



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TÚNEL DE  
VIENTO CERRADO PARA CALIBRACIÓN DE SENSORES E  
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL  
DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)**

**AUTOR: BENALCÁZAR VENEGAS, JAIME FERNANDO**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO MARIÑO**

**CODIRECTOR: ING. ALEXANDER IBARRA**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

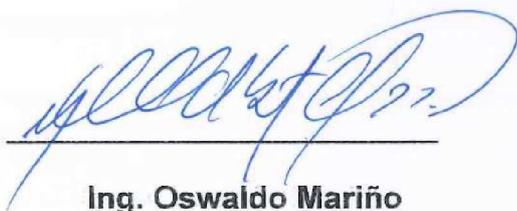
## CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

**Ing. Oswaldo Mariño**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Ing. Alexander Ibarra**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

### CERTIFICAN

El presente proyecto titulado "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)" fue desarrollado en su totalidad por Jaime Fernando Benalcázar Venegas como requisito de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónica



**Ing. Oswaldo Mariño**

**DIRECTOR**



**Ing. Alexander Ibarra**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2015-08-19**

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

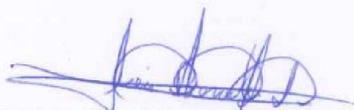
JAIME FERNANDO BENALCÁZAR VENEGAS

### DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TÚNEL DE VIENTO CERRADO PARA CALIBRACIÓN DE SENSORES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)**”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el texto desarrollado, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.



---

JAIME FERNANDO BENALCÁZAR VENEGAS

CI: 1003624515

Sangolquí, 2015-08

## AUTORIZACIÓN

Yo, Jaime Fernando Benalcázar Venegas

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TÚNEL DE VIENTO CERRADO PARA CALIBRACIÓN DE SENSORES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)"**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.



---

JAIME FERNANDO BENALCÁZAR VENEGAS

CI: 1003624515

## DEDICATORIA

A mi madre y abuelitas que con todos sus consejos, sacrificios, esfuerzos, paciencia y cariño me han guiado en el camino correcto para cumplir así cada uno de mis objetivos y es por ellas que soy lo que soy ahora. Las amo con mi vida.

A tío Galo y abuelito Fernando que aunque no están junto a mí en este momento se lo orgullosos que se sentirían de verme cumplir esta meta en mi vida.

A mi familia que me ha cuidado y apoyado para continuar en todas las pruebas que se han presentado en mi vida.

**Jaime Fernando Benalcázar Venegas**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre por apoyarme de  
forma incondicional en toda mi vida.

Agradezco al Ing. Marcelo Ayabaca, quien a  
lo largo de este tiempo colaboro para la  
culminación del proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	¡Error!
<b>Marcador no definido.</b>	
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
RESUMEN .....	xxii
ABSTRACT.....	xxiii
CAPITULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. General .....	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Alcance del proyecto.....	4
CAPITULO 2.....	5
FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE UN TÚNEL DE VIENTO .....	5

2.1	Definición del viento .....	5
2.2	El hombre y los vientos .....	6
2.3	Túnel de viento.....	7
2.4	Instrumentos para la medición de la velocidad del viento .....	8
2.4.1	Anemómetro de copela .....	8
2.4.2	Anemómetro de hélice .....	9
2.4.3	Anemómetro ultrasónico .....	9
2.4.4	Anemómetro de hilo caliente.....	10
2.4.5	Tubo de Pitot.....	11
2.5	Número de Reynolds.....	12
2.5.1	Laminar .....	12
2.5.2	Turbulento.....	13
2.6	Capa Límite.....	14
2.6.1	Causas y Efectos .....	15
2.7	Túnel de viento.....	15
2.7.1	Tipos de túnel de viento .....	16
2.7.2	Túnel abierto .....	16
2.7.3	Túnel cerrado .....	17
2.7.4	Partes del túnel de viento cerrado.....	17
2.8	Ventiladores .....	18
2.8.1	Clasificación de los ventiladores .....	18
2.9	Motor eléctrico.....	19
2.9.1	Potencia .....	20

2.9.2	Motor asincrónico trifásico.....	20
2.9.3	Variador de frecuencia .....	21
2.9.4	Interruptor automático .....	22
2.9.5	Guarda motor .....	22
2.10	Controlador lógico programable PLC .....	22
2.10.1	Arquitectura del PLC .....	23
2.10.2	Grafcet (gráfico de mando etapa/transición) .....	25
2.10.2.1	Etapas .....	25
2.10.2.2	Acciones asociadas a las etapas .....	26
2.10.2.3	Transiciones .....	26
2.10.3	Diagramas de escalera .....	27
2.11	HMI (Interfaz Humano Máquina) .....	27
2.11.1	Funciones de un HMI .....	28
2.12	Software de programación .....	28
2.12.1	RSLogix 500.....	28
2.12.2	RSLinx.....	30
2.12.3	Factory Talk View Studio.....	31
CAPITULO 3.....		32
DISEÑO DE LOS ELEMENTOS MECANICOS Y ELÉCTRICOS .....		32
3.1	Parámetros de diseño .....	32
3.2	Selección de tipo de túnel de viento.....	32
3.3	Selección de la geometría de la sección de pruebas .....	35
3.4	Calculo de flujo másico y caudal de aire requerido .....	36

3.5	Elementos del túnel de viento .....	39
3.5.1	Sección de pruebas.....	39
3.5.2	Difusor.....	40
3.5.3	Contracción .....	43
3.5.4	Direccionadores de flujo.....	46
3.5.5	Alisador de Flujo (Mallas).....	48
3.5.6	Deflectores .....	50
3.5.7	Pre diseño Difusor 2 y Difusor 3.....	54
3.6	Calculo de las pérdidas .....	55
3.6.1	Secciones de área constante .....	57
3.6.2	Difusores .....	62
3.6.3	Esquinas .....	66
3.6.4	Alisador de Flujo (Mallas).....	68
3.6.5	Direccionadores de flujo.....	71
3.6.6	Contracción .....	74
3.6.7	Pérdidas Total .....	76
3.7	Dimensionamiento y selección del ventilador.....	77
3.7.1	Tipo de ventilador.....	77
3.7.2	Potencia de ventilador.....	78
3.7.3	Selección de ventilador .....	79
3.8	Diseño difusor 2 y difusor 3.....	81
3.9	Espesor secciones metálicas .....	81
3.10	Espesor Contracción .....	83

3.11	Espesor sección de pruebas .....	84
3.12	Diseño eléctrico.....	85
3.12.1	Dimensionamiento y selección del transformador .....	85
3.12.2	Selección variador de frecuencia .....	87
3.12.3	Dimensionamiento y selección del disyuntor general.....	88
3.12.4	Dimensionamiento y selección del guarda motor .....	89
3.12.5	Diagrama eléctrico de potencia.....	90
3.12.6	Distribución elementos de potencia.....	92
3.12.7	Diseño del control.....	93
3.12.8	Selección del PLC .....	94
3.12.9	Selección Interfaz de usuario .....	94
3.12.10	Selección del sensor de velocidad de viento.....	95
3.12.11	Selección transductor de presión. ....	96
3.12.12	Diagrama de control .....	98
3.12.13	Descripción de control.....	98
•	Panel de control manual.....	99
•	HMI Manual.....	99
•	HMI Control abierto .....	100
•	Identificar planta control abierto .....	101
•	HMI PID.....	103
•	Identificación planta para control PID.....	103
•	Controlador PID.....	106
3.12.14	Grafset sistema .....	108

3.12.15 Estructura del programa PLC.....	109
3.12.16 Comunicación PLC y Panel View.....	110
3.12.17 Diseño del sistema de supervisión y control .....	111
• Pantalla principal.....	111
• Pantalla Manual.....	111
• Pantalla Semi automático.....	112
• Pantalla automático.....	113
• Pantalla configuración .....	113
• Pantalla Pitot .....	114
• Pantalla Velocidad.....	114
• Distribución del sistema de supervisión y control .....	115
CAPITULO 4.....	117
RESULTADOS.....	117
4.1 Perfiles de velocidad en la sección de pruebas .....	117
4.2 Condiciones atmosféricas .....	118
4.2.1 Toma de datos .....	118
4.2.2 Prueba a 5 m/s.....	119
4.2.3 Pruebas de 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s, .....	122
4.3 Velocidad máxima .....	134
4.4 Verificar control PID .....	135
CAPITULO 5.....	136
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	136
5.1 Conclusiones.....	136

5.2	Recomendaciones.....	137
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
	ANEXOS.....	141

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Velocidad de viento.....	6
Tabla 2 Alterativas de diseño.....	33
Tabla 3 Evaluación del peso específico de cada criterio.....	34
Tabla 4 Evaluación del peso específico de las propiedades del aire .....	34
Tabla 5 Evaluación del peso específico del criterio Nivel de ruido.....	34
Tabla 6 Evaluación del peso específico del criterio Estabilidad del flujo	34
Tabla 7 Evaluación del peso específico del criterio factores externos ...	35
Tabla 8 Tabla de conclusiones del tipo de túnel de viento.....	35
Tabla 9 Ponderación geometría de la sección de pruebas .....	36
Tabla 10 Resumen de la geometría de la sección de prueba.....	36
Tabla 11 Alternativas de diseño del difusor 1 .....	42
Tabla 12 Ponderación Difusor 1.....	43
Tabla 13 Resultado de selección del difusor 1.....	43
Tabla 14 Ponderación de la forma de los direccionadores .....	47
Tabla 15 Resultado de selección forma de los direccionadores. ....	47
Tabla 16 Mallas mercado.....	49
Tabla 17 Ponderación de malla .....	49
Tabla 18 Resultado de selección de malla.....	49
Tabla 19 Alternativas de diseño.....	51
Tabla 20 Ponderación perfiles de los deflectores .....	52
Tabla 21 Resultado de selección del perfil de los deflectores.....	52
Tabla 22 Ponderación deflectores .....	53

Tabla 23 Resultado de selección deflectores.....	54
Tabla 24 Sucesión de aproximaciones .....	61
Tabla 25 Pérdidas en secciones de área constante. ....	62
Tabla 26 Pérdidas en los difusores.....	66
Tabla 27 Pérdidas en las esquinas .....	68
Tabla 28 Pérdidas en las mallas .....	71
Tabla 29 Pérdidas totales .....	76
Tabla 30 Ponderación tipo de ventilador.....	78
Tabla 31 Selección tipo de ventilador .....	78
Tabla 32 Ponderación ventilador .....	80
Tabla 33 Resultados selección ventilado .....	80
Tabla 34 Dimensiones difusor 2 y difusor 3 .....	81
Tabla 35 Espesor distintos materiales .....	82
Tabla 36 Ponderación material de construcción .....	83
Tabla 37 Resultados selección material de construcción.....	83
Tabla 38 Ponderación autotransformador.....	87
Tabla 39 Resultados de selección de autotransformador .....	87
Tabla 40 Ponderación sensor de viento.....	95
Tabla 41 Resultados de la selección del Sensor de viento.....	96
Tabla 42 Datos Velocidad y RMP .....	102
Tabla 43 Datos prueba de la planta .....	104
Tabla 44 Condiciones atmosféricas .....	118
Tabla 45 Resumen de datos a 5 m/s .....	119

Tabla 46 Resumen de datos a 10 m/s .....	122
Tabla 47 Resumen de datos a 15 m/s .....	125
Tabla 48 Resumen de datos a 20 m/s .....	128
Tabla 49 Resumen de datos a 25 m/s .....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del proceso de convección .....	5
Figura 2. Anemómetro de copela.....	8
Figura 3. Anemómetro de hélice .....	9
Figura 4. Anemómetro ultrasónico .....	10
Figura 5. Anemómetro de hilo caliente.....	11
Figura 6. Tubo de Pitot.....	12
Figura 7. Perfil de flujo laminar .....	13
Figura 8. Perfil de velocidades en régimen laminar .....	13
Figura 9. Perfil de flujo turbulento .....	14
Figura 10. Perfil de velocidad flujo turbulento .....	14
Figura 11. Desarrollo de la capa limite en una superficie plana.....	15
Figura 12. Túnel de viento abierto .....	16
Figura 13. Túnel de viento cerrado o cíclico .....	17
Figura 14. Clasificación de ventiladores.....	19
Figura 15. Motor asincrónico WEG .....	21
Figura 16. Arquitectura PLC.....	24
Figura 17. Dibujo etapa.....	25
Figura 18. Unión de varias etapas .....	26
Figura 19. Acción asociada a la etapa 1 .....	26
Figura 20. Transición que une la etapa 1 con la etapa 2 .....	27
Figura 21. Pantalla principal RSlogix 500 .....	29
Figura 22. RSLinx .....	30

Figura 23. Pantalla principal FactoryTalk View Studio .....	31
Figura 24. Difusor .....	40
Figura 25. Dibujo esquemático de la contracción .....	44
Figura 26. Contracción.....	46
Figura 27. Tipos de direccionadores de flujo .....	46
Figura 28. Dimensiones malla.....	48
Figura 29. Cámara de estabilización.....	50
Figura 30. Perfiles de deflectores .....	51
Figura 31. Deflector.....	53
Figura 32. Dimensiones del Deflector .....	54
Figura 33. Pre diseño difusor 3.....	55
Figura 34. Prediseño Túnel de viento .....	57
Figura 35. Lateral 1 .....	59
Figura 36. Difusor 1.....	64
Figura 37. Esquina 1.....	67
Figura 38. Contracción.....	74
Figura 39. Características Ventilador.....	80
Figura 40. Mangas aislantes.....	81
Figura 41. Características motor.....	85
Figura 42. Características técnicas Autotransformador .....	87
Figura 43. Selección variador de Frecuencia.....	88
Figura 44. Selección disyuntor.....	89
Figura 45. Selección guarda Motor .....	90

Figura 46. Diagrama Eléctrico de potencia .....	91
Figura 47. Distancias mínimas de montaje .....	92
Figura 48. Tablero de Potencia.....	93
Figura 49. PLC Micrologix 1400.....	94
Figura 50. Panel View 600 plus .....	95
Figura 51. Tubo de pitot.....	96
Figura 52. Selección transductor de presión.....	97
Figura 53. Transductor de presión SDP2000-L.....	98
Figura 54. Diagrama eléctrico de control .....	98
Figura 55. Diagrama de Flujo Panel de control manual .....	99
Figura 56. Diagrama de flujo HMI Manual.....	100
Figura 57. Diagrama de flujo HMI Control abierto.....	101
Figura 58. Relación entre Velocidad y RPM .....	102
Figura 59. Diagrama de flujo HMI PID .....	103
Figura 60. Velocidad del viento y Step en función del tiempo.....	105
Figura 61. Aproximación de la planta del sistema.....	105
Figura 62. Planta del sistema.....	106
Figura 63. Controlador PID para la planta.....	106
Figura 64. Función de transferencia controlador PID.....	106
Figura 65. Lazo de control .....	107
Figura 66. Respuesta de la planta y el controlador PID.....	107
Figura 67. Graficet del sistema .....	108
Figura 68. Diagrama de Red.....	110

Figura 69. Tablero de control .....	110
Figura 70. Pantalla principal HMI .....	111
Figura 71. Pantalla HMI Manual.....	112
Figura 72. Pantalla Semiautomática .....	112
Figura 73. Pantalla Automático .....	113
Figura 74. Pantalla Configuración .....	113
Figura 75. Pantalla Pitot.....	114
Figura 76. Pantalla corrección de la Velocidad .....	115
Figura 77. Panel de control .....	115
Figura 78. Sección transversal de puntos de medición.....	117
Figura 79. Características Anemomaster Model 1570 .....	118
Figura 80. Datos promedios en los puntos a 5 m/s.....	120
Figura 81. Interpolación a 5 m/s.....	120
Figura 82. Datos de desviación estándar a 5 m/s .....	121
Figura 83. Interpolación de la desviación estándar a 5 m/s .....	121
Figura 84. Datos promedios en los puntos a 10 m/s.....	123
Figura 85. Interpolación a 10 m/s.....	123
Figura 86. Datos de desviación estándar a 10 m/s .....	124
Figura 87. Interpolación de la desviación estándar a 10 m/s .....	124
Figura 88. Datos promedios en los puntos a 15 m/s.....	126
Figura 89. Interpolación a 15 m/s.....	126
Figura 90. Datos de desviación estándar a 15 m/s .....	127
Figura 91. Interpolación de la desviación estándar a 15 m/s .....	127

Figura 92. Datos promedios en los puntos a 20 m/s.....	129
Figura 93. Interpolación a 20 m/s.....	129
Figura 94. Datos de desviación estándar a 20 m/s .....	130
Figura 95. Interpolación de la desviación estándar a 20 m/s .....	130
Figura 96. Datos promedios en los puntos a 28 m/s.....	132
Figura 97. Interpolación a 25 m/s.....	132
Figura 98. Datos de desviación estándar a 25 m/s .....	133
Figura 99. Interpolación de la desviación estándar a 25 m/s .....	133
Figura 100. Velocidad en función de RPM.....	134
Figura 101. Velocidad en función del tiempo modo manual.....	135
Figura 102. Control PID .....	135

## RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el diseño y construcción de un túnel de viento cerrado subsónico que permite variar su velocidad en un rango de 0 a 60 m/s para calibrar de anemómetros. La necesidad de verificar el correcto funcionamiento de los sensores de velocidad de viento, requiere un equipo que garantice uniformidad de flujo, velocidad y propiedades del aire constantes durante el periodo de calibración, por lo que requiere un túnel que en la sección de pruebas tenga turbulencias menores al 2% y una variación de la velocidad promedio de  $\pm 2$ . Para comenzar se realiza una descripción de las partes y sistemas que conforma el túnel, mostrando las distintas alternativas de diseño, ventajas, desventajas, y recomendaciones propuestas por distintos autores. Partiendo de los conceptos y recomendaciones se realiza un análisis y dimensionamiento de los elementos mecánicos que conforman el túnel, el cálculo de las pérdidas en las secciones, dimensionamiento del propulsor del aire, y selección de los elementos eléctricos y de control. El control de la velocidad del motor se lo implementa con un variador de frecuencia el cual se encarga de controlar las RPM del motor, donde además se incluyen las protecciones eléctricas necesarias para el sistema. También se incluyen el diseño de cuatro modos para el control de la velocidad, donde se muestran además los valores ingresados, velocidad instantánea en la sección de pruebas, densidad y rpm del motor. Finalmente se realiza pruebas para verificar la uniformidad del flujo dentro de la sección de pruebas, las velocidades máxima y la desviación estándar en un punto durante un periodo de 100 s.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **TÚNEL DE VIENTO CERRADO**
- **ANEMÓMETROS**
- **DEFLECTORES**
- **PÉRDIDAS EN TUBERÍAS**
- **PLC**
- **HMI**

## **ABSTRACT**

In this project the design and construction of a closed subsonic wind tunnel is performed. It can vary its speed in a range of 0-60 m / s to calibrate anemometers. The need to verify the correct operation of wind speed sensors, requires an equipment to ensure uniformity of flow, speed and constant properties of air during the calibration period, this tunnel test section has turbulence less than 2% and a variation speed of the average  $\pm 2$ . To start a description of the parts and systems of the tunnel is done, showing design alternatives, advantages, disadvantages, and recommendations made by different authors. Based on the concepts and recommendations analysis and sizing of the mechanical elements of the tunnel, the calculation of losses in the sections, air propeller sizing and selection of the electrical and control is performed. Controlling the engine speed implements with a frequency which is responsible for controlling the engine RPM, which also electrical protection necessary for the system include. It also includes the design of four modes for speed control, which also shows the input values, instantaneous velocity in the test section, density and engine rpm. Finally tests to verify the uniformity of flow within the test section, the maximum speeds and standard deviation at a point is conducted for a period of 100 s.

### **KEYWORDS:**

- **CLOSED WIND TUNNEL**
- **ANEMOMETERS**
- **LOSSES IN PIPES**
- **BAFFLE**
- **HMI**
- **PLC**

## **CAPITULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. Antecedentes.**

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología Nacional del Ecuador (INAMHI) fue creado con el objetivo de suministrar información vital sobre el tiempo, el clima y los recursos hídricos del pasado, presente y futuro, que necesita conocer el país para la protección de la vida humana y los bienes materiales.

Para poder realizar su trabajo de forma veras y eficaz, el INAMHI, se ha visto en la obligación de instalar distintas instalaciones de monitoreo equipadas con instrumentos de última tecnología para obtener datos confiables y brindar información útil y verídica en los distintos servicios ofertados por la institución.

Enfocados en la calidad del servicio brindado es necesario mantener cada uno de los instrumentos en revisiones y mantenimiento periódicos, convirtiéndose en una necesidad primordial para el mantenimiento y calibración de sensores.

Existen diferentes tipos de sensores e instrumentos de medición ubicados en estaciones hídricas y meteorológicas entre los cuales podemos encontrar: termómetros, termógrafos, pluviómetros, fluviógrafos, atmómetros, barómetros, anemómetros entre otros.

Para la medición de la dirección y velocidad del viento es necesario el uso de distintos instrumentos que necesitan tener un mantenimiento periódico para tener certeza de su correcto funcionamiento, los instrumentos utilizados para este fin son veletas, anemómetros, tubos de Pitot.

El procedimiento para realizar la inspección de los instrumentos mencionados consiste en:

- Desmontar el instrumento de la estación.
- Inspeccionar el estado físico del instrumento.
- Comprobar el funcionamiento del instrumento.
- Limpiar los componentes del instrumento.
- Volver a ensamblar el instrumento y calibrarlo.

Para realizar la calibración de los instrumentos de medición en los laboratorios del INAMHI es necesario el uso de un túnel de viento, el cual constituye un equipo especial de pruebas experimentales y que permite modelar situaciones reales a escala mucho menor, razón por la cual resulta tan práctico, sin embargo para que esto sea posible es necesario que el túnel pueda satisfacer ciertas condiciones de semejanza con la situación real que se desea estudiar, con ello cobran vital importancia conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos como el número de Reynolds y el factor de Darcy las cuales deben ser iguales en las condiciones de prueba y reales.

## **1.2. Justificación**

Actualmente en los laboratorios del INAMHI, se utiliza un túnel de viento abierto para realizar la calibración de los instrumentos de medición, pero este presenta inconvenientes entre los cuales podemos mencionar:

- Velocidad de aire máxima de 20 m/s.
- Ruido excesivo en la instalación.
- Vibraciones en la carcasa del túnel.
- Carece de seguridades para los operarios.
- Dentro de la cámara de ensayos no posee un lugar adecuado para la ubicación de los sensores a calibrar.

Para mejorar el diseño ya existente se propuso el diseño de un túnel de viento cerrado el cual dentro de sus ventajas podemos mencionar las siguientes:

- Recirculación el aire de forma cíclica.
- Permite tener controladas las variables termodinámicas del aire: densidad, temperatura y presión.
- Menor consumo de potencia del ventilador.
- Reducción considerable de la contaminación acústica del entorno.
- Mayor calidad de flujo en la cámara de ensayos.

El presente trabajo busca mejorar las condiciones existentes mediante el diseño y construcción de un túnel de viento cerrado para la calibración de sensores del INAMHI.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Diseñar y construir un túnel de viento subsónico cerrado que permita realizar la calibración de los sensores e instrumentos de medición utilizados por el INAMHI.

#### **1.3.2. Específicos**

- Definir los conceptos básicos del funcionamiento de un túnel de viento subsónico cerrado, y los elementos que lo conforman.
- Dimensionar y construir los diferentes componentes mecánicos que conforman el túnel de viento.
- Efectuar el dimensionamiento de los dispositivos eléctricos y electrónicos empleados en el túnel de viento.
- Realizar pruebas de los sistemas en conjunto en los distintos modos de operación, para verificar los tiempos de estabilización.

#### **1.4. Alcance del proyecto**

Este proyecto de grado se enfoca en el diseño e implantación de un túnel de viento subsónico de circuito cerrado, que permita realizar de forma experimental el mantenimiento y calibración de los diferentes sensores e instrumentos utilizados por el INAMHI para la medición de la dirección y velocidad del viento, con mejor confiabilidad.

El resultado será un Túnel de Viento que permita generar flujos uniformes con un bajo nivel de turbulencia en la sección de pruebas de hasta 60 m/s, capaz de soportar los efectos producidos en los elementos por la circulación del flujo de aire a altas velocidades.

## CAPITULO 2.

### FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE UN TÚNEL DE VIENTO

#### 2.1 Definición del viento

El viento es una corriente de aire que se produce en la atmósfera por diversas causas naturales, se desplaza en sentido horizontal, reservándose la denominación de "corriente de convección" para los movimientos de aire en sentido vertical. Es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un calentamiento desigual de las diversas zonas de la Tierra y de la atmósfera. Las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado por las masas de aire más frío y por lo tanto, más denso lo cual se puede observar en la Figura 1

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión hacia los de baja presión y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. (Iannini & Gonzalez, 2004)



Figura 1. Diagrama del proceso de convección

Fuente: (Iannini & Gonzalez, 2004)

En la Tabla 1 se presenta una escala para distintas velocidades del viento y su clasificación.

**Tabla 1**  
**Velocidad de viento**

Grados Beaufort	Nudos		m/s		km/h		Descripción	Presión s/superficie Plana en daN/m <sup>2</sup>	
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma		
1	1	3	0.3	1.5	1.0	3.0	Ventolina	0.0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13.0	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50.0	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17.0	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63.0	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76.0	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89.0	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3		179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51.0	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202.0	218.7	Ciclón	409	480

**Fuente: (Iannini & Gonzalez, 2004)**

## 2.2 El hombre y los vientos

“Durante miles de años el hombre ha dependido de los vientos: ellos traían la lluvia a la tierra e impulsaban los barcos por los mares. Así, hace siglos que conocemos los cinturones de vientos del oeste, los vientos alisios y los monzones del sistema general de circulación.

Sin embargo, hasta la aparición del globo aerostático, a finales del siglo XVIII, no fue posible estudiar las condiciones meteorológicas a grandes alturas. El globo sigue siendo un importante medio de investigación, si bien en la actualidad, en lugar de transportar personalmente a los científicos, lleva un reflector de radar o un equipo de instrumentos y un transmisor de radio.

La ciencia de la meteorología se desarrolló en el siglo XIX y fue sustituyendo paulatinamente los viejos métodos empíricos del campesino y del navegante por predicciones meteorológicas más seguras. Es importante recalcar que las mediciones meteorológicas comunes no son útiles para el caso de estudio de generación eléctrica por medio de energía eólica principalmente por las alturas de medición utilizadas, que son de diez metros aproximadamente”.

En la actualidad se cuenta con una serie de instrumentos muy precisos en comparación con los utilizados en los inicios de la exploración eólica, entre otros artefactos se cuenta con la veleta, el anemómetro, Anemómetros de hilo caliente y ultrasónicos los cuales miden la dirección y la velocidad del viento respectivamente, y están disponibles en el mercado con distintas características según la necesidad. (Jiménez, 2003)

### **2.3 Túnel de viento**

Aunque hay muchos grupos de túneles de viento, en general pueden definirse como conductos que llevan en alguna parte de su trayecto un ventilador accionado por un motor, que se encarga de que el aire fluya de manera constante.

La parte de interés para la experimentación es la sección de pruebas, que debe ser transparente para permitir la visualización. En ella se instala el modelo y diferentes aparatos que miden las fuerzas que experimenta éste y las condiciones del aire que atraviesa esa sección.

Resulta de interés que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel, de este modo, se consigue ahorrar energía en el ventilador, además de reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.

## **2.4 Instrumentos para la medición de la velocidad del viento**

En este apartado se estudiarán las características y funciones de los anemómetros con los que cuenta el Instituto.

### **2.4.1 Anemómetro de copela**

Este instrumento consiste en un conjunto de tres copelas centralmente conectadas a un eje vertical para la rotación. De acuerdo al diseño, por lo menos una copela está enfrentando siempre el viento que viene de frente. La forma aerodinámica de las copelas convierte la fuerza de presión del viento en torque rotatorio. La rotación de la copela es casi linealmente proporcional a la velocidad del viento sobre un rango especificado. Un transductor dentro del anemómetro convierte este movimiento rotatorio en una señal eléctrica. (Maggiolo, 2010)



**Figura 2. Anemómetro de copela**

### 2.4.2 Anemómetro de hélice

Este instrumento consiste en una hélice montado sobre un eje horizontal que se orienta en el viento a través del uso de una veleta. El anemómetro de hélice también genera una señal eléctrica proporcional a la velocidad del viento. (Maggiolo, 2010)



**Figura 3. Anemómetro de hélice**

### 2.4.3 Anemómetro ultrasónico

La medición de la velocidad de un fluido utilizando señales de ultrasonido se basa en la influencia del campo de las velocidades del fluido sobre una señal generada desde un transmisor hacia un receptor. Básicamente el sistema consiste en un transmisor de ondas ultrasónicas que emite una señal continua o una serie de pulsos que viajan por el fluido (líquido o gas) del cual se requiere conocer la velocidad, hasta llegar a un receptor que capta esta señal perturbada.

Existen gran cantidad de modelos comerciales. La mayoría de estos instrumentos tiene un amplio rango de operación, tamaño compacto, son de fácil instalación y de bajo consumo de corriente. Los resultados de las medidas

son mostrados como salidas de voltaje (0-5V) o corriente (4-20mA). (Flores Paredes & Meneses Costales, 2009)



**Figura 4. Anemómetro ultrasónico**

#### **2.4.4 Anemómetro de hilo caliente**

Un anemómetro de hilo caliente consiste en un filamento calentado que queda expuesto al paso de un flujo. Este filamento está conectado a un circuito eléctrico que es capaz de monitorear las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Entonces, se puede establecer una relación entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento calentado

El principio físico de funcionamiento de los anemómetros de hilo caliente está basado en la transferencia de calor por convección entre el hilo calentado y el flujo pasando a su alrededor. En estos sensores, una pequeña estructura es calentada y expuesta al flujo para medir el intercambio térmico que se produce. La relación entre la velocidad del flujo y la tensión de salida es deducida sobre la base de las ecuaciones de transferencia de calor, tomando por referencia la potencia generada por la corriente eléctrica que pasa por el

hilo. El sensor es calentado por una corriente eléctrica y enfriado proporcionalmente, de acuerdo a la componente de la velocidad del aire que incide perpendicular al elemento sensible (Loureiro, 2006)

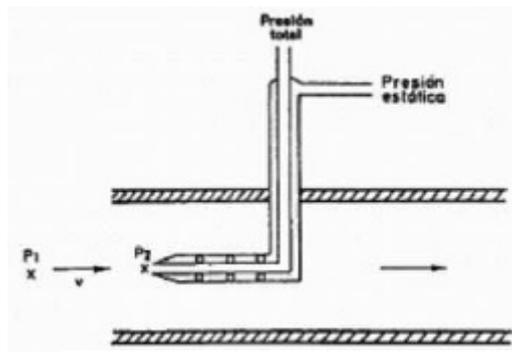


**Figura 5. Anemómetro de hilo caliente**

#### **2.4.5 Tubo de Pitot**

El tubo de pitot mide la presión total y la presión estática en un punto de un fluido o gas, la unidad para medir la presión de total es un tubo con el extremo doblado en ángulo recto hacia la dirección del flujo. El extremo del tubo que mide presión estática es cerrado pero tiene una pequeña ranura de un lado.

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.



**Figura 6. Tubo de Pitot**

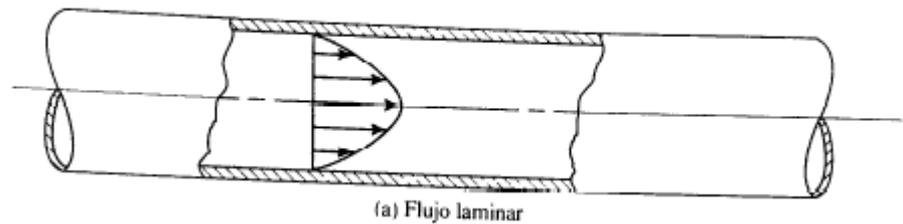
## 2.5 Número de Reynolds

El número de Reynolds es una cantidad adimensional, la cual relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión del área por donde el flujo circula.

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. (Mott, Mecanica de Fluidos, 2006)

### 2.5.1 Laminar

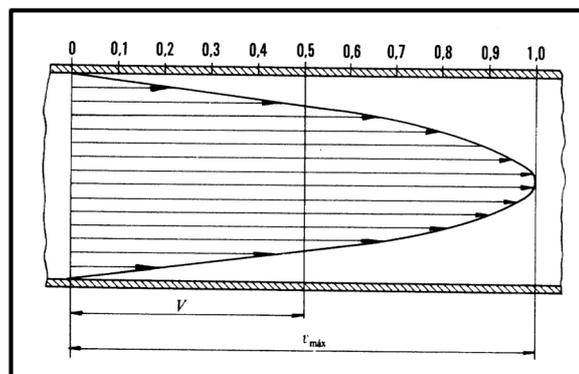
El flujo laminar está definido como el desplazamiento de las partículas de fluido en trayectorias paralelas, formando así en conjunto capas o láminas, el fluido se mueve sobre la capa vecina sin que exista una mezcla significativa de partículas con la capa vecina. La viscosidad del fluido es la encargada de frenar o aumentar la capacidad de un fluido a transformarse en turbulento, componiendo así una relación inversamente proporcional a la velocidad del fluido, es decir, a mayor velocidad del fluido necesitamos una viscosidad mayor para mantener un fluido en estado laminar.



**Figura 7. Perfil de flujo laminar**

**Fuente: (Mott, Mecanica de Fluidos, 2006)**

El perfil de velocidades en el flujo laminar para una sección circular tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el centro de la sección y en la superficie es igual a cero. La velocidad de cada una de las capas que componen el fluido es iguales en cualquier punto de la trayectoria del fluido y no cambian con el tiempo. Un fluido en régimen laminar está determinado teóricamente mediante el número de Reynolds, esta cantidad adimensional debe ser  $<2000$ .



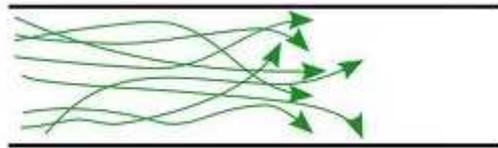
**Figura 8. Perfil de velocidades en régimen laminar**

**Fuente: (Mataix & Hurtado, 1993)**

### 2.5.2 Turbulento

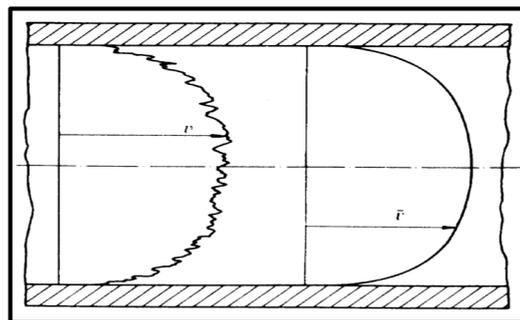
El movimiento en régimen turbulento o flujo turbulento es caótico y desordenado, se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos. El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades del fluido son muy altas o la viscosidad del fluido es muy baja. Esta turbulencia puede

generarse por presencia de paredes en contacto con el fluido o variación de velocidad en las capas del fluido.



**Figura 9. Perfil de flujo turbulento**

La distribución de velocidades en régimen turbulento para una sección circular tiene forma logarítmica, esta velocidad es totalmente irregular y su distribución se representa con velocidades medias temporales. (Mott, Mecanica de Fluidos, 2006)



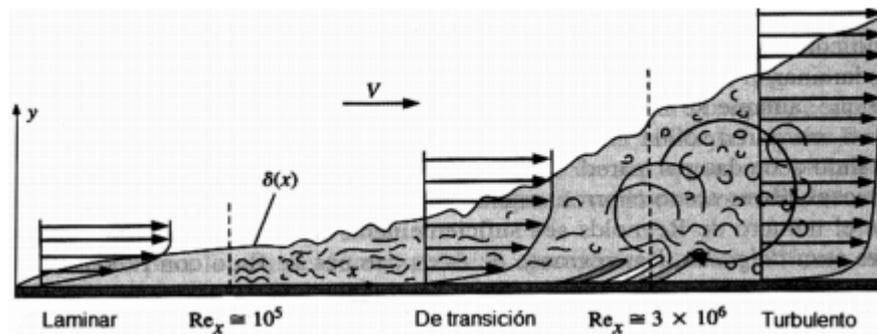
**Figura 10. Perfil de velocidad flujo turbulento**

**Fuente: (Mataix & Hurtado, 1993)**

## 2.6 Capa Límite

En 1904 Ludwig Prandtl publicó introdujo el concepto de capa límite, una delgada zona de fluido cercana a la superficie de los cuerpos, en la cual se presentan grandes variaciones de la velocidad y donde se concentran los efectos viscosos. En términos generales se puede decir que, puesto que la viscosidad es bastante pequeña en casi todos los fluidos, los esfuerzos cortantes deben ser apreciables únicamente en las regiones en donde existan grandes gradientes de velocidad; el flujo en otras regiones se podría describir con gran exactitud por medio de las ecuaciones para flujo no viscoso.

Bajo condiciones estándar de flujo, se considera la capa límite es laminar hasta un número de Reynolds de  $10^5$  a partir del cual entra en la zona de transición y la zona de flujo turbulento inicia hasta un número de Reynolds mayor que  $3 \times 10^6$ . En la figura 11 se ilustra el crecimiento de la capa límite sobre una placa plana. Al inicio la capa límite es laminar, después ocurre la transición y finalmente se vuelve turbulenta. (Rosas Quiterio, 2010)



**Figura 11. Desarrollo de la capa límite en una superficie plana**

**Fuente: (Mataix & Hurtado, 1993)**

### 2.6.1 Causas y Efectos

La capa límite se estudia para analizar la variación de velocidades en la zona de contacto entre un fluido y un obstáculo. La presencia de esta capa es debida principalmente a la existencia de la viscosidad, propiedad inherente de cualquier fluido. Ésta es la causante de que el obstáculo produzca una variación en el movimiento de las líneas de corriente más próximas a él. La variación de velocidades, como indica el principio de Bernoulli, conlleva una variación de presiones en el fluido, que pueden dar lugar a efectos como las fuerzas de sustentación y de resistencia aerodinámica.

### 2.7 Túnel de viento

Un túnel de viento es una herramienta experimental utilizada para simular un flujo de aire dentro de un circuito que puede ser abierto o cerrado, su funcionamiento está basado en un ventilador encargado en suministrar el aire para que fluya a través del circuito preparado para el túnel, es necesario, la

incorporación de distintos elementos mecánicos para conseguir un flujo uniforme.

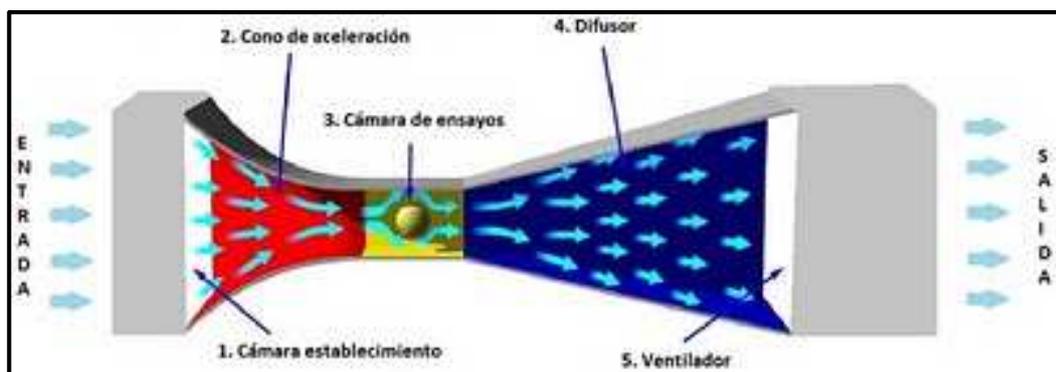
La principal característica de un túnel de viento es conseguir las condiciones ideales para la correcta simulación de las condiciones ambientales que serán aplicadas a los cuerpos dentro de la cámara de prueba.

### 2.7.1 Tipos de túnel de viento

Existen dos formas de clasificar a los túneles de viento las cuales pueden ser: las velocidades de viento que este maneja en su interior o por la forma que circula el aire dentro del mismo. Basados en la última clasificación tenemos dos tipos de túneles de viento que son: Túnel abierto o Túnel cerrado.

### 2.7.2 Túnel abierto

En los túneles de viento de circuito abierto el aire es soplado o aspirado y luego escapa del túnel hacia la atmosfera, la sección de pruebas dentro de este túnel puede ser abierta o cerrada, el fluido dentro del túnel no es presurizable, lo cual no permite cambiar su densidad, tampoco es posible controlar la temperatura dentro del circuito.



**Figura 12. Túnel de viento abierto**

**Fuente: (Illán, 2015)**

### 2.7.3 Túnel cerrado

En los túneles de viento cerrados o cíclicos donde el aire es forzado a circular en forma indefinida al interior del túnel. El tamaño y tipo de fluido puede variar, desde los muy pequeños donde el tamaño de la sección de ensayo es del orden los micrones donde el fluido típicamente es un líquido, hasta los grandes que pueden alojar un avión de tamaño real, dentro de este tipo de túnel es posible mantener constante la presión dentro del circuito y también controlar la variable de temperatura.

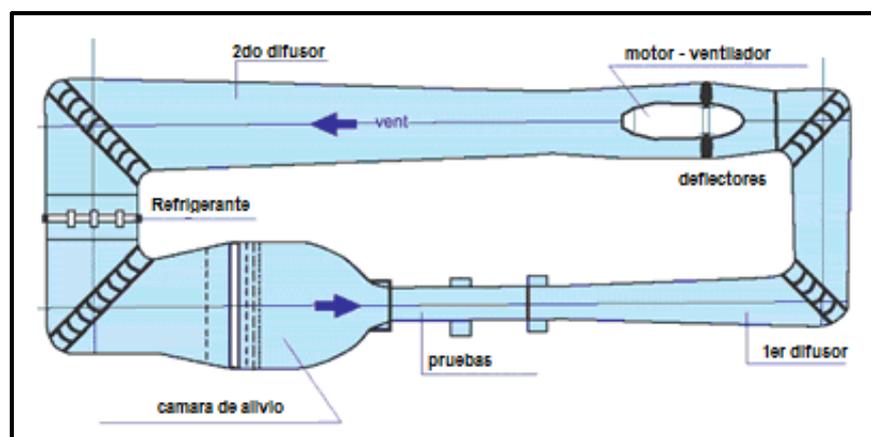


Figura 13. Túnel de viento cerrado o cíclico

Fuente: (Illán, 2015)

### 2.7.4 Partes del túnel de viento cerrado

Las principales partes de un túnel de viento cerrado son:

- **Ventilador:** este elemento es el encargado de proporcionar al túnel la cantidad necesaria de aire para su funcionamiento.
- **Difusor:** Esta etapa es la encargada de redireccionar el flujo de la manera más adecuada para evitar pérdidas por el cambio brusco de dirección del fluido.
- **Cámara de Laminarización:** Usa paneles de nido de abeja y mallas finas que deben reducir las fluctuaciones de velocidad del aire ( $< 0.3\%$ ).
- **Contracción o cámara de alivio:** Aumenta la velocidad del aire y concentra el flujo en la entrada de la sección de ensayos.

- **Sección de ensayos o pruebas:** En esta sección se ubican los modelos o sensores para realizar la simulación y obtener los datos que necesitamos.
- **Refrigeración:** Realiza el intercambio de calor para reducir la temperatura del aire dentro del túnel de viento.

## 2.8 Ventiladores

Un ventilador es una máquina rotativa que pone el aire, o un gas, en movimiento. Podemos definirlo como una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria con la que mantener un flujo continuo de aire.

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc. y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía.

Concretando un poco más en cuanto a la sobrepresión alcanzada por el fluido, llamaremos Ventilador, simplemente, cuando aquella sea inferior a 700 mm c.d.a., Soplante si no sobrepasa los 2.000 mm c.d.a. y Turbocompresor cuando se trate de mayores presiones, hasta las máximas posibles.

### 2.8.1 Clasificación de los ventiladores

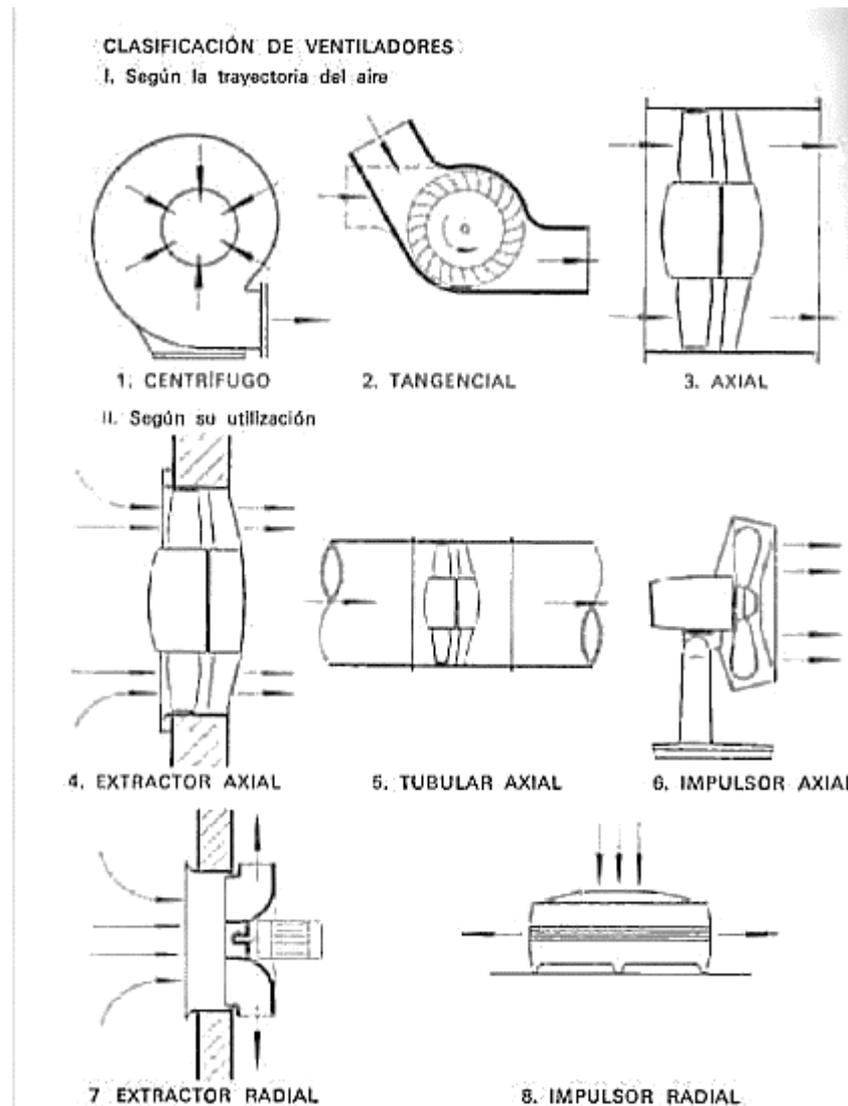
La primera clasificación de los ventiladores aparece al atender a la trayectoria que sigue el fluido al pasar por ellos. Según este concepto se agrupan en:

- Ventiladores Axiales
- Ventiladores Centrífugos
- Ventiladores Tangenciales

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

- Extractores
- Tubulares
- Impulsores

En la figura se presenta gráficos de la clasificación expuesta.



**Figura 14. Clasificación de ventiladores**

## 2.9 Motor eléctrico

Se llama motor eléctrico al dispositivo capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, es decir, puede producir movimiento al convertir en trabajo la energía eléctrica proveniente de la red o almacenada

en un banco de baterías. Básicamente, un motor está constituido por dos partes, una fija denominada Estator, y otra móvil respecto a esta última denominada Rotor. Ambas están fabricadas en material ferromagnético de chapas magnéticas apiladas, y disponen de una serie de ranuras en las que se alojan los hilos conductores de cobre que forman el devanado eléctrico.

En todo motor eléctrico existen dos tipos de devanados: el inductor, que origina el campo magnético para inducir las tensiones correspondientes en el segundo devanado, que se denomina inducido, puesto que en él aparecen las corrientes eléctricas que producen el par de funcionamiento deseado.

### 2.9.1 Potencia

La potencia eléctrica para un motor trifásico es

$$P_{electrica} = \sqrt{3} * V_l * I_l * \text{Cos}(\varphi)$$

**Ecuación 1**

Donde

$P_{electrica}$	Potencia eléctrica [w]
$V_l$	Voltaje de línea [V]
$I_l$	Corriente de línea [A]
$\text{Cos}(\varphi)$	Factor de potencia [Adimensional]

### 2.9.2 Motor asincrónico trifásico

El motor asincrónico trifásico consta de un estator bobinado de dos o más polos por fase y de un rotor constituido por chapas de hierro al silicio, que puede tener un bobinado, cuando se conectan a una red trifásica balanceada de frecuencia  $f_1$  con tres bobinas desplazadas  $120^\circ$  entre sí, se genera un campo magnético de amplitud constante pero que gira a una velocidad denominada de sincronismo.



**Figura 15. Motor asincrónico WEG**

### **2.9.3 Variador de frecuencia**

La velocidad variable es una necesidad en todos los sectores de la industria, pues permite el control de la producción de un proceso o de un sistema con el gasto mínimo de energía y de materia prima. También es útil en aplicaciones de domótica, tales como el control de calderas, ventilación y aire acondicionado.

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia. El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. Este regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

#### **2.9.4 Interruptor automático**

Dispositivo mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes bajo condiciones normales de operación. De igual forma 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.

#### **2.9.5 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.

#### **2.10 Controlador lógico programable PLC**

Un controlador lógico programable (IEC 61131) es una máquina electrónica programable diseñada para ser utilizada en un entorno industrial, que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar soluciones específicas tales como funciones lógicas, secuenciales, temporizaciones, recuentos y funciones aritméticas, con el fin de controlar mediante entradas y salidas, diversos tipos de máquinas o procesos.

Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo de estado sólido, utilizado para el control de procesos, control de máquinas e información de procesamiento. El PLC resuelve un programa almacenado en su memoria y recibe realimentación de dispositivos de campo de entrada y salida.

El PLC lee datos de los sensores de campo, resuelve su programa y envía comandos de salida a los dispositivos de control en campo. El proceso de leer entradas, resolver el programa y controlar las salidas es repetido continuamente y se le conoce como "SCAN".

El Controlador Lógico Programable fue originalmente construido como un sustituto de los paneles de control por relevadores, con la idea de tener una "secuencia lógica" almacenado en un programa en lugar de conexiones entre relevadores. Esto permite que los cambios a ser realizados en la secuencia se realizan en el programa, rápidamente y con un mínimo de modificaciones en el alambrado.

La evolución del PLC ha continuado, y en éstos tiempos, los PLC's no únicamente solucionan las necesidades de remplazar relevadores, sino que permiten la integración de funciones tales como el control analógico, adquisición de datos, control de alarmas, generación de reportes y más. Los nuevos PLC's proveen la mejor opción para adquirir datos e integrar información desde el nivel de planta de proceso a computadoras en redes de comunicación local o cualquier computadora, permitiendo obtener información estadística para la generación de reportes, ayudando a la mejor toma de decisiones. (García González , 2004)

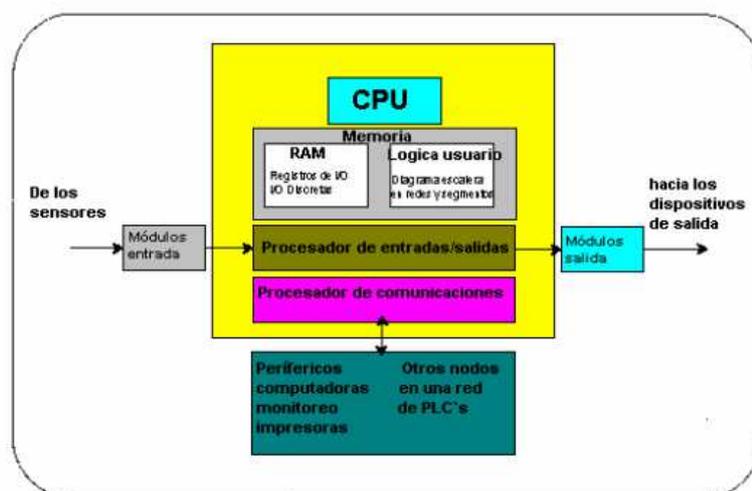
### **2.10.1 Arquitectura del PLC**

El PLC se presenta como un conjunto de partes funcionales que se articulan alrededor de un canal de comunicación llamado bus interno. Generalmente cada bloque está físicamente constituido por un módulo específico. Esta organización modular permite una gran flexibilidad de configuración para las necesidades del usuario, así como un diagnóstico y mantenimiento más fáciles. Los diferentes módulos del PLC se montan en un

bastidor que contiene el soporte de unión (bus + conectores) Cada módulo posee bornera de conexión y está equipado con un conjunto de visualización del estado lógico de cada vía.

La arquitectura común de un controlador programable es la siguiente:

- Una sección de memoria que almacena la lógica (programa) del usuario en RAM, con un sistema CMOS RAM respaldado por batería, además del sistema ejecutivo en EPROM no volátil.
- El CPU que resuelve la lógica del programa basado en los valores de las entradas almacenados en la memoria RAM, para actualizar los valores de las salidas en la memoria RAM.
- Un Procesador de Entradas /Salidas que dirige el flujo de las señales de entrada desde los módulos a la memoria RAM y provee el camino para las señales de salida provenientes de la solución del programa por el CPU y las envía a los módulos de salida.
- Un procesador de comunicaciones provisto de uno o más puertos de interface. Estas interfaces permiten al controlador la comunicación con los dispositivos de programación, computadoras de monitoreo, herramientas de mano para el diagnóstico y otros dispositivos maestros, así como con otros PLC's y otros nodos en una red Modbus.



**Figura 16. Arquitectura PLC**

### 2.10.2 Grafcet (gráfico de mando etapa/transición)

Un diagrama funcional permite describir los comportamientos del automatismo en relación a las informaciones que recibe, imponiendo un funcionamiento riguroso, evitando de esta forma incoherencias, bloqueos o conflictos en el funcionamiento. En cada nivel de descripción, este diagrama puede ser modificado o corregido, sin necesidad de volver a partes ya estudiadas.

El Grafcet se compone de un conjunto de: ·

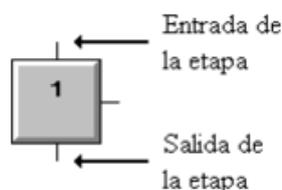
- Etapas o Estados a las que van asociadas acciones. ·
- Transiciones a las que van asociadas receptividades. ·
- Uniones Orientadas que unen las etapas a las transiciones y las transiciones a las etapas.

#### 2.10.2.1 Etapas

Una etapa se caracteriza por un comportamiento invariable en una parte o en la totalidad de la parte de mando.

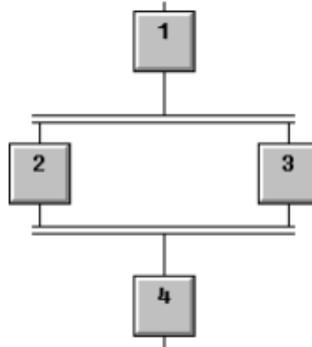
En un momento determinado, y según sea la evolución del sistema:

- Una etapa puede estar activa o inactiva. ·
- El conjunto de las etapas activas definen la situación de la parte de mando
- Las etapas se representan por un cuadrado con un número en su parte superior como identificación. La entrada y salida de una etapa aparece en la parte superior e inferior, respectivamente, de cada símbolo. El conjunto formado por el cuadrado y la extensión de las entradas y salidas constituye el símbolo completo de la etapa.



**Figura 17. Dibujo etapa**

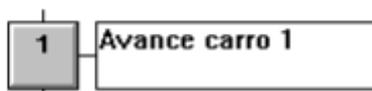
Cuando varias transiciones van unidas a una misma etapa, las uniones orientadas correspondientes se reagrupan antes o después de la etapa.



**Figura 18. Unión de varias etapas**

### 2.10.2.2 Acciones asociadas a las etapas

Las acciones están descritas, literal o simbólicamente, en el interior de uno o varios rectángulos unidos al símbolo de la etapa a la que van asociados.



**Figura 19. Acción asociada a la etapa 1**

### 2.10.2.3 Transiciones

Una transición indica la posibilidad de evolución entre etapas. Esta evolución se consume al producirse el franqueo de la transición. El franqueo de una transición provoca el paso en la parte de mando de una situación a otra situación.

Una transición entre dos etapas se representa mediante una línea perpendicular a las uniones orientadas, también puede llevar una línea paralela a las uniones orientadas.

A cada transición va asociada una proposición lógica llamada receptividad que puede ser verdadero o falso. Entre todas las informaciones disponibles en un momento determinado, la receptividad agrupa solamente aquellas que son necesarias para el franqueo de la transición.

La receptividad va escrita literal o simbólicamente, preferentemente a la derecha del símbolo de la transición.



**Figura 20. Transición que une la etapa 1 con la etapa 2**

### 2.10.3 Diagramas de escalera

Este lenguaje permite representar gráficamente el circuito de control de un proceso, con ayuda de símbolos de contactos normalmente cerrados (N.C.) y normalmente abiertos (N.A.), relés, temporizadores, contadores, registros de desplazamiento, etc.

Cada uno de estos símbolos representa una variable lógica cuyo estado puede ser verdadero o falso, en el diagrama de escalera, la fuente de energía se representa por dos "rieles" verticales, y las conexiones horizontales que unen a los dos rieles, representan los circuitos de control, el riel o barra del lado izquierdo representa a un conductor con voltaje positivo y el riel o barra de lado derecho representa tierra o masa. El programa se ejecuta de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

### 2.11 HMI (Interfaz Humano Máquina)

La sigla HMI es la abreviación en ingles de Interfaz Hombre Máquina. Los sistemas HMI podemos pensarlos como una "ventana" de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora. Los sistemas HMI en computadoras se los conoce

también como software HMI o de monitoreo y control de supervisión. Las señales del procesos son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, PLC's (Controladores lógicos programables), Todos estos dispositivos deben tener una comunicación que entienda el HMI.

### **2.11.1 Funciones de un HMI**

- a) Monitoreo, es la habilidad de obtener y mostrar datos del proceso en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, textos o gráficos que permitan una interpretación más fácil de interpretar.
- b) Supervisión, esta función permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente del panel de visualización.
- c) Alarmas, es la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportar estos eventos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control preestablecido.
- d) Control, es la capacidad de aplicar algoritmos que ajustan los valores de proceso y así mantener estos valores dentro de ciertos límites

### **2.12 Software de programación**

Para configurar tanto el PLC como el Panelview 600 plus es necesario contar con el siguiente software.

#### **2.12.1 RSLogix 500**

RSLogix 500 es el software destinado a la creación de los programas para la familia de procesadores SLC 500 y MicroLogix, en lenguaje de esquema de contactos o también llamado lógica de escalera (Ladder). Incluye editor de Ladder y verificador de proyectos (creación de una lista de errores) entre otras opciones. Este software funciona en los sistemas operativos Windows.

La pantalla principal es



**Figura 21. Pantalla principal RSLogix 500**

Barra de menú, permite realizar diferentes funciones como recuperar o guardar programas, opciones de ayuda, etc. Es decir, las funciones elementales de cualquier software actual.

Barra de iconos, engloba las funciones de uso más repetido en el desarrollo de los programas.

Barra de estado del procesador, nos permite visualizar y modificar el modo de trabajo del procesador (online, offline, program, remote), cargar y/o descargar programas (upload/download program), así como visualizar el controlador utilizado.

Árbol del proyecto, contiene todas las carpetas y archivos generados en el proyecto, estos se organizan en carpetas.

Propiedades del controlador, contiene las prestaciones del procesador que se está utilizando, las opciones de seguridad que se quieren establecer para el proyecto y las comunicaciones.

Estado del procesador, se accede al archivo de estado del procesador.

Configuración de E/S, se podrán establecer y/o leer las tarjetas que conforman el sistema.

Configuración de canales, permite configurar los canales de comunicación del procesador

Archivos de programa contiene las distintas rutinas Ladder creadas para el proyecto.

Panel de resultados, aparecen los errores de programación que surgen al verificar la corrección del programa realizado (situados en la barra de iconos). Efectuando doble clic sobre el error, automáticamente el cursor se situará sobre la ventana de programa Ladder en la posición donde se ha producido tal error.

Barra de instrucciones: Esta barra le permitirá, a través de pestañas y botones, acceder de forma rápida a las instrucciones más habituales del lenguaje Ladder. Presionando sobre cada instrucción, ésta se introducirá en el programa Ladder.

### 2.12.2 RSLinx

RSLinx es el software que se encarga de regular las comunicaciones entre los diferentes dispositivos utilizando el Microsoft NT de Windows. Proporciona el acceso de los controladores Allen-Bradley a una gran variedad de aplicaciones de Rockwell Software, tales como RSLogix 500 y Factory Talk View Studio

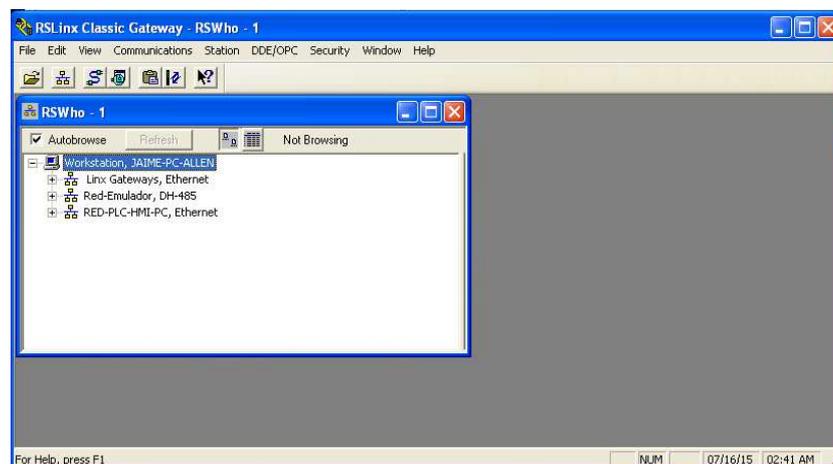
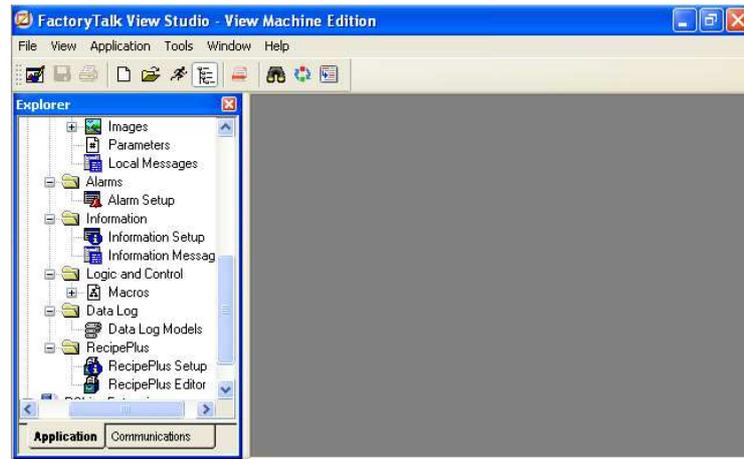


Figura 22. RSLinx

### 2.12.3 FactoryTalk View Studio

FactoryTalk View Studio es un paquete basado en Windows de Microsoft que le permite diseñar las aplicaciones del panel de control para el terminal Panel View de la marca Allen Bradley, que ofrece una solución robusta y dedicada para dispositivos de interface de operador a nivel de máquina.



**Figura 23. Pantalla principal FactoryTalk View Studio**

## **CAPITULO 3.**

### **DISEÑO DE LOS ELEMENTOS MECANICOS Y ELÉCTRICOS**

#### **3.1 Parámetros de diseño**

El diseño del túnel es un complejo campo que involucra problemas estructurales, mecánica de fluidos y automatización, que ha sido tratado en artículos y libros como de Barlow, Rae, & Pope, 1999, el cual sirve como una guía para un correcto dimensionamiento de las partes que lo conforman.

Debido a que el túnel de viento se utilizará para la calibración de sensores de viento, para lograr un túnel de calibración, se debe cumplir con las siguientes características según requerimientos del INAMHI.

- Diámetro mínimo de la sección de pruebas de 500 mm
- Velocidades variables
- Velocidad de operación de hasta 60 m/s
- Uniformidad de flujo
- Niveles de turbulencia menores al 2% para el promedio de período de hasta 1 minuto.
- Niveles de ruido inferiores a 115 dB(A)
- Sección de pruebas en acrílico transparente.
- Dimensiones acorde a la infraestructura del Instituto

#### **3.2 Selección de tipo de túnel de viento**

Existen dos tipos de túnel de vientos que se en listan en la tabla 2 los cuales fueron detallados en el capítulo anterior, mostrando sus ventajas y desventajas, existen muchos factores y parámetros para seleccionar el tipo de túnel de viento.

Para una correcta selección se utilizará el método ordinal corregido de criterios ponderados el cual se basa en tablas donde cada criterio o solución, para un determinado criterio se confronta con los restantes criterios o soluciones (Romeva, 2010), se asignan los valores siguientes:

- 1 Si el criterio o solución de las filas es superior (o mejor;  $>$ ) que el de las columnas
- 0,5 Si el criterio o solución de las filas es equivalente ( = ) al de las columnas
- 0 Si el criterio o solución de las filas es inferior (o peor;  $<$ ) que el de las columnas

Luego, para cada criterio, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se le añade una unidad para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula; después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio.

Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

Existen dos posibles alternativas de diseño las cuales se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2**  
**Alterativas de diseño**

Alternativas	
<b>A</b>	Túnel de viento cerrado
<b>B</b>	Túnel de viento Abierto

Los criterios de valoración que se consideraron más determinantes fueron.

- a) Control de propiedades del aire, ya que el aire debe mantener constante durante todo el proceso de calibración para garantizar que distintos tipos de sensores son sometidos a las mismas condiciones en distintos periodos de tiempo.
- b) Nivel de ruido, al permanecer el personal durante un largo periodo de tiempo en las calibraciones es necesario que cumpla con los valores establecidos en la ergonomía para los niveles de ruidos.
- c) Estabilidad del flujo, debido que se requiere comparar distintos tipos de sensores en un lapso de tiempo determinando se requiere

una flujo estable, y una área de trabajo uniforme en la sección de pruebas.

- d) Impacto factores externos, el cambio en el funcionamiento del túnel debe ser independiente de los cambios ambientales externos al túnel.

A partir de los criterios dados se procede a evaluar peso específico de cada criterio.

**Tabla 3**  
**Evaluación del peso específico de cada criterio**

Criterio		b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	0	1	3	0,3
b	0		0	0	1	0,1
c	1	1		1	4	0,4
d	0	1	0		2	0,2
<b>Suma</b>					<b>10</b>	<b>1</b>

**Tabla 4**  
**Evaluación del peso específico de las propiedades del aire**

Criterio	Túnel Abierto	Túnel Cerrado	$\Sigma+1$	Pondera.
Túnel Abierto		0	1	0,33
Túnel Cerrado	1		2	0,67
<b>Suma</b>			<b>3</b>	<b>1</b>

**Tabla 5**  
**Evaluación del peso específico del criterio Nivel de ruido**

Criterio	Túnel Abierto	Túnel Cerrado	$\Sigma+1$	Pondera.
Túnel Abierto		0	1	0,33
Túnel Cerrado	1		2	0,67
<b>Suma</b>			<b>3</b>	<b>1</b>

**Tabla 6**  
**Evaluación del peso específico del criterio Estabilidad del flujo**

Criterio	Túnel Abierto	Túnel Cerrado	$\Sigma+1$	Pondera.
Túnel Abierto		0	1	0,33
Túnel Cerrado	1		2	0,67
<b>Suma</b>			<b>3</b>	<b>1</b>

**Tabla 7**  
**Evaluación del peso específico del criterio factores externos**

Criterio	Túnel Abierto	Túnel Cerrado	$\Sigma+1$	Pondera.
Túnel Abierto		0	1	0,33
Túnel Cerrado	1		2	0,67
		Suma	3	1

**Tabla 8**  
**Tabla de conclusiones del tipo de túnel de viento**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
Túnel Abierto	$0,33*0,3$	$0,33*0,1$	$0,33*0,4$	$0,33*0,2$	0,33	2
Túnel Cerrado	$0,67*0,3$	$0,67*0,1$	$0,67*0,4$	$0,67*0,2$	0,67	1

Por lo tanto la mejor alternativa de diseño es la opción de túnel de viento cerrado, al contar con mejores características para mantener las propiedades del aire, como un nivel de ruido menor y menor nivel de turbulencias.

### 3.3 Selección de la geometría de la sección de pruebas

Se puede diseñar y calcular secciones circulares, rectangulares y octogonales, entre otras. Para cada una se tienen consideraciones especiales.

- Circular: conveniente para una configuración circular de todo el sistema, uniformidad de flujo, medición de velocidades y presiones bajo estándares definidos.
- Rectangular: Muchas veces es usada por su facilidad de manufactura sobre todo a gran escala.
- Octagonal: Es una opción mixta tomando características de las dos soluciones anteriores.

Existen muchas relaciones y consideraciones geométricas para dimensionar dichas secciones, siendo los principales criterios los siguientes:

- a) Distribución de presión, al existir una mejor distribución de la presión el flujo en la sección será más estable.
- b) Uniformidad de flujo, se debe garantizar un flujo uniforme para realizar una correcta calibración de los sensores.

- c) Costos de manufactura, los costos de manufactura no deben adaptar al presupuesto de la institución.
- d) Pérdidas, las pérdidas son directamente proporcionales a los costos de operación.

**Tabla 9**  
**Ponderación geometría de la sección de pruebas**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		0	1	1	3	0.3
b	1		1	1	4	0.4
c	0	0		0.5	1.5	0.15
d	0	0	0.5		1.5	0.15
<b>Suma</b>					<b>10</b>	<b>1</b>

Como se realizó anteriormente se utilizará el método ordinal corregido de criterios ponderados obteniendo como resultado.

**Tabla 10**  
**Resumen de la geometría de la sección de prueba**

Alternativas	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Circular</b>	0,5* 0,3	0,5* 0,4	0,17*0,15	0,5* 0,15	0,46	1
<b>Rectangular</b>	0,17*0,3	0,17*0,4	0,5* 0,15	0,25*0,15	0,23	3
<b>Octogonal</b>	0,33*0,3	0,33*0,4	0,33*0,15	0,25*0,15	0,31	2

Al realizar un análisis de la tabla 10 la forma que se garantiza una mejor calidad de flujo es la sección de forma circular, además en esta aplicación se tendrá una configuración circular para todo el sistema lo cual lo recomiendan algunos autores.

### 3.4 Cálculo de flujo másico y caudal de aire requerido

Para el cálculo del flujo másico es necesario contar con la densidad del aire a la altura de la ciudad de Quito y la temperatura de 22 °C y una humedad relativa promedio de 50%

Para lo cual se calcula la presión atmosférica en función de la altura con la ecuación 2 propuesta por (Nave, 2015)

$$P_h = P_0 * e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

**Ecuación 2**

Donde

$P_h$	Presión atmosférica en [hPa]
$P_0$	Presión atmosférica a nivel el mar 1 013,25 [hPa]
m	Masa de una molécula [kg]
g	Gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
T	Temperatura [K]
k	Constante Boltzmann $\left[\frac{J}{K}\right]$
h	Altura [m]

Reemplazando las constantes de la ecuación obtenemos

$$P_h = P_0 * e^{-\frac{h}{8625}}$$

Siendo así la presión atmosférica en Quito igual a:

$$P_h = 1013.25 * e^{-\frac{2800}{8625}}$$

$$P_h = 732.36[hPa]$$

El Comité internacional de Pesas y Medidas (CIPM) propone la Ecuación 3 para determinar la densidad del Aire, siendo la ecuación general:

$$\rho_a = \frac{0.34848 * p - 0.009 * h_r * e^{0.06 * t}}{273.15 + t}$$

### Ecuación 3

Donde,

$\rho_a$	Densidad del aire en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
p	Presión barométrica en [hPa]
$h_r$	Humedad relativa de aire en [%]
t	temperatura de aire en [°C]

$$\rho_a = \frac{0.34848 * 732.36 - 0.009 * 50 * e^{0.06 * 22}}{273.15 + 22} = 0.83487 \frac{kg}{m^3}$$

Se calcula el caudal másico de flujo de aire máximo ( $\dot{m}$ ) con la velocidad y el área en la sección de pruebas requerido en el túnel de viento.

$$\dot{m} = \rho * \vec{V} * A$$

#### Ecuación 4

Donde

$\dot{m}$  Flujo másico  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$\rho$  Densidad  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\vec{V}$  Velocidad en la sección de pruebas  $\left[\frac{m}{s}\right]$

A Área transversal en la sección de pruebas  $[m^2]$

Siendo el Área transversal de una circunferencia igual a:

$$A = \pi * r^2$$

#### Ecuación 5

Donde

A Área transversal en la sección de pruebas  $[m^2]$

r Radio de la sección de pruebas  $[m]$

Reemplazando se obtiene:

$$A = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{0.5[m]}{2}\right)^2 = 0.19635[m^2]$$

$$\dot{m} = 0.83487 * 60 * 0.19635$$

$$\dot{m} = 9.8356 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Este flujo másico se mantendrá constante en todas las secciones del túnel de viento, por lo tanto a partir del caudal másico se obtendrá el caudal volumétrico Q, de aire máximo que debe suministrar el ventilador.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

### Ecuación 6

Donde

Q Caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$\dot{m}$  Flujo másico  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$\rho$  Densidad  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$Q = \frac{9.8356}{0.83487}$$

$$Q = 11.7803 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

## 3.5 Elementos del túnel de viento

El dimensionamiento de las partes del túnel de viento se lo realiza mediante una secuencia de cálculo, y siguiendo las recomendaciones para ciertos parámetros definidos por autores expertos en el tema, tanto para cumplir lineamiento de túnel de viento, como para la calibración de sensores

### 3.5.1 Sección de pruebas

El diámetro de esta sección depende del tamaño de los instrumentos a ser calibrados y la longitud se toma en cuenta la recomendación (Guru, 2010), (Barlow, Rae , & Pope, 1999) donde se recomienda la longitud de la sección de pruebas este entre 2 a 3 veces el diámetro hidráulico de la misma, por lo cual se obtiene:

$$D= 500 \text{ mm}$$

$$L = 1200 \text{ mm} \quad 2 * D < L < 3 * D$$

Donde

D Diámetro de la sección [mm]

L Largo de la sección [mm]

### 3.5.2 Difusor

Dado que las pérdidas de potencia locales en todo el circuito del túnel de viento son directamente proporcionales a la velocidad local, se utilizan difusores para transformar la energía cinética de la corriente de aire en energía de presión. Los difusores son muy sensibles a errores de diseño, pueden crear separación de la capa límite de manera intermitente o estable, que es difícil de detectar y puede causar vibración en el túnel, oscilación del ventilador y variación en la velocidad de la sección de pruebas.

El flujo a través de un difusor depende de sus parámetros geométricos mostrados en la figura 16, tales como su longitud,  $L$ , relación de área,  $A_r$ , ángulo de inclinación,  $\theta$ , el diseño del difusor resulta ser clave en el éxito del túnel, pues es necesario encontrar el punto adecuado para aumentar el área, sin permitir que la capa límite se desprenda. La forma más común para un ángulo de inclinación es de  $3^\circ$  o menor, con una relación de área alrededor de 3. (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

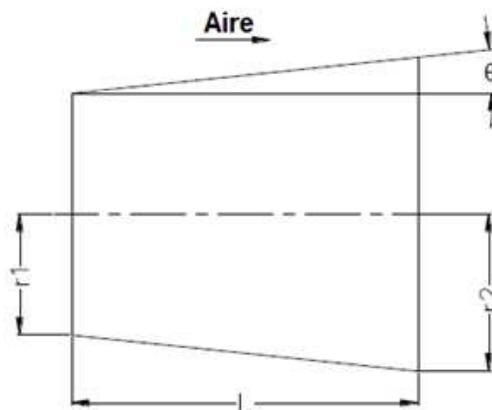


Figura 24. Difusor

La relación de áreas viene dado entre el área de salida  $A_2$  y el área de entrada al difusor  $A_1$  esta última será el área de salida de la sección de pruebas calculada de acuerdo a su diámetro.

$$A_r = \frac{A_2}{A_1}$$

### Ecuación 7

Donde

$A_2$  Área de Salida del difusor [ $m^2$ ]

$A_1$  Área de Entrada del difusor [ $m^2$ ]

Se conoce el  $A_1$  y será necesario imponer un  $A_2$  siguiendo las recomendaciones establecidas por (Barlow, Rae , & Pope, 1999), para un mejor diseño del difusor se deberá calcular tres alternativas de diseño con  $r_{21} = 300$ ,  $r_{22} = 365$  y  $r_{23} = 400$ .

Cálculos del difusor 1 con un  $r_{21} = 300$

$$A_2 = \pi * 0.3^2 = 0.2827 m^2$$

$$A_r = \frac{A_2}{A_1}$$

$$A_r = \frac{0.2827}{0.1963} = 1.44$$

El largo del túnel de viento está limitado por la infraestructura que cuenta el INAMHI por lo que  $L$  es 2520 mm y es constante para las tres alternativas de diseño.

El ángulo de inclinación está definido por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{r_2 - r_1}{L}\right)$$

### Ecuación 8

Donde

$\theta$  Ángulo de inclinación [ $^\circ$ ]

- r2      Radio salida del difusor 1 [mm]
- r1      Radio entrada difusor 1 [mm]
- L      Largo difusor 1 [mm]

Siendo r1=250, r2=300 y L=2520 obtenemos un  $\theta$  igual a:

$$\theta = \arctan\left(\frac{300 - 250}{2520}\right)$$

$$\theta = 1.13^\circ$$

De igual forma como se realizó el cálculo para las dos alternativas de diseño r2<sub>2</sub> = 365 y r2<sub>3</sub> = 400 obteniendo como resultado la tabla 11

**Tabla 11**  
**Alternativas de diseño del difusor 1**

Alternativas	r2 [mm]	A2 [m <sup>2</sup> ]	Ar	$\theta$	L [mm]
1	300	0.2827	1.44	1.13	2520
2	365	0.4185	2.13	2.61	2520
3	400	0.5027	2.56	3.4	2520

De forma semejante para una selección se utiliza la matriz ponderada siendo los criterios de selección:

- Pérdidas, se necesita obtener la menores pérdidas posible para que el tamaño del propulsor sea menor.
- Uniformidad de flujo, al ser un elementos que influye directamente en la calidad de flujo en la sección de pruebas se debe diseñar siguiendo las recomendaciones de (Barlow, Rae , & Pope, 1999)
- Angulo de inclinación, el Angulo de inclinación incide en el desprendimiento de capa en la sección de prueba.
- Relación de Área, debe cumplir con las recomendaciones de los distintos autores para transformar una mayor cantidad de energía cinética de la corriente de aire e energía de presión disminuyendo las pérdidas.

**Tabla 12**  
**Ponderación Difusor 1**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		0	0	0	1	0.1
b	1		1	1	4	0.4
c	1	0		0.5	2.5	0.25
d	1	0	0.5		2.5	0.25
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

Y obtenido como resultado la tabla 13.

**Tabla 13**  
**Resultado de selección del difusor 1**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
r2=300	0,17*0,1	0,33*0,4	0,25*0,25	0,17*0,25	0,25	3
r2=365	0,33*0,1	0,5* 0,4	0,5* 0,25	0,33*0,25	0,44	1
r2=400	0,5* 0,1	0,17*0,4	0,25*0,25	0,5* 0,25	0,30	2

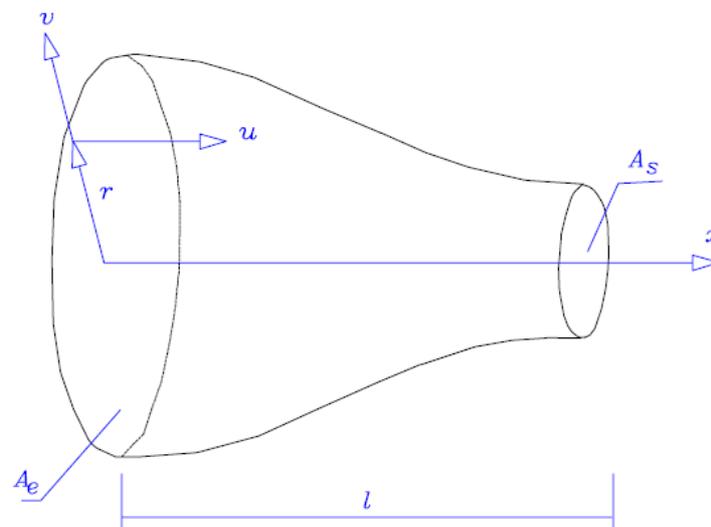
Siendo la mejor alternativa de diseño la opción con r2=365 mm y un L= 2520 mm

### 3.5.3 Contracción

Las funciones que cumple la contracción son:

- Incrementar la velocidad, lo cual permite que la instalación del direccionador de flujo y mallas sea en una zona de baja velocidad, reduciendo así las pérdidas, ya que éstas dependen directamente de la velocidad al cuadrado.
- Reducir la variación de velocidad en la sección de pruebas
- Un flujo paralelo e uniforme a la entrada en la sección de pruebas.

El diseño de la contracción se centra en el logro de la uniformidad y estabilidad del flujo al momento de salir, evitando la separación de flujo con un espesor de capa límite mínimo y una longitud de contracción no muy larga, considerando los valores que para el Radio de Contracción, sugieren (Barlow, Rae , & Pope, 1999) un valor entre 6 y 10, se optó por tomar un valor de 7.3, el radio de contracción está definido por Ver figura 25.



**Figura 25. Dibujo esquemático de la contracción**

$$R_c = \frac{A_e}{A_s}$$

**Ecuación 9**

Donde

$R_c$  Radio de compresión [Adimensional]

$A_e$  Área de entrada en  $[m^2]$

$A_s$  Área de salida en  $[m^2]$

Donde despejamos el Área de entrada

$$A_e = 1.43 [m^2]$$

De donde el radio de la sección de entrada es

$$r_e = \sqrt{A_e * \pi} = 0.675[m]$$

Con los años, muchos autores se han interesado en los métodos de diseño de las contracciones del túnel de viento de baja velocidad (Jordinson de 1961, Morel, 1975, 1977; Downie et al, 1984. Vieira y Aparecido, 1999). Se

identifican varias características deseables del perfil de la pared. Se espera que los resultados de la combinación más favorable de la uniformidad de flujo, capa límite delgada y pérdidas insignificantes.

Un polinomio de quinto orden (Bell y Mehta, 1988) satisface la condición para un correcto funcionamiento, la normalización de la longitud de este polinomio es de la siguiente manera:

$$h = (-10 * \varepsilon^3 + 15 * \varepsilon^4 - 6 * \varepsilon^5) * (h_i - h_o) + h_i$$

**Ecuación 10**

$$\varepsilon = x/L$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

Donde

h      Altura de la Contracción en la posición x [mm]

L      Longitud total de la Contracción [mm]

h<sub>i</sub>     Radio entrada [mm]

h<sub>o</sub>     Radio salida [mm]

Según el análisis realizado por (Su, 1991) donde encuentra que el L que mejor se comporta es donde  $L/D_o \approx 1.03$  de donde  $L=1400$

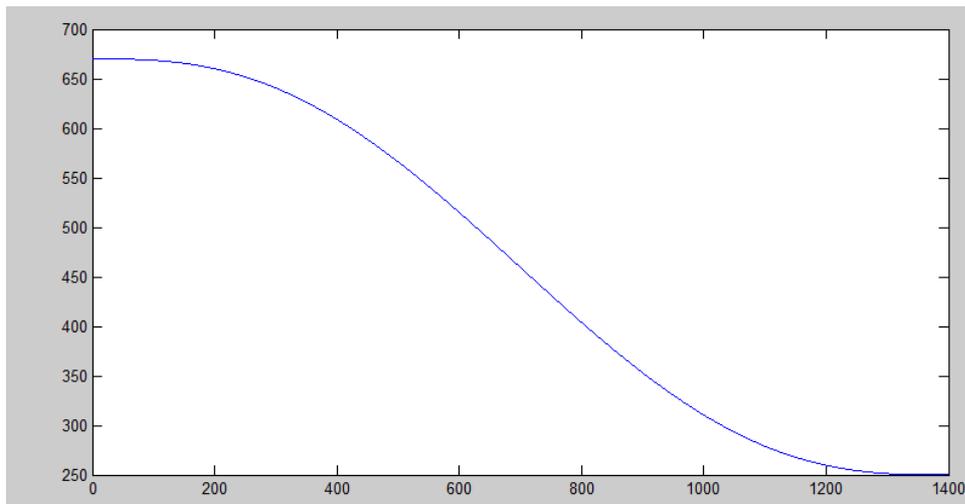
Obteniendo así:

$$h = (-10 * \varepsilon^3 + 15 * \varepsilon^4 - 6 * \varepsilon^5) * (h_i - h_o) + h_i$$

**Ecuación 11**

$$\varepsilon = x/1400$$

Graficando la ecuación 11 obtenemos

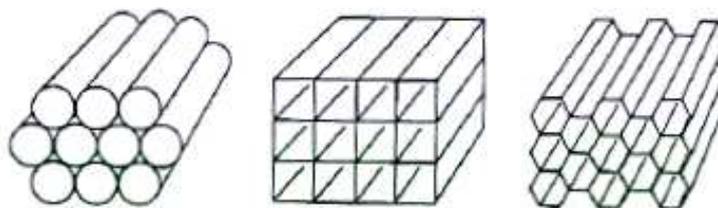


**Figura 26. Contracción**

### 3.5.4 Direccionadores de flujo

Los direccionadores de flujo son dispositivos que se instalan en los túneles de viento con la finalidad de distribuir el flujo uniformemente sobre la sección transversal de la zona de pruebas, evitando flujos en sentidos diferentes al de la velocidad de corriente libre

Los direccionadores pueden ser fabricados de diferentes formas, entre ellas tenemos la circular, la cuadrada o la hexagonal.



**Figura 27. Tipos de direccionadores de flujo**

**Fuente: (Barlow, Rae , & Pope, 1999)**

La forma de los direccionadores de flujo se considerara los siguientes criterios de selección.

- a) Manufactura, al ser un elemento complejo con su manufactura, se debe considerar el proceso de fabricación más sencillo.

- b) Precio, el precio se debe ajustar a los costos del proyecto
- c) Pérdidas, de ser posible se debe disminuir lo mayor posible las pérdidas para disminuir el tamaño del propulsor.
- d) Mercado Nacional, se necesita que la manufactura sea con elementos de uso común en la industria ecuatoriana, para un fácil remplazo en caso de daño.

**Tabla 14**  
**Ponderación de la forma de los direccionadores**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.	
a			1	1	1	4	0.4
b	0			1	1	3	0.3
c	0	0			0	1	0.1
d	0	0	1			2	0.2
				<b>Suma</b>		<b>10</b>	<b>1</b>

**Tabla 15**  
**Resultado de selección forma de los direccionadores.**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Circular</b>	0,5* 0,4	0,5* 0,3	0,17*0,1	0,5* 0,2	0,47	1
<b>Cuadrado</b>	0,33*0,4	0,33*0,3	0,33*0,1	0,33*0,2	0,33	2
<b>Hexagonal</b>	0,17*0,4	0,17*0,3	0,5* 0,1	0,17*0,2	0,20	3

Por lo que la mejor alternativa de diseño es la circular y, Mehta y Bradshau sugieren un total de 25000 celdas en el direccionador de flujo siendo la relación entre la longitud y el diámetro de las celdas de los direccionadores varía entre 5 y 10, cuanto más largas las celdas, se producirán menos corrientes transversales al flujo principal, también producirán una mayor resistencia friccional lo que mejora el perfil de velocidades en la zona de pruebas.

Siendo el diámetro de la cámara de ajustes 1350 mm, el diámetro de la celdas sería de 7.5 por lo que recomienda el INAMHI el uso de pajillas plásticas con un diámetro de 7mm, una pared de 0.2 mm y una longitud total de 70 mm de con se muestra en los anexos.

### 3.5.5 Alisador de Flujo (Mallas)

El alisador de flujo, consiste en una malla colocada en la sección transversal del túnel de viento, cuyo propósito es destruir la turbulencia generada por los direccionadores de flujo y proporcionar a la zona de pruebas un flujo de aire con mínima turbulencia.

Una malla en principio reduce la velocidad del flujo. Las mallas que no sean montadas firmemente, pueden pandearse notablemente, causando desprendimiento de capa límite.

La característica principal de las mallas es la porosidad  $\beta$  y el número de Reynolds ( $Re_{lw}$ ) y (Barlow, Rae, & Pope, 1999) sugieren el empleo de mallas con  $\beta > 0,57$ , debido a que un valor menor produce inestabilidades del flujo que se conservan hasta la sección de pruebas.

$$\beta = \left(1 - \frac{d_w}{M}\right)^2$$

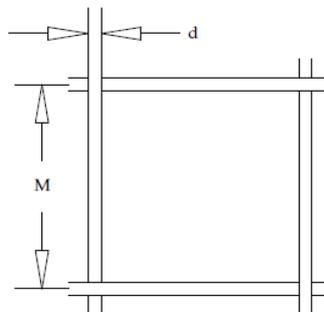
#### Ecuación 12

Donde:

$\beta$  Coeficiente porosidad de la malla [Adimensional].

$d_w$  Diámetro del alambre [mm]

$M$  Abertura [mm]



**Figura 28. Dimensiones malla**

Existen en el mercado tres mallas que cumplen con las características recomendadas por (Barlow, Rae , & Pope, 1999) tabla 16 por lo que se selecciona la mejor alternativa según los criterios.

**Tabla 16**  
**Mallas mercado**

Mallas en el mercado	Apertura [mm]	Diámetro hilo [mm]	Porosidad	Material
Malla para construcción	3	0,450	0,723	Galvanizado
Acero Inoxidable 20 Mesh	1,041	0,229	0,609	Acero Inoxidable
Acero Inoxidable 7 Mesh	2,63	0,750	0,511	Acero Inoxidable

- Porosidad, es el criterio de mayor importancia ya que de este depende directamente la aparición de turbulencias.
- Pérdidas, al tener pérdidas considerablemente altas el propulsor aumentaría su tamaño.
- Costo, el costo se debe ajustar al presupuesto del proyecto.
- Material de fabricación, de este depende la forma de montaje y el mantenimiento periódico que se debe dar a esta sección.

**Tabla 17**  
**Ponderación de malla**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0.4
b	0		0	1	2	0.2
c	0	1		1	3	0.3
D	0	0	0		1	0.1
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

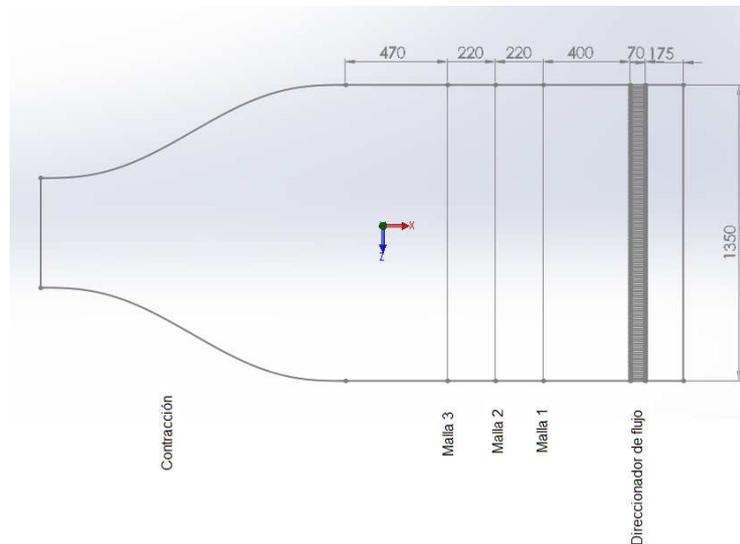
**Tabla 18**  
**Resultado de selección de malla**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
Construcción	0,5* 0,4	0,5* 0,2	0,5* 0,3	0,17* 0,1	0.47	1
20 Mesh	0,33*0,4	0,33*0,2	0,17*0,3	0,415*0,1	0.29	2
7 Mesh	0,17*0,4	0,17*0,2	0,33*0,3	0,415*0,2	0.24	3

Por lo que la mejor alternativa para la instalación sería la malla tejida utilizada en la construcción con una apertura de 3mm y un diámetro de alambre de 0.45mm.

Se propone instalar 3 mallas siendo la primera malla instalada según las recomendaciones de (Purtell & Klebanoff, 1979) 5 a 56 diámetros del

direccionador de flujo, por lo que se instalara a 400 mm, y una distancias entre mallas de 220 mm equivalentes a  $500 d_w$ , obteniendo así una configuración final como el de la Figura 29.



**Figura 29. Cámara de estabilización**

La distancia entre la última malla y la contracción debe ser mayor de 0,2 diámetros de la cámara de estabilizadora, obteniendo así una distancia de 270 mm, por lo que se propone dejar espacio para una malla adicional, la cual se deberá realizar un análisis posterior y de ser necesario instalarse, y así se obtiene una distancia final entre la contracción y la última malla instalada de 490mm.

### 3.5.6 Deflectores

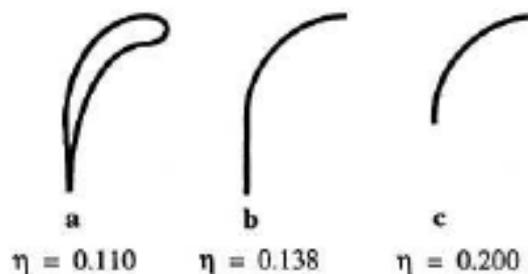
El túnel consta de cuatro cambios de dirección de área constante, esquinas de  $90^\circ$ , para orientar el flujo alrededor de la curva de  $360^\circ$ . Como se estudió por Idelchik y Fried (1989) y Krober (1932), el coeficiente de pérdida de presión,  $K_L$ , a través de dicha esquina sería mayor que la unidad, si no se emplean deflectores

Klein en ( 1930 ) , Collar ( 1936 ) , Salter (1946) y Winter ( 1947 ) han demostrado que un  $\frac{1}{4}$  de círculo con un espacio de relación de cuerda (  $s/c$  ), de entre 0,20 a 0,25 , produce un  $K_L$  de entre 0,12 a 0,20 . Sin embargo, estas fuentes se centraron en la determinación de  $K_L$  en vez de cuantificar la calidad

de flujo aguas abajo de las esquinas. Aunque  $K_L$ , es importante en términos de lograr unas pérdidas bajas, el mal diseño de los deflectores genera perturbaciones que se pueden ver arriba en la sección de trabajo.

El uso de secciones de perfil aerodinámico modernos, tanto en área constante y la ampliación de las curvas han sido propuesto por Sahlin y Johansson (1991) y Lindgren (1998), respectivamente, para mejorar aún más la eficiencia más tradicional  $\frac{1}{4}$  de círculo. Aunque se ha demostrado que estos deflectores reducen  $K_L$  hasta un mínimo de 0.04, y son los mejores en la uniformidad aguas abajo, el coste adicional se consideró injustificada ya que con el diseño propuesto por Idelchik y Fried (1989) obtenemos un  $K_L$  de 0.10 con similares características de uniformidad de flujo a un costo considerablemente menor.

Por lo que se realizará una selección del perfil para la construcción de los deflectores como de la Figura 30



**Figura 30. Perfiles de deflectores**

Fuente: (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

**Tabla 19**  
**Alternativas de diseño**

	Eficiencia ( $\eta$ )	Descripción
Alternativa 1	0.110	Perfil aerodinámico
Alternativa 2	0.138	Cuarto de circunferencia extendido
Alternativa 3	0.200	Cuarto de circunferencia

Siendo los criterios de selección:

- a) Precio, el precio de estos influirá directamente al coste total del proyecto.
- b) Pérdidas, las pérdidas se deben reducir lo más posible para disminuir el tamaño del propulsor.
- c) Turbulencias, las turbulencias generadas por los deflectores no pueden influir aguas arriba en la sección de prueba.
- d) Manufactura, el proceso de manufactura debe ser lo más sencillo posible ya que se podrán realizar ajustes de acuerdo a experimentos prácticos para mejorar la calidad de flujo en la sección de pruebas.

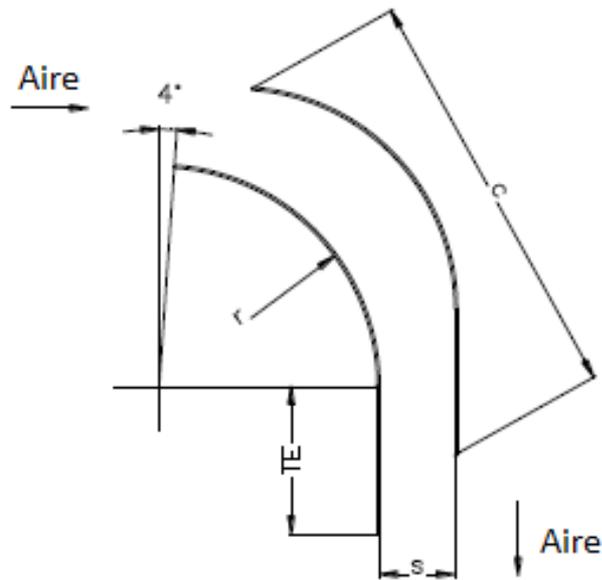
**Tabla 20**  
**Ponderación perfiles de los deflectores**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0,4
b	0		1	1	3	0,3
c	0	0		0,5	1,5	0,15
d	0	0	0,5		1,5	0,15
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

**Tabla 21**  
**Resultado de selección del perfil de los deflectores**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	$0,42*0,4$	$0,17*0,2$	$0,17*0,1$	$0,42*0,3$	0,34	2
Alternativa 2	$0,42*0,4$	$0,33*0,2$	$0,42*0,1$	$0,42*0,3$	0,40	1
Alternativa 3	$0,33*0,4$	$0,5*0,2$	$0,42*0,1$	$0,17*0,3$	0,33	3

De acuerdo a la tabla 21 la mejor alternativa de diseño es la alternativa 2, para la construcción de este deflector se debe considerar los parámetros de la figura 31.



**Figura 31. Deflector**

Tomando en cuenta el estudio realizado por (Guru, 2010) la mejor relación para obtener una mejor calidad de flujo con bajas pérdidas es de  $(s/c)$  0.19 se dimensiona tres deflectores con  $s=50$ ,  $s=100$  y  $s=200$

Siendo los criterios de valoración:

- Manufactura, al contar con una superficie es necesario analizar el proceso de manufactura para que los acabados sean de calidad.
- Precio, el diseño debe ajustarse a los presupuestos del proyecto
- Tamaño, al elaborar dimensiones demasiado grandes la infraestructura necesaria para instalar el túnel debería ser mayor de lo que cuenta la institución.
- Pérdidas, al tener pérdidas mayores en las esquinas estas influirán en el precio del propulsor.

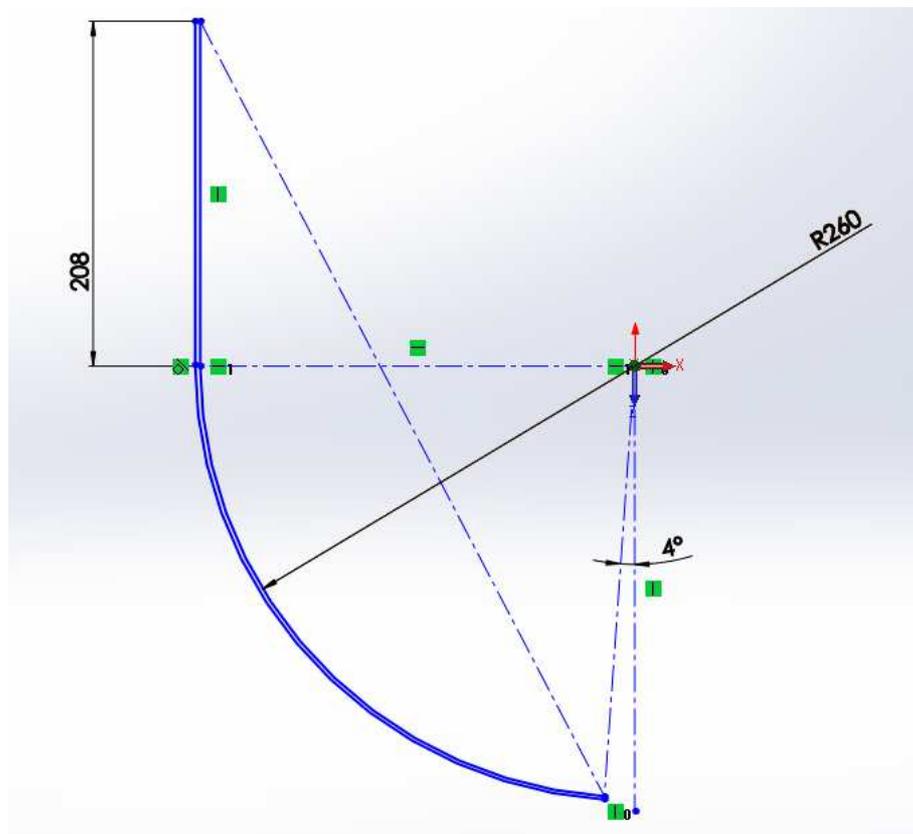
**Tabla 22**  
**Ponderación deflectores**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0.4
b	0		1	1	3	0.3
c	0	0		0.5	1.5	0.15
d	0	0	0.5		1.5	0.15
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

**Tabla 23**  
**Resultado de selección deflectores.**

Criterio	a	b	c	D	$\Sigma$	Prioridad
S=50	0,17*0,4	0,17*0,3	0,5* 0,15	0,5* 0,15	0,27	3
S=100	0,42*0,4	0,5* 0,3	0,33*0,15	0,33*0,15	0,42	1
S=200	0,42*0,4	0,33*0,3	0,17*0,15	0,17*0,15	0,32	2

Según la tabla 23 la mejor alternativa de diseño es donde  $s=100$  y un  $c= 526$  obtenido así la siguiente configuración de deflectores.

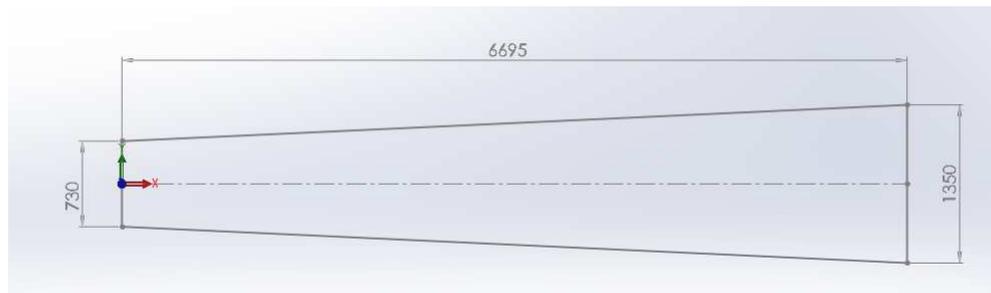


**Figura 32. Dimensiones del Deflector**

### 3.5.7 Pre diseño Difusor 2 y Difusor 3

Se dimensionara un difusor temporal que una la esquina dos y tres para tener unas pérdidas aproximadas en este sector y poder dimensionar el Ventilador.

De esta forma el pre diseño final del difusor en el túnel de viento es el de la figura 33



**Figura 33. Pre diseño difusor 3**

### 3.6 Cálculo de las pérdidas

La máxima velocidad en la zona de pruebas, es el parámetro de diseño para calcular las pérdidas de presión dentro del túnel de viento y sus accesorios; el cálculo de las pérdidas de presión permitirá seleccionar un adecuado ventilador o impulsor de aire.

Las pérdidas en un túnel de viento cerrado se dividen en partes y el análisis de las pérdidas a considerar son:

- Secciones de área constante
- Difusores
- Codos
- Direccionadores de flujo
- Mallas
- Contracciones

En estas secciones se produce una pérdida de energía, que en realidad es una transformación de la energía de forma mecánica al calor que resulta en el aumento de la temperatura de la corriente de gas y los materiales sólidos con la que está en contacto. La transformación de la energía se produce debido a la acción viscosa entre el gas que fluye y las paredes.

La pérdida en una sección se define como la pérdida media de la presión total causado por el paso de la corriente de aire a través de la sección en particular. El coeficiente de pérdida en una sección es adimensional y está

dado por la ecuación 13 y es la relación de la pérdida de presión en la sección y la presión dinámica en la entrada de la sección. (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

$$K_l = \frac{\Delta H}{(1/2) * \rho_l * V_l^2}$$

### Ecuación 13

Donde

$K_l$  Coeficiente de pérdidas en una sección [Adimensional]

$\Delta H$  Caída de presión en la sección [Pa]

$\rho_l$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$V_l$  Velocidad del aire  $\left[\frac{m}{s}\right]$

Estas pérdidas locales se pueden relacionar con la presión dinámica en la sección de pruebas, por lo que el coeficiente de pérdidas en función de la presión dinámica está expresado por la ecuación 14

$$K_{lt} = K_l \frac{q_l}{q_t}$$

### Ecuación 14

Asumiendo que es un fluido incompresible, y por lo tanto una masa y densidad constante en todas las secciones según (Barlow, Rae , & Pope, 1999) tenemos que

$$K_{lt} = K_l \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

Donde

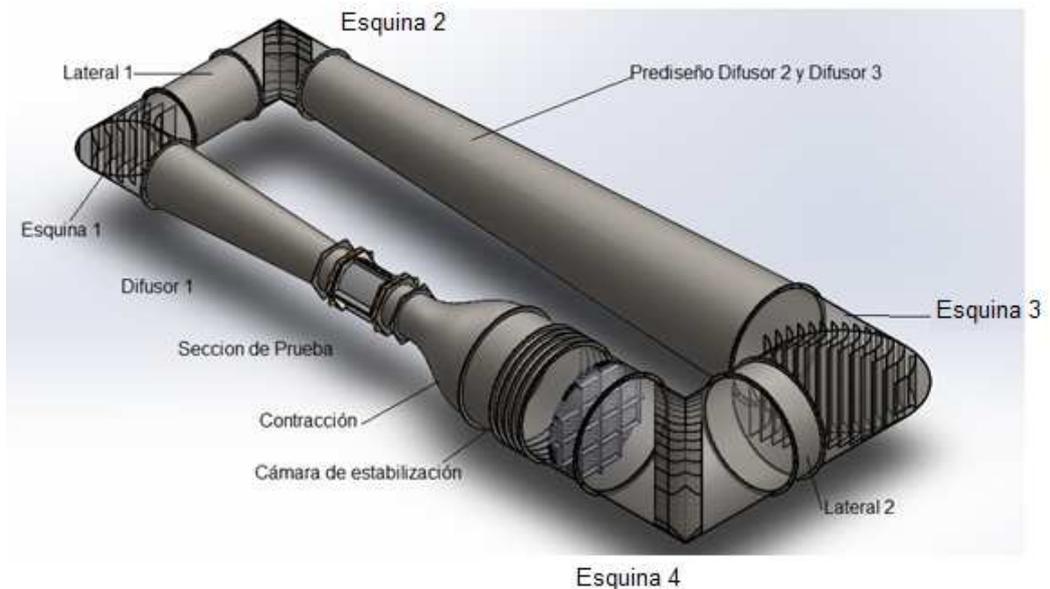
$K_{lt}$  Coeficiente de pérdidas en función de la sección de pruebas  
[Adimensional]

$K_l$  Coeficiente de pérdidas locales [Adimensional]

$A_t$  Área en la sección de pruebas [ $m^2$ ]

$A_l$  Área en la sección local [ $m^2$ ]

Las partes del prediseño del túnel de viento son las de la figura 34.



**Figura 34. Prediseño Túnel de viento**

### 3.6.1 Secciones de área constante

Se determinara con la Ecuación 15, la cual se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de conductos, tanto para flujo laminar como turbulento. (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

$$K_l = f \frac{L}{D}$$

**Ecuación 15**

Donde

$K_l$  Pérdidas Locales [Adimensional]

$f$  Factor de fricción [Adimensional]

$L$  Longitud [ $m$ ]

$D$  Diámetro [ $m$ ]

Donde el factor de fricción se calcula con la ecuación propuesta por Colebrook-White (Mataix & Hurtado, 1993)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} - \frac{2,51}{R_e * \sqrt{f}} \right)$$

### Ecuación 16

Donde:

- $f$  Factor de fricción [Adimensional]  
 $D$  Diámetro interno de la tubería [m]  
 $\varepsilon$  Rugosidad de Acero  $5 \times 10^{-5}$  [m] (Mataix & Hurtado, 1993)

Y siendo  $R_e$  para sección circular igual a:

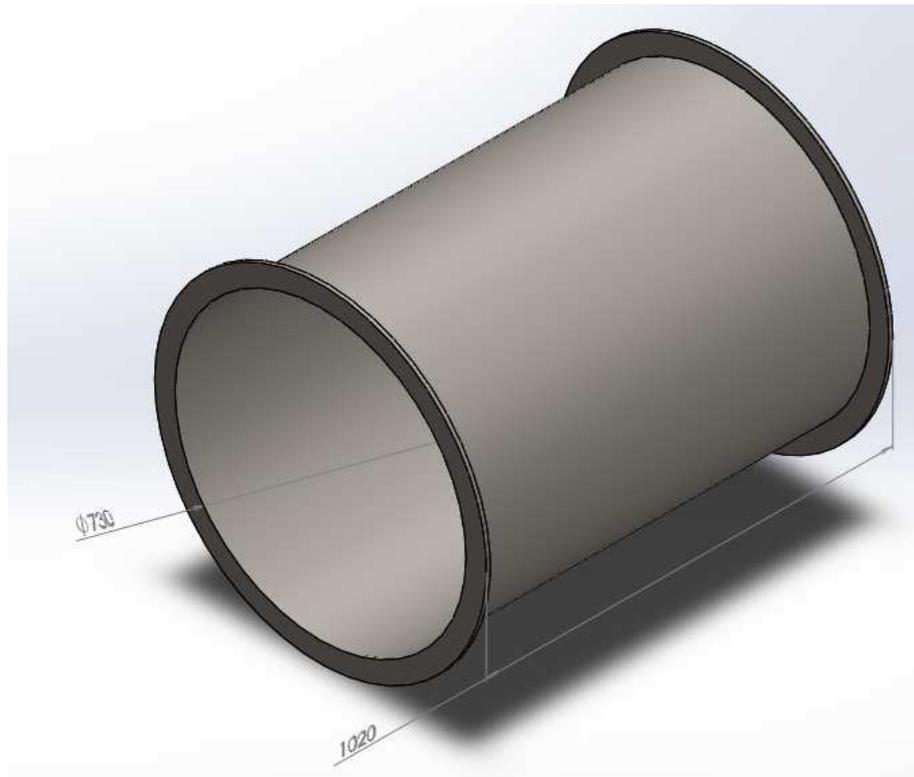
$$R_e = \frac{\rho * V_l * D_l}{\mu}$$

Donde

- $R_e$  Número de Reynolds [Adimensional]  
 $\rho$  Densidad del Aire  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$   
 $V_l$  Velocidad del aire  $\left[ \frac{m}{s} \right]$   
 $D_l$  Diámetro de la sección transversal [m]  
 $\mu$  Viscosidad del aire  $\left[ \frac{N*s}{m^2} \right]$

Para el cálculo pérdidas se asume que el fluido es incompresible por lo cual  $A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = q$

Pérdidas en la sección lateral 1, con las siguientes dimensiones serian:



**Figura 35. Lateral 1**

Velocidad en una sección

$$V_{l1} = \frac{q}{A_{l1}}$$

Donde

$V_{l1}$  Velocidad en la sección  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$q$  Caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$A_{l1}$  Area transversal  $[m^2]$

Reemplazando el área transversal se tiene

$$V_{l1} = \frac{11.7803}{0.419} = 28.148 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Para el cálculo del Número de Reynolds es necesario contar con la viscosidad del aire la cual es función de la temperatura (Schlichting , 1960) por lo que se puede utilizar la estándar donde  $\mu = 1.7894 * 10^{-5} N * s / m^2$

$$R_e = \frac{\rho * V_l * D_l}{\mu}$$

$$R_{el1} = \frac{0.83487 * 28.148 * .730}{1.7894}$$

$$R_{el1} = 9.587 * 10^5$$

Factor de fricción

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{2.51}{R_e * \sqrt{f}} \right)$$

Para resolver esta ecuación se utiliza el método de Newton-Raphson donde:

$$f(x_n) = \frac{1}{\sqrt{x_n}} + \log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{2.51}{R_e * \sqrt{x_n}} \right)$$

Y la derivada de  $f(x_n)$  es:

$$f'(x_n) = -\frac{1}{2} * x_n^{-\frac{3}{2}} - \frac{\frac{2.51}{R_e} * x_n^{-3/2}}{\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R_e * \sqrt{x_n}}}$$

Donde

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Siendo  $x_n=0.025$

$$f(x_n) = \frac{1}{\sqrt{0.025}} + \log_{10} \left( \frac{5 * 10^{-5}/0.73}{3.7} - \frac{2.51}{9.587 * 10^5 \sqrt{0.025}} \right)$$

$$f(x_n) = -2.5855$$

Y

$$f'(x_n) = -\frac{1}{2} * 0.025^{-\frac{3}{2}} - \frac{\frac{2,51}{9.587 * 10^5} * 0.025^{-3/2}}{\frac{5 * 10^{-5}/0.73}{3,7} + \frac{2,51}{9.587 * 10^5 * \sqrt{0.025}}}$$

$$f'(x_n) = -145.3772$$

Por lo que

$$x_{n+1} = 0.025 - \frac{-2.5855}{-145.3772}$$

$$x_{n+1} = 0.007214761$$

Utilizando esta primera aproximación y con el mismo método de cálculo se obtiene la tabla 24

**Tabla 24**  
**Sucesión de aproximaciones**

$x_n$	$f(x_n)$	$f'(x_n)$	$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$
0.02500	-2.5855691	-145,3772	0,00721
0.00721	3.1593620	-902,4973	0,01072
0.01072	0.9434172	-504,6539	0,01258
0.01258	0.1574439	-398,4695	0,01298
0.01298	0.0132585	-380,7791	0,01301
0.01301	0.0008652	-379,2836	0,01302
0.01302	0.0000550	-379,1859	0,01302
0.01302	0.0000035	-379,1797	0,01302
0.01302	0.0000002	-379,1793	0,01302

Siendo finalmente  $f = 0.01302$

Por lo que las pérdidas locales son:

$$K_l = f \frac{L}{D}$$

$$K_l = 0.01302 \frac{1.020}{.730}$$

$$K_l = 0.018$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{lt} = K_l \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{lt} = 0.018 \frac{0.196^2}{0.419^2}$$

$$K_{lt} = 0.004$$

Procediendo con el cálculo de igual forma para las otras secciones de área constante se obtiene la tabla 25.

**Tabla 25**  
**Pérdidas en secciones de área constante.**

	D [m]	L [m]	V [m/ s]	Re	f	$K_l$	$K_{lt}$
<b>Sección de pruebas</b>	0.5	1.2	60	1.40E+06	0.013	0.0312	0.0312
<b>Lateral 1</b>	0.73	1.02	28.15	9.59E+05	0.013	0.01816	0.004
<b>Lateral 2</b>	1.35	0.42	8.23	5.18E+05	0.014	0.00435	8.19E-05
<b>Cámara de estabilización</b>	1.35	1.555	8.23	5.18E+05	0.014	0.01840	0.000346

### 3.6.2 Difusores

El coeficiente de pérdidas en un difusor está definido por dos componentes, el coeficiente de pérdidas del factor de fricción, y el coeficiente de pérdidas de expansión.

$$K_l = K_f + K_{ex}$$

**Ecuación 17**

Donde:

$K_l$       Pérdidas en la sección [Adimensional]

$K_f$       Pérdidas por fricción [Adimensional]

$K_{ex}$      Pérdidas por expansión [Adimensional]

Siendo las pérdidas por fricción iguales a la ecuación 18 según (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_r^2}\right) * \frac{f}{8 * \sin(\theta)}$$

**Ecuación 18**

Donde

$K_f$  Pérdidas por fricción [Adimensional]

$A_r$  Relación de área [Adimensional]

$f$  Factor de fricción [Adimensional]

$\theta$  Angulo de inclinación[°]

Las pérdidas por expansión son:

$$K_{ex} = K(\theta) \left(\frac{A_r - 1}{A_r}\right)^2$$

**Ecuación 19**

Donde

$A_r$  Relación de área [Adimensional]

$K(\theta)$  Factor de expansión [Adimensional]

El factor  $K(\theta)$  depende del ángulo de inclinación y para una sección circular es expresado por la ecuación 20

$$K_{e(circular)} = \begin{cases} 0.1033 - 0.02389 * \theta & \text{para } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1709 - 0.1170 * \theta + 0.03260 * \theta^2 & \text{para } 1.5 < \theta < 5^\circ \\ +0.001078 * \theta^3 - 0.0009076 * \theta^4 & \\ -0.000028 * \theta^5 + 0.00002337 * \theta^6 & \\ -0.09661 + 0.04672 * \theta & \text{para } 5^\circ < \theta \end{cases}$$

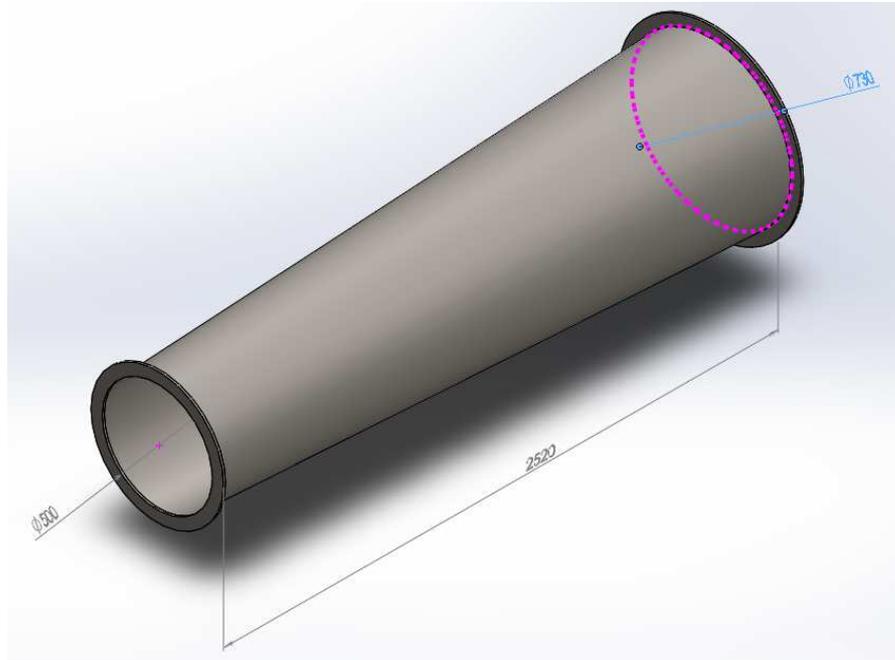
**Ecuación 20**

Donde:

$K_e$  Factor de expansión

$\theta$  Angulo de inclinación [°]

Las pérdidas para el Difusor 1 con las siguientes dimensiones serian:



**Figura 36. Difusor 1**

Ángulo de inclinación

$$\theta = \text{artan}\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right)$$

$$\theta = \text{artan}\left(\frac{.365 - .250}{2.52}\right)$$

$$\theta = 2.613^\circ$$

Factor de expansión

$$K_e = 0.1709 - 0.117 * \theta + 0.03260 * \theta^2 + 0.001078 * \theta^3 - 0.0009076 * \theta^4 \\ - 0.000028 * \theta^5 + 0.00002337 * \theta^6$$

Para  $\theta = 2.613$

$$K_e = 0.1709 - 0.117 * 2.613 + 0.03260 * 2.613^2 + 0.001078 * 2.613^3 - 0.0009076 \\ * 2.613^4 - 0.000028 * 2.613^5 + 0.00002337 * 2.613^6$$

$$K(\theta) = 0.068$$

Pérdidas por expansión

$$K_{ex} = K(\theta) \left( \frac{A_r - 1}{A_r} \right)^2$$

$$K_{ex} = 0.068 \left( \frac{2.132 - 1}{2.132} \right)^2$$

$$K_{ex} = 0.019$$

Pérdidas por fricción

$$K_f = \left( 1 - \frac{1}{A_r^2} \right) * \frac{f}{8 * \sin(\theta)}$$

$$K_f = \left( 1 - \frac{1}{2.132^2} \right) * \frac{.01302}{8 * \sin(2.613)}$$

$$K_f = 0.028$$

Pérdidas locales en el difusor 1

$$K_l = K_f + K_{ex}$$

$$K_l = 0.028 + 0.019$$

$$K_l = 0.047$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{lt} = K_l \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{lt} = 0.047 \frac{0.196^2}{0.196^2}$$

$$K_{lt} = 0.047$$

Procediendo de igual forma para el pre diseño del difusor 2 y 3 se obtiene la tabla 26

**Tabla 26**  
**Pérdidas en los difusores**

	$D_i$ [m]	$D_o$ [m]	L [m]	$\theta$ [°]	V [m/s]	Re	F	$K_l$	$K_{lt}$
<b>Difusor 1</b>	0.5	0.73	2.52	2.61	60	1.40E+06	0.013	0.0470	0.0470
<b>Difusor 2 y 3</b>	0.73	1.35	6.695	2.65	28.15	9.59E+05	0.013	0.0662	0.0146

### 3.6.3 Esquinas

Las pérdidas por fricción así como las pérdidas por cambio de ángulo varían en función del número de Reynolds por lo (Schlichting , 1960) propone la ecuación 21 para calcular las pérdidas en las esquinas.

$$K_c = 0.1 + \frac{4.55}{(\log(R_{ec}))^{2.58}}$$

**Ecuación 21**

Donde

$K_c$  Coeficiente de pérdidas en las esquinas [Adimensional]

$R_{ec}$  Número de Reynolds de la cuerda del deflector [Adimensional]

El Número de Reynolds de la cuerda de los deflectores:

$$R_e = \frac{\rho * V_l * c}{\mu}$$

**Ecuación 22**

Donde

$R_e$  Número de Reynolds adimensional [Adimensional]

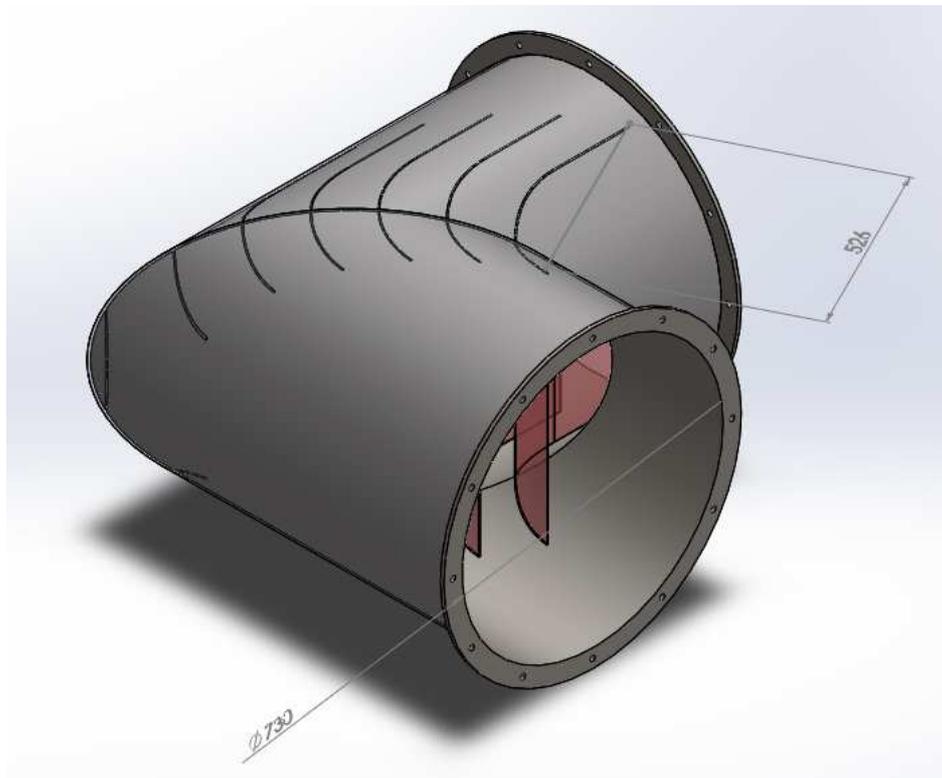
$\rho$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$V_l$  Velocidad del aire  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$c$  Cuerda de los deflectores [m]

$\mu$  Viscosidad del aire  $\left[\frac{N*s}{m^2}\right]$

Las pérdidas para la esquina 1 con las siguientes dimensiones:



**Figura 37. Esquina 1**

Velocidad en la Esquina 1

$$V_{c1} = \frac{q}{A_{c1}}$$

$$V_{l1} = \frac{11.7803}{0.419} = 28.148 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Número de Reynolds de la cuerda de los deflectores

$$R_e = \frac{\rho * V_l * c}{\mu}$$

$$R_{el1} = \frac{0.83487 * 28.148 * .526}{1.7894}$$

$$R_{el1} = 6.908 * 10^5$$

Pérdidas en la esquina 1

$$K_c = 0.1 + \frac{4.55}{(\log(R_{ec}))^{2.58}}$$

$$K_c = 0.1 + \frac{4.55}{(\log(6.908 * 10^5))^{2.58}}$$

$$K_c = 0.148$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{ct} = K_c \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{ct} = 0.148 \frac{0.196^2}{0.419^2}$$

$$K_{ct} = 0.033$$

Siguiendo el mismo proceso de cálculo se obtiene la tabla 27 con las pérdidas en las cuatro esquinas del túnel.

**Tabla 27**  
**Pérdidas en las esquinas**

	D[m]	V[m/s]	c[m]	Re	$K_c$	$K_{ct}$
<b>Esquina 1</b>	0.730	28.148	0.526	6.91E+05	0.148	0.033
<b>Esquina 2</b>	0.730	28.148	0.526	6.91E+05	0.148	0.033
<b>Esquina 3</b>	1.350	8.230	0.526	2.02E+05	0.161	0.003
<b>Esquina 4</b>	1.350	8.230	0.526	2.02E+05	0.161	0.003

### 3.6.4 Alisador de Flujo (Mallas)

Para determinar las pérdidas que genera una malla, se establece la ecuación 23 (Barlow, Rae , & Pope, 1999)

$$K_m = K_{mesh} * K_{Rn} * \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2}$$

**Ecuación 23**

Donde:

- $K_m$  Coeficiente de pérdidas en una malla [Adimensional]
- $K_{mesh}$  Factor de mayado, 1.3 para alambres metálicos circular  
(Barlow, Rae , & Pope, 1999) [Adimensional]
- $K_{Rn}$  Factor de Número de Reynolds del alambre [Adimensional]
- $\sigma_s$  Solides de la malla [Adimensional]
- $\beta_s$  Porosidad de la malla [Adimensional]

Solides de una malla

$$\sigma_s = 1 - \beta_s$$

Siendo Número de Reynolds en una malla igual a:

$$R_{ew} = \frac{\rho * V_l * d_i}{\mu}$$

#### Ecuación 24

Donde

- $R_e$  Número de Reynolds [Adimensional]
- $\rho$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- $V_l$  Velocidad del aire en la malla  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $d_i$  Diámetro del hilo e [m]
- $\mu$  Viscosidad del aire  $\left[\frac{N*s}{m^2}\right]$

Factor de Número de Reynolds del alambre para  $R_e < 400$

$$K_{rn} = \left[0.785 * \left(1 - \frac{R_{ew}}{354}\right) + 1.01\right]$$

Donde

$K_{rn}$  Factor de Número de Reynolds del alambre [Adimensional]

$R_{ew}$  Número de Reynolds del alambre [Adimensional]

Para  $R_e \geq 400$   $K_{rn} = 1$

Las pérdidas para la malla 1 con las especificaciones establecidas en el diseño son  $M=3$  mm y  $d_i=0.45$ mm en una sección transversal de 1.35m:

Velocidades en la sección transversal

$$V_{c1} = \frac{q}{A_{c1}}$$

$$V_{l1} = \frac{11.7803}{1.431} = 8.23 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Número de Reynolds del alambre

$$R_{ew} = \frac{\rho * V_l * d_i}{\mu}$$

$$R_{el1} = \frac{0.83487 * 8.23 * .45 * 10^{-3}}{1.7894}$$

$$R_{el1} = 172.80$$

Factor de Número de Reynolds del alambre para  $R_e < 400$

$$K_{rn} = \left[ 0.785 * \left( 1 - \frac{R_{ew}}{354} \right) + 1.01 \right]$$

$$K_{rn} = \left[ 0.785 * \left( 1 - \frac{172.8}{354} \right) + 1.01 \right]$$

$$K_{rn} = 1.412$$

Solides de una malla

$$\sigma_s = 1 - \beta_s$$

$$\sigma_s = 1 - 0.723$$

$$\sigma_s = 0.278$$

Pérdidas de la malla 1

$$K_m = K_{mesh} * K_{Rn} * \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2}$$

$$K_m = 1.3 * 1.412 * 0.278 + \frac{0.278^2}{0.723^2}$$

$$K_m = 0.657$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{m1t} = K_{m1} \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{m1t} = 0.657 \frac{0.196^2}{1.431^2}$$

$$K_{m1t} = 0.012$$

De igual manera se realiza los cálculos para el resto de mallas alisadoras así como para las mallas de protección, obteniendo así la tabla 28.

**Tabla 28**  
**Pérdidas en las mallas**

	$d_w[m]$	$M[m]$	$V[m/s]$	$R_{ew}$	$K_m$	$K_{mt}$
<b>Malla 1</b>	4.50E-04	3.00E-03	8.230	172.80	0.6568	0.0124
<b>Malla 2</b>	4.50E-04	3.00E-03	8.230	172.80	0.6568	0.0124
<b>Malla 3</b>	4.50E-04	3.00E-03	8.230	172.80	0.6568	0.0124
<b>Malla de Protección 1</b>	1.40E-03	7.22E-03	8.230	1838.59	0.7458	0.1641
<b>Malla de Protección 2</b>	1.40E-03	7.22E-03	8.230	1838.59	0.7458	0.1641

### 3.6.5 Direccionadores de flujo

Las pérdidas en los direccionadores de flujo según (Eckert, Mort, & Jope, 176) se calculan con la ecuación 25

$$K_h = \gamma_h \left( \frac{L_h}{D_h} + 3 \right) * \left( \frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left( \frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2$$

**Ecuación 25**

Donde

$K_h$	Pérdidas en el direccionador de flujo [Adimensional]
$\gamma_h$	Coficiente del Número de Reynolds [Adimensional]
$L_h$	Largo del direccionador de flujo [m]
$D_h$	Diámetro del direccionado de flujo [m]
$\beta_h$	Porosidad [Adimensional]

Donde  $\gamma_h$  se calcula con la ecuación 26

$$\gamma_h = \begin{cases} 0.375 * \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} * R_{e\Delta}^{-1} & \text{para } R_{e\Delta} \leq 275 \\ 0.214 * \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} & \text{para } R_{e\Delta} > 275 \end{cases}$$

**Ecuación 26**

Donde

$\gamma_h$	Coficiente del Número de Reynolds [Adimensional]
$\Delta$	Espesor de las paredes [m]
$D_h$	Diámetro [m]
$R_{e\Delta}$	Número de Reynolds [Adimensional]

Las pérdidas en el direccionador de flujo donde  $d_i=7\text{mm}$ , espesor  $0.2\text{ mm}$   
 $L=70\text{ mm}$

Velocidad en el direccionador de flujo

$$V_h = \frac{q}{A_h}$$

$$V_h = \frac{11.7803}{1.431} = 8.23 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Número de Reynolds en la salida de la contracción

$$R_e = \frac{\rho * V_h * d_i}{\mu}$$

$$R_{e\Delta} = \frac{0.83487 * 8.28 * .2 * 10^{-3}}{1.7894}$$

$$R_{e\Delta} = 76.80$$

Coefficiente  $\gamma_h$

$$\gamma_h = 0.375 * \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} * R_{e\Delta}^{-1} \quad \text{para} \quad R_{e\Delta} \leq 275$$

$$\gamma_h = 0.375 * \left(\frac{0.2 * 10^{-3}}{7 * 10^{-3}}\right)^{0.4} * 76.80^{-1}$$

$$\gamma_h = 0.059$$

Porosidad

$$\beta = \left(1 - \frac{d_w}{M}\right)^2$$

$$\beta = \left(1 - \frac{0.2 * 10^{-3}}{10 * 10^{-3}}\right)^2$$

$$\beta = .944$$

Pérdidas en el direccionador

$$K_h = \gamma_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3\right) * \left(\frac{1}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1\right)^2$$

$$K_h = 0.059 \left(\frac{70 * 10^{-3}}{7 * 10^{-3}} + 3\right) * \left(\frac{1}{0.944}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.944} - 1\right)^2$$

$$K_h = 0.859$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{ht} = K_h \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{ct} = 0.859 \frac{0.196^2}{1.431^2}$$

$$K_{ct} = 0.016$$

### 3.6.6 Contracción

Las pérdidas en la contracción en función del Número de Reynolds a la salida propuesto por (Barlow, Rae , & Pope, 1999) son:

$$K_c = 0.32 * f_c * \frac{L_n}{D_c}$$

**Ecuación 27**

Donde

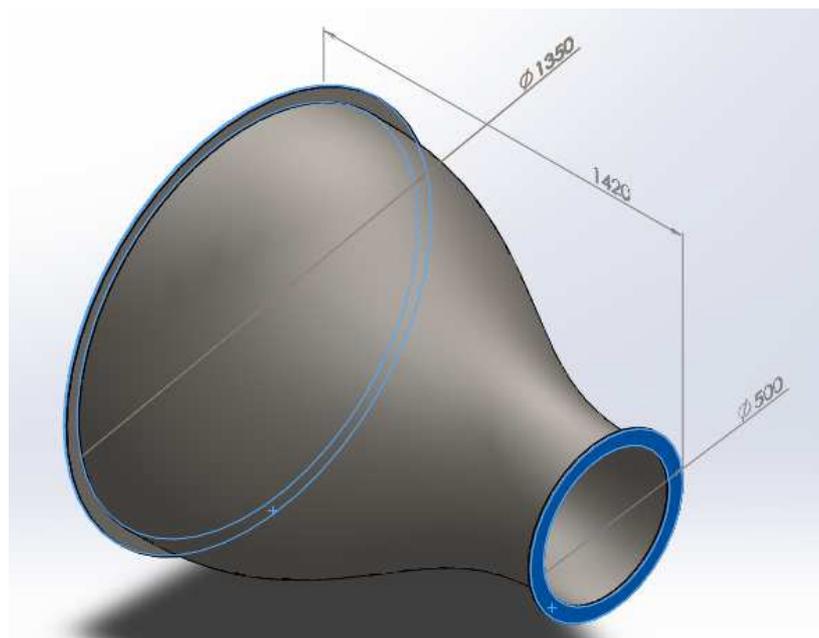
$K_c$  Pérdidas en la contracción [Adimensional]

$f_c$  Factor de fricción [Adimensional]

$L_n$  Largo de la contracción [m]

$D_c$  Diámetro de la salida [m]

Las pérdidas para la contracción son:



**Figura 38. Contracción**

Velocidad en la contracción

$$V_{c1} = \frac{q}{A_{c1}}$$

$$V_{l1} = \frac{11.7803}{0.196} = 60 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Número de Reynolds en la salida de la contracción

$$R_e = \frac{\rho * V_l * D}{\mu}$$

$$R_{ec} = \frac{0.83487 * 60 * .5}{1.7894}$$

$$R_{el1} = 1.4 * 10^6$$

Factor de fricción

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{2.51}{R_e * \sqrt{f}} \right)$$

Y resolviendo por el método de Newton-Raphson

$$f = 0.01309$$

Pérdidas en la contracción

$$K_c = 0.32 * f_c * \frac{L_n}{D_c}$$

$$K_c = 0.32 * 0.01309 * \frac{1.42}{0.5}$$

$$K_c = 0.012$$

Pérdidas con respecto a la sección de pruebas

$$K_{ct} = K_c \frac{A_t^2}{A_l^2}$$

$$K_{ct} = 0.012 \frac{0.196^2}{0.196^2}$$

$$K_{ct} = 0.012$$

### 3.6.7 Pérdidas Total

Para obtener las pérdidas totales es necesario sumar los coeficientes de cada una de las secciones ver tabla 29.

**Tabla 29**  
**Pérdidas totales**

	$K_l$	$K_{lt}$	%
<b>Sección de pruebas</b>	0.0312	0.0312	5.56
<b>Lateral 1</b>	0.01816	0.004	0.71
<b>Lateral 2</b>	0.00435	8.19E-05	0.01
<b>Cámara de estabilización</b>	0.01840	0.000346	0.06
<b>Difusor 1</b>	0.0470	0.0470	8.36
<b>Pre diseño</b>	0.0662	0.0146	2.59
<b>Esquina 1</b>	0.148	0.033	5.80
<b>Esquina 2</b>	0.148	0.033	5.80
<b>Esquina 3</b>	0.161	0.003	0.54
<b>Esquina 4</b>	0.161	0.003	0.54
<b>Malla 1</b>	0.6568	0.0124	2.20
<b>Malla 2</b>	0.6568	0.0124	2.20
<b>Malla 3</b>	0.6568	0.0124	2.20
<b>Malla de Protección 1</b>	0.7458	0.1641	29.23
<b>Malla de Protección 2</b>	0.7458	0.1641	29.23
<b>Direccionador de flujo</b>	0.859	0.016	2.88
<b>Contracción</b>	0.012	0.012	2.07
<b>Total</b>		0.5615	100

Las pérdidas totales según (Mott, Mecanica de fluidos , 2006) son:

$$\Delta P = \frac{\sum K_{lt} * \rho * V_t^2}{2}$$

**Ecuación 28**

Donde

$\Delta P$  Pérdidas de presión [Pa]

$\sum K_{lt}$  Sumatoria de las pérdidas locales

$\rho$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$V_t$  Velocidad del aire en la sección de pruebas  $\left[\frac{m}{s}\right]$

Reemplazando

$$\Delta P = \frac{0.5615 * 0.83487 * 60^2}{2}$$

$$\Delta P = 843.80 [Pa]$$

### 3.7 Dimensionamiento y selección del ventilador

- Niveles de ruido inferiores a 115 dB(A)
- Trabajar con un motor eléctrico
- Debe suministrar el volumen requerido con un 10% adicional recomendado por el INAMHI
- En las pérdidas totales se incluirá un 15 % adicional, para agregar accesorios adicionales.

#### 3.7.1 Tipo de ventilador

Los tipos de ventilador que existen en el mercado son centrífugo, axial y turbo axiales, siendo los parámetros para la selección los especificados a continuación.

- a) Dimensiones, al ser instalado en el pre diseño del difusor 2 y difusor 3 el diámetro mínimo es de 730 mm y el máximo 1350 mm.
- b) Presión, la presión suministrada por el ventilador debe ser capaz de vencer las pérdidas en el sistema.
- c) Nivel de ruido, los niveles de ruido deben ser inferior a 115 dB(A)
- d) Eficiencia, la eficiencia del ventilador será directamente proporcional a los gastos de operación.

**Tabla 30**  
**Ponderación tipo de ventilador**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0,4
b	0		1	1	3	0,3
c	0	0		0	1	0,1
d	0	0	1		2	0,2
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

Para una selección se utiliza la matriz ponderada, obtenido como resultado la tabla 31

**Tabla 31**  
**Selección tipo de ventilador**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Centrifugo</b>	0,17*0,4	0,42*0,3	0,17*0,1	0,17*0,2	0,24	3
<b>Axial</b>	0,33*0,4	0,17*0,3	0,33*0,1	0,33*0,2	0,28	2
<b>Turbo Axial</b>	0,5* 0,4	0,42*0,3	0,5* 0,1	0,5* 0,2	0,48	1

Analizando la tabla 31 la mejor alternativa es un ventilador turbo axial

### 3.7.2 Potencia de ventilador

La potencia requerida por el motor del ventilador según (Mott, Mecanica de fluidos , 2006)

$$P = \frac{\Delta P * Q}{n}$$

**Ecuación 29**

Donde

P Potencia [W]

$\Delta P$  Pérdidas totales [Pa]

Q Caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

n Eficiencia 0.62 0.62<n<.72

Siendo el caudal requerido igual a

$$Q = 11.7803 * 1.1 = 12.96 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$\Delta P = 843.80 * 1.15 = 970.34 [Pa]$$

Reemplazando

$$P = \frac{\Delta P * Q}{\eta}$$

$$P = \frac{970.34 * 12.96}{0.62} = 2029 * 10^4 [W] = 20.29 [kW]$$

$$P = 27.21 [HP]$$

### 3.7.3 Selección de ventilador

Los parámetros que debe cumplir el ventilador son:

- Tipo Turbo Axial
- Diámetro entre 730 mm a 1350mm
- Niveles de ruido inferiores a 115 dB(A)
- Caudal 12.96[m<sup>3</sup>/s]
- Potencia 30 HP

En el mercado existen dos ventiladores que cumplen con las características por lo que se realizara una selección utilizando el método de ponderación, siendo los criterios de selección:

- a) Precio, el precio del propulsor influirá directamente en el precio del proyecto, por lo que se debe ajustar al presupuesto.
- b) Características técnicas, debe cumplir con los criterio antes mencionados.
- c) Nivel de ruido, al ser un instrumento de uso cotidiano los niveles de ruidos deben ser lo menores posible para no afectar a los operadores.

- d) Costo de operación, los costos de operación influirán en gastos corrientes de la institución por lo que un equipo con mejores desempeños representa un ahorro para la institución.

**Tabla 32**  
**Ponderación ventilador**

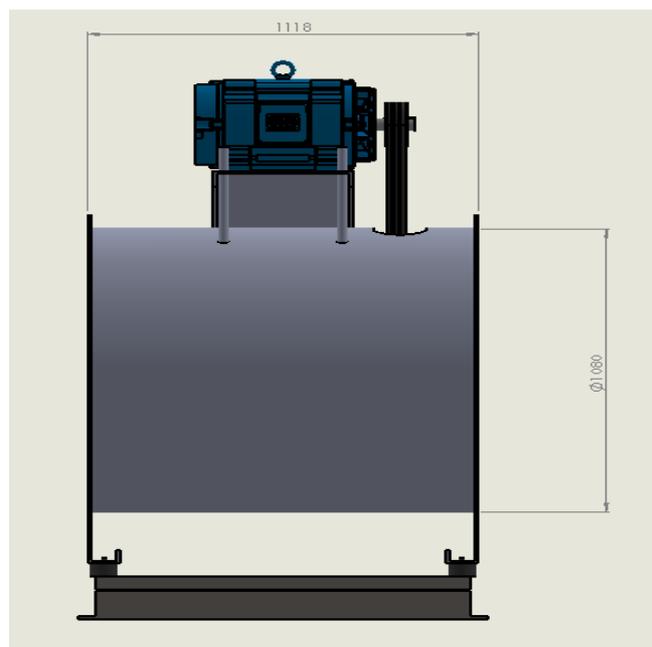
Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0,4
b	0		0	0	1	0,1
c	0	1		0	2	0,2
d	0	1	1		3	0,3
				suma	10	1

Aplicando el mismo método de selección antes utilizado obtenemos la tabla 33

**Tabla 33**  
**Resultados selección ventilado**

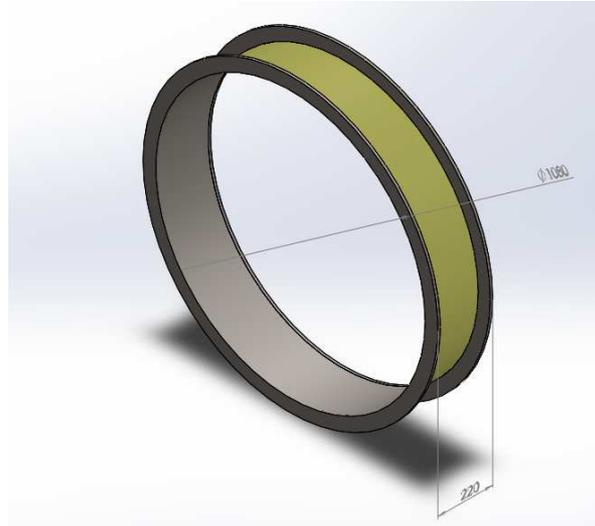
	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
VAB-42F17-II-30	0,17*0,4	0,42*0,3	0,17*0,1	0,17*0,2	0,58	1
VAB-42F26-II-30	0,33*0,4	0,17*0,3	0,33*0,1	0,33*0,2	0,42	2

Por lo que la mejor alternativa de diseño es el modelo VAB-42F17-II-30 de la marca greenheck contando con las siguientes características.



**Figura 39. Características Ventilador.**

Además contará con dos mangas para alistarle de las vibraciones del resto de la estructura que tendrá las siguientes dimensiones



**Figura 40. Mangas aislantes**

### 3.8 Diseño difusor 2 y difusor 3

Siguiendo las mismas recomendaciones y cálculos del difusor 1 se diseñara el difusor 3, y el difusor 2 corresponderán a las dimensiones restantes para cerrar el circuito del túnel.

**Tabla 34**  
**Dimensiones difusor 2 y difusor 3**

	Di	De	L	T	Ar
<b>Difusor 2</b>	0.73	1.08	2.541	3.94	2.1887
<b>Difusor 3</b>	1.08	1.35	2.596	2.98	1.5625

### 3.9 Espesor secciones metálicas

La parte más crítica es el difusor 3, ya que este soportara la presión suministrada por el ventilador.

El espesor de una tubería según (Pérez Farrás & Pérez, 2007) es igual:

$$e = \frac{P * D}{2 * \sigma}$$

**Ecuación 30**

Donde:

- e        Espesor de la tubería [*mm*]  
 P        Presión estática en la tubería [*Pa*]  
 D        Diámetro de la tubería [*mm*]  
 $\sigma$       Tensión de trabajo del material [*Pa*]

Para Acero 1006 con  $\sigma = 330 \text{ MPa}$  (Smith & Hashemi, 2006) y con la presión máxima suministrada por el ventilador igual a  $1000 \text{ Pa}$  tenemos

$$e = \frac{1000 * 1350}{2 * 330 * 10^3} = 2.0$$

Siguiendo la misma forma de cálculo para Acero inoxidable 302 y Aleación de aluminio 6061 tenemos la tabla 35

**Tabla 35**  
**Espesor distintos materiales**

Material	Diámetro [ <i>mm</i> ]	Presión [ <i>Pa</i> ]	$\sigma$ [ <i>Mpa</i> ]	Espesor [ <i>mm</i> ]
Acero 1006	1350	1000	330	2.0
Acero inoxidable 302	1350	1000	620	1.1
Aluminio 6061	1350	1000	124	5.4

Los criterios de selección para el material del túnel de viento son:

- Precio, el costo del material influirá directamente al precio del túnel del túnel
- Manufactura, de ser posible no debe contar con procesos de manufactura especiales, ya que de ser necesario realizar cambios estos se los realice en la institución.
- Resistencia a la corrosión, esto dependerá el mantenimiento que se dé a la estructura del túnel.
- Peso, la estructura debe ser fácil de trasladar o reubicar.

**Tabla 36**  
**Ponderación material de construcción**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0.4
b	0		1	1	3	0.3
c	0	0		1	2	0.2
d	0	0	0		1	0.1
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

Utilizando el mismo método de selección obtenemos como resultado la tabla 37.

**Tabla 37**  
**Resultados selección material de construcción**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Acero 1006</b>	0,5* 0,4	0,5* 0,3	0,17*0,2	0,33* 0,1	0.42	1
<b>Acero inoxidable 302</b>	0,17*0,4	0,33*0,3	0,5* 0,2	0,17 *0,1	0.28	3
<b>Aluminio 6061</b>	0,33*0,4	0,17*0,3	0,33*0,2	0,5 *0,2	0.30	2

Siendo el Acero 1006 el material seleccionado para la construcción, con un factor de seguridad de 1.45, por lo que el espesor final es 2.95, existiendo comercialmente planchas de 3mm, el cual se utilizará en todos los elementos metálicos del túnel.

### 3.10 Espesor Contracción

Para calcular la presión en la contracción se utilizará la ecuación 31 propuestas por Bernoulli aplicando en la salida del ventilador y la entrada a la contracción

$$P_1 + \rho \frac{1}{2} V_1^2 + \rho * g * h_1 - \Delta h = P_2 + \rho \frac{1}{2} V_2^2 + \rho * g * h_2$$

**Ecuación 31**

Donde:

$P_1$  Presión en el punto 1 [Pa]

$\rho$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$V_1$  Velocidad en el Punto 1  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$g$	Gravedad $9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
$h_1$	Altura en el punto 1 [m]
$\Delta h$	Pérdidas entre el punto 1 y 2 [Pa]
$P_2$	Presión en el punto 1 [Pa]
$V_2$	Velocidad en el Punto 1 $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$
$h_2$	Altura en el punto 1 [m]

Al tener una altura  $h_1=h_2$  y pérdidas iguales a  $89.70 [Pa]$   $P_2$  es:

$$P_2 = P_1 + \rho \frac{1}{2} V_1^2 - \Delta h - \rho \frac{1}{2} V_2^2$$

$$P_2 = 1000 + 84.06 - 89.70 - 34.43$$

$$P_2 = 959.93 [Pa]$$

En la contracción se utilizará un material compuesto con  $\sigma = 135 MPa$

$$e = \frac{959.93 * 1350}{2 * 135 * 10^3} = 4.8$$

Con un factor 2.08 el espesor es igual a 10 mm

### 3.11 Espesor sección de pruebas

Aplicamos la ecuación 31 para calcular la presión en la sección de pruebas, donde

$$P_2 = P_1 + \rho \frac{1}{2} V_1^2 - \Delta h - \rho \frac{1}{2} V_2^2$$

$$P_2 = 1000 + 84.06 - 107.5 - 1830$$

$$P_2 = -853.29 [Pa]$$

Es necesario que la sección de pruebas sea transparente se usará polimetacrilato de metilo PMMA no reforzado con un  $\sigma = 62 MPa$  (Smith & Hashemi, 2006)

Por lo que el espesor de la sección de pruebas es:

$$e = \frac{853.29 * 500}{2 * 62 * 10^3} = 3.44$$

Con un factor 1.45 el espesor es igual a 5 mm

### 3.12 Diseño eléctrico

El ventilador incluye un motor trifásico de marca Weg con las siguientes características.

Carcasa	: 180M
Potencia	: 30 HP
Frecuencia	: 60 Hz
Polos	: 4
Rotación nominal	: 1775
Deslizamiento	: 1,39 %
Voltaje nominal	: 208-230/460 V
Corriente nominal	: 78,3-70,8/35,4 A
Corriente de arranque	: 510/255 A
Ip/In	: 7,2
Corriente en vacío	: 32,5/16,3 A
Par nominal	: 118 Nm
Par de arranque	: 300 %
Par máxima	: 300 %
Categoría	: ---
Clase de aislación	: F
Elevación de temperatura	: 80 K
Tiempo de rotor bloqueado	: 20 s (caliente)
Factor de servicio	: 1,25
Régimen de servicio	: S1
Temperatura ambiente	: -20°C - +40°C
Altitud	: 1000
Protección	: IPW55
Masa aproximada	: 176 kg
Momento de inercia	: 0,19185 kgm <sup>2</sup>
Nivel de ruido	: 64 dB(A)

**Figura 41. Características motor**

#### 3.12.1 Dimensionamiento y selección del transformador

La institución cuenta con una comedita trifásica 220V por lo que es necesario contar con un autotransformador para el funcionamiento del ventilador donde la potencia activa es igual a:

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

**Ecuación 32**

Donde:

P Potencia aparente [VA]

I Intensidad de Corriente [A]

U Tensión de línea [V]

Siendo la corriente igual a

$$I = I_n * FS$$

Donde

I Corriente de trabajo [A]

$I_n$  Corriente nominal [A]

FS Factor de servicio [Adimensional]

Donde reemplazando tenemos:

$$I = 34.5 * 1.25$$

$$I = 44.98 A$$

$$P = \sqrt{3} * 44.98 * 460 = 35255.8 [VA] = 35.3 [kVA]$$

El INAMHI recomienda un adicional de 20%, por lo que la potencia aparente del autotransformador es de 42.3 [kVA] .

En el mercado existen tres marcas que pueden suministrar un autotransformador de 45 kVA por lo que se realiza una selección bajo los siguientes criterios.

- a) Precio, el precio se debe ajustar al presupuesto del proyecto.
- b) Tiempo de entrega, el tiempo de entrega debe ser el menor posible para cumplir con el cronograma de trabajo.
- c) Garantía, el tiempo de garantía suministrado por la marca debe ser mínimo un año de ser posible dos.
- d) Montaje, al contar con espacio limitado el montaje del autotransformador debe ser en el piso.

**Tabla 38**  
**Ponderación autotransformador**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0.4
b	0		1	1	3	0.3
c	0	0		0	1	0.1
d	0	0	1		2	0.2
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

De igual forma como en los casos anteriores aplicando el método de selección obtenemos como resultado la tabla 39.

**Tabla 39**  
**Resultados de selección de autotransformador**

	A	B	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Imetrilec</b>	0,5* 0,4	0,5* 0,2	0,5* 0,3	0,17* 0,1	0.47	1
<b>Rvrtransformadores</b>	0,33*0,4	0,33*0,2	0,17*0,3	0,415*0,1	0.30	2
<b>General Electric</b>	0,17*0,4	0,17*0,2	0,33*0,3	0,415*0,2	0.23	3

Siendo la mejor alternativa el autotransformador de la marca Imetrilec con las siguientes características técnicas.

<b>AUTO TRANSFORMADOR DE 45 KVA TRIFASICO</b>	
<b>CON LAS SIGUIENTES CARACTERERÍSTICAS TÉCNICAS:</b>	
POTENCIA:	45 KVA
VOLTAJE DE ENTRADA:	220 VOLTIOS - CONEXIÓN ESTRELLA
VOLTAJE DE SALIDA:	440 -460-480 VOLTIOS - CONEXIÓN ESTRELLA
FRECUENCIA:	60HZ
TIPO DE CONEXIÓN:	ESTRELLA-ESTRELLA (YY) CON NEUTRO

**Figura 42. Características técnicas Autotransformador**

### 3.12.2 Selección variador de frecuencia

Para el control de velocidad del ventilador se usará un variador de frecuencia, y por recomendación del INAMHI se utilizará la marca Allen Bradley, por lo que se utilizó la herramienta web del proveedor para la selección. Ver Figura 43

Catalog Number	Description
20BD040A0AYNANCO	PowerFlex700 AC Drive, 480 VAC, 3 PH, 40 Amps, 30 HP Normal Duty, 25 HP Heavy Duty, IP20 / Type 1, with conformal coating, No HIM (Blank Plate), Brake IGBT Installed, Without Drive Mounted Brake Resistor, Second Environment Filter per CE EMC directive (89/336/EEC), No Communication Module, Vector Control with 24V I/O, No Feedback

Voltage Rating  
 480 VAC, 3 PH  
 Output  
 40 Amps  
 Enclosure  
 IP20 / Type 1, with conformal coating  
 Size  
 Frame Size 3  
 Output Current Information  
 Output Amps: 40A Cont, 51A 1 Min, 68A 3 Sec  
 Brake IGBT  
 Brake IGBT Installed  
 Filter Options  
 Second Environment Filter per CE EMC directive (89/336/EEC)  
 Three-Phase Max. Hp, 60 Hz (380...480V)  
 Normal Duty  
 30  
 Three-Phase Max. Hp, 60 Hz (380...480V)  
 Heavy Duty

**Figura 43. Selección variador de Frecuencia**

### 3.12.3 Dimensionamiento y selección del disyuntor general

El dimensionamiento se lo realizará con respecto a la capacidad máxima del transformador y considerando la norma NEC en la sección 430-57, que establece que los disyuntores de protección tendrán una intensidad de régimen de carga continua no inferior al 115% de la intensidad a plena carga.

Se calculará la intensidad de la corriente despejando de la Ecuación 32:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U}$$

$$I = \frac{45000}{\sqrt{3} * 460} = 56.48 [A]$$

Por lo cual

$$I = Factor * I_n$$

$$I = 1.15 * 56.48 = 64.95$$

El disyuntor seleccionado es de la marca Abb con las siguientes características

**T2 160 - TMG 16÷160 A**

	$I_n$ (400 Hz)			
	<b>In</b>	<b>MIN</b>	<b>MED</b>	<b>MAX</b>
<b>T2N 160</b>	16	10	12	14
	25	16	19	22
	40	25	30,5	36
	63	39	48	57
	80	50	61	72
	100	63	76,5	90
	125	79	98	113
	160	100	122	144

**Figura 44. Selección disyuntor**

**Fuente: (ABB, 2015)**

### 3.12.4 Dimensionamiento y selección del guarda motor

Son dispositivos de protección contra cortocircuito, de corte tripolar. Los guardamotores magnéticos 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 guardamotores magnéticos sean aparatos limitadores.

Para la selección de las protecciones contra sobrecargas se debe considerar: La corriente nominal, de arranque y de funcionamiento en régimen estacionario del motor. Para el cálculo de la corriente de sobrecarga los fabricantes recomiendan un ajuste del 25 % de corriente nominal del motor.

$$I = 1.25 * I_n$$

**Ecuación 33**

Donde

$I$  Corriente guardamotor [A]

$I_n$  Corriente nominal del motor [A]

Donde reemplazando tenemos

$$I = 1.25 * 35.4$$

$$I = 44.25 [A]$$

El guardamotor seleccionado es de la marca Abb con las siguientes características:

Guardamotores MS495						
30	45.0...63.0	25	819.00	MS495-63	1SAM550000R1007	2.247
37	57.0...75.0	25	975.00	MS495-75	1SAM550000R1008	2.253
45	70.0...90.0	25	1170.00	MS495-90	1SAM550000R1009	2.280
55	80.0...100.0	25	1235.00	MS495-100	1SAM550000R1010	2.295

**Figura 45. Selección guarda Motor**

**Fuente: (ABB, 2015)**

### 3.12.5 Diagrama eléctrico de potencia

Se presenta todos los dispositivos utilizados en la etapa de potencia así como la distribución dentro del tablero eléctrico.

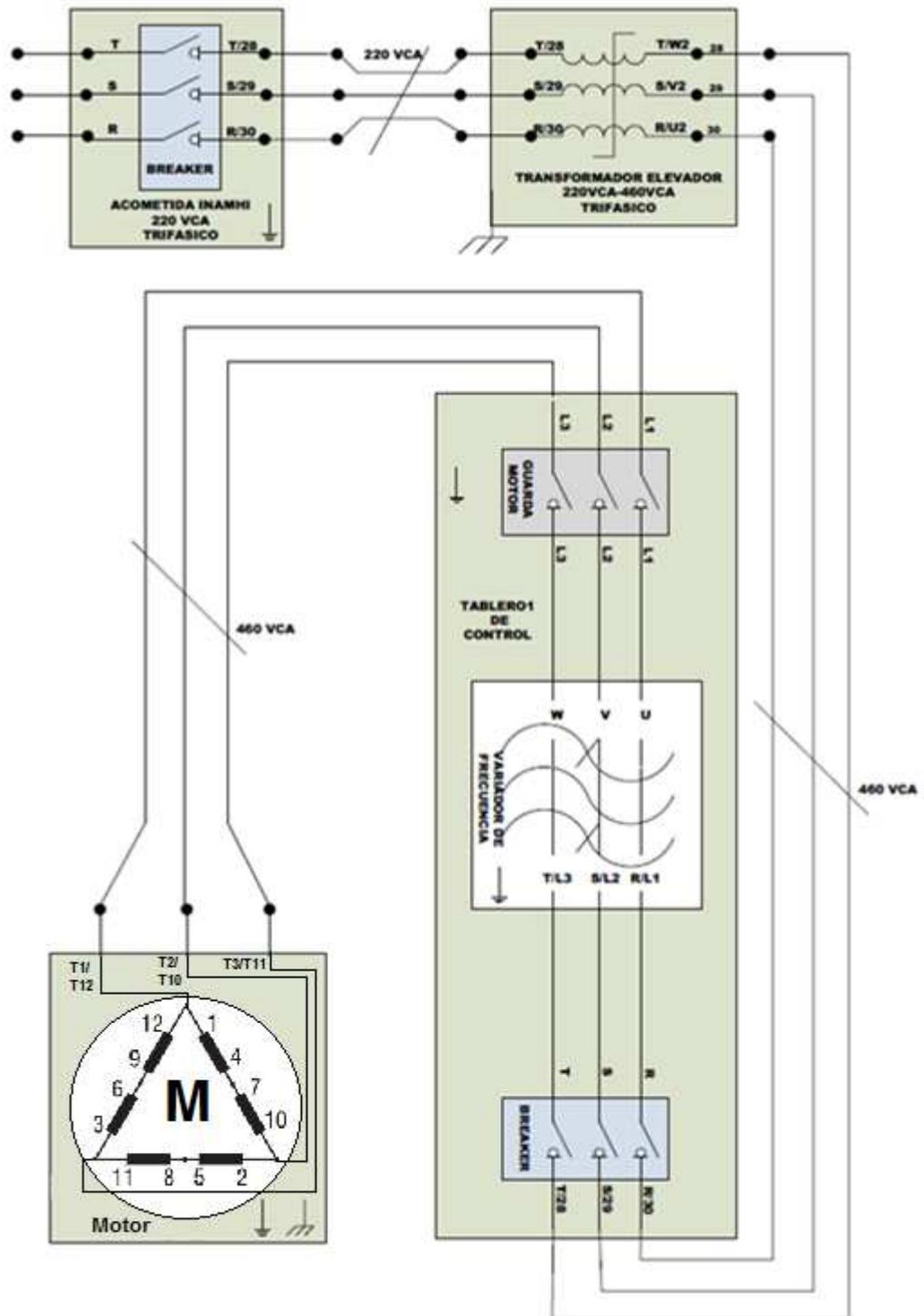
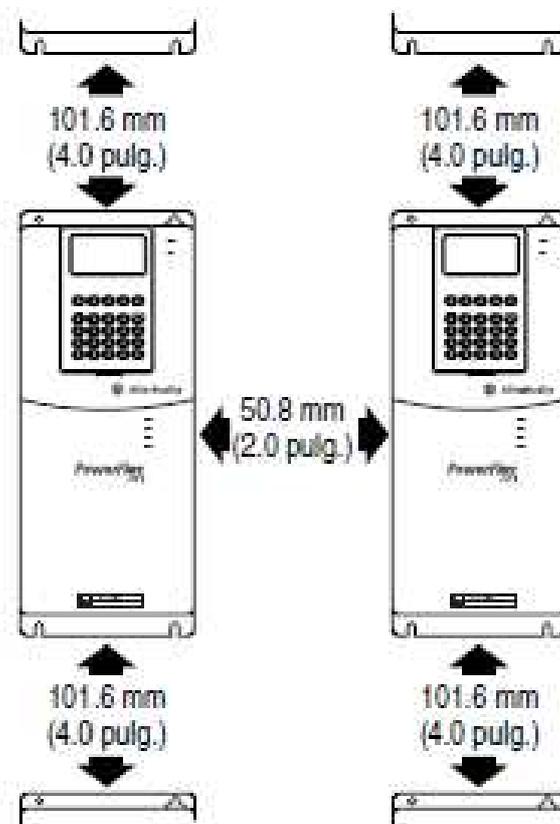


Figura 46. Diagrama Eléctrico de potencia

### 3.12.6 Distribución elementos de potencia

Los elementos de potencia se instalarán en un tablero que posee las características adecuadas para albergar los elementos de fuerza y protección necesarios para poner en marcha el sistema considerando el espacio y ventilación adecuada. Para la instalación del variador de frecuencia se consideró las distancias recomendadas por el proveedor las cuales se muestran en la figura 47.



**Figura 47. Distancias mínimas de montaje**

Considerando las recomendaciones de montaje se instalaron los equipos con la siguiente configuración final.



**Figura 48. Tablero de Potencia**

### 3.12.7 Diseño del control

Los elementos que conformar el control son:

- PLC
- Interfaz
- Switch
- Fuente de voltaje de 24V DC
- Pulsadores
- Luces Indicadoras
- Sensor de velocidad de Viendo

### 3.12.8 Selección del PLC

Para garantizar una completa compatibilidad en los protocolos que cuenta el variador el PLC deberá cumplir las siguientes características.

- Comunicación Ethernet
- 7 Entradas analógicas
- 6 Salidas de relé
- 1 Entrada analógica de voltaje
- 1 Salida analógica de Voltaje

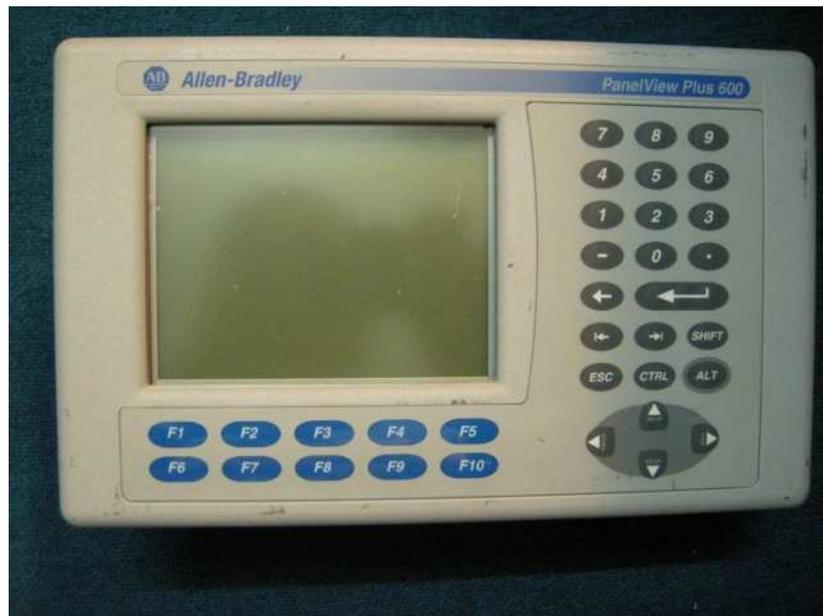
Así el PLC Micrologic 1400 es el indicado debido a que cuenta con la comunicación Ethernet, las salidas de relé requeridas así como las entradas digitales y el un módulo de entradas y salidas análogas 1762-IF2OF2.



**Figura 49. PLC Micrologix 1400**

### 3.12.9 Selección Interfaz de usuario

El PLC Micrologic 1400 fue escogido acorde a las necesidades del sistema y para garantizar una completa compatibilidad en los protocolos se utilizará una interfaz de marca Allen Bradley, siendo seleccionado el Panel View 600 plus debido a su funcionalidad, facilidad de programación y su desempeño.



**Figura 50. Panel View 600 plus**

### 3.12.10 Selección del sensor de velocidad de viento

Existen tres tipos de sensores que se podrían usar para medir la velocidad del aire dentro de la sección de pruebas, por lo que se realizara una selección de acuerdo a los siguientes criterios.

- a) Tamaño, debe ser pequeño para que no genere turbulencias en la sección o interferencia con los sensores a calibrar.
- b) Resolución, la resolución mínima del sensor debe ser de 0.1 m/s.
- c) Rango, el sensor debe ser capaz de medir de 0 a 80 m/s como mínimo.
- d) Precio, el precio se debe ajustar al precio del proyecto.

**Tabla 40**  
**Ponderación sensor de viento**

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Pondera.
a		1	1	1	4	0,4
b	0		0	0	1	0,1
c	0	1		0	2	0,2
d	0	1	1		3	0,3
				<b>Suma</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

Realizando el mismo proceso de selección antes utilizado se obtiene como resultado la tabla 41.

**Tabla 41**  
**Resultados de la selección del Sensor de viento.**

	a	b	c	d	$\Sigma$	Prioridad
<b>Tubo Pitot</b>	0,5* 0,4	0,42*0,1	0,42*0,2	0,5* 0,3	0,48	1
<b>Ultrasónico</b>	0,17*0,4	0,42*0,1	0,42*0,2	0,17*0,3	0,24	3
<b>Molinete</b>	0,33*0,4	0,17*0,1	0,17*0,2	0,33*0,3	0,28	2

Siendo la mejor alternativa el Tubo de Pitot por su baja interferencia con el flujo así como su bajo costo, alta sensibilidad y amplio rango de medición.



**Figura 51. Tubo de pitot**

### 3.12.11 Selección transductor de presión.

El Tubo de Pitot entrega un valor de presión diferencial equivalente al valor de la velocidad, la cual se calcula con la ecuación 34 propuestas por el fabricante del instrumento.

$$V = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho}}$$

### Ecuación 34

Donde:

$V$  Velocidad del viento  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\Delta P$  Presión diferencial  $[Pa]$

$\rho$  Densidad del Aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

De donde despejando la presión es:

$$\Delta P = \frac{V^2 * \rho}{2}$$

### Ecuación 35

Para evitar daños en el transductor se lo seleccionará en un rango de 0 o 80  $\left[\frac{m}{s}\right]$  siendo así el rango de presión del transductor igual a:

$$\Delta P = \frac{80^2 * 0.83487}{2}$$

$$\Delta P = 2.54 * 10^3 [Pa]$$

Por lo que el transductor de presión debe ser capaz de medir de 0 a  $2.54 * 10^3 [Pa]$

Parameter	SDP1000-L025			SDP1000-L05			SDP1000-L			SDP1000-R			SDP2000-L			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Measurement range	-62		62	-5		125	-20		500	-20		500	-100		3500	Pa
	-0.25		0.25	-0.02		0.5	-0.08		2	-0.08		2	-0.4		14	Inch water
Power supply (see Tab 4)	4.75	5.00	5.25	4.75	5.00	5.25	4.75	5.00	5.25	4.75	5.00	5.25	4.75	5.00	5.25	V
Full scale output (100 k $\Omega$ load)	Typ. 4.00V at +62Pa Typ. 0.20V at -62Pa			4.00			4.00			4.00			4.00			V
Zero Pressure Output		2.10			0.250			0.250			0.250			0.250		V
Accuracy (also see Figure 1)		0.5	0.6		0.2	0.3		0.1	0.2		0.2	0.3		0.1	0.2	% FS <sup>(1)(2)</sup>
		1.5	2		1.5	2		1	1.5		1	1.5		1	1.5	% m.v. <sup>(1)</sup>
Repeatability		0.3	0.5		0.3	0.5		0.3	0.5		0.3	0.5		0.3	0.5	% m.v. <sup>(1)</sup>
Offset stability		0	$\pm 0.1$		0	$\pm 0.1$		0	$\pm 0.1$		0	$\pm 0.3$		0	$\pm 0.3$	Pa / year
Additional error over temperature (T $\neq$ 23°C)		0.003	0.006		0.003	0.006		0	0		0	0		0	0	% FS/°C <sup>(2)</sup>
		0.03	0.05		0.03	0.05		0.03	0.05		0.03	0.05		0.03	0.05	% m.v./°C
Resolution < 30% FS <sup>(1)</sup>							0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.2	0.5	1	Pa
Resolution 30..70% FS <sup>(1)</sup>	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.2	0.5	1.5	0.2	0.5	1.5	1	2.5	8	Pa
Resolution > 70% FS <sup>(1)</sup>							1.5	2.2	3	1.5	2.2	3	8	11	14	Pa

**Figura 52. Selección transductor de presión**

Por lo que el transductor seleccionado es el SDP2000-L que es capaz de medir desde -100 [Pa] a 3500 [Pa]

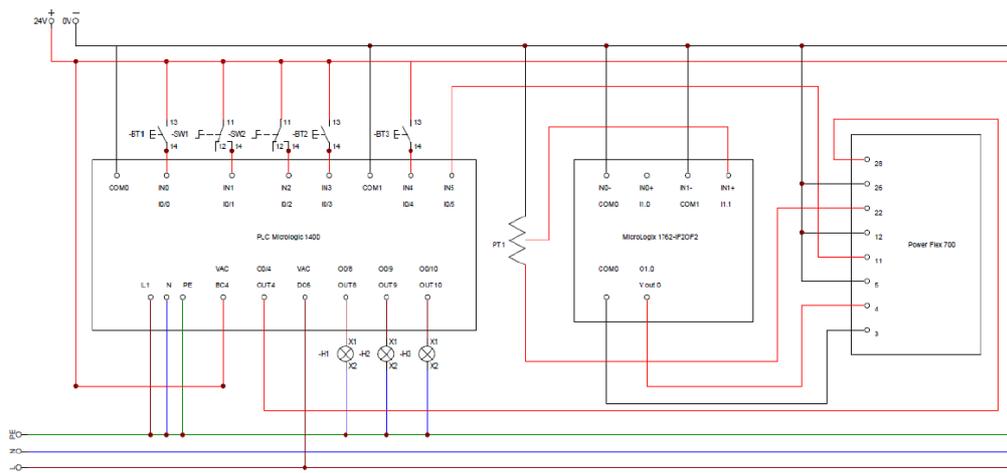


**Figura 53. Transductor de presión SDP2000-L**

**Fuente: (Mayer & Lechner, 2015)**

### 3.12.12 Diagrama de control

Se presenta todos los dispositivos utilizados en la etapa de control.



**Figura 54. Diagrama eléctrico de control**

### 3.12.13 Descripción de control

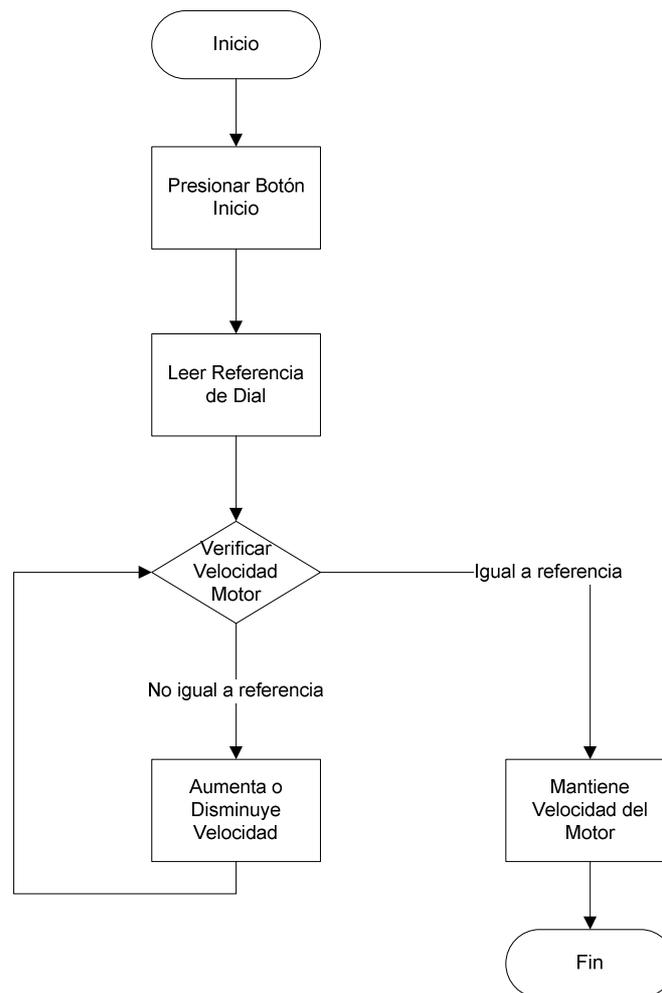
El INAMHI requiere que existan cuatro formas de control, que son:

- Panel de control Manual
- HMI Manual
- HMI Control Abierto
- HMI Control PID

Además que la aceleración del motor sea progresivo, aumentado 1 RPM cada 100 ms.

- **Panel de control manual**

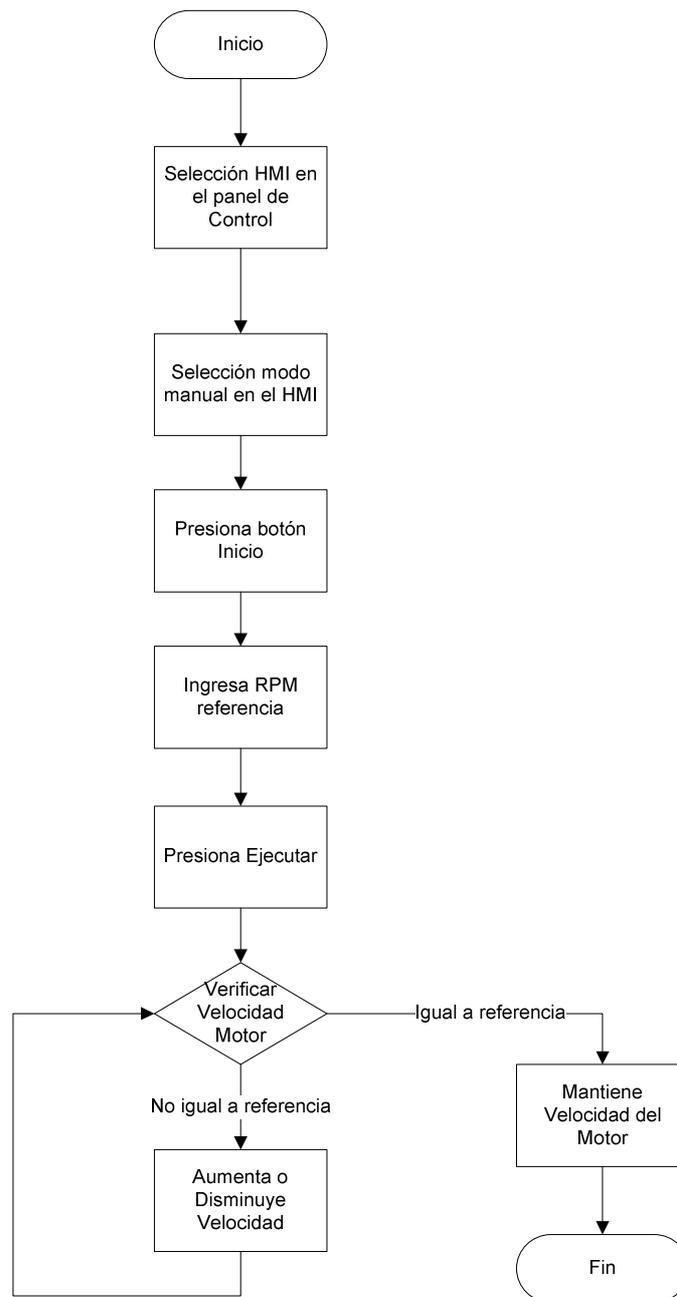
En esta forma de funcionamiento, la velocidad del motor será controlada desde el panel con una perilla la cual aumenta o disminuye la velocidad según sea el caso, siendo el aumento progresivo, por lo que el diagrama de flujo es:



**Figura 55. Diagrama de Flujo Panel de control manual**

- **HMI Manual**

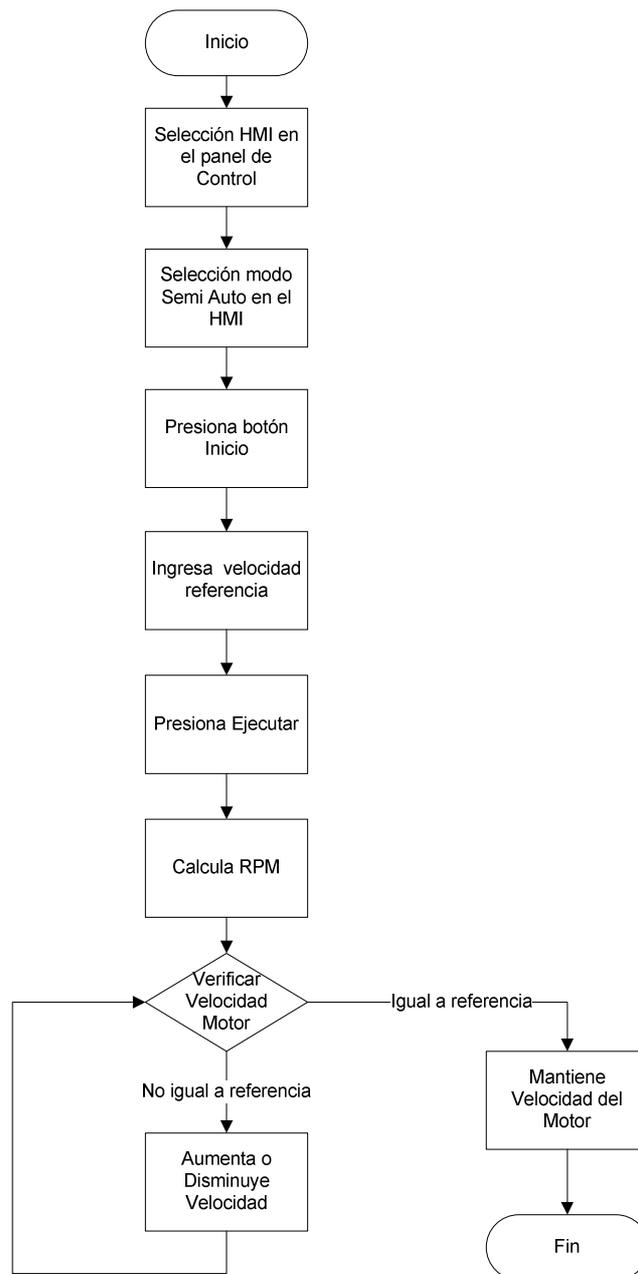
En este modo de funcionamiento se ingresará las RPM que se requiere, en el HMI, y se aumenta o disminuye la velocidad luego de presionar un botón ejecutar dentro de la ventana. Ver figura 56



**Figura 56. Diagrama de flujo HMI Manual**

- **HMI Control abierto**

En este modo de funcionamiento se ingresará una velocidad en  $\left[\frac{m}{s}\right]$  y mediante un control de lazo abierto se calculará las RPM requeridas para alcanzar la velocidad, el sistema cambiará de velocidad una vez presionado el botón ejecutar.



**Figura 57. Diagrama de flujo HMI Control abierto**

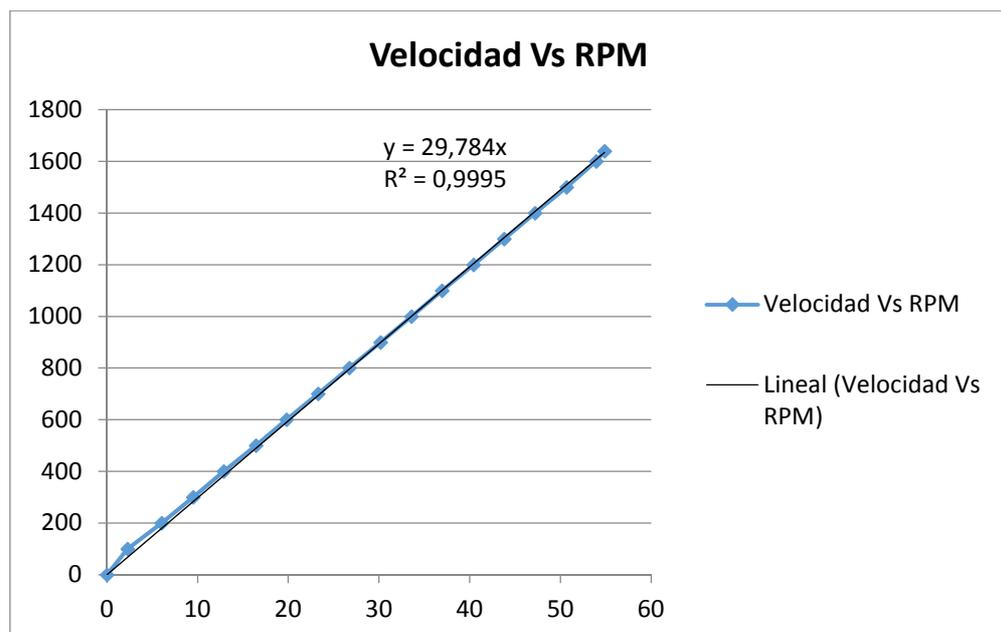
- **Identificar planta control abierto**

Para realizar un control sin retroalimentación es necesario encontrar una función que relacione la velocidad del viento con las RPM del motor, por lo que se tomó 100 muestras de datos a distintas RPM, siendo los promedios de velocidad los mostrados en la tabla 42.

**Tabla 42**  
**Datos Velocidad y RMP**

Velocidad	RPM
0	0,00
2,26	100,00
6,03	200,00
9,51	300,00
12,88	400,00
16,43	500,00
19,79	600,00
23,27	700,00
26,74	800,00
30,17	900,00
33,57	1000,00
36,95	1100,00
40,44	1200,00
43,80	1300,00
47,22	1400,00
50,68	1500,00
53,94	1600,00
54,88	1640

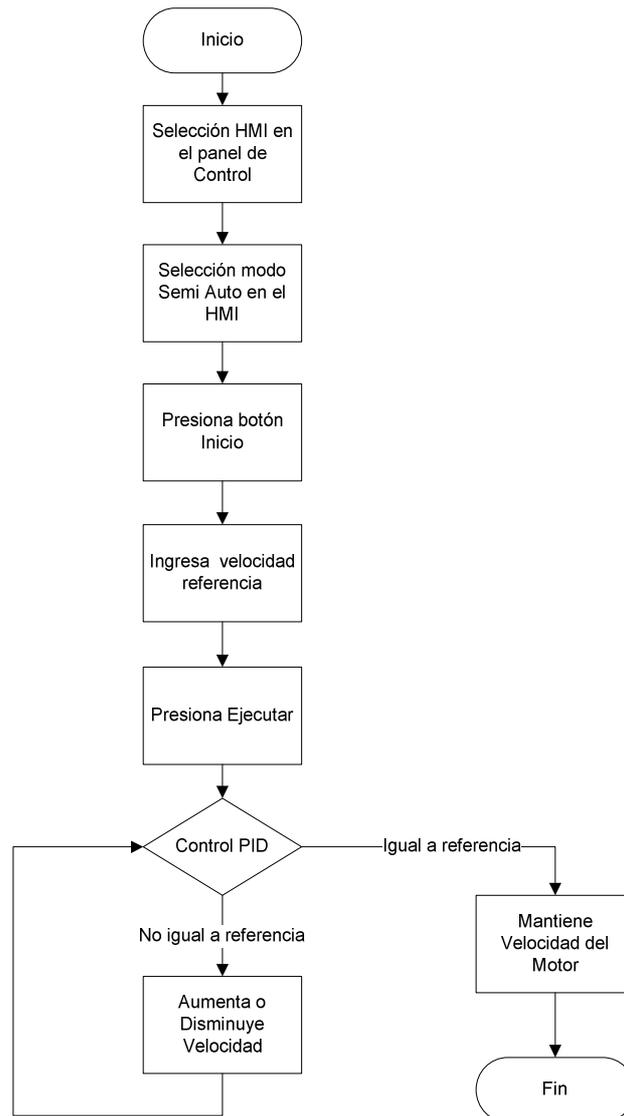
Siendo la aproximación igual a



**Figura 58. Relación entre Velocidad y RPM**

- **HMI PID**

En el control HMI PID, se realizará un control de lazo cerrado, para lo cual es necesario identificar la planta del sistema, lo cual se lo realizará con la ayuda de la herramienta Ident de Matlab, igual que en los casos anteriores es necesario presionar el botón ejecutar, como se muestra en la figura 59.



**Figura 59. Diagrama de flujo HMI PID**

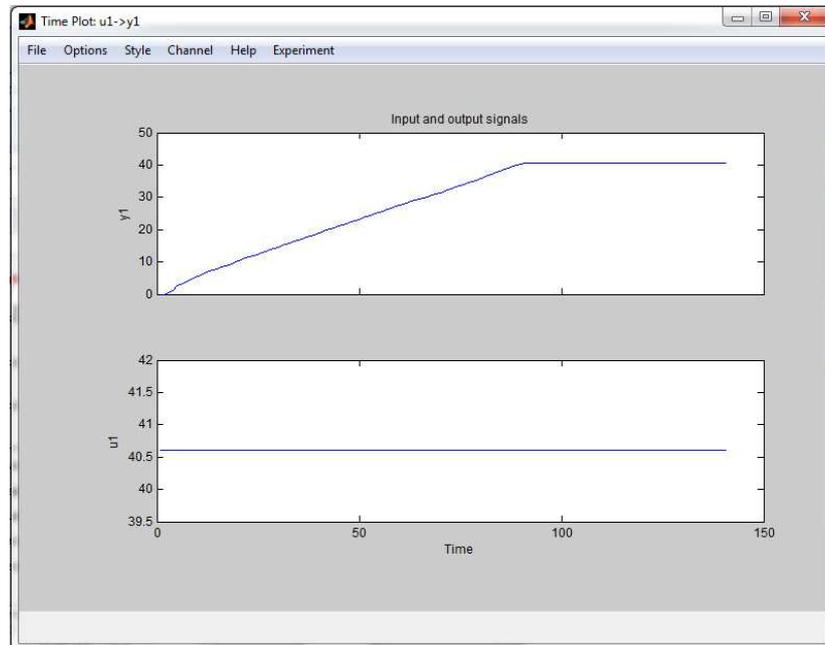
- **Identificación planta para control PID**

Para identificar la planta se tomarán datos de pruebas, con un step del 50% de la capacidad máxima del ventilador, los datos obtenidos de la prueba se muestran a continuación.

**Tabla 43**  
**Datos prueba de la planta**

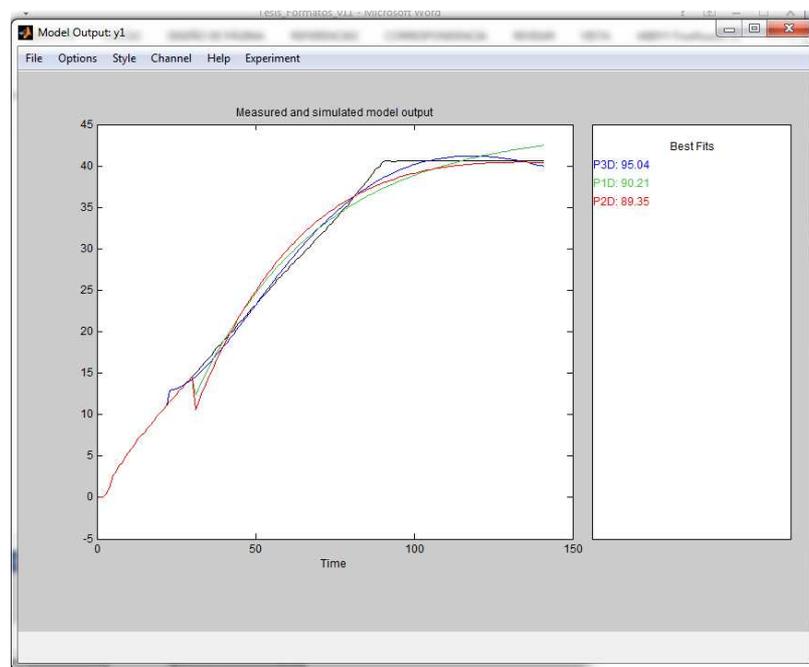
<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>
<b>1</b>	0,000	<b>37</b>	17,621	<b>73</b>	32,723	<b>109</b>	40,612
<b>2</b>	0,000	<b>38</b>	18,148	<b>74</b>	33,132	<b>110</b>	40,612
<b>3</b>	0,477	<b>39</b>	18,469	<b>75</b>	33,528	<b>111</b>	40,612
<b>4</b>	1,102	<b>40</b>	18,878	<b>76</b>	33,884	<b>112</b>	40,612
<b>5</b>	2,696	<b>41</b>	19,352	<b>77</b>	34,566	<b>113</b>	40,612
<b>6</b>	3,047	<b>42</b>	19,816	<b>78</b>	34,864	<b>114</b>	40,612
<b>7</b>	3,777	<b>43</b>	20,153	<b>79</b>	35,226	<b>115</b>	40,612
<b>8</b>	4,191	<b>44</b>	20,696	<b>80</b>	35,769	<b>116</b>	40,612
<b>9</b>	4,951	<b>45</b>	21,077	<b>81</b>	36,279	<b>117</b>	40,612
<b>10</b>	5,524	<b>46</b>	21,494	<b>82</b>	36,782	<b>118</b>	40,612
<b>11</b>	5,903	<b>47</b>	21,853	<b>83</b>	37,218	<b>119</b>	40,612
<b>12</b>	6,493	<b>48</b>	22,402	<b>84</b>	37,649	<b>120</b>	40,612
<b>13</b>	7,092	<b>49</b>	22,875	<b>85</b>	38,060	<b>121</b>	40,612
<b>14</b>	7,473	<b>50</b>	23,244	<b>86</b>	38,611	<b>122</b>	40,612
<b>15</b>	7,753	<b>51</b>	23,697	<b>87</b>	39,089	<b>123</b>	40,612
<b>16</b>	8,367	<b>52</b>	24,137	<b>88</b>	39,602	<b>124</b>	40,612
<b>17</b>	8,808	<b>53</b>	24,516	<b>89</b>	39,858	<b>125</b>	40,612
<b>18</b>	9,216	<b>54</b>	24,909	<b>90</b>	40,409	<b>126</b>	40,612
<b>19</b>	9,747	<b>55</b>	25,379	<b>91</b>	40,620	<b>127</b>	40,612
<b>20</b>	10,211	<b>56</b>	25,712	<b>92</b>	40,611	<b>128</b>	40,612
<b>21</b>	10,579	<b>57</b>	26,265	<b>93</b>	40,520	<b>129</b>	40,612
<b>22</b>	11,166	<b>58</b>	26,646	<b>94</b>	40,538	<b>130</b>	40,612
<b>23</b>	11,520	<b>59</b>	27,109	<b>95</b>	40,633	<b>131</b>	40,612
<b>24</b>	12,048	<b>60</b>	27,441	<b>96</b>	40,635	<b>132</b>	40,612
<b>25</b>	12,390	<b>61</b>	27,956	<b>97</b>	40,612	<b>133</b>	40,612
<b>26</b>	12,916	<b>62</b>	28,335	<b>98</b>	40,612	<b>134</b>	40,612
<b>27</b>	13,208	<b>63</b>	28,752	<b>99</b>	40,612	<b>135</b>	40,612
<b>28</b>	13,759	<b>64</b>	29,012	<b>100</b>	40,612	<b>136</b>	40,612
<b>29</b>	14,153	<b>65</b>	29,436	<b>101</b>	40,612	<b>137</b>	40,612
<b>30</b>	14,565	<b>66</b>	29,906	<b>102</b>	40,612	<b>138</b>	40,612
<b>31</b>	15,012	<b>67</b>	30,241	<b>103</b>	40,612	<b>139</b>	40,612
<b>32</b>	15,390	<b>68</b>	30,685	<b>104</b>	40,612	<b>140</b>	40,612
<b>33</b>	15,828	<b>69</b>	31,116	<b>105</b>	40,612	<b>141</b>	40,612
<b>34</b>	16,288	<b>70</b>	31,488	<b>106</b>	40,612		
<b>35</b>	16,718	<b>71</b>	31,818	<b>107</b>	40,612		
<b>36</b>	17,155	<b>72</b>	32,213	<b>108</b>	40,612		

Siendo las gráficas de los datos ingresados



**Figura 60. Velocidad del viento y Step en función del tiempo**

Una vez que se cuenta con los datos se ingresan a la herramienta Ident del programa Matlab, para identificar la planta del sistema, siendo la mejor alternativa la mostrada en el color azul con un 95.04 %.



**Figura 61. Aproximación de la planta del sistema**

Los datos de la función de transferencia se muestran a continuación

Parameter	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	0.21561	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	30.8317	Auto	[0.001 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	97.0443	Auto	[0.001 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	42.0444	Auto	[0.001 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	22.3215	Auto	[0 30]

**Figura 62. Planta del sistema**

- **Controlador PID**

Con la ayuda de la herramienta SISOTOOL de Matlab se obtuvo un controlador adecuado acorde a los requerimientos de la institución y se muestra a continuación.

Type	Location	Damping	Frequency
Integrator	0	-1	0
Complex ...	-0.013 +/- ...	1	0.013

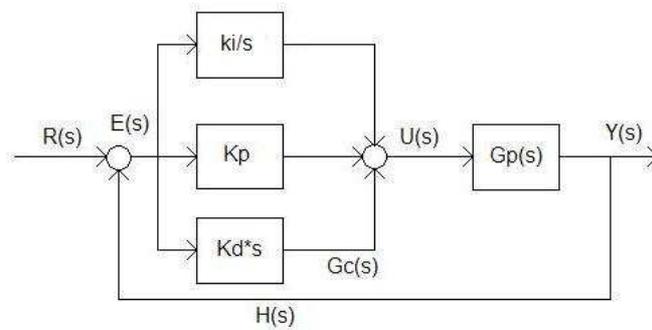
**Figura 63. Controlador PID para la planta**

Siendo la función de transferencia igual a

$$\frac{239.7 s^2 + 6.225 s + 0.04043}{s}$$

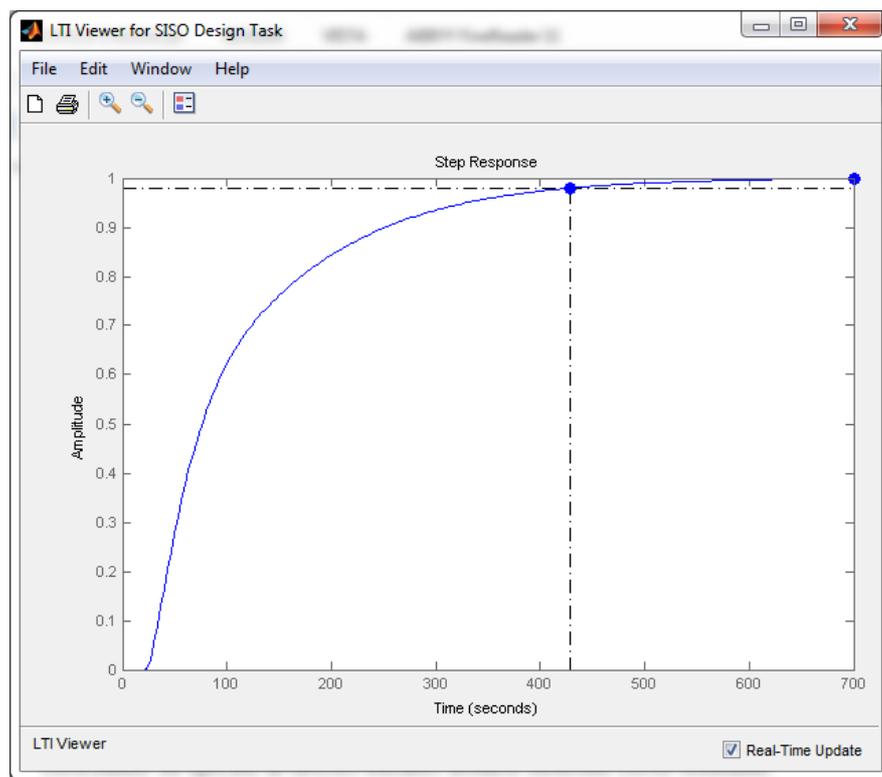
**Figura 64. Función de transferencia controlador PID**

El lazo de control es el mostrado en la figura 65, siendo  $G_p(s)$  la planta del sistema,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_d$ , las constantes del controlador PID,  $R(s)$  es el set point ingresado por el usuario y  $Y(s)$  es la salida del sistema.



**Figura 65. Lazo de control**

Donde  $K_p=6.23$   $K_d=239.7$  y  $K_i=0.04043$ , para comprobar el desempeño del controlador se ejecutó la función escalón unitario obtenido como resultado.



**Figura 66. Respuesta de la planta y el controlador PID**

### 3.12.14 Grafcet sistema

El grafcet muestra todo el funcionamiento de sistema y sus distintas formas de control de todo el sistema.

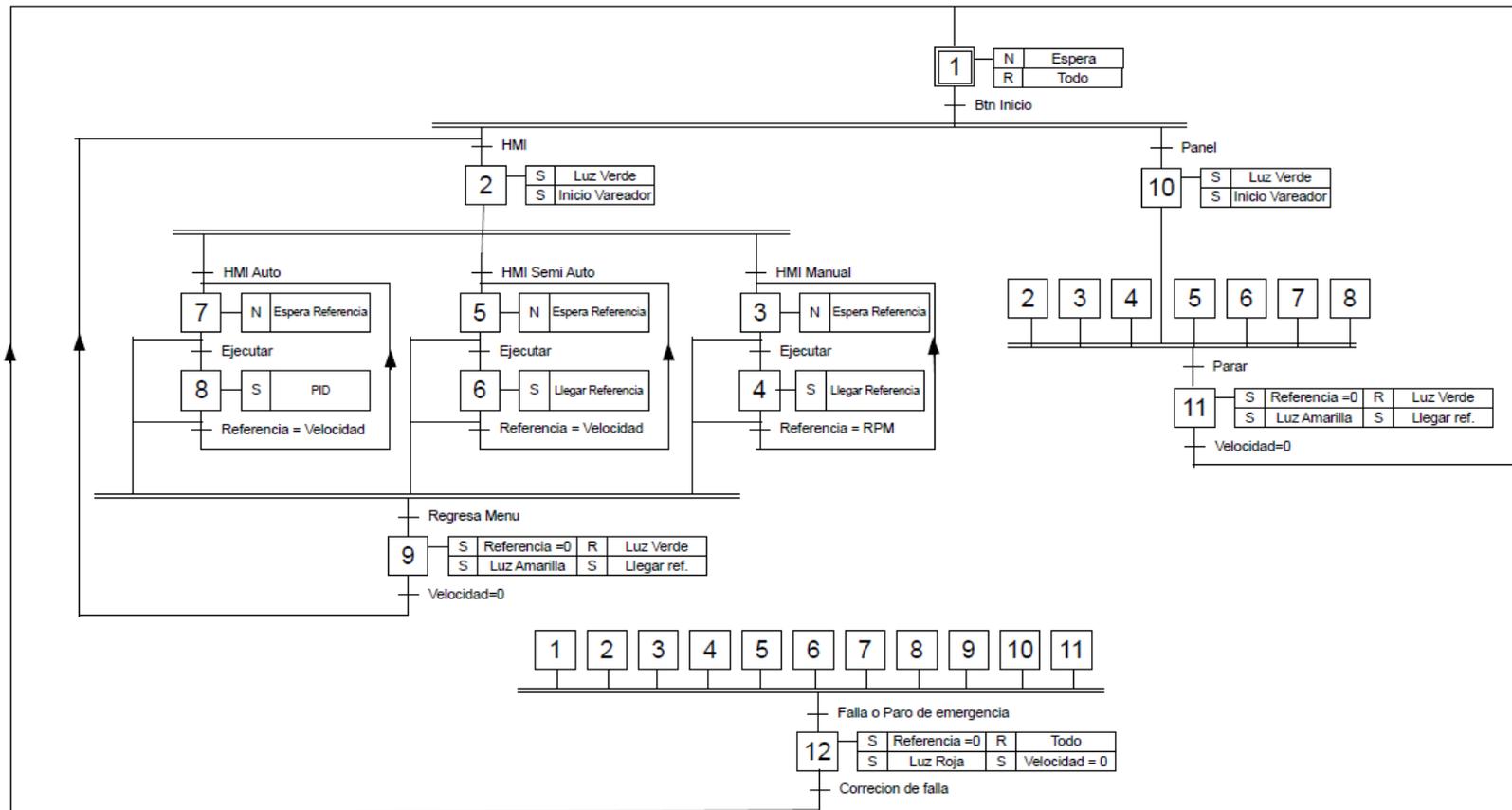


Figura 67. Grafcet del sistema

### 3.12.15 Estructura del programa PLC

El programa se subdivide en 5 lads secundarios y un principal, los cuales se detallan a continuación

1) Lad 2-Principal

Este es el principal donde se activan o desactivan los lad secundarios además de accionar las salidas del variador.

2) Lad 3- SALIDARPMH

Aquí se compara y se incrementa o decrementa según sea la diferencia de velocidad para los modos del HMI manual y de control abierto, además se incluye el retardo solicitado por la institución de una RPM por cada 100 ms.

3) Lad 4- SALIDARPMP

En este lader se toma el valor ingresado por el dial, el cual se compara con la velocidad actual para así incrementar o disminuir la velocidad hasta llegar a la velocidad referencial, también se incluye el retardo.

4) Lad 5- PID

El modo automático del HMI utiliza ese lader para implementar el control PID antes dimensionado.

5) Lad 6-Apagar

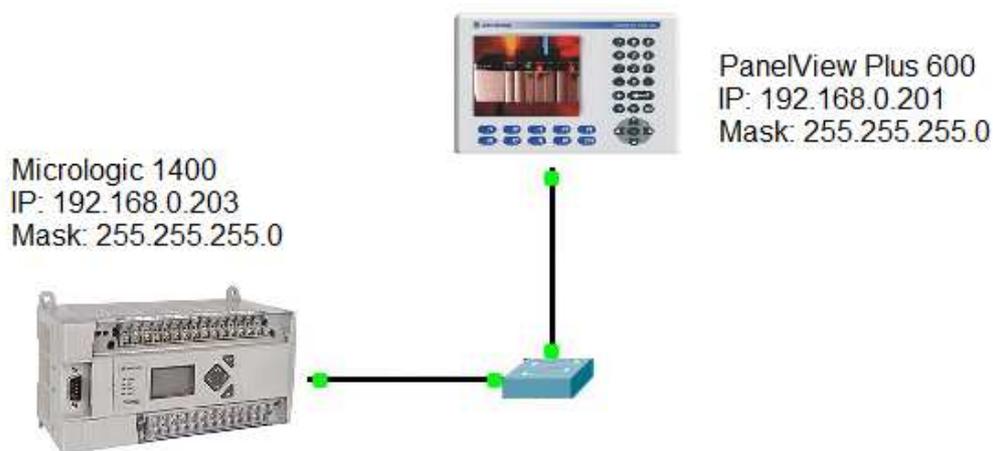
Al ingresar en esta subdivisión se ejecuta la secuencia para desacelerar el motor ya sea en el caso que se apagó o se regresó al menú sin apagar el sistema.

6) Lad 7-VAIRE

Se utiliza para calcular la velocidad del aire así como como para realizar una corrección solicitada por la institución.

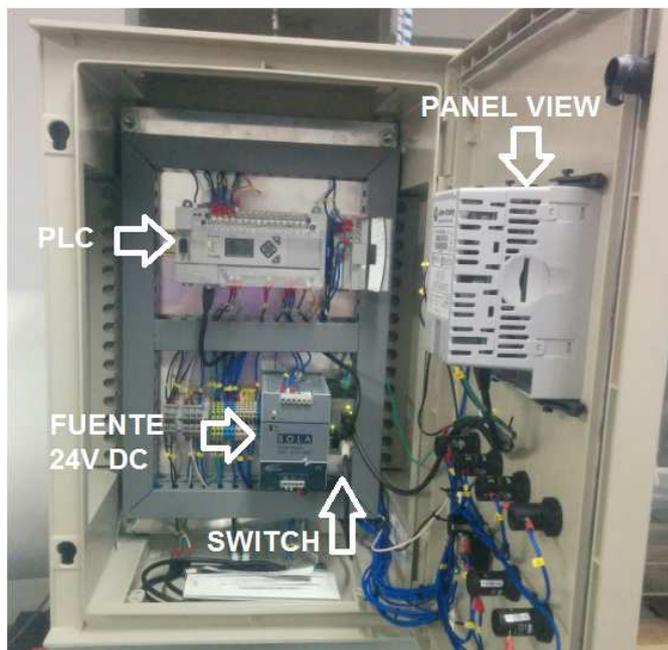
### 3.12.16 Comunicación PLC y Panel View

Para enlazar el panel y el PLC se usará comunicación Ethernet mediante un Switch industrial, se configurara IPs fijas en todos los equipos ver figura 68.



**Figura 68. Diagrama de Red**

La distribución de los elementos del tablero de control es:



**Figura 69. Tablero de control**

### 3.12.17 Diseño del sistema de supervisión y control

El software FactoryTalk View Studio permite adaptar el entorno de trabajo de acuerdo a las necesidades del usuario, por lo cual se realizó ventanas específicas para los distintos tipos de control y configuraciones.

- **Pantalla principal**

La ventana principal contiene acceso a las diferentes ventanas de control y configuración del sistema.



**Figura 70. Pantalla principal HMI**

El menú consta de las siguientes ventanas

- Manual
  - Semi Auto.
  - Automa.
  - Configurar
  - Acerca de
- **Pantalla Manual**

En esta ventana se ingresa la referencia en RPM para el modo manual del HMI, muestra los valores de la referencia ingresada así como la velocidad real del motor, la velocidad en la sección de pruebas y la densidad del aire,

para que se produzca un cambio de referencia es necesario presionar el botón ejecutar.



Figura 71. Pantalla HMI Manual

- **Pantalla Semi automático**

El control abierto usa la pantalla semi automático para ingresar la velocidad de referencia en  $\left[\frac{m}{s}\right]$  y muestra las mismas variables que la ventana manual.



Figura 72. Pantalla Semiatomatica

- **Pantalla automático**

De igual forma que en el semi automático se ingresa la referencia de velocidad de viento en la sección de pruebas, y una vez presionado el botón de ejecutar el controlador acciona el lader PID encargado de realizar el control, el botón Ok se usa para desconectar el controlador y mantener las RPM del motor en el valor que se encuentre en ese instante.



**Figura 73. Pantalla Automático**

- **Pantalla configuración**

En esta pantalla se ingresa los valores correspondientes a la Temperatura, presión atmosférica y la humedad relativa para calcular la densidad del Aire automáticamente.

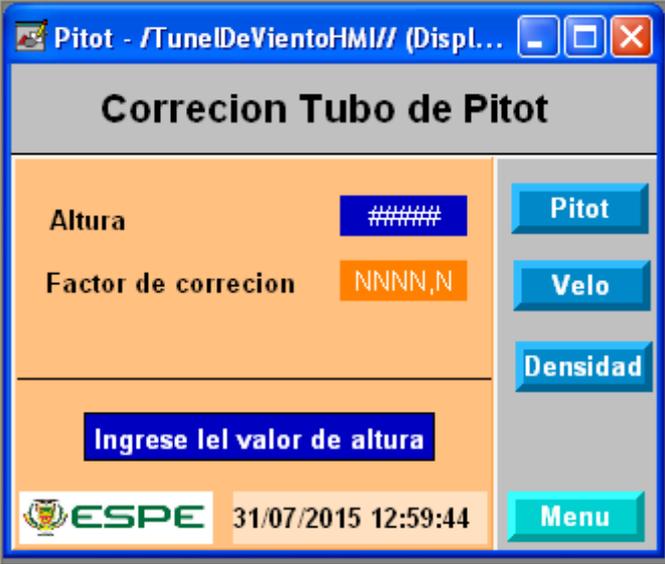


**Figura 74. Pantalla Configuración**

Además esta pantalla tiene un submenú con las siguientes ventanas

- Pitot
  - Velocidad
  - Densidad
- **Pantalla Pitot**

El transductor de presión necesita una corrección con respecto a la altura, por lo que se creó esta ventana para ingresar el valor de la altura y realizar la correspondiente corrección.



**Figura 75. Pantalla Pitot**

- **Pantalla Velocidad**

El INAMHI solicito que se pueda realizar una corrección de la velocidad, para lo cual se puede ingresar tres constantes correspondientes a una ecuación de segundo grado según la necesidad de la institución.

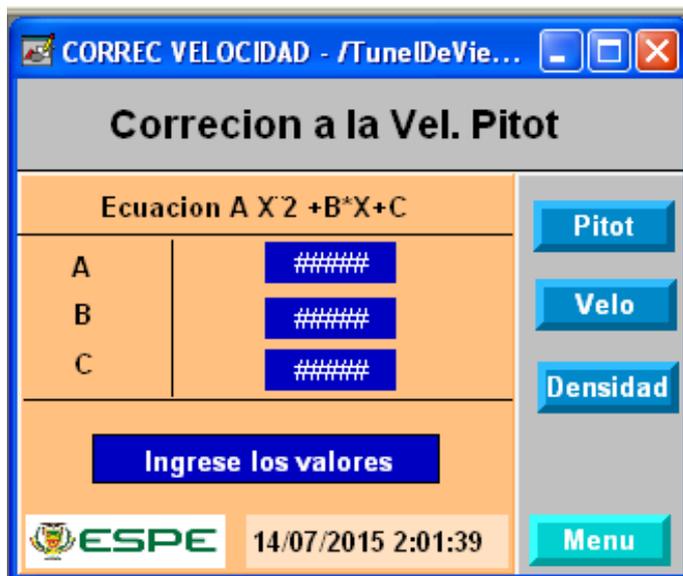


Figura 76. Pantalla corrección de la Velocidad

- **Distribución del sistema de supervisión y control**

La distribución del panel view y los elementos de control es:

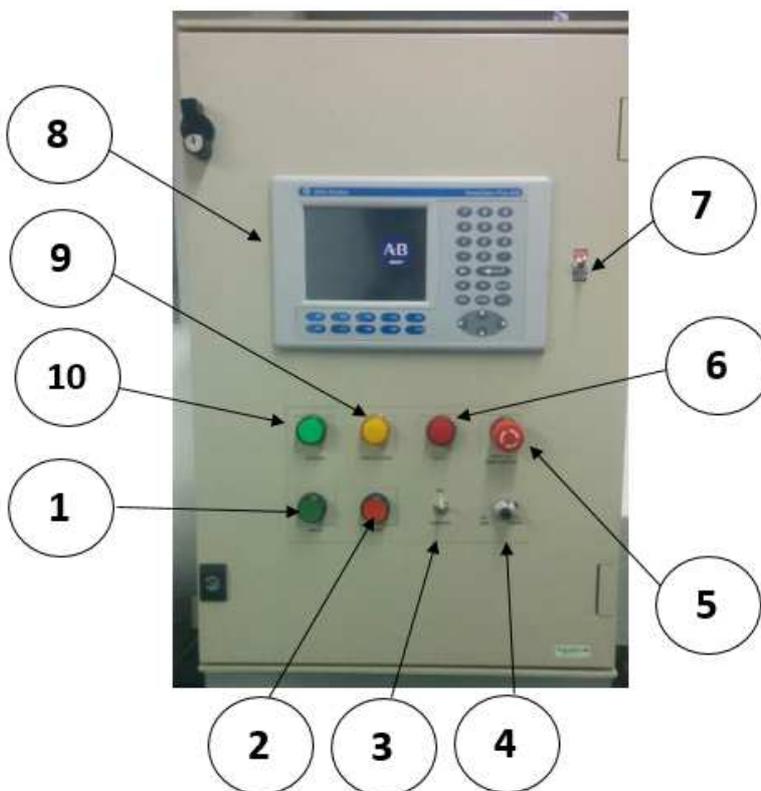


Figura 77. Panel de control

Donde:

1. **Botón inicio.**- Botón con el cual se inicia el sistema
2. **Botón Pare.**- Botón para apagar el sistema.
3. **Switch.**- Selector entre el tablero y HMI
4. **Perilla.**- Dial para controlar el tablero desde el tablero de control
5. **Pare de emergencia.**- Botón para apagar de forma inmediata en el caso de emergencia o falla.
6. **Luz indicadora Roja.**- Luz que indica que existe falla en el variador o se ha presionado el pare de emergencia, esta alerta no se desactivara hasta q se haya solucionado el problema, si esta alerta se encuentra encendida el sistema se mantiene bloqueado.
7. **Switch pantalla.**- Switch con el cual se puede encender o apagar la pantalla
8. **HMI.**- Pantalla para ingresar datos, visualizar la velocidad y configurar parámetros del equipo.
9. **Luz indicadora Amarilla.**- Luz que indica precaución que el sistema se está apagando progresivamente.
10. **Luz indicadora Verde.**- Luz que indica que el sistema se encuentra trabajando normalmente.

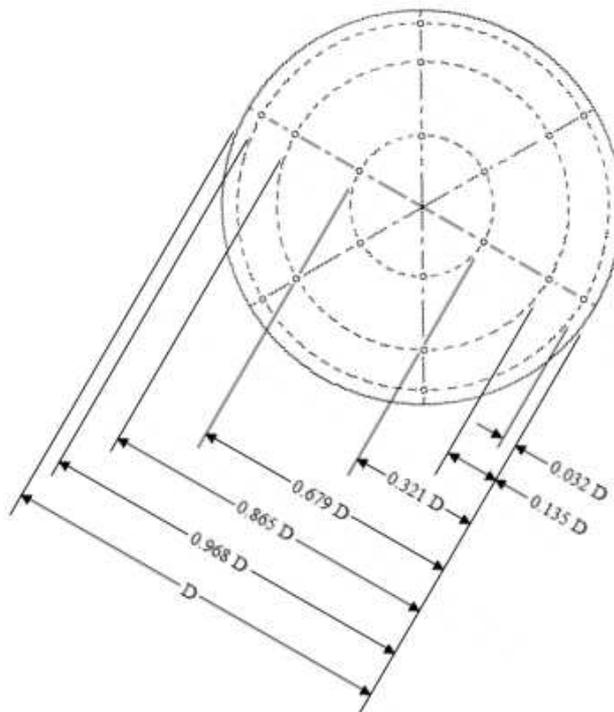
## CAPITULO 4.

### RESULTADOS

#### 4.1 Perfiles de velocidad en la sección de pruebas

Para verificar el correcto funcionamiento del túnel se tomará datos a distintas velocidades, para obtener el perfil de la velocidad dentro de la sección se pruebas y así confirmar la uniformidad del flujo.

Puesto que la velocidad de aire en el conducto puede variar en su sección transversal, es necesario medir la velocidad en varios puntos diferentes. La Figura 78 muestra el esquema de desplazamiento recomendado por ASHRAE Standard 111 para un conducto circular.



**Figura 78. Sección transversal de puntos de medición**

**Fuente: ASHRAE Standard 111**

Por lo que los radios con los que se toman los datos con respecto al centro de la circunferencia son 234, 182.5, 89.5 y 0 mm

Para la medición se utilizará un sensor patrón Anemomaster Model 1570 que cuenta el INAMHI el cual tienen las siguientes características.

#### Main Unit Specifications

Air velocity Resolution	0.01 m/s (@ range of 0 to 9.99m/s) 0.1 m/s (@ 10 m/s or more)
Data Output	Digital: RS 232C (Baud rate 9600 bps fixed) Analog: 0 to 5 V
Operation Temperature	41 to 104 F (5 to 40 C)
Dimensions	D 7.8 x W 10.2 x H 2.8 inches (200 x 260 x 70 mm)
Weight	5.7 lbs (2.6 kg)
Power Supply	AC 85 to 276 V, 50/60Hz

#### Probe Specifications

Model	Range (m/s)	Accuracy (m/s)	Response Time
0962-00 0963-00	0.1 to 4.99	+/- 0.1	1 sec
	5.00 to 9.99	+/- 0.2	
	10.0 to 24.9	+/- 0.5	

**Figura 79. Características Anemomaster Model 1570**

Se toma mediciones de 5, 10, 15, 20, 25 m/s, con 100 datos por cada punto de donde se calculará el promedio y la desviación estándar para cada punto.

## 4.2 Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas durante la ejecución de las pruebas son:

**Tabla 44**  
**Condiciones atmosféricas**

Temperatura [ ° ]	Presión Atmosférica [hPa]	Humedad Relativa [ % ]
22	745	45

### 4.2.1 Toma de datos

El procedimiento que se seguirá es el siguiente:

- Se usará el modo Automático del HMI
- Se digita el set point en el valor deseado, ya sea 5,10,15,20,25 m/s
- Esperamos el tiempo de estabilización del sistema que es aproximadamente 900 s
- Se elimina el controlador con el botón Ok del HMI

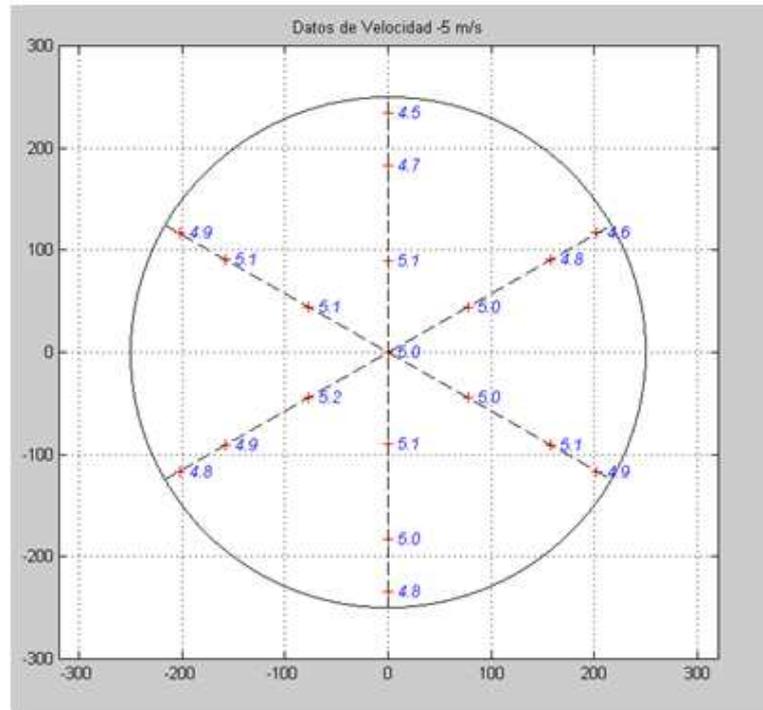
- Se coloca el sensor de hilo caliente en cada uno de los puntos mostrados en la figura 76.
- Se captura los datos por cada segundo con el software del sensor patrón.

#### 4.2.2 Prueba a 5 m/s

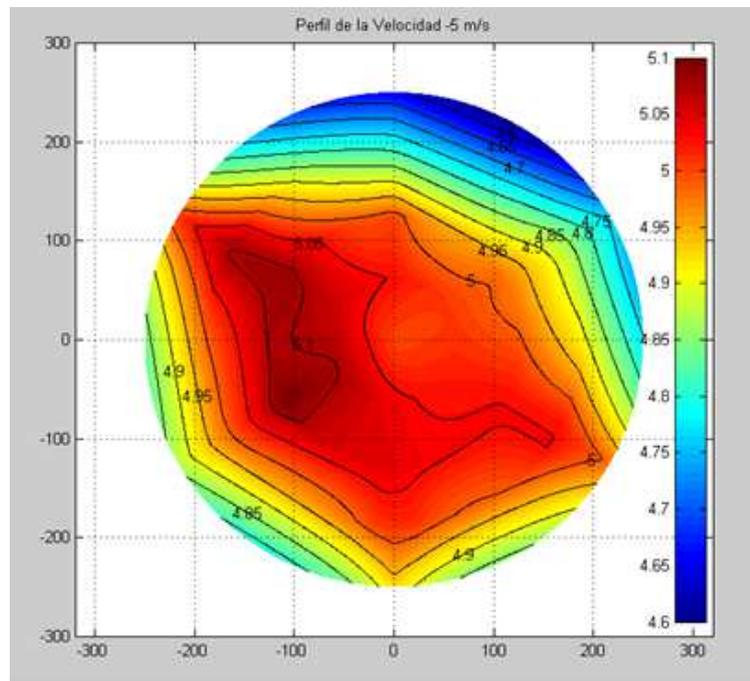
El resumen de los datos de la prueba a 5 m/s es:

**Tabla 45**  
**Resumen de datos a 5 m/s**

Radio [mm]	Angulo [°]	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Desviación Estándar [Adimensional]
234	30	4,6	0,020
234	90	4,5	0,061
234	150	4,9	0,028
234	210	4,8	0,024
234	270	4,8	0,051
234	330	4,9	0,017
182,5	30	4,8	0,021
182,5	90	4,7	0,047
182,5	150	5,1	0,026
182,5	210	4,9	0,042
182,5	270	5,0	0,034
182,5	330	5,1	0,021
89,5	30	5,0	0,030
89,5	90	5,1	0,031
89,5	150	5,1	0,028
89,5	210	5,2	0,050
89,5	270	5,1	0,028
89,5	330	5,0	0,017
0	30	4,9	0,018
0	90	5,0	0,029
0	150	5,1	0,021
0	210	5,1	0,040
0	270	5,0	0,023
0	330	5,0	0,017



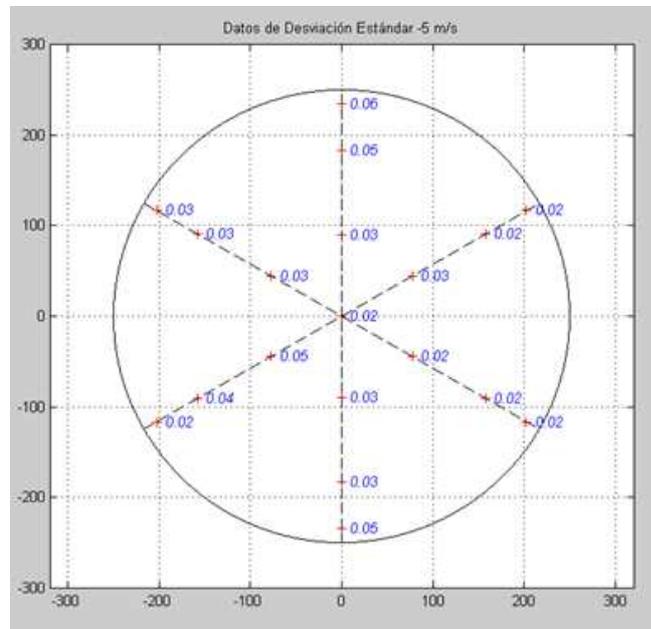
**Figura 80. Datos promedios en los puntos a 5 m/s**



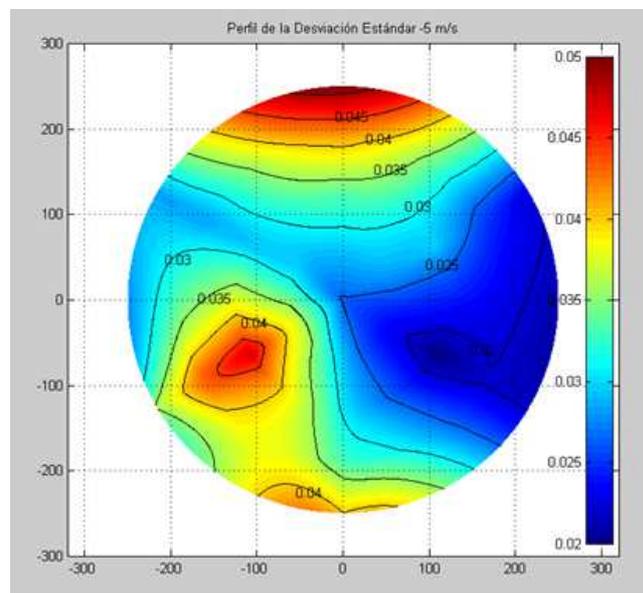
**Figura 81. Interpolación a 5 m/s**

Como era de esperarse la figura 81 muestra que se tiene menor velocidad en las paredes de la sección de pruebas, y se cuenta con una amplia zona uniforme en el centro donde se tiene una variación de 0.1, el cual representa

el  $\pm 2\%$  de diferencia, el cual está presente debido a la falta del direccionado de flujo y las mallas.



**Figura 82. Datos de desviación estándar a 5 m/s**



**Figura 83. Interpolación de la desviación estándar a 5 m/s**

En la figura 83 muestra que la desviación estándar dentro de la zona uniforme es como máximo 0.05 m/s lo cual quiere decir que el flujo dentro de la sección de pruebas tiene variaciones de velocidad inferiores al 1%, manteniéndose así constante.

### 4.2.3 Pruebas de 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s,

De igual forma se realizó pruebas para las distintas velocidades de donde se obtuvo los siguientes resultados

**Tabla 46**  
**Resumen de datos a 10 m/s**

Radio [mm]	Angulo [°]	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Desviación Estándar [Adimensional]
234	30	9,6	0,05
234	90	9,2	0,10
234	150	10,1	0,07
234	210	9,5	0,07
234	270	9,7	0,04
234	330	9,5	0,07
182,5	30	10,0	0,05
182,5	90	9,2	0,06
182,5	150	10,1	0,05
182,5	210	10,3	0,06
182,5	270	10,1	0,04
182,5	330	9,9	0,09
89,5	30	9,7	0,06
89,5	90	9,2	0,03
89,5	150	10,1	0,05
89,5	210	10,3	0,06
89,5	270	10,2	0,06
89,5	330	9,9	0,08
0	30	10,0	0,05
0	90	9,7	0,03
0	150	10,1	0,05
0	210	10,2	0,06
0	270	10,1	0,04
0	330	9,8	0,07

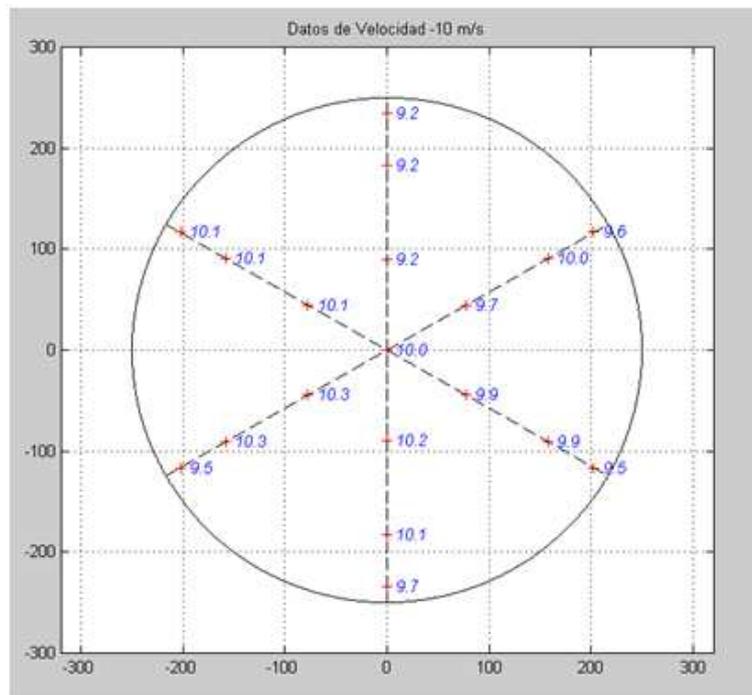


Figura 84. Datos promedios en los puntos a 10 m/s

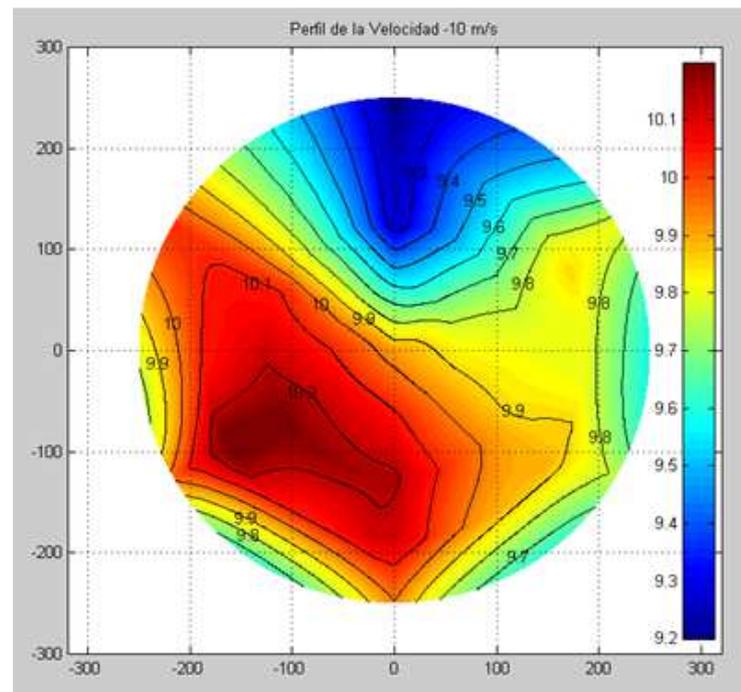


Figura 85. Interpolación a 10 m/s

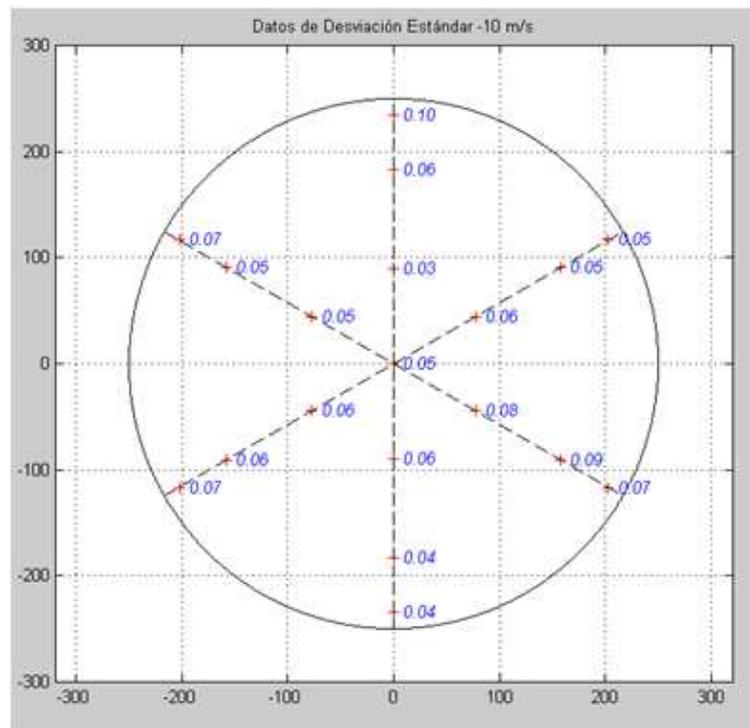


Figura 86. Datos de desviación estándar a 10 m/s

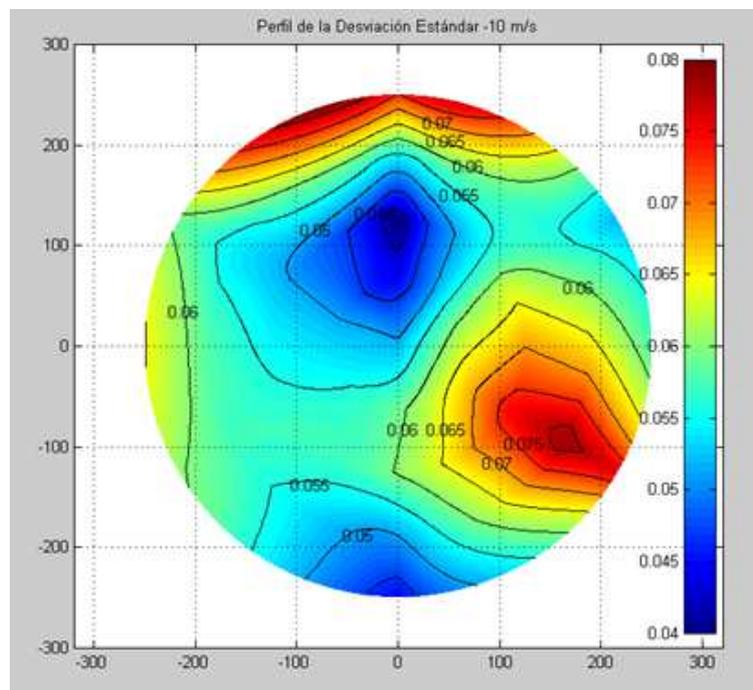


Figura 87. Interpolación de la desviación estándar a 10 m/s

**Tabla 47**  
**Resumen de datos a 15 m/s**

<b>Radio [mm]</b>	<b>Angulo [ ° ]</b>	<b>Velocidad [<math>\frac{m}{s}</math>]</b>	<b>Desviación Estándar [Adimensional]</b>
234	30	14,27	0,14
234	90	13,66	0,15
234	150	13,80	0,19
234	210	14,38	0,19
234	270	14,33	0,17
234	330	13,98	0,16
182,5	30	14,80	0,15
182,5	90	14,34	0,18
182,5	150	15,14	0,17
182,5	210	14,99	0,16
182,5	270	14,91	0,15
182,5	330	14,61	0,17
89,5	30	14,63	0,17
89,5	90	14,29	0,17
89,5	150	14,93	0,15
89,5	210	15,25	0,16
89,5	270	15,32	0,16
89,5	330	15,06	0,16
0	30	14,96	0,17
0	90	14,75	0,13
0	150	15,02	0,19
0	210	15,12	0,14
0	270	15,05	0,18
0	330	15,10	0,17



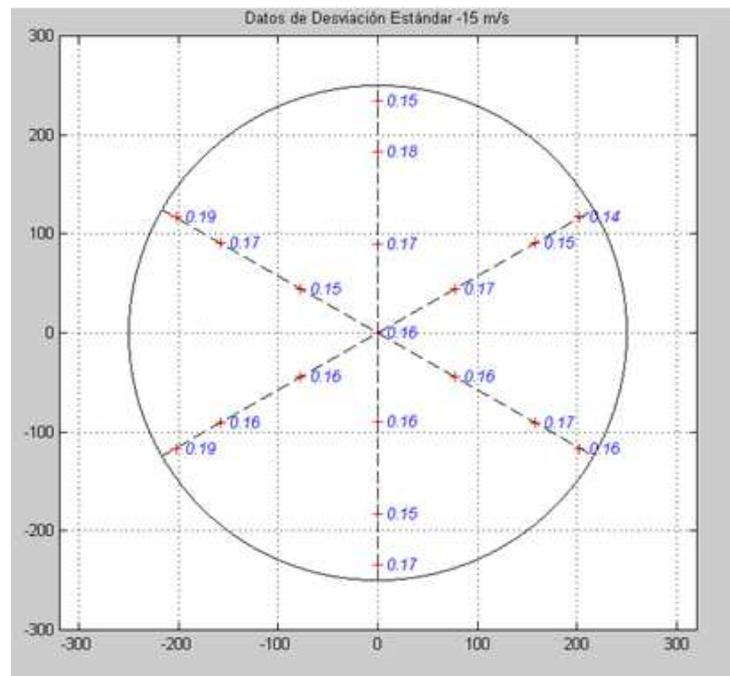


Figura 90. Datos de desviación estándar a 15 m/s

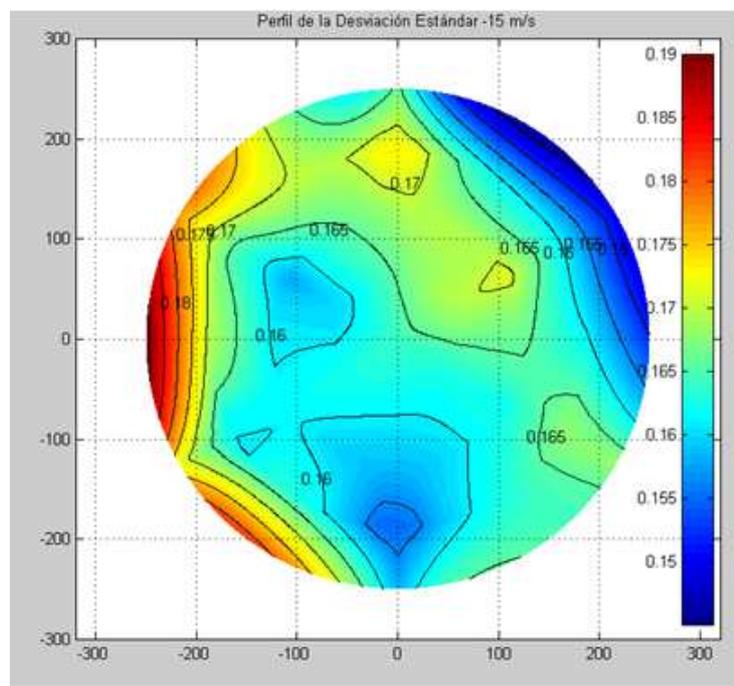


Figura 91. Interpolación de la desviación estándar a 15 m/s

**Tabla 48**  
**Resumen de datos a 20 m/s**

<b>Radio [mm]</b>	<b>Angulo [ ° ]</b>	<b>Velocidad [<math>\frac{m}{s}</math>]</b>	<b>Desviación Estándar [Adimensional]</b>
234	30	19,08	0,22
234	90	18,34	0,13
234	150	18,89	0,20
234	210	19,34	0,18
234	270	18,91	0,19
234	330	19,01	0,15
182,5	30	20,11	0,24
182,5	90	19,30	0,18
182,5	150	20,26	0,20
182,5	210	20,08	0,21
182,5	270	19,54	0,20
182,5	330	19,94	0,18
89,5	30	19,49	0,15
89,5	90	19,51	0,17
89,5	150	20,04	0,18
89,5	210	20,43	0,17
89,5	270	20,17	0,13
89,5	330	20,16	0,21
0	30	20,35	0,17
0	90	19,59	0,19
0	150	20,12	0,16
0	210	20,44	0,17
0	270	19,94	0,16
0	330	19,74	0,20

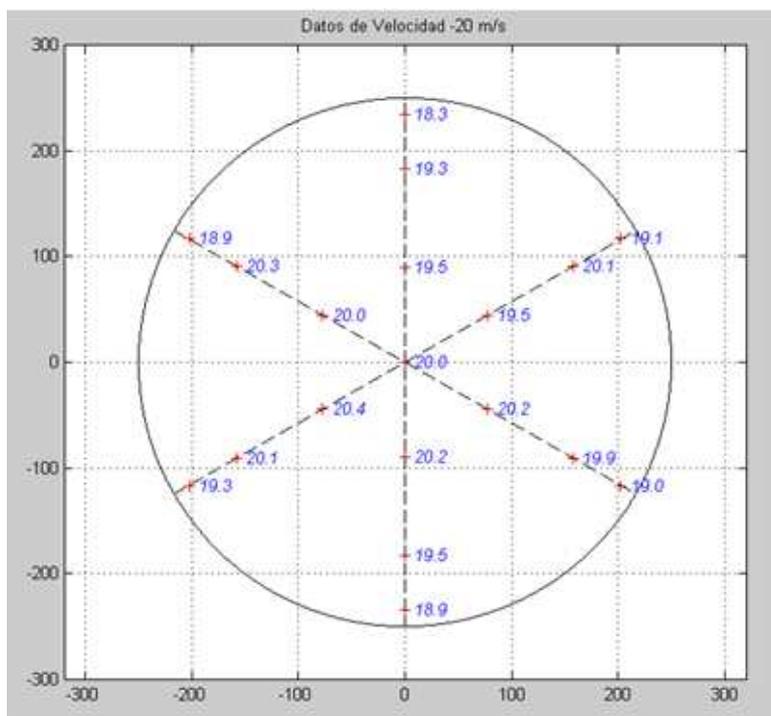


Figura 92. Datos promedios en los puntos a 20 m/s

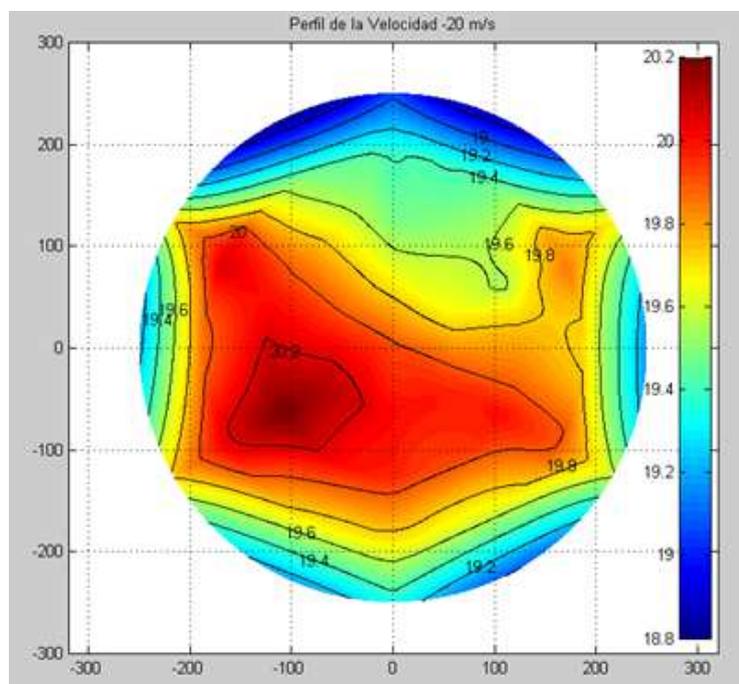


Figura 93. Interpolación a 20 m/s

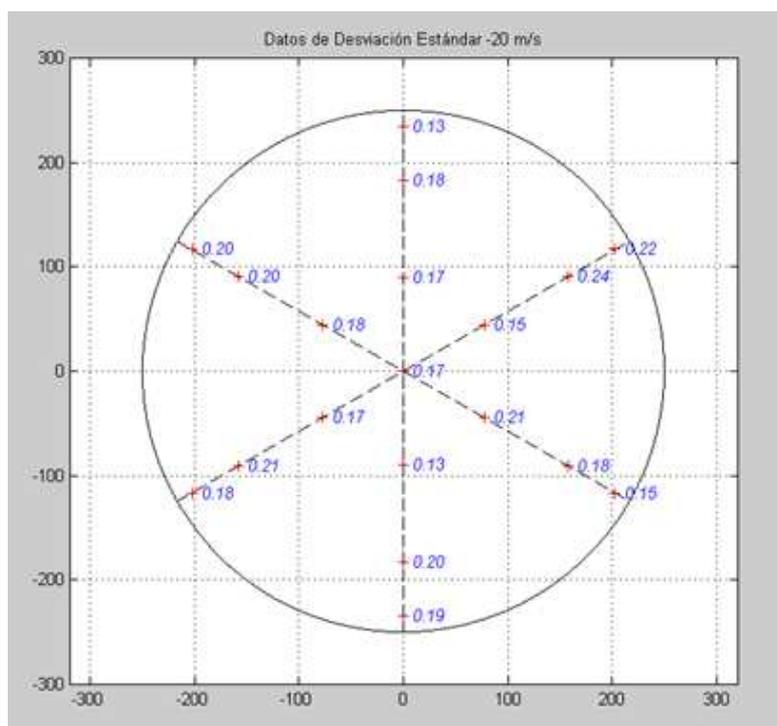


Figura 94. Datos de desviación estándar a 20 m/s

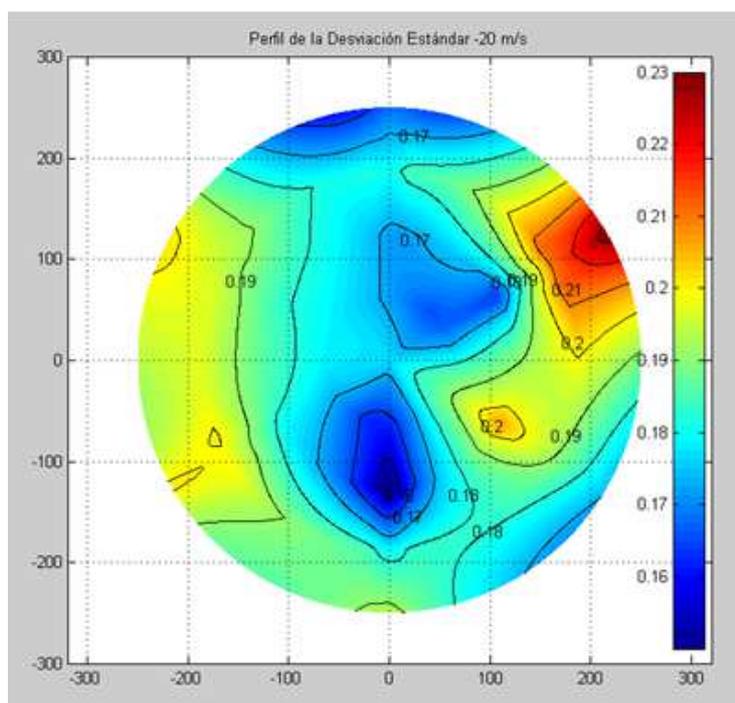


Figura 95. Interpolación de la desviación estándar a 20 m/s

**Tabla 49**  
**Resumen de datos a 25 m/s**

<b>Radio [mm]</b>	<b>Angulo [ ° ]</b>	<b>Velocidad [<math>\frac{m}{s}</math>]</b>	<b>Desviación Estándar [Adimensional]</b>
234	30	23,30	0,19
234	90	22,78	0,27
234	150	23,69	0,20
234	210	24,11	0,22
234	270	23,81	0,19
234	330	23,69	0,17
182,5	30	24,57	0,20
182,5	90	24,45	0,23
182,5	150	24,59	0,21
182,5	210	25,17	0,19
182,5	270	25,22	0,21
182,5	330	24,39	0,22
89,5	30	24,83	0,22
89,5	90	24,87	0,28
89,5	150	24,77	0,21
89,5	210	25,32	0,25
89,5	270	25,13	0,23
89,5	330	25,13	0,22
0	30	25,00	0,25
0	90	24,96	0,25
0	150	25,07	0,25
0	210	25,14	0,25
0	270	25,16	0,24
0	330	24,71	0,16

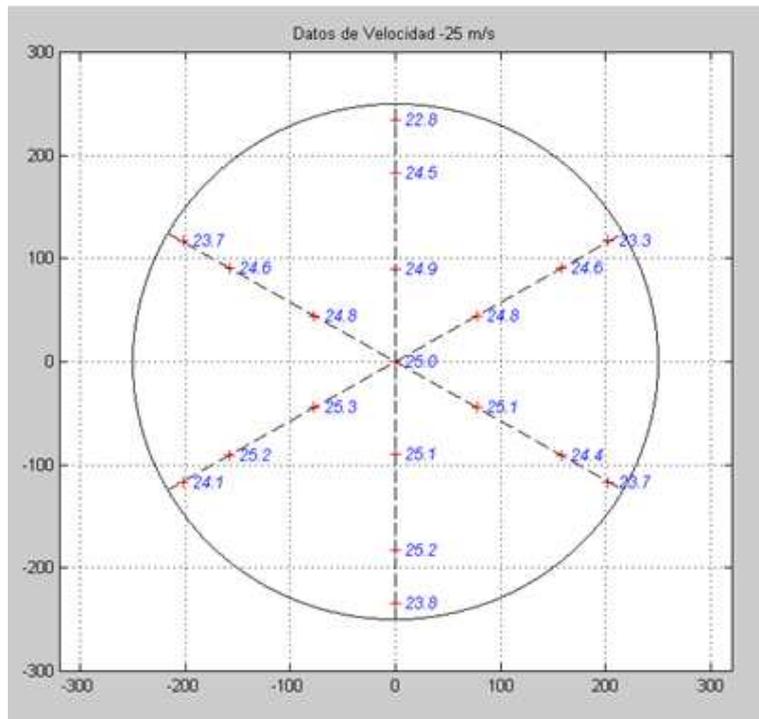


Figura 96. Datos promedios en los puntos a 28 m/s

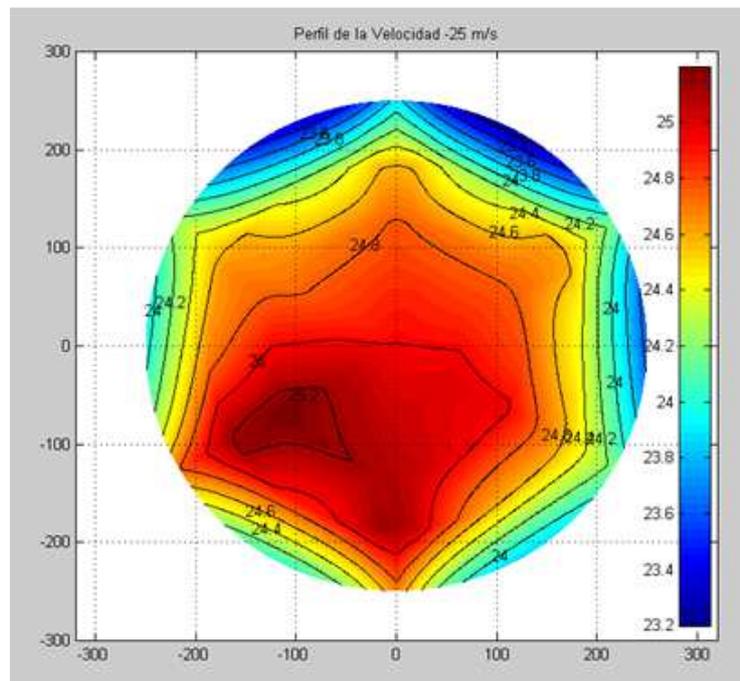


Figura 97. Interpolación a 25 m/s

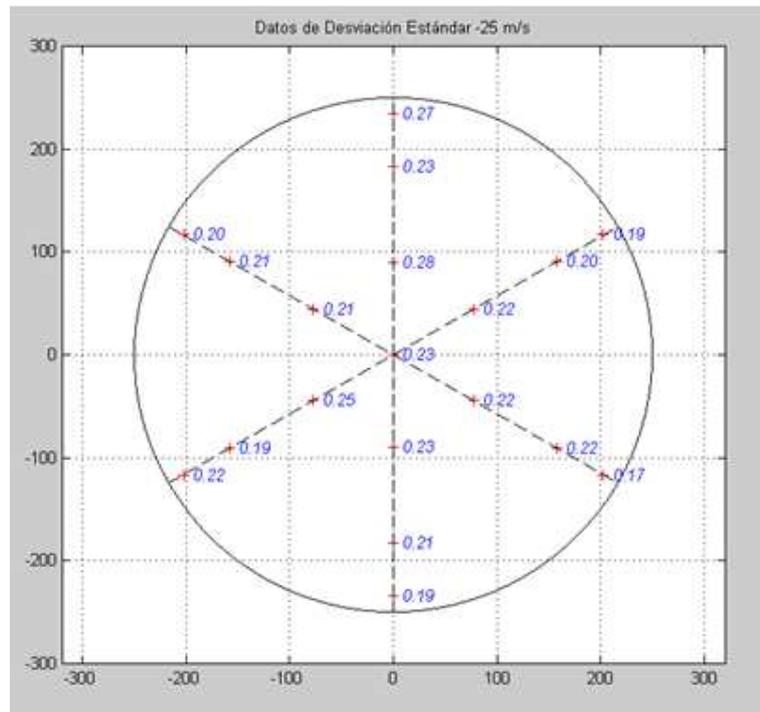


Figura 98. Datos de desviación estándar a 25 m/s

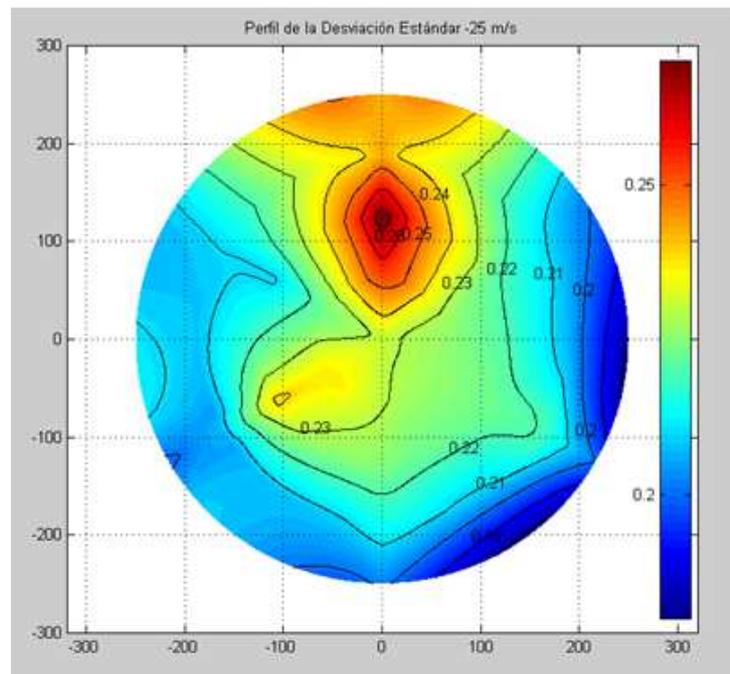
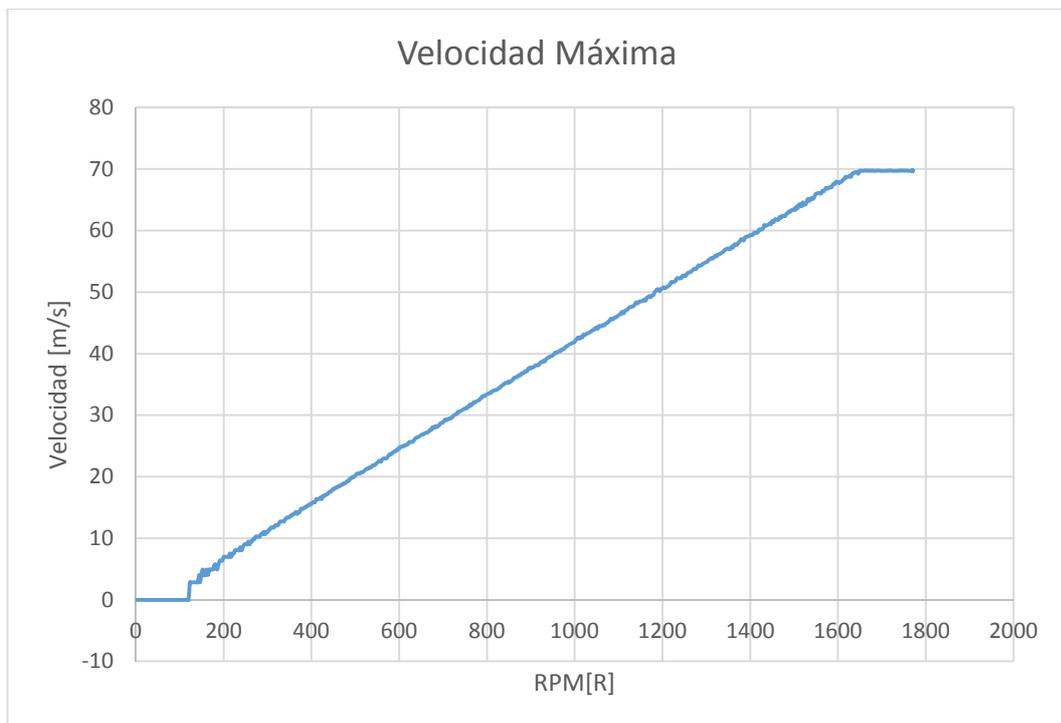


Figura 99. Interpolación de la desviación estándar a 25 m/s

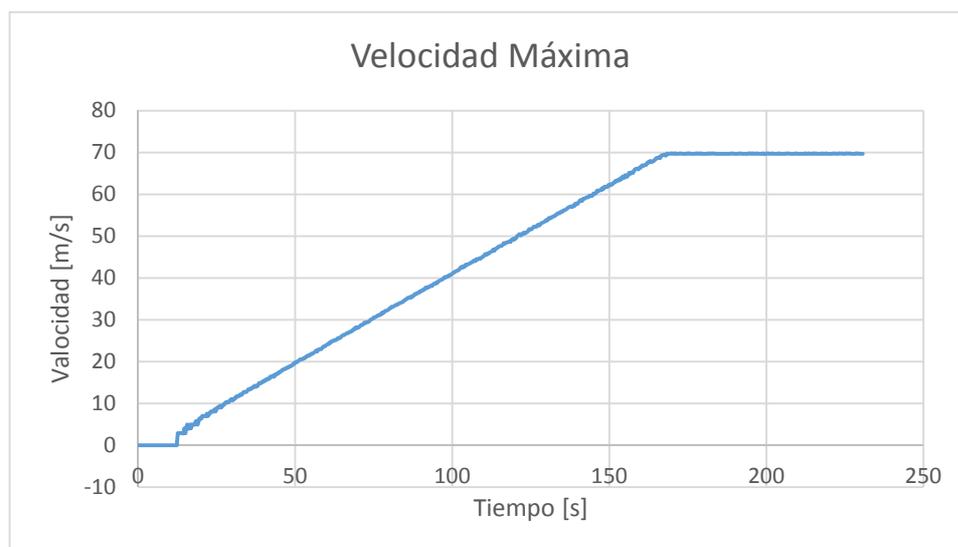
A medida que se aumenta la velocidad la variación así como la desviación estándar aumenta proporcionalmente pero se mantienen en los porcentajes equivalentes, es decir la velocidad varía un  $\pm 2\%$  y la desviación estándar un 1% con respecto al set point.

### 4.3 Velocidad máxima

Para verificar la velocidad máxima del sistema, se utilizará el modo manual del HMI colocando las máximas revoluciones del motor 1770, y se tomara los datos del tubo de pitot con la ayuda de una adquisición de datos mediante una interfaz en Microsoft Excel con macros.



**Figura 100. Velocidad en función de RPM**

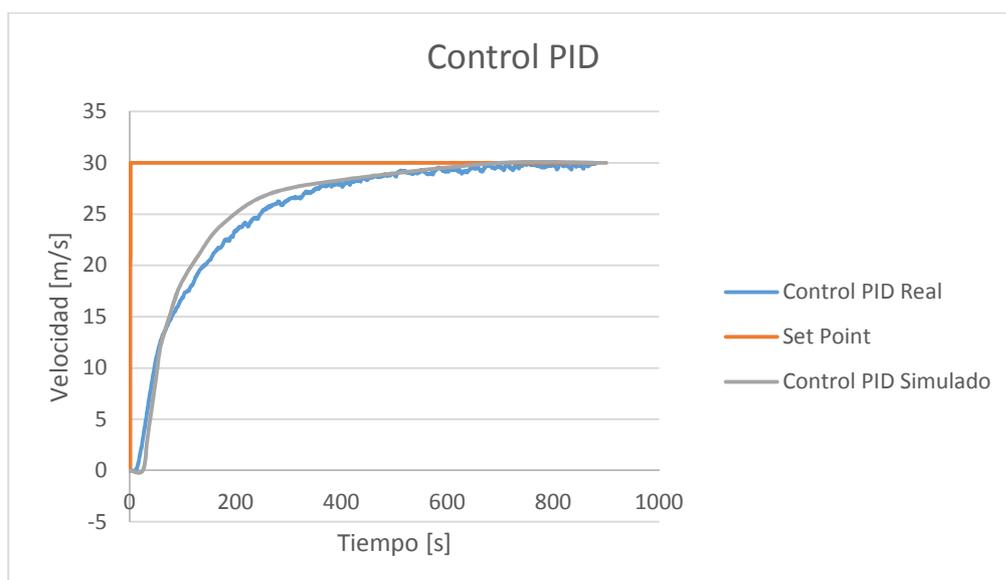


**Figura 101. Velocidad en función del tiempo modo manual**

La velocidad máxima del túnel es de 69,7 m/s, la cual se alcanza a 1650 RPM.

#### 4.4 Verificar control PID

Para corroborar el correcto funcionamiento del controlador PID, y que este se encuentra trabajando bajo los parámetros calculados se tomaran los datos mediante los sensores de hilo caliente hasta que el sistema se estabilice en el setpoint igual a 30 m/s.



**Figura 102. Control PID**

## CAPITULO 5.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un túnel de viento subsónico cerrado con un rango de velocidad variable para la calibración de los sensores e instrumentos de medición del INAMHI, su velocidad máxima es 69,7 m/s a 1650 RPM con una desviación estándar del 1%; y una variación del  $\pm 2\%$  en la velocidad promedio en la sección de pruebas
- El túnel de viento cerrado es la mejor alternativa ya que controla, la velocidad en un rango de 0 a 69,7 m/s con una resolución de 0,1 m/s, además la temperatura y humedad varían menos del 1% en la sección de pruebas, manteniendo estas condiciones constantes durante el tiempo de calibración de los instrumentos.
- Los difusores del túnel tienen un ángulo menor a  $2^\circ$ , para así evitar que exista desprendimiento de capa, además en las esquinas se instaló deflectores con una relación s/c de 0,19 siendo esta la mejor alternativa para obtener una mejor calidad de flujo y pérdidas del 5.8 y 0.54 %.
- Existen cuatro formas de controlar y variar la velocidad requerida en el túnel, y son panel, manual, semiautomático y automático, las cuales varían las RPM del motor entre 0 y 1770 RPM para setear distintas velocidades, y en caso que exista una falla o para de emergencia se mostrara un mensaje en el HMI hasta que se solucione el problema.
- El tiempo en el cual llegue a la velocidad máxima el túnel en modo manual es de 170 s aproximadamente, y en modo automático con el controlador PID el sistema alcanza el setpoint en 800 s.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda seguir el manual de operación y mantenimiento para evitar fallas en el equipo o accidentes con los operadores, realizando los procedimientos de encendido, apagado, limpieza y lubricación especificados en el anexo.
- Se recomienda la instalación de las mallas y el direccionador de flujo dentro de la cámara de estabilización, para disminuir la diferencia de la velocidad promedio a rangos menores del 1% en toda la sección de pruebas y lograr una mejor calidad de flujo.
- Se recomienda la implementación de visualizadores de flujo, control de temperatura, control de humedad y control de presión para modelar las condiciones atmosféricas, de las ciudades del Ecuador a escala, mejorando así los modelos de predicción climática al realizar estudios sobre el impacto del viento en la topología real del país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (15 de 01 de 2015). *ABB*. Obtenido de ABB: <http://www.abb.com/>
- Anonimo. (2008). *Capa limite*. Asturias: Universidad de Oviedo.
- Barlow, J., Rae , W., & Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnl testing* . New York: Jhon Wilwy & Sons.
- Eckert, W. T., Mort, K. W., & Jope, J. (1976). *Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance*. Texas: Nasa.
- Flores Paredes, J. A., & Meneses Costales, F. D. (2009). *Diseño e implementación de un sistema de medición de la temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento en base a sensores ultrasónicos*. Quito: Escuela Politecnica Nacional .
- García González , F. j. (2004). *Control Lógico Programable*. Puebla: Universidad Tecnológica de Puebla .
- Guru, J. (2010). *The Design and Performance of a 1.9m x 1.3m Indraft Wind Tunnel*. Loughborough: Loughborough's Institutional Repository.
- Iannini , R., & Gonzalez, J. (20 de Enero de 2004). *COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA*. Recuperado el 5 de Febrero de 2013, de COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/energe/b13/Bolet%C3%ADn-13.pdf>
- Illán, I. (01 de Agosto de 2015). *F1aldia*. Obtenido de F1aldia: <http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- Jiménez, E. R. (2003). *EL ANEMÓMETRO, CUESTIÓN DE SOPLAR*. Recuperado el 17 de Abril de 2013, de EL ANEMÓMETRO, CUESTIÓN DE SOPLAR: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/anemometro/anemometro.html>

- Loureiro, J. B. (2006). *Principios de anemometría térmica, in Turbulencia*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Maggiolo, O. (2010). *Nociones generales de Energía Eólica* . Montevideo : Univercidad de la Republica, Uruguay .
- Mataix, C., & Hurtado, A. F. (1993). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas* . Madrid: Castillo.
- Mayer, F., & Lechner, M. (19 de 08 de 2015). *Sensirion*. Obtenido de Sensirion: <http://www.sensirion.com/en/home/>
- Medrano Alatorre, D. (03 de 07 de 2015). *Mecánica de fluidos. Teoría de la capa limite Sustentación y arrastre*. Obtenido de monografias: <http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre2.shtml>
- Mott, R. (2006). *Mecanica de Fluidos*. Mexico: Pearson Educacion.
- Mott, R. (2006). *Mecanica de fluidos* . Mexico: Pearson.
- Nave, O. R. (29 de Junio de 2015). *hyperphysics*. Obtenido de hyperphysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/kinetic/barfor.html#c6>
- Pérez Farrás , L. E., & Pérez, S. (2007). *“Criterios de diseño, cálculo y selección de tuberías en base al criterio de las prestaciones equivalentes*. Buenos Aires : Univercidad de Buenos Aires .
- Purtell, L., & Klebanoff, P. S. (1979). *A Low-Velocity Airflow Calibration and Research Facility*,. Washington: National Bureau of Standards.
- Romeva, C. R. (2010). *Diseño concurrente*. Catalunya: Ediciones UPC.
- Rosas Quiterio, P. (2010). *Caracterizacion del tunel de viento de la velocidad baja del LABINTHAP*. Mexico D.F: Instituto Politecnico Nacional .
- Schlichting , H. (1960). *Boundary Layer Theory*. New York: McGraw-Hill.
- Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: McGRAW-HILL.

Su, Y.-x. (1991). *Flow Analysis and Design of Three-Dimensional Wind Tunnel Contractions*. Xian: AIAA Journal.

## **ANEXOS**