N. D. (2019). Study experimental of blade NACA 4412 with pitch angle on horizontal wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012137>
- Giles, R. v. (2009). Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. *Revista Internacional de Seguridad Social*, 62(4), 267. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1734.2009.01342.x>
- Hernández, R. (2008). *Antecedentes*. <https://www.cec.uchile.cl/~rohernan/tunel/node1.html>
- Hidalgo, S. (2018). *▷¿Qué es el ángulo de ataque? Ingeniería Aeroespacial*.  
<https://www.sergiohidalgo.site/que-es-el-angulo-de-ataque/>
- Instruments, N. (2015). *Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device*.
- Instruments, N. (2021). *¿Qué es Adquisición de Datos? - National Instruments*.  
<http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/es/pg/1/sn/n17:daq/fmid/652/>
- Jimenez, S., Scarioni, L., & Vano, K. (2013). Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo , fabricados con NaCl , KBr y KCl. *Revista Ingeniería UC*, 20, 83–86.
- Lanzarote, C. (2003). *Minieólica Lanzarote*.  
[http://www.minieolicadelanzarote.com/tecnologia\\_tipos.php](http://www.minieolicadelanzarote.com/tecnologia_tipos.php)
- Leyva, A., & Mexico, F. (2017). (423) *Configuración de un Sensor Analógico en un PLC - YouTube*. 2017. [https://www.youtube.com/watch?v=X\\_xFzugeEzQ&t=2s&ab\\_channel=FestoMéxico](https://www.youtube.com/watch?v=X_xFzugeEzQ&t=2s&ab_channel=FestoMéxico)
- Llamas Cerrato, A. (2005). *TREBALL DE FI DE CARRERA*.

- Lorenzo, J. I. (2017, March 8). *CALIBRACION DE INSTRUMENTOS*.  
[https://www.youtube.com/watch?v=1nmAxVllpal&ab\\_channel=Electrocontrol.Jos%C3%A9IgnacioLorenzo](https://www.youtube.com/watch?v=1nmAxVllpal&ab_channel=Electrocontrol.Jos%C3%A9IgnacioLorenzo)
- Luis, I., & Sexto, F. (n.d.). *¿CÓMO ELEGIR UN SONÓMETRO?*
- Marbán, R. M., & Pellecer C, J. A. (2002). *Calibración de instrumentos de sonido*.  
<https://alphametrologia.com/calibracion-de-instrumentos-de-sonido/>
- Martín Rodríguez, P., Martín Rodríguez, E., Loredó-Souza, M., Beatriz, E., & Schettini, C. (2014). *Utilización de anemómetro de hilo caliente*.
- Mecafenix, I. (2018). *El amperímetro como funciona y para que sirve - Ingeniería*.  
<https://www.ingmecafenix.com/medicion/el-amperimetro/>
- Mueller, T. J. (2001). Aeroacoustics measurements. In *Springer* (Vol. 53, Issue 9).  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Orts, M. A., & Ronda Peñacoba, S. (2012). *Electromagnetismo. Efecto Hall*.  
<http://rsefalicante.umh.es/TemasElectromagnetismo/Electromagnetismo07.htm>
- Otzen, T., Manterola, C., Núñez, I. R., & García-Domínguez, M. (2017). La necesidad de aplicar el método científico en investigación. Problemas, beneficios y factibilidad del desarrollo de protocolos de investigación. *International Journal of Morphology*, 35(3), 1031–1036.  
<https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000300035>
- Oulad, B. Z. R. (2010). 2. *Generalidades sobre aerogeneradores*. 20–36.  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70162/direccion/Volumen+único%252F>
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2015). *Voltímetro y amperímetro | Física y matemáticas*.  
<https://es.scribd.com/doc/289168832/Voltimetro-y-amperimetro-pdf>
- Pinzón Paz, S. (2013). *Vista de El perfil alar y su nomenclatura NACA | Ciencia y Poder Aéreo*.  
<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., Ramadan, Bassem., Shih, T. I.-P., Romo Muñoz, J. H., & León Cárdenas, Javier. (2015). *Mecánica de fluidos*.
- Ramos, L. (2011). *Números adimensionales - 201108\_Luis\_RAMOS*.  
<https://sites.google.com/site/201108luisramos/apuntes/numeros-adimensionales>
- Revisión técnica: Andrés Barrado Bautista, Emilio Olías Ruiz, Antonio Lázaro Blanco, universidad carlos I. de M. (2001). *Electronica de Potencia - Daniel W Hart.pdf*. In *Electronica* (p. 472).
- Rodrigo, L., Interno, A., & Rodr, F. (2017). *Variadores de frecuencia - ¿Para qué sirven? Usos y aplicaciones*. <https://iguren.es/blog/aplicaciones-y-usos-de-los-variadores-de-frecuencia/>
- Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (1995). *MECÁNICA DE FLUIDOS* (N. York, Ed.; 3rd ed.). McGRAW-HILL.

Sensors, S. S. (n.d.). *Shaft Speed Sensors ST420*.

Siemens. (2014). *Siemens LOGO! 8 AM 2 AQ - 6ED1055-1MM00-0BA2*. Logo, Siemens.  
<https://www.automation24.es/siemens-logo-8-am-2-aq-6ed1055-1mm00-0ba2>

Siemens. (2020a). *Siemens LOGO! 8 AM2 - 6ED1055-1MA00-0BA2* .  
<https://www.automation24.es/siemens-logo-8-am2-6ed1055-1ma00-0ba2>

Siemens. (2020b). *Siemens LOGO! 8 DM8 12/24R - 6ED1055-1MB00-0BA2* .  
<https://www.automation24.es/siemens-logo-8-dm8-12-24r-6ed1055-1mb00-0ba2>

Sobrecorrientes, C. (2015). *CAPÍTULO 6-PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTES*.

Spark, W. (2019). *Clima promedio en Pamplona, Colombia, durante todo el año - Weather Spark*.  
<https://es.weatherspark.com/y/25308/Clima-promedio-en-Pamplona-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Specialist, F. M., Switch, D. I. P., Set, O. F. F., & Set, O. F. F. (n.d.). *Ftm84/85*. 1–6.

TECH, Y. (2020). *Measuring Specialist of Transmitter and Meter for industry - eYc*.  
<https://www.eyc-tech.com/>

Uribe, O., Acosta, D. E., & de Yomasa, C. (2016). *PROGRAMA DE INGENIERÍA*.

Villacampa, A. (n.d.). *LOGO8 REGISTRO DE DATOS*. Retrieved December 3, 2020, from  
[https://www.youtube.com/watch?v=eXMpIE3tRtk&t=258s&ab\\_channel=AngelVillacampa](https://www.youtube.com/watch?v=eXMpIE3tRtk&t=258s&ab_channel=AngelVillacampa)

## 8. ANEXOS

### 8.1 PANTALLA PRINCIPAL DE LA INTERFAZ DE CONTROL

La pantalla principal de la interfaz está compuesta por un esquema del túnel de viento en funcionamiento, en el cual se puede observar cuando están encendidos los dispositivos que lo componen (ver Figura 55).

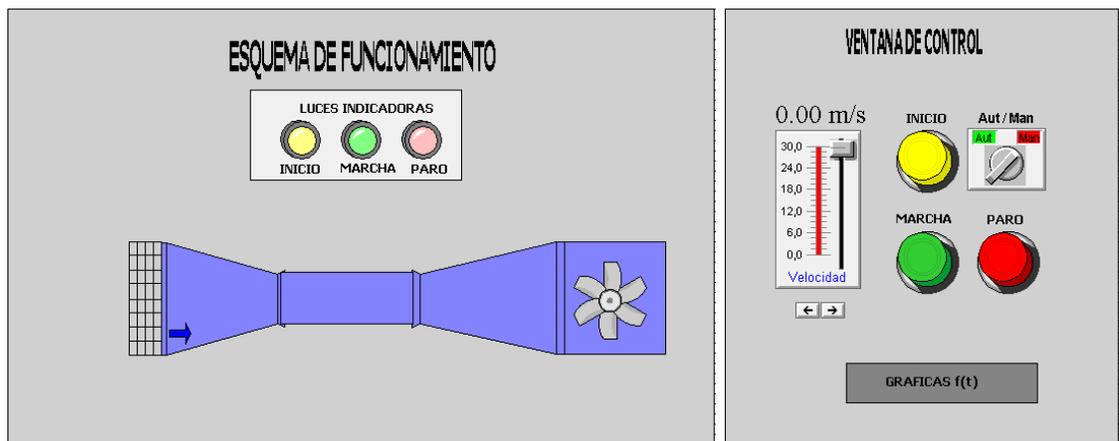


Figura 55. Interfaz de control

La figura anterior es la interfaz gráfica de un modelo para el túnel de viento, se desarrolló en el software Wonderware InTouch, en la parte izquierda de la imagen se observa el esquema de funcionamiento del túnel de viento, y en ella puede simularse si los componentes están en funcionamiento, en la parte derecha se encuentra la ventana de control desde la cual se puede controlar la velocidad del ventilador que proporciona la energía del aire, en la parte inferior se observa un botón de gráficas, este botón despliega una ventana secundaria en la que se pueden observar en tiempo real las curvas de los sensores y de la velocidad.

## 8.2 Diagrama de bloques en logo soft confort

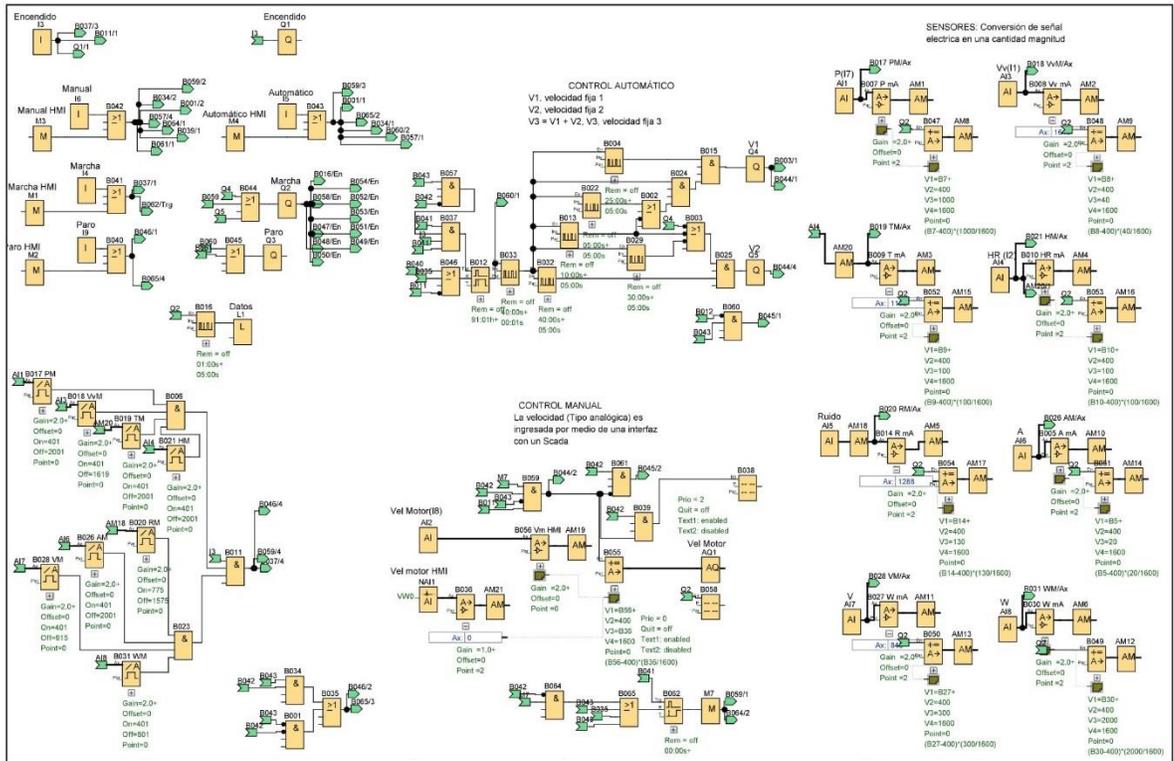


Figura 56. Diagrama de bloques en logo soft confort

En la Figura 56 se muestra uno de los programas diseñados el control del túnel de viento para pruebas de aerogeneradores, este diagrama de bloques puede ser utilizado en el logo 8 12/24 RCE, en la parte derecha se puede ver el escalado de las variables analógicas, en la parte central se encuentran los modos de control manual y automático, en la parte superior izquierda se ubican los controles de encendido, marcha/paro, manual/automático, en la parte inferior izquierda se ubica los límites máximos de las señales analógicas de entrada para evitar que el sistema trabaje más allá de sus límites.

### 8.3 Diagrama eléctrico de control y de fuerza

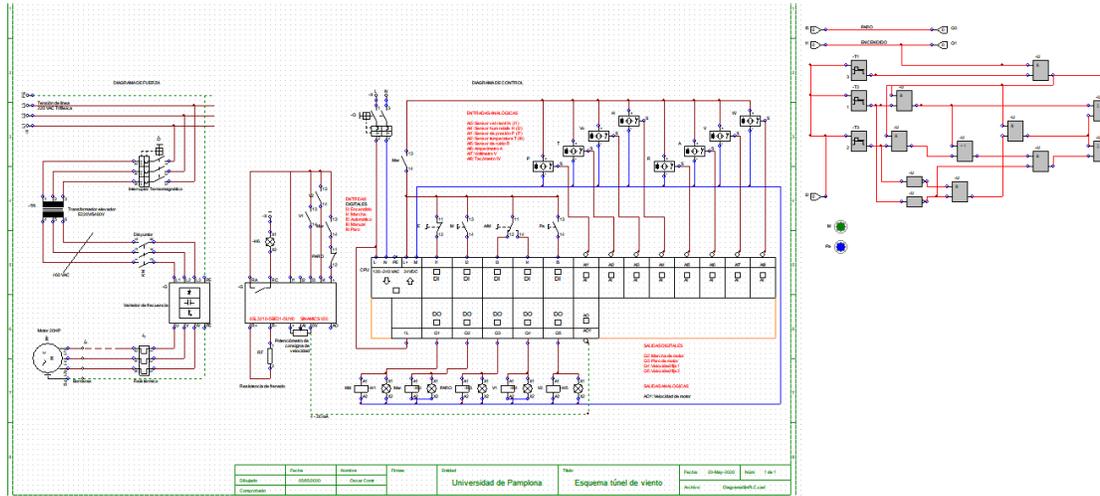


Figura 57. Diagrama eléctrico de control

Este diagrama elaborado en CADE SIMU V3.0 muestra la instrumentación necesaria para funcionamiento del túnel de viento y su forma de conexión (Figura 57)

### 8.4 COTIZACIONES DE DISPOSITIVOS CON EMPRESAS



**YUDEN-TECH CO., LTD.**  
 SF,NO.121,LI DE ST. JHONGHE CITY, TAIPEI COUNTY 23556,  
 TAIWAN(R.O.C)  
 TEL:+886-2-8221-2958 FAX:+886-2-8221-2508

**Quotation**

Page: 1 / 1

Printed Date: 2020/04/06

Quotation Type: Quotation Quotation No.: 2102 20200406002 Currency: USD Terms of transaction: FOB Payment Term: TT IN ADVANCE Delivery Date: From Order Date Within 15 Day Salesman: S3010 Cella		Company code: QFSA0022 Company name: Add: Carrera 40E # 3 - 23 Barrio Santa Martha, Carrera 40E # 3 - 23 Barrio Santa Martha Pamplona Tel.: 3166752095 Fax: Attn: Oscar Contreras E-mail: odct2305@gmail.com Remark:		
Line No.	Item No.	Qty Unit Price	Amount	Remark
0001	PMD33-306-MD1 Differential Pressure Wall Type ±1000/1600/2500pa , 0-10V,M12x1 connection,2M power supply cable ,Display, RS-485	1 108.6	108.6	
0002	PTM85-4061-25MD Air Velocity Transmitter-Remote 40m/s, 0-10V,RS-485&Analog, TEFLON cable 5M,M12 metal connector(with 2m electrical cable) , Disply	1 679.8	679.8	
	BLANK //			
Total Qty: 2		Total Amount: 788.4		

**Figura 58. Diagrama eléctrico de control y de fuerza**

Para poder instrumentar los dispositivos del túnel de viento es necesario consultar con las empresas distribuidoras de dispositivos que son específicos de esta aplicación, por lo tanto, su adquisición debe de ser con empresas especializadas. En la Figura 58 se muestra una de las cotizaciones de instrumentos con empresas especializadas

**8.5 TABLA DE COTIZACIÓN DE DISPOSITIVOS**

**Tabla 7. Tabla de cotización de dispositivos**

Sensores Analogicos							
	dispositivo	referencia	precio	cantidad	Marca	Sitio web	Total
1	s. presion (T)	AFMT-042-10	\$ 887.882	1	Yuden Tech	<a href="http://www.eyc-tech.com/">www.eyc-tech.com/</a>	\$ 887.882
2	transmisor d	PMD33 - 301	\$ 228.630	1	Yuden Tech	<a href="http://www.eyc-tech.com/">www.eyc-tech.com/</a>	\$ 228.630
3	s. velocidad	FTS34-1011-C	\$ 621.518	1	Yuden Tech	<a href="http://www.eyc-tech.com/">www.eyc-tech.com/</a>	\$ 621.518
4	s. temperatu	THS-301-T40	\$ 395.108	1	Yuden Tech	<a href="http://www.eyc-tech.com/">www.eyc-tech.com/</a>	\$ 395.108
5	s. ruido	BGT-WZS	\$ 553.447	1	mercado libr	<a href="http://spanish.alibaba.com">spanish.alibaba.com</a>	\$ 553.447
6	s. voltimetr	HDH - 20	\$ 94.707	1	Huadian	<a href="http://spanish.alibaba.com">spanish.alibaba.com</a>	\$ 94.707
7	s. amperime	HD -T41 de 2	\$ 125.783	1	Huadian	<a href="http://www.alibaba.com/p">www.alibaba.com/p</a>	\$ 125.783
8	s. tacometro	ST420	\$ 2.890.000	1	electro sens	<a href="https://www.electrc">https://www.electrc</a>	\$ 2.890.000
<b>Total</b>							<b>\$ 5.797.075</b>

Se realizó un listado con los componentes del sistema de control con el fin de saber el costo promedio de los equipos como se observa en la Tabla 7, aunque en esta tabla solo se pueden ver las cotizaciones de los sensores, también se realizaron las cotizaciones de los demás dispositivos, como los del sistema de fuerza y demás componentes del sistema de control.