



Rediseño estructura, caracterización y modelamiento CFD del funcionamiento del túnel de viento subsónico de ciclo abierto tipo NPL por succión de 2 Hp de potencia de la Universidad Antonio Nariño

Wilmar Banyoni Angulo Cardenas

Código: 10451421515

Donovan German Cardenas Cepeda

Código: 10451421269

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

FIMEB

Bogotá D.C, Colombia

2021

Rediseño estructura, caracterización y modelamiento CFD del funcionamiento del túnel de viento subsónico de ciclo abierto tipo NPL por succión de 2 Hp de potencia de la

Universidad Antonio Nariño

Wilmar Banyoni Angulo Cárdenas

Código: 10451421515

Donovan German Cárdenas Cepeda

Código: 10451421269

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Msc. Diego Alejandro Pardo Amaya

Línea de Investigación:

Mecánica de fluidos, Aerodinámica, Diseño mecánico

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

FIMEB

Bogotá D.C, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
_____, Cumple con
los requisitos para optar
Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

| | |
|--|-----------|
| Resumen..... | 21 |
| 1. Introducción | 23 |
| 1.1. Planteamiento del Problema | 25 |
| 1.2. Justificación | 27 |
| 1.3. Objetivos | 30 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 30 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 30 |
| 1.4. Alcance | 31 |
| 1.5. Metodología | 32 |
| 2. Marco Teórico | 35 |
| 2.1. El diseño mecánico | 35 |
| 2.1.1. Metodología para un diseño. | 35 |
| 2.1.2. Filosofía de un diseño seguro..... | 36 |
| 2.1.3. Función principal y objetivo del diseño de la estructura..... | 36 |
| 2.1.4. Esfuerzos directos. | 36 |
| 2.1.5. Esfuerzos debido a flexión. | 36 |
| 2.1.6. Esfuerzos estáticos | 37 |
| 2.1.7. Esfuerzo repetido e invertido | 37 |
| 2.1.8. Esfuerzo fluctuante..... | 37 |
| 2.2. Ventiladores..... | 37 |
| 2.2.1. Generalidades | 37 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.2. | Clasificación de los ventiladores..... | 37 |
| 2.2.3. | Curva característica..... | 38 |
| 2.2.4. | Punto de trabajo del ventilador..... | 39 |
| 2.2.5. | Identificación del ventilador del túnel de viento..... | 39 |
| 2.2.6. | Generalidades ventilador TAT 630/H..... | 39 |
| 2.2.7. | Características ventilador TAT 630/H..... | 39 |
| 2.2.8. | Aplicaciones..... | 39 |
| 2.2.9. | Características técnicas..... | 40 |
| 2.2.10. | Dimensiones y accesorios..... | 40 |
| 2.2.11. | Leyes aplicables al ventilador..... | 41 |
| 2.3. | CFD..... | 51 |
| 2.4. | Aerodinámica..... | 51 |
| 3. | Rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento..... | 53 |
| 3.1. | Detalle general de la actual estructura de soporte del túnel de viento..... | 53 |
| 3.2. | ¿Por qué surge la necesidad de hacer un rediseño de la estructura de soporte? | 54 |
| 3.3. | Función principal y objetivo del diseño de la estructura..... | 57 |
| 3.4. | Condiciones ambientales donde se instalará el diseño..... | 57 |
| 3.5. | Caracterización de las cargas que soportará la estructura..... | 57 |

| | |
|--|----|
| 3.6. Cálculo, análisis y determinación de magnitud de fuerzas que al que estará sometido el diseño..... | 58 |
| 3.6.1. Análisis de cargas producidas por el ventilador..... | 58 |
| 3.6.2. Análisis de cargas producidas por el difusor..... | 64 |
| 3.6.3. Análisis de cargas producidas por la cámara de pruebas | 69 |
| 3.6.4. Análisis de cargas producidas por la boquilla..... | 74 |
| 3.6.5. Análisis de cargas producidas por todos los componentes que constituyen el túnel de viento..... | 79 |
| 3.6.6. Tipos de esfuerzos identificados en el estudio previo..... | 88 |
| 3.7. Geometría básica de los elementos que conforma el nuevo diseño | 88 |
| 3.7.1. Propiedades del material de construcción de la estructura..... | 89 |
| 3.8. Razonamiento para elegir el factor de diseño (N) | 89 |
| 3.9. Desarrollo y cálculos del diseño | 90 |
| 3.9.1. Datos para considerar:..... | 90 |
| 3.9.2. Análisis de las ecuaciones a utilizar..... | 90 |
| 3.9.3. Desarrollo de cálculos para la selección de perfil en ángulo tipo americano de lados iguales..... | 92 |
| 3.9.4. Desarrollo de cálculos para la selección de perfil rectangular y perfil cuadrado | 93 |
| 3.10. Elección y especificaciones del tipo de perfil que se implementara en el rediseño de la estructura | 94 |

| | |
|--|------------|
| 3.11. Comprobación del factor de diseño (N)..... | 94 |
| 3.12. Descripción general del nuevo rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento..... | 95 |
| 3.13. Documentación del diseño y realización de planos de construcción..... | 96 |
| 3.14. Diseño de perno de soporte..... | 96 |
| 3.15. Vibraciones mecánicas producidas en la estructura por la parte del túnel de viento..... | 101 |
| 3.15.1. Selección de los soportes flexible..... | 102 |
| 3.15.2. Proyección de los soportes elastoméricos..... | 104 |
| 4. Caracterización matemática del funcionamiento del ventilador con que opera el túnel de viento..... | 109 |
| 4.1. Metodología de la caracterización..... | 109 |
| 4.2. Variables conocidas del ventilador de estudio (630/H)..... | 111 |
| 4.2.1. Datos de condiciones ambientales..... | 111 |
| 4.2.2. Datos físicos y condiciones iniciales del equipo..... | 111 |
| 4.2.3. Desarrollo de los cálculos de la caracterización..... | 112 |
| 4.2.4. Curva de trabajo del ventilador..... | 120 |
| 4.2.5. Pérdida de carga del sistema..... | 124 |
| 5. Rediseño y optimización de la cámara de pruebas del túnel de viento..... | 133 |
| 5.1. Descripción general de la actual zona de pruebas..... | 133 |
| 5.2. Proceso del funcionamiento de la actual zona de pruebas..... | 134 |

| | | |
|---|---|------------|
| 5.3. | Limitaciones del actual diseño de la zona de pruebas | 134 |
| 5.4. | Requerimientos para el nuevo diseño de la zona de pruebas | 135 |
| 5.5. | Análisis de optimización zona de pruebas..... | 135 |
| 5.6. | Descripción general del nuevo rediseño de la zona de pruebas | 138 |
| 5.7. | Componentes del rediseño de la zona de pruebas | 139 |
| 5.8. | Características de los componentes del rediseño la zona de pruebas | 140 |
| 5.8.1. | Cámara | 140 |
| 5.8.2. | Rodamiento | 141 |
| 5.8.3. | Mecanismo de giro de los objetos de estudio..... | 142 |
| 5.8.4. | Medidor de grados de inclinación | 143 |
| 5.9 | Aspectos incorporados para optimización de zona de pruebas..... | 144 |
| 6. Modelado 3d, simulación CFD y análisis aerodinámico aplicado a cuerpos geométricos utilizando el software SolidWorks..... | | 146 |
| 6.1. | Modelado 3D del túnel de viento..... | 146 |
| 6.2. | Procedimiento para la realización de simulación CFD utilizando el software SolidWorks | 147 |
| 6.3. | Generación del Mallado..... | 153 |
| 6.4. | Pos - procesamiento de Datos | 158 |
| 6.4.1. | Visualización de líneas de flujo aire | 158 |
| 6.5. | Diseño de perfil Naca 63 212..... | 162 |

| | |
|---|------------|
| 6.5.1. Explicación del diseño y construcción perfil naca..... | 162 |
| 6.6. Análisis de presión y velocidad al perfil con diferentes tipos de inclinación..... | 163 |
| 6.6.1. Simulación del perfil naca 63-212 sin inclinación..... | 164 |
| 6.6.2. Simulación del perfil naca 63-212 con una inclinación de -10 grados..... | 166 |
| 6.6.3. Simulación del perfil naca 63-212 con una inclinación de veinte grados..... | 168 |
| 6.7. Simulación de otros cuerpos geométricos..... | 170 |
| 6.7.1. Análisis de presiones cubo de madera Cara frontal | 170 |
| 6.7.1. Análisis de presiones cubo de madera Cara posterior | 171 |
| 6.7.2. Análisis de velocidades cubo de madera | 171 |
| 7. Guía de laboratorio referente a simulación en SolidWorks..... | 172 |
| Conclusiones | 173 |
| Bibliografía | 175 |

Lista de ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: metodología | 32 |
| Ilustración 2: Clasificación de ventiladores | 38 |
| Ilustración 3: Dimensiones accesorios ventilador..... | 40 |
| Ilustración 4: Estructura de soporte actual del túnel de viento | 53 |
| Ilustración 5: Masa de cada una de las partes que constituyen el túnel de viento | 58 |
| Ilustración 6: Diagrama con la fuerza distribuida que produce el ventilador | 59 |
| Ilustración 7: Diagrama de cuerpo libre (ventilador)..... | 60 |
| Ilustración 8: Corte de sección..... | 61 |
| Ilustración 9: Diagrama fuerza cortante (ventilador)..... | 62 |
| Ilustración 10: Diagrama momento flector (ventilador) | 64 |
| Ilustración 11: Diagrama con la fuerza distribuida que produce el difusor | 65 |
| Ilustración 12: Diagrama de cuerpo libre (difusor)..... | 66 |
| Ilustración 13: Corte de sección..... | 67 |
| Ilustración 14: Diagrama de fuerza cortante (difusor)..... | 68 |
| Ilustración 15: Diagrama de momento flector (difusor) | 69 |
| Ilustración 16: Diagrama con la fuerza distribuida que produce la cámara de ensayos ... | 70 |
| Ilustración 17: Diagrama de cuerpo libre (cámara de pruebas) | 71 |
| Ilustración 18: Corte de sección..... | 72 |
| Ilustración 19: Diagrama fuerza cortante (cámara de pruebas) | 73 |
| Ilustración 20: Diagrama de momento flector (cámara de pruebas)..... | 74 |
| Ilustración 21: Diagrama con la fuerza distribuida que produce la boquilla | 75 |
| Ilustración 22: Diagrama de cuerpo libre (boquilla)..... | 76 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 23: Corte de sección..... | 77 |
| Ilustración 24: Diagrama de fuerza cortante (boquilla) | 78 |
| Ilustración 25: Diagrama del momento flector (boquilla) | 79 |
| Ilustración 26: Viga unificada con todas las cargas distribuidas | 80 |
| Ilustración 27: Diagrama de cuerpo libre (Túnel de viento)..... | 80 |
| Ilustración 28: Corte de sección..... | 82 |
| Ilustración 29: Corte de sección 2..... | 83 |
| Ilustración 30: Corte de sección 3..... | 84 |
| Ilustración 31: Corte de sección 4..... | 85 |
| Ilustración 32: Diagrama de fuerza cortante (viga unificada) | 87 |
| Ilustración 33: Diagrama de momento flector (viga unificada)..... | 87 |
| Ilustración 34: Rediseño de la estructura de soporte | 95 |
| Ilustración 35: Identificación del perno a diseñar..... | 96 |
| Ilustración 36: Resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión..... | 99 |
| Ilustración 37: Fuente de las vibraciones en el túnel de viento | 102 |
| Ilustración 38: Triángulo de velocidades entrada | 112 |
| Ilustración 39: Triángulo de velocidad salida..... | 113 |
| Ilustración 40: Curva de trabajo del ventilador A..... | 122 |
| Ilustración 41 Curva de trabajo del ventilador B | 122 |
| Ilustración 42 Eficiencia mecánica del ventilador | 123 |
| Ilustración 43: Esquema general de los conductos donde está instalado el ventilador... | 124 |
| Ilustración 44: Medidas difusor | 125 |
| Ilustración 45: Zona de pruebas | 126 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 46: Difusor | 127 |
| Ilustración 47: Angulo apertura de la sección..... | 127 |
| Ilustración 48: Curva característica de la instalación | 130 |
| Ilustración 49: Punto de trabajo del ventilador..... | 131 |
| Ilustración 50: Descripción del punto de trabajo del ventilador | 132 |
| Ilustración 51: Zona de pruebas actual del túnel de viento..... | 133 |
| Ilustración 52: Zona de pruebas rediseñada..... | 138 |
| Ilustración 53: Componentes de la zona de pruebas vista isométrica frontal | 139 |
| Ilustración 54: Componentes de la zona de pruebas vista isométrica posterior | 140 |
| Ilustración 55: Cámara..... | 141 |
| Ilustración 56: Rodamiento rígido de bolas 6300..... | 141 |
| Ilustración 57: Mecanismo de giro | 143 |
| Ilustración 58: Medidor de grados | 143 |
| Ilustración 59: Modelo 3D Túnel de viento..... | 146 |
| Ilustración 60: Modelo 3D Una sola pieza | 147 |
| Ilustración 61: Límites del Volumen | 148 |
| Ilustración 62: Caras Lids | 148 |
| Ilustración 63: Selección Caras..... | 149 |
| Ilustración 64: Tipo Análisis..... | 150 |
| Ilustración 65: Tipos de fluido..... | 151 |
| Ilustración 66: Tipo Muro..... | 151 |
| Ilustración 67: Parámetros Simulación | 152 |
| Ilustración 68: Volumen Requerido..... | 152 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 69: Mesh | 153 |
| Ilustración 70: Malla..... | 153 |
| Ilustración 71: Tipo de Malla..... | 154 |
| Ilustración 72: Boundary Conditions | 154 |
| Ilustración 73: Condición de frontera | 155 |
| Ilustración 74: Pressure Openings | 155 |
| Ilustración 75: Surface Goals..... | 156 |
| Ilustración 76: Metas de Superficie | 156 |
| Ilustración 77: Variables Promedio | 157 |
| Ilustración 78: Goals | 157 |
| Ilustración 79: Procedimiento Nueva Simulación | 158 |
| Ilustración 80: Iteraciones Simulación..... | 158 |
| Ilustración 81: configuración líneas fluido | 159 |
| Ilustración 82: Túnel Velocidad..... | 160 |
| Ilustración 83: Túnel Presión | 160 |
| Ilustración 84: Túnel Líneas de Flujo | 161 |
| Ilustración 85 Túnel Cut Plot..... | 161 |
| Ilustración 86: Túnel de viento Cut Plot..... | 162 |
| Ilustración 87: Datos Plot Naca | 163 |
| Ilustración 88: Perfil Naca 63 -212..... | 163 |
| Ilustración 89: Perfil Naca 63 212 | 164 |
| Ilustración 90:Tunel de Viento | 164 |
| Ilustración 91: Naca Horizontal | 165 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 92: Perfil Horizontal | 165 |
| Ilustración 93: Perfil Horizontal | 166 |
| Ilustración 94: Naca -10 grados | 167 |
| Ilustración 95: Perfil -10 grados | 168 |
| Ilustración 96: Naca +20 Grados respecto a Y | 169 |
| Ilustración 97: Perfil inclinado 20 grados | 169 |
| Ilustración 98: Cubo Madera | 170 |
| Ilustración 99: Cubo de madera | 171 |

Lista de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Túnel de viento de circuito abierto tipo NPL, laboratorios de mecánica de fluidos en la Universidad Antonio Nariño | 28 |
| Tabla 2: Características de funcionamiento ventilador axial TAT 630/H | 40 |
| Tabla 3: Matrix QFD rediseño estructura de soporte..... | 55 |
| Tabla 4: Propiedades de acero de perfiles..... | 89 |
| Tabla 5: Propiedades y características del perfil estructural cuadrado | 94 |
| Tabla 6: Grado de confiabilidad | 99 |
| Tabla 7: Propiedades de los materiales elastómeros..... | 105 |
| Tabla 8: Parámetros característicos elastómeros | 105 |
| Tabla 9: Valores curva de trabajo del ventilador | 121 |
| Tabla 10: Perdida de carga..... | 130 |
| Tabla 11: Matriz QFD rediseño zona de pruebas | 136 |
| Tabla 12: Dimensiones rodamiento 6300 | 142 |
| Tabla 13: Comparación diseño zona de pruebas..... | 145 |

Índice de ecuaciones

| | |
|---|-----|
| Ecuación a: Fuerza | 59 |
| Ecuación b: Carga distribuida..... | 59 |
| Ecuación c: Ecuaciones de equilibrio eje x..... | 60 |
| Ecuación d: Ecuaciones de equilibrio eje y | 60 |
| Ecuación e: Ecuación de equilibrio de momento..... | 60 |
| Ecuación f: Esfuerzo de flexión | 90 |
| Ecuación g: Modulo de sección | 91 |
| Ecuación h: Esfuerzo | 91 |
| Ecuación i: Resistencia de fluencia para esfuerzos estáticos..... | 91 |
| Ecuación j: Esfuerzo de diseño | 93 |
| Ecuación k: Factor de diseño | 95 |
| Ecuación l: Esfuerzos cortantes fluctuantes..... | 97 |
| Ecuación m: Esfuerzo cortante | 98 |
| Ecuación n: Fuerza media..... | 98 |
| Ecuación o: Fuerza alternativa..... | 98 |
| Ecuación p: Resistencia en cortante..... | 98 |
| Ecuación q: Resistencia a la fatiga en cortante..... | 98 |
| Ecuación r: Área sección transversal perno | 100 |
| Ecuación s: Diámetro mínimo admisible..... | 101 |
| Ecuación t: Parte del peso que corresponde a cada soporte..... | 103 |
| Ecuación u: Velocidad angular | 103 |
| Ecuación v: Frecuencia estática | 103 |

| | |
|--|-----|
| Ecuación w: Deflexión estática..... | 105 |
| Ecuación x: Relación lado/altura | 106 |
| Ecuación y: Factor de forma rectángulo | 106 |
| Ecuación z: Modulo efectivo en compresión..... | 106 |
| Ecuación aa: Deflexión estática real | 106 |
| Ecuación bb: Área rectángulo | 107 |
| Ecuación cc: Coeficiente de rigidez total..... | 107 |
| Ecuación dd: Constante de rigidez..... | 107 |
| Ecuación ee: Frecuencia natural | 107 |
| Ecuación ff: Relación de frecuencias..... | 108 |
| Ecuación gg: Densidad del aire..... | 111 |
| Ecuación hh: Velocidad rodete periférica entrada | 113 |
| Ecuación ii: Velocidad rodete periférica salida | 113 |
| Ecuación jj: Velocidad absoluta meridional entrada | 113 |
| Ecuación kk: Angulo de los alabes entrada | 114 |
| Ecuación ll: Angulo de los alabes salida..... | 114 |
| Ecuación mm: Velocidad absoluta circunferencial salida | 114 |
| Ecuación nn: Velocidad relativa circunferencial salida..... | 114 |
| Ecuación oo: Velocidad circunferencial salida..... | 114 |
| Ecuación pp: Altura ventilador | 114 |
| Ecuación qq: Velocidad relativa entrada | 115 |
| Ecuación rr: Velocidad relativa radial salida | 115 |
| Ecuación ss: Velocidad absoluta entrada..... | 115 |

| | |
|--|-----|
| Ecuación tt: Velocidad absoluta salida | 115 |
| Ecuación uu: Angulo de ataque a la salida | 116 |
| Ecuación vv: Presión estática del rodete..... | 116 |
| Ecuación ww: Velocidad a la salida | 116 |
| Ecuación xx: Presión de velocidad | 117 |
| Ecuación yy: Presión total | 117 |
| Ecuación zz: Potencia de salida del motor..... | 117 |
| Ecuación aaa: Inercia rodete | 117 |
| Ecuación bbb: Torque ventilador..... | 118 |
| Ecuación ccc: Potencia requerida motor..... | 119 |
| Ecuación ddd: Eficiencia eléctrica..... | 119 |
| Ecuación eee: Eficiencia mecánica..... | 120 |
| Ecuación fff: Curva de trabajo del ventilador..... | 120 |
| Ecuación ggg: Perdida de carga boca campana | 125 |
| Ecuación hhh: Perdida de carga zona de pruebas | 126 |
| Ecuación iii: Angulo de apertura de la sección..... | 128 |
| Ecuación jjj: Perdida de carga difusor | 128 |
| Ecuación kkk: Perdida de carga total..... | 128 |
| Ecuación III: Perdida de carga secundaria | 129 |

Lista de anexos

| | |
|---|-----|
| Anexo A: Montaje de la estructura de soporte actual con el túnel de viento..... | 178 |
| Anexo B: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista isométrica | 179 |
| Anexo C: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista: superior | 180 |
| Anexo D: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista: frontal. | 181 |
| Anexo E: Cotización del rediseño de soporte del túnel de viento | 182 |
| Anexo F: Coeficiente de pérdida de carga de una boca campana..... | 183 |
| Anexo G: Diámetro equivalente de un conducto rectangular con igual pérdida de carga | 184 |
| Anexo H: Pérdida de carga en secciones graduales de sección | 185 |
| Anexo I: Lista de componentes zona de pruebas..... | 186 |
| Anexo J: Planos de fabricación cámara de pruebas | 187 |
| Anexo K: Plano de fabricación mecanismo de giro..... | 188 |
| Anexo L: Plano de fabricación medidor de grados..... | 189 |
| Anexo M: Cotización rediseño zona de pruebas..... | 190 |

Resumen

En la actualidad la universidad Antonio Nariño cuenta con un túnel de viento subsónico de ciclo abierto el cual está fuera de operación por el deterioro acumulado de sus componentes mecánicos y eléctricos, además, no posee la documentación que soporte las variables y parámetros operacionales de funcionamiento por lo cual la finalidad de este proyecto es realizar una completa caracterización teórica y modelado de su funcionamiento, para comprobar sus parámetros de operación, en específico analizando variables como rango de presiones generadas por cambio en las velocidades de flujo y coeficientes aerodinámicos, los cuales pueden ser aplicados a una simulación CFD en Flow Simulation de SolidWorks, que sirva de marco de referencia para los resultados obtenidos en una futura práctica en campo. Adicionalmente se pretende plantear una mejora en su funcionamiento, rediseñando la zona de prueba y su estructura de soporte, las cuales se han identificado presentan inconvenientes y fallas técnicas. Consecuentemente se generará un documento guía tipo tutorial, que recrea la simulación CFD de forma que pueda ser replicada por estudiantes y docentes del área por medio de una experiencia de aprendizaje.

Palabras clave: Túnel de Viento, Simulación CFD, Diseño Mecánico, Mecánica de Fluidos, Aerodinámica.

Abstract

Currently, the Antonio Nariño University has an open cycle subsonic wind tunnel, which is out of operation due to the accumulated deterioration of its mechanical and electrical components, in addition, it does not have the documentation that supports the variables and operational parameters of operation, so the purpose of this project is to perform a complete theoretical characterization and modeling of its operation, to check its operating parameters, specifically analyzing variables such as range of pressures generated by changes in flow velocities and aerodynamic coefficients, which can be applied to a CFD simulation in Flow Simulation of SolidWorks, to serve as a frame of reference for the results obtained in a future practice in the field. Additionally, it is intended to propose an improvement in its operation, redesigning the test area and its support structure, which have been identified as having drawbacks and technical failures. Consequently, a tutorial type guide document will be generated, which recreates the CFD simulation so that it can be replicated by students and teachers of the area through a learning experience.

Key words: Wind Tunnel, CFD Simulation, Mechanical Design, Fluid Mechanics, Aerodynamics.

1. Introducción

Dada la importancia y versatilidad de las máquinas hidráulicas, para la experimentación de fenómenos propios de la mecánica de fluidos, en el programa de mecánica de la Universidad Antonio Nariño en el año de 2010 se realizó la implementación del túnel de viento con el nombre del proyecto "influencia del número y orientación angular de los álabes externos en el desempeño de un pico turbina eólica tipo savonius modificada" de autoría de los estudiantes Sandro Murcia, Argemiro Quitian y Rodrigo Uriel el cual se encuentra en la Sede sur de la UAN, laboratorio de máquinas hidráulicas y mecánica de fluidos. Sin embargo, debido a factores externos y de malas prácticas de mantenimiento en años recientes su funcionamiento se ha deteriorado seriamente al punto de estar técnicamente inservible en las condiciones actuales.

El uso y aprovechamiento de la máquina se encuentra suspendido debido al deficiente estado de sus componentes electromecánicos en las que, por ejemplo, se encuentra: estructura de soporte inestable, defectos en la instalación y sello en las secciones de succión, pruebas y expansión, daño en la malla de seguridad que protege el rotor del ventilador, tablero electrónico de mando con conexiones y partes faltantes, entre otros. Así pues, se considera que la labor de readecuación y actualización de esta máquina a óptimas condiciones operativas es fundamental para soportar las labores educativas, prácticas de los estudiantes, e investigaciones por parte del personal de la FIMEB en la universidad.

Las mejoras propuestas para implementar en el túnel de viento mencionado, es la caracterización matemática del funcionamiento del túnel, efectuando el modelado 3D y simulación CFD por medio de SolidWorks para verificar las características de su flujo de aire, coeficientes

de arrastre y sustentación de un cuerpo de estudio, optimizar la operación y manipulación de la zona de pruebas, rediseñar la estructura de soporte y zona de succión para adaptación de toma de aire y se elaboración de un tutorial por medio de SolidWorks para realizar experiencias de aprendizaje.

1.1.Planteamiento del Problema

En la universidad Antonio Nariño la facultad de ingeniería mecánica electrónica y biomédica (FIMED) continuamente se elaboran proyectos académicos producto de los semilleros de investigación y también del trabajo de grado de los estudiantes; muchos de estos son conducidos a los laboratorios de sus respectivas líneas de acción, para el mejor aprovechamiento de estos, contribuyendo con un mejor aprendizaje de los estudiantes.

Debido a cambios tanto estructurales como de organización de la facultad varios traslados se han efectuado entre ellos el de algunos laboratorios, lo que se ocasionado es que la maquinaria se ha venido deteriorando, la falta de un mantenimiento preventivo, el deterioro por el uso y otros factores externos hayan quedado rezagados y en algunos casos almacenados dejando vacíos en las áreas que contribuyen. Al investigar mejor se encuentra entonces la necesidad de realizar mejoramiento de un túnel de viento tipo NPL por succión, el cual fue desarrollado a partir de la elaboración de un trabajo de grado. Actualmente el túnel de viento no se encuentra en las mejores condiciones mecánicas, eléctricas y de seguridad para la operación para el aprovechamiento de los estudiantes. Se deben intervenir varias zonas de este que están afectadas para garantizar un buen funcionamiento, además, se quiere incorporar nuevos elementos que lo complementen facilitando su uso y por ende mayor aprovechamiento de la máquina.

La maquinaria se encuentra en un mal estado y no está trabajando, lo que se desea es recomponer y optimizar el estado funcional del túnel para que pueda ser utilizado en los laboratorios por medio de una caracterización matemática del funcionamiento del ventilador, un

modelado CFD y un rediseño de la zona de pruebas, lo anterior posteriormente sirva para realizar investigaciones de mecánica de fluidos, máquinas hidráulicas, aerodinámica entre otros.

1.2. Justificación

El túnel de viento es considerado un instrumento útil para la investigación de los efectos del flujo de aire según Álvarez (2012) afirma que un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental científica-tecnológica cuyo funcionamiento está basado a estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos, es decir, con este dispositivo se hacen simulaciones en condiciones experimentales del objeto que podrán llevarse a cabo en una situación real.

La finalidad de los ensayos en túnel aerodinámico es suministrar información sobre las particularidades del flujo en las proximidades del cuerpo en consideración, proveer información sobre la distribución de presiones y sobre las cargas globales producidas por la corriente en el obstáculo objeto de interés y, si el objeto del ensayo es flexible y susceptible de experimentar fenómenos Aero elásticos (la respuesta dinámica de las estructuras ante fuerzas aerodinámicas), así como proporcionar los datos necesarios sobre las vibraciones inducidas por el flujo. (Ruiz, 2007).

Como es conocido, la certificación de los ensayos realizados en el túnel de viento con modelos a escala real requiere varios factores. Álvarez (2011) precisa que tales requerimientos son: semejanzas geométricas, cinemática, y dinámica entre el flujo del modelo y el flujo alrededor del obstáculo real.

En la Universidad Antonio Nariño la facultad de ingeniería mecánica, electrónica, y biomédica (FIMED) cuenta con una diversidad de laboratorios como apoyo fundamental a la educación de sus integrantes, entre estos laboratorios se encuentra el de máquinas hidráulicas, el cual conserva diversos equipos entre ellos permanece un túnel de viento, ver ilustración 1.

Tabla 1: Túnel de viento de circuito abierto tipo NPL, laboratorios de mecánica de fluidos en la Universidad Antonio Nariño



Fuente: Autores

El túnel de viento previamente mencionado tiene las siguientes características: sección de contracción de geometría cuadrada con un área transversal de 0.991m^2 longitud de 0.5 m ; sección de pruebas de geometría cuadrada con un área transversal de 0.23m^2 longitud de 0.56m ; y difusor de geometría circular con un área transversal de 0.32 m^2 longitud de 2 m ; el parámetro de la velocidad de operación no debe exceder los 7 m/s .

Con el rediseño de la estructura de soporte se mejora considerable una manipulación más segura y eficiente de la máquina, al reducir: ruidos, vibraciones, pérdidas de flujo de aire y dándole un sitio definitivo a su ubicación dentro del laboratorio. Con el rediseño, modelado y simulación 3D de la zona de pruebas se busca una visualización mejor de los perfiles de viento, ayudando de una forma más práctica y óptima en la apertura y cierre de la misma, el nuevo mecanismo que se diseñó permite de una forma más práctica cambiar la inclinación de los objetos de estudio sin necesidad de destapar dicha parte. Con la caracterización matemática de los parámetros de

dimensionamiento del ventilador de flujo axial se busca un soporte teórico basado en un modelo numérico, para la comprobación práctica del funcionamiento del túnel. Con la ejecución del modelamiento en 3D y simulación por medio el software SolidWorks con la herramienta Flow Simulation de todo el túnel de viento, se consigue tener un medio alternativo de experimentación que favorezca ampliar el uso práctico de la máquina, recreando los parámetros de funcionamiento, adaptando un análisis aerodinámico de algunos cuerpos geométricos. La creación de una guía tipo tutorial es pensada para que en un futuro los usuarios interesados puedan copiar su modelo propio y posteriormente aplicarlo a unas prácticas de aprendizaje.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Rediseñar la estructura, caracterizar y modelar el funcionamiento del túnel de viento subsónico de ciclo abierto tipo NPL por succión de 2 Hp de potencia situado en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Antonio Nariño sede sur.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Rediseñar la estructura de soporte.
- ✓ Rediseñar y optimizar la zona de pruebas de 560 x 540 [mm] del túnel de viento adaptando un mecanismo funcional de manipulación externa.
- ✓ Caracterizar matemáticamente los parámetros del ventilador de flujo axial y cálculo teórico de la curva de trabajo.
- ✓ Efectuar el modelado 3D, simulación CFD y análisis aerodinámico aplicado a cuerpos geométricos para el funcionamiento del túnel de viento utilizando la herramienta Flow Simulation del software SolidWorks.
- ✓ Elaborar una guía de trabajo tipo tutorial de la simulación CFD en Flow Simulation de SolidWorks enfocada a experiencias de aprendizaje para prácticas de laboratorio.

1.4.Alcance

En este proyecto, se realizará una caracterización matemática del funcionamiento para elaborar la curva característica de trabajo del ventilador de flujo axial que posee el túnel. Con la simulación CFD se pretende obtener parámetros teóricos utilizando Solid Works con la función Flow Simulation que nos permite verificar características de flujo de aire, coeficientes de arrastre y sustentación del perfil aerodinámico, al verificar los parámetros anteriores se puede observar como resultado los vórtices creados por el tipo de flujo trabajado. La optimización de la zona de pruebas será propuesta de forma que se permita mejorar el acceso y manipulación de los perfiles/cuerpos objeto de estudio, de forma que se tenga una mejor visualización de los efectos aerodinámicos; la zona de pruebas será diseñada y modelada en un material acrílico translúcido que facilita ver las corrientes de flujo creadas al interactuar con los cuerpos en estudio; además, con el rediseño de la estructura de soporte del túnel y la zona de succión de toma de aire en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Sede Sur de la UAN, se espera reducir las vibraciones, aprovisionar una alimentación de aire directamente de la atmósfera o espacio libre, reducir las pérdidas de flujo en los sellos de las uniones estructurales, también como, aumentar el nivel de seguridad al momento su operación reduciendo el ruido y delimitando una zona específica para su manipulación.

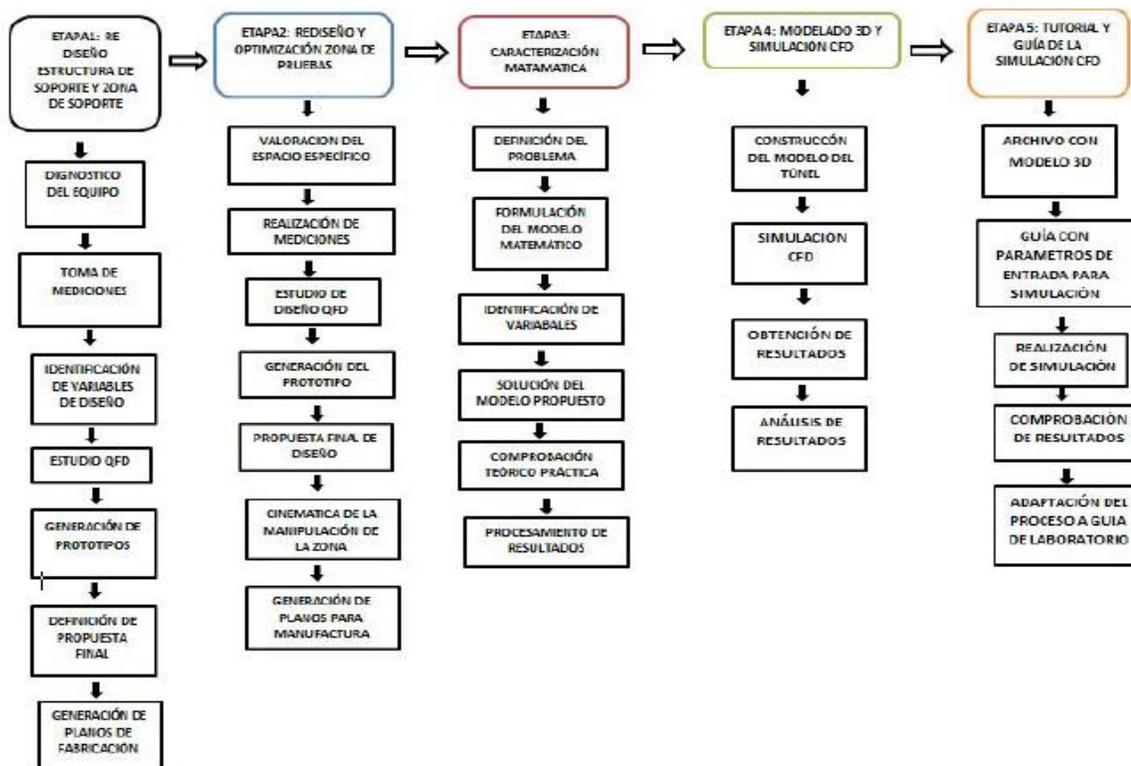
Como complemento, este documento procederá a elaborar una guía tipo tutorial del proceso de simulación CFD del túnel de viento, para permitir a futuros estudiantes e interesados en la materia verificar las características del flujo de aire generado por el túnel, determinación de coeficientes de arrastre y sustentación de algunos cuerpos objeto estudio, en conjunto al análisis de los resultados teórico-prácticos.

1.5. Metodología

El marco de trabajo metodológico inicia con un diagnóstico general del equipo basándose primordialmente en fuentes de información primarias tales como: la recolección personal de datos en los que se encuentran, mediciones y dimensionamiento del equipo en conjunto a la evaluación del estado funcional de sus componentes; también, se utilizan fuentes de información secundaria, como lo son trabajos de grado previos, bibliografía relacionada con los temas de mecánica de fluidos, máquinas hidráulicas y aerodinámica.

Se plantean cinco (5) etapas de desarrollo a ejecutar en este proyecto las cuales están en función de cada uno de los objetivos específicos establecidos, estas son descritas en el siguiente diagrama de flujo:

Ilustración 1: metodología



Fuente: Autores

Primera etapa: Concerniente al rediseño estructural del túnel, se plantean las siguientes operaciones: diagnóstico actual de la máquina, toma de mediciones para identificación de variables de diseño como lo son peso y dimensiones del túnel, estudio QFD para generación de prototipos y ponderación de variables de calidad, definición de propuesta final de diseño y comprobación de resistencia mediante análisis de elementos finitos FEM, generación de planos de fabricación, cotización de materiales y manufactura.

Segunda etapa: pertinente a la optimización y rediseño de la zona de prueba del túnel de viento, se desarrollaran las siguientes operaciones: valoración del espacio en el que se trabajará, verificación del estado de la zona intervenida, realización de mediciones correspondientes, estudio QFD para la generación de un prototipo funcional para la posterior propuesta final de diseño acompañado de una simulación cinemática en SolidWorks la cual permita verificar la manipulación de la zona de pruebas y cuerpos geométricos objeto de estudios, finalizando con la generación de planos y cotización para manufactura.

Tercera etapa: referida a la caracterización matemática la cual maneja un modelo empírico llevando consecutivamente las siguientes actividades: identificación del problema a estudiar en cual se basa en obtener los parámetros de funcionamiento teóricos del ventilador axial que posee el túnel de viento, formulación de un modelo con elementos matemáticos que representen el problema de estudio incluyendo las variables más relevantes como lo son caudal [Q], presión [P], velocidad de flujo[V] entre otras, análisis numérico soportado en la teoría de la Mecánica de Fluidos principalmente, procesamiento de los datos obtenidos para generación curva de trabajo del ventilador.

Cuarta etapa: enlazado al modelado 3D y la simulación CFD, se ejecutarán subsecuentemente estos pasos: Inspección del equipo, obtención de medidas, creación de modelo 3D a escala real en el software SolidWorks, creación de modelo 3D de los cuerpos geométricos a usar en la simulación CFD, exportar los modelos CAD a la herramienta Flow Simulation, cargar parámetros de funcionamiento del túnel a la simulación CFD, realizar el pre alistamiento de los cuerpos geométricos objeto de análisis aerodinámico, ejecutar la simulación hasta verificar convergencia en los resultados, análisis y pos- procesamiento de datos obtenidos de la simulación, discusión de resultados comparando con el modelamiento matemático previo.

Quinta etapa: relacionado a la realización de una guía tipo tutorial de trabajo se llevará a cabo de la siguiente manera, generación del modelado 3D indicando en la guía los parámetros de entrada necesarios para la simulación, se adaptará una práctica de laboratorio en la que se podrá verificar el proceso de forma virtual.

2. Marco Teórico

2.1. El diseño mecánico

Procedimiento de escoger partes mecánicas para posteriormente reunirlos y alcanzar un propósito anhelado, la mayoría de las veces las piezas de las maquinas deben tener un grado de adaptabilidad, esto quiere decir que entre ellas se puedan conjugar y formar otra. Los diseñadores no solo deben hacer responsable del mecanismo u objeto que tuvieron de tarea su diseño, sino que también son responsables del buen desempeño que esta tenga cuando este interactuando con las demás, lo que quiere decir que un diseñador debe contemplar en sus cálculos de diseño las variables que las demás piezas tienen.

2.1.1. Metodología para un diseño.

- ✓ Filosofía de un diseño seguro
- ✓ Función primordial que debe cumplir el nuevo diseño (objetivo de construcción)
- ✓ Determinación del ambiente donde estará prestando la función el diseño realizado
- ✓ Caracterización y naturaleza de todas las cargas que va a tener que soportar dicho elemento
- ✓ Cálculo de las magnitudes de las fuerzas bajo unas condiciones de operación
- ✓ Análisis y determinación de cargas para identificación de tipos de esfuerzos
- ✓ Geometría básica de los elementos que conforman el nuevo diseño
- ✓ Indicar el material o materiales con que va a ser construido dicha estructura, especificando todas las propiedades de interés
- ✓ Indicar un factor de diseño (N), siguiendo criterios técnicos
- ✓ Especificar algún método de análisis de esfuerzo
- ✓ Calcular el esfuerzo de diseño basado en métodos ya existentes
- ✓ Proponer un diseño considerando todos los anteriores requisitos.
- ✓ Análisis de esfuerzos requeridos, en los puntos donde los valores puedan ser grandes y afecten el diseño
- ✓ Decir el método más factible para la fabricación de la nueva estructura
- ✓ Documentación de diseño final con la construcción de planos de fabricación

- ✓ Especificación de costos de los materiales y valor de manufactura

2.1.2. Filosofía de un diseño seguro

Es de entero compromiso por parte de los diseñadores de la estructura que va a servir de soporte a todas las partes del túnel de viento, garantizar que dicho diseño sea adecuado y seguro para el funcionamiento óptimo bajo unas condiciones previstas. La totalidad de los métodos empleados por los creadores de este diseño en particular, tienen como fin último asegurar que los valores de los esfuerzos sean menores que los valores de fluencia del material de construcción (acero). Si es necesario realizar un análisis aparte de algún segmento en especial que afecte en alguna medida el funcionamiento adecuado del total de la estructura, se realizará la respectiva revisión.

2.1.3. Función principal y objetivo del diseño de la estructura

Objetivo: Diseñar una estructura

Función principal que debe satisfacer el diseño de la estructura: Servir como soporte de todos los componentes (difusor, boquilla, cámara de pruebas, ventilador, etc.) que hacen parte del túnel de viento, brindándole así un mayor grado de eficiencia al funcionamiento de este.

2.1.4. Esfuerzos directos.

Un esfuerzo es la firmeza interior que brinda una unidad de área de un elemento contra una fuerza externa aplicada. Existe esfuerzos normales de tensión que se les otorga signo positivo a la hora de hacer cálculos y esfuerzos de compresión negativos.

2.1.5. Esfuerzos debido a flexión.

Las estructuras posicionadas horizontalmente (vigas) en su mayoría de veces soportan cargas que transversales a su eje, estas fuerzas producen momentos de flexión en la estructura

(viga), que consecuentemente generan momentos de flexión. Los esfuerzos de flexión pueden ser de naturaleza normales tanto de tensión como de compresión.

2.1.6. Esfuerzos estáticos

Se produce cuando a un componente se le somete a una carga aplicada muy lentamente sin que se produzca algún tropiezo.

2.1.7. Esfuerzo repetido e invertido

Se genera cuando en algún componente se le somete a un esfuerzo de tensión e inmediatamente a un esfuerzo de compresión. Si esta variación de esfuerzos sucede muchas ocasiones se le denomina esfuerzo repetido e invertido.

2.1.8. Esfuerzo fluctuante

Se genera a partir de que a un objeto se le exponga a un esfuerzo alternativo con una variación de fuerza.

2.2. Ventiladores

2.2.1. Generalidades

Los ventiladores son maquinas que al hacer rotar sus hélices pueden mover una cierta cuantía de aire, a esta cantidad de fluido le transmite una cierta presión que le ayuda a vencer las pérdidas de carga.

2.2.2. Clasificación de los ventiladores

- ✓ Extractores: Como su nombre lo indica son aquellos que extraen el aire de algún recinto o cámara y le expulsa a la atmosfera.
- ✓ Impulsores: Son aquellos que impulsan el aire desde la atmosfera y lo introducen al ducto que esté conectado.
- ✓ De chorro: Ventiladores que suministran una determinada ráfaga de aire sobre algún objeto o una persona.

- ✓ Centrífgos: Ventilador en donde el fluido entra de manera axial y sale de este en forma perpendicular.
- ✓ Axiales: La entrada y la salida del fluido no cambia su dirección.
- ✓ De baja, mediana y alta presión: Ventiladores que ofrecen un rango de presiones desde 72 mm c.d.a. hasta 360 mm c.d.a.

Ilustración 2: Clasificación de ventiladores



Fuente: Soler & Palau. volumen 6

2.2.3. Curva característica

Es una característica muy importante de un ventilador, donde se pone a funcionar la máquina en unas condiciones iniciales estandarizadas, registrando los valores a diferentes caudales de funcionamiento, según se vayan presentando las pérdidas de carga que deba dominar.

No solo la curva de caudal versus presión hace parte de la curva de trabajo, sino que también hace parte la de potencia absorbida del ventilador, porcentaje de rendimiento del ventilador, entre otras.

2.2.4. Punto de trabajo del ventilador

Para poder dar se cuenta en qué condiciones está funcionando el ventilador, es necesario conocer la curva resistente a la instalación, esta curva relaciona la perdida de carga de la instalación con el caudal que tiene esta. Para hallar el punto de trabajo superponiendo la curva característica y la curva resistente del conducto.

2.2.5. Identificación del ventilador del túnel de viento

El ventilador que posee el túnel de viento de la facultad de ingeniería mecánica es un ventilador conocido en la industria como TAT 630/H de tipo axial. (Anexo Digital C)

2.2.6. Generalidades ventilador TAT 630/H

Ventilador extractor con motor exterior, este tipo de máquinas de tubo axiales han sido desarrolladas para manejo de aire en conductos de sistemas de ventilación comercial o industrial, calefacción y aire acondicionado. Brindan grandes prestaciones de caudal y una presión media que garantiza una alta eficiencia de funcionamiento.

2.2.7. Características ventilador TAT 630/H

- ✓ Hélice fabricada por método de inyección de aluminio, lo cual brinda resistencia a la corrosión, bajo peso, ideal para el tipo de arreglo anti chispa, debido a la ausencia de material ferroso.
- ✓ Protección de poleas y bandas
- ✓ Motor externo al paso del aire
- ✓ Carcasa tubular fabricada en acero.

2.2.8. Aplicaciones

Instalaciones en ducto, donde sea necesario la impulsión o extracción de aire, también es utilizado en:

- ✓ Campanas extractoras
- ✓ Procesos industriales

- ✓ Cuartos de pintura
- ✓ Estacionamientos

2.2.9. Características técnicas

Las características de funcionamiento se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 2: Características de funcionamiento ventilador axial TAT 630/H

| Modelo | Velocidad RPM | Potencia HP | Tensión Volts | Intensidad A | Caudal de descarga m3/hr/CFM | Potencia sonora LwA | Peso aprox Kg |
|--------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------|------------------|
| TAT 630/H | 1300 | 2 | 208- 230/460 | 6.2/3.1 | 14285/8408 | 92.2 | 62 |

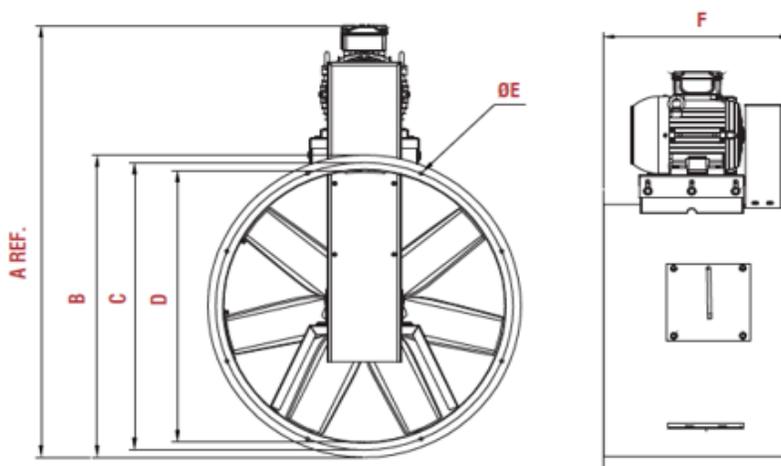
Fuente: Manual de ventilación Soler y Palau volumen 6

2.2.10. Dimensiones y accesorios

A continuación, se presentan las dimensiones del ventilador axial que hace parte de túnel de viento, todas las medidas están en milímetros.

Ilustración 3: Dimensiones accesorios ventilador

| Modelo | A | B | C | D | ØE | F |
|--------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| TAT 630/H | 900 | 710 | 670 | 630 | 11 | 430 |



Fuente: Manual de ventilación Soler y Palau volumen 6

2.2.11. Leyes aplicables al ventilador

Caudal

$$Q = A \times V \quad (1)$$

Q : Caudal

A : Área sección transversal del ducto

V : Velocidad del aire

Presión

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

F : Fuerza

A : Área

Densidad del aire

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (3)$$

Peso específico

$$\gamma = \frac{w}{V} \quad (4)$$

w : Peso

V: Volumen

Rapidez de flujo de peso

$$W = \gamma \times Q \quad (5)$$

γ : Peso específico

Q: Caudal

Rapidez de flujo de masa

$$M = \rho \times Q \quad (6)$$

ρ : Densidad

Q: Caudal

Velocidad del rodete periférica circunferencial a la entrada

$$u_1 = \frac{\pi \times D_1 \times n}{60} \quad (7)$$

D₁: Diámetro de entrada del ventilador

n: Velocidad (revoluciones/ minuto)

π : Numero pi

Velocidad del rodete periférica circunferencial a la salida

$$u_2 = \frac{\pi \times D_2 \times n}{60} \quad (8)$$

D₂: Diámetro de salida del ventilador

n: Velocidad (revoluciones/ minuto)

π : Numero pi

Velocidad absoluta meridional a la entrada

$$c_{1m} = \frac{Q}{\pi \times b_1 \times D_1} \quad (9)$$

D_2 : Diámetro de salida del ventilador

Q : Caudal

b_1 : Ancho del rodete a la entrada

Angulo de los alabes a la entrada

Para la obtención del ángulo de los alabes a la entrada se debe observar el triángulo de velocidades a la entrada del fluido, respectivamente para este caso se usa la siguiente formula:

$$\tan \beta_1 = \frac{c_{1m}}{u_1} \quad (10)$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{c_{1m}}{u_1} \quad (11)$$

c_{1m} : Velocidad absoluta meridional a la entrada

u_1 : Velocidad periférica del rodete a la entrada

Angulo de los alabes a la salida

Para la obtención del ángulo de los alabes a la salida se procede a realizar el siguiente procedimiento:

$$r_1 \cos \beta_1 = r_2 \cos \beta_2 \quad (12)$$

$$\cos \beta_2 = \frac{r_1}{r_2} \cos \beta_1 \quad (13)$$

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r_1}{r_2} \times \cos \beta_1 \right) \quad (14)$$

β_1 : Angulo de los alabes a la entrada

r_1 : Radio del diámetro a la entrada del ventilador

r_2 : Radio del diámetro a la salida del ventilador

Velocidad absoluta circunferencial a la salida

Para obtener esta velocidad se debe observar el triángulo de velocidades a la salida, se obtiene:

$$Q = \pi \times D_1 \times b_1 \times c_{1m} = \pi \times D_2 \times b_2 \times c_{2m} \quad (15)$$

$$c_{2m} = \frac{\pi \times D_1 \times b_1 \times c_{1m}}{\pi \times D_2 \times b_2} \quad (16)$$

D_1 : Diámetro de entrada del ventilador

b_1 : Ancho del rodete a la entrada

c_{1m} : Velocidad absoluta meridional a la entrada

π : Número pi

D_2 : Diámetro de salida del ventilador

b_2 : Ancho del rodete a la salida

Velocidad relativa circunferencial a la salida

Para obtener esta velocidad se debe observar el triángulo de velocidades a la salida, se obtiene:

$$\tan \beta_2 = \frac{c_{2m}}{w_{2u}} \quad (17)$$

$$w_{2u} = \frac{c_{2m}}{\tan \beta_2} \quad (18)$$

c_{2m} : Velocidad absoluta meridional a la salida

β_2 : Angulo de los alabes a la salida

Velocidad absoluta circunferencial a la salida

Para obtener esta velocidad se relaciona con la velocidad periférica circunferencial menos la velocidad relativa circunferencial, las velocidades mencionadas son a la salida del ventilador esto se evidencia así:

$$c_{2u} = u_2 - w_{2u} \quad (19)$$

u_2 : Velocidad periférica del rodete a la salida

w_{2u} : Velocidad relativa circunferencial a la salida

Angulo de ataque a la entrada del fluido

Como la entrada del fluido es radial el ángulo α_1 tiene una apertura de 90 grados

$$\alpha_1 = 90^\circ \quad (20)$$

Velocidad relativa radial a la entrada

De acuerdo con el triángulo de velocidades, esta velocidad es obedece a la siguiente formula:

$$w_1 = \left(\frac{c_{1m}}{\text{sen}(\beta_1)} \right) \times \text{sen} \alpha_1 \quad (21)$$

c_{1m} : Velocidad absoluta meridional a la entrada

β_1 : Angulo de los alabes a la entrada

α_1 : Angulo de ataque a la entrada del fluido

Velocidad relativa radial a la salida

Se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$w_2 = \left(\frac{c_{2m}}{\text{sen}(\beta_2)} \right) \quad (22)$$

c_{2m} : Velocidad absoluta meridional a la salida

β_2 : Angulo de los alabes a la salida

Velocidad absoluta a la entrada

$$c_1^2 = \left(u_1^2 + w_1^2 - 2(u_1 \times w_1 \cos(\beta_1)) \right) \quad (23)$$

u_1 : Velocidad periférica del rodete a la entrada

w_1 : Velocidad relativa radial a la entrada

β_1 : Angulo de los alabes a la entrada

Velocidad absoluta a la salida

$$c_2^2 = c_{2u}^2 + c_{2m}^2 \quad (24)$$

c_{2u} : Velocidad absoluta circunferencial a la salida

c_{2m} : Velocidad absoluta meridional a la salida

Angulo de ataque a la salida del fluido

Para la obtención del ángulo de ataque de los alabes a la salida se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{sen} \alpha_2 = \left(\frac{w_{2u} \times \text{sen} \beta_2}{c_2} \right) \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{w_{2u} \times \text{sen} \beta_2}{c_2} \right) \quad (26)$$

w_{2u} : Velocidad relativa circunferencial a la salida

β_2 : Angulo de los alabes a la salida

c_2 : Velocidad absoluta a la salida

Altura del ventilador

$$H_u: \frac{u_2 \times c_{2u} - u_1 \times c_{1u}}{g} \quad (27)$$

u_2 : Velocidad del rodete periférica circunferencial a la salida

c_{2u} : Velocidad absoluta circunferencial a la salida

u_1 : Velocidad del rodete periférica circunferencial a la entrada

c_{1u} : Velocidad absoluta circunferencial a la entrada

g : Gravedad

Presión estática del rodete

La presión estática experimental es medida con instrumentos especializados en dicha tarea, la presión estática teórica la describe la siguiente ecuación:

$$P_t = \left(\left(\frac{\rho}{2} \right) \left((u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2) \right) \right) \quad (28)$$

ρ : Densidad del aire

u_2 : Velocidad del rodete periférica circunferencial a la salida

u_1 : Velocidad del rodete periférica circunferencial a la entrada

w_1 : Velocidad relativa radial a la entrada

w_2 : Velocidad relativa radial a la salida

Velocidad a la salida

$$V = \frac{Q}{A_2} \quad (29)$$

Q: Caudal

A₂: Área del diámetro a la salida

Presión de velocidad

$$Vp = \left(\frac{V}{4005} \right)^2 \quad (30)$$

V: Velocidad a la salida

Presión total

$$Tp = P_t + Vp \quad (31)$$

Dónde:

P_t: Presión estática del rodete

Vp: Presión de velocidad

Potencia de salida del motor

$$P_{out} = \left(\frac{Q \times Tp}{6356} \right) \quad (32)$$

Q: Caudal

Tp: Presión total

Masa del rodete

$$w = \pi \left((r_2^2 - r_1^2) \times b \times g \times \rho \right) \quad (33)$$

r₂: Radio del diámetro a la salida del ventilador

r₁: Radio del diámetro a la entrada del ventilador

b: Ancho del rodete a la entrada

g: Gravedad

ρ : Densidad del material

Rango de giro del rodete

$$k = \sqrt{\frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2}} \quad (34)$$

r_2 : : Radio del diámetro a la salida del ventilador

r_1 : Radio del diámetro a la entrada del ventilador

Inercia del rodete

$$i = w \times k^2 \quad (35)$$

w: Masa del rodete

k: Rango de giro del rodete

Sustituyendo las ecuaciones de la masa y del rango de giro del rodete tenemos que la inercia nos queda así:

$$i = \left(\frac{(\pi(r_2^4 - r_1^4) \times b \times g \times \rho)}{2 \times (1,0)} \right) \quad (36)$$

Torque del motor que posee el ventilador

$$T = \left(\frac{i(n_1 - n_2)}{\left(\frac{1}{2\pi}\right) \times t} \right) \quad (37)$$

i: Inercia del rodete

n_1 : Numero de revoluciones iniciales

n_2 : Numero de revoluciones finales

t: Tiempo

Potencia requerida del motor

$$P = \left(\frac{T \times n}{\frac{60}{2\pi}} \right) \quad (38)$$

T:Torque del motor

n: Número de revoluciones

Eficiencia eléctrica del motor

$$Ef = \left(\frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I \times fp} \right) \quad (39)$$

P:Potencia requerida del motor

V:Voltaje

I:Corriente

fp:Factor de potencia

Eficiencia mecánica del motor

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (40)$$

P_{out}: Potencia de salida del motor

P_{in}: Potencia de entrada del motor

Curva de trabajo del ventilador

$$P_{est} = \left(V^2 - \left(\frac{V_2 \times \cot(\beta_2) \times Q}{(2\pi \times r_2 \times b_2)} \right) \right) \rho \quad (41)$$

V: Velocidad a la salida

β_2 : Angulo de los alabes a la salida

Q : Caudal

r_2 : Radio del diámetro a la salida del ventilador

b_2 : Ancho del rodete a la salida

ρ : Densidad del aire

Presión dinámica

$$Pd = \left(\frac{v}{4,04} \right)^2 \quad (42)$$

v : Velocidad del fluido.

2.3.CFD

La dinámica de fluidos computacional (del inglés CFD- Computational Fluid Dynamics) consiste en analizar numéricamente (física matemática, métodos numéricos, interfaces de usuarios y técnicas de visualización) sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados (reacciones químicas, combustión y Aero acústica) (. ast INGENIERÍA, 2019). Una de las grandes ventajas de las simulaciones CFD es que permite realizar diseños y construir prototipos con el fin de evaluarlos sin inversiones de dinero considerables.

2.4.Aerodinámica

La aerodinámica es la parte de la física que estudia las reacciones de un fluido sobre los cuerpos (un sólido o superficie) que se mueven sobre o a través él (DA RIVA DE LA CAVADA, 1991).la aerodinámica indica (Carrera Akutain, Hualde Garaikoetxea, & Mateos Pastor):

- La resistencia que es la componente de la fuerza sobre el obstáculo en dirección y sentido del viento relativo. En obstáculos que se mueven a través del viento (un avión, un coche,

un tren, un ciclista, una bola de golf, un balón,) dicha fuerza se opone al avance. En la mayoría de los casos interesa reducirla. (DA RIVA DE LA CAVADA, 1991)

- Cuanto se pega (sustentación o lift) al suelo o despega (carga aerodinámica o downforce) de él

Estas dos características son modificadas si hay cambio en la presión o la velocidad del fluido.

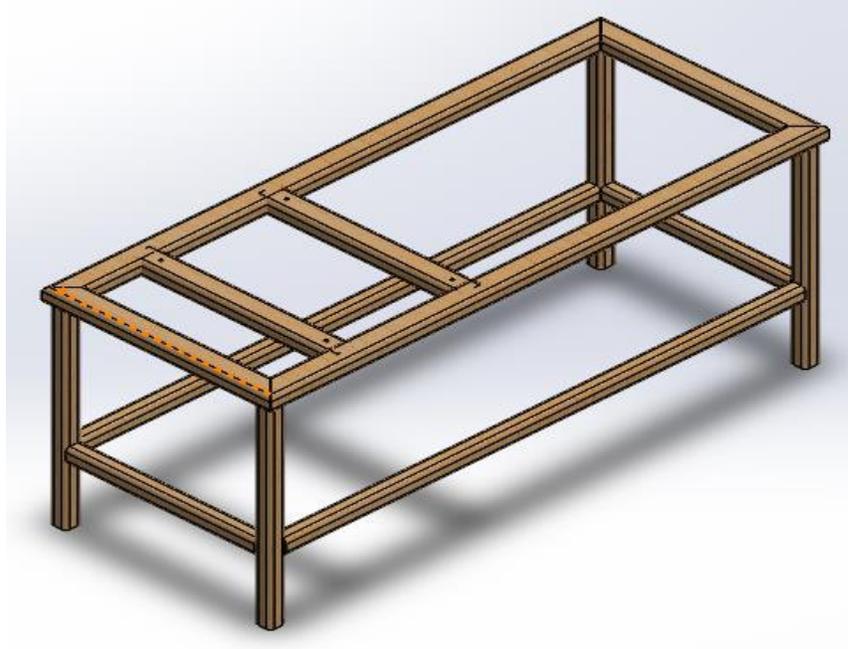
3. Rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento

Se optó por una condición crítica extrema debido al caso de que solo hay dos puntos apoyos en cada uno de los extremos en el cual se realizó un nuevo replanteamiento en el la estructura en la cual ahora cuenta con tres apoyos en el cual uno de los principales soportaría la zona de pruebas y los dos resultantes se ubican en el inicio y final del túnel de viento rediseñado

3.1.Detalle general de la actual estructura de soporte del túnel de viento

La estructura de soporte actual (ver imagen) que tiene instalado el túnel de viento, consta de dos apoyos conectado paralelamente por travesaños en dirección vertical y dos apoyos más que se unen paralelamente por travesaños orientados de forma horizontal; dando forma a una especie de mesa, la madera (se desconoce el tipo) conforma casi la totalidad del material de la cual está construido. Está estructura soporta un gran porcentaje de toda la masa que tiene el túnel de viento. Aparte de esta estructura se tiene como apoyo, en donde va ubicado el ventilador y la boquilla unos perfiles en ángulo, como se aprecia en más detalle en el Anexo A.

Ilustración 4: Estructura de soporte actual del túnel de viento



Fuente: Autores

3.2.¿Por qué surge la necesidad de hacer un rediseño de la estructura de soporte?

Los fabricantes de la estructura de soporte, que actualmente está instalada con el túnel de viento, omitieron y no tuvieron en cuenta ningún concepto propio del diseño de estructuras, pasando por alto todo el procedimiento que se debe seguir a la hora de diseñar y posteriormente fabricar tal objeto, entre los ítems principales que se debieron tomar en cuenta están:

Cargas a las que se expone la estructura: No hay evidencia del tipo de cargas, momentos y la magnitud de las fuerzas que debe soportar la estructura actual. Por ende, no existe ningún cálculo matemático y ninguna simulación para determinar dichas interrogantes.

Estudio del material de construcción: No se realizó ninguna escogencia técnica del material en el que se podría fabricar la estructura, el material elegido fue una clase de madera el cual para este caso no funciona de una forma óptima debido que este es muy frágil y en dado caso

| REQUERIMIENTO DE DISEÑO | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--|---|------------------------------|--|--------------------------------------|--|----------------------|-------------|
| | COSTO DE REDISEÑO | PROPIEDADES DEL MATERIAL DE CONSTRUCCION | DETERMINACIÓN DE CARGAS PARA IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE ESFUERZOS | GEOMETRIA DEL NUEVO REDISEÑO | MANUFACTURA IDONEA PARA LA FABRICACION | INDICAR UN FACTOR DE DISEÑO ADECUADO | CÁLCULO DE LAS MAGNITUDES DE LAS FUERZAS | REDISEÑO ESTRUCTURAL | |
| | 1,13386 | 0,62992 | 0,126 | 0,12598 | 0,6299 | 0,12598 | 0,126 | 1,13 | |
| | 1,13386 | 1,13386 | 1,1339 | 1,13386 | 1,1339 | 0,62992 | 1,1339 | 1,13 | |
| | 0,59055 | 0,59055 | 0,5906 | 1,06299 | 0,5906 | 1,06299 | 0,5906 | 1,06 | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,06 | |
| | 0,7874 | 1,41732 | 1,4173 | 0,7874 | 1,4173 | 1,41732 | 1,4173 | 1,42 | |
| | 0,7874 | 1,41732 | 1,4173 | 0,7874 | 0,7874 | 0,7874 | 1,4173 | 1,42 | |
| | 0,7874 | 1,41732 | 1,4173 | 1,41732 | 1,4173 | 1,41732 | 1,4173 | 1,42 | |
| | 0 | 0 | 0 | 0,47244 | 0 | 0 | 0 | 0,85 | |
| DISEÑO REQ IMPORTANCIA ABSOLUTO | | | | | | | | | |
| | 5,22047 | 6,6063 | 6,1024 | 5,7874 | 5,9764 | 5,44094 | 6,1024 | 8,5 | 49,7 |
| DISEÑO REQ IMPORTANCIA RELATIVO | | | | | | | | | |
| | 0,10497 | 0,13284 | 0,1227 | 0,11637 | 0,1202 | 0,1094 | 0,1227 | 0,17 | |
| REFERENCIA TÉCNICA COMPETITIVA | UNI. UAN | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| | UNI. LIBRE | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 |

| RELACIONES | |
|------------|--------|
| 9 | FUERTE |
| 5 | MEDIO |
| 1 | DEBIL |

| RELACIONES | |
|------------|-------------------|
| 1,5 | MUY PUBLICITABLE |
| 1,2 | PUBLICITABLE |
| 1,0 | NADA PUBLICITABLE |

| RELACIONES | |
|------------|-------------------|
| 5 | LO MAS IMPORTANTE |
| 4 | MUY IMPORTANTE |
| 3 | IMPORTANTE |
| 2 | ALGO IMPORTANTE |
| 1 | SIN IMPORTANCIA |

| RELACIONES | |
|------------|---------------|
| 5 | EXCELENTE |
| 4 | SOBRESALIENTE |
| 3 | BUENO |
| 2 | ACEPTABLE |
| 1 | INSUFICIENTE |

Fuente: Autores

El análisis QFD realizado para el rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento, se evidencian las exigencias o metas a cumplir, estas se ordenan de las más importante a la menos importante, y se contrarrestan con los parámetros escogidos por los diseñadores, dando como resultado que los parámetros más importantes para el cliente son: la confiabilidad de la estructura y la eficiencia de funcionamiento. A su vez los requisitos que se deben tener presente por parte de

los diseñadores son, la determinación de cargas para identificación de esfuerzos y propiedades de los materiales de construcción. Con este estudio QFD se evidencia los factores más relevantes que se deben contemplar a la hora de hacer el rediseño.

3.4.Función principal y objetivo del diseño de la estructura

Objetivo: Diseñar una estructura

Función principal que debe satisfacer el diseño de la estructura: Servir como soporte de todos los componentes (difusor, boquilla, cámara de pruebas, ventilador, etc.) que hacen parte del túnel de viento, brindándole así un mayor grado de eficiencia al funcionamiento de este.

3.5.Condiciones ambientales donde se instalará el diseño

La estructura diseñada, se ubicará en los laboratorios de mecánica de fluidos la cual pertenece a la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Antonio Nariño sede sur, la cual se localiza en ciudad de Bogotá, esta tiene un margen de temperatura entre 13 y 23 grados Celsius, con una humedad relativa promedio de 70 %. El modelo permanecerá siempre en un ambiente cerrado (laboratorio), protegido de los fenómenos climáticos que puedan afectarlo tales como la lluvia o el calor. Debido al ambiente poco corrosivo al que estará sometido, no se tendrán en cuenta estos factores para algún análisis en el diseño principal.

3.6.Caracterización de las cargas que soportará la estructura

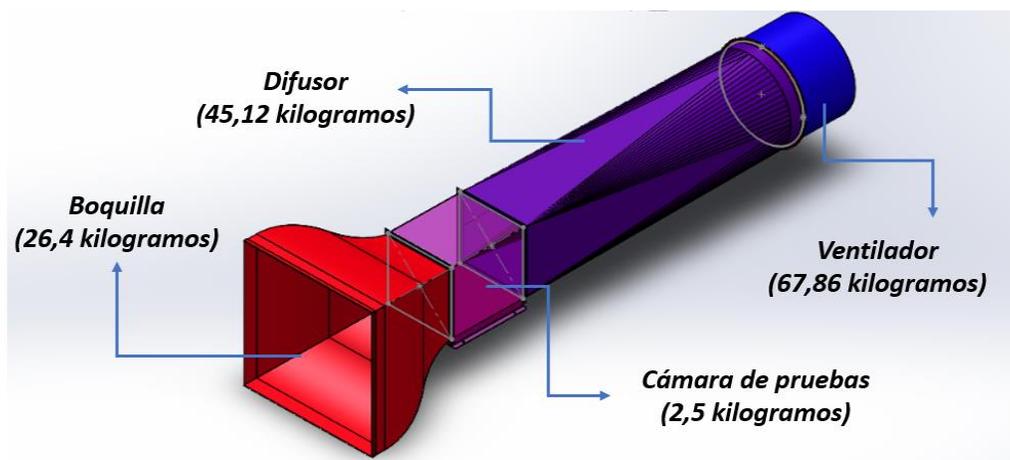
El diseño de la estructura de soporte tiene como característica propia que las cargas y fuerzas que manejará serán cargas estáticas muertas en todos los segmentos que la componen. Esto es debido a que, solo se ensamblará la estructura total del túnel de viento, la cual se instalará y esporádicamente se le removerá por alguna cuestión de mantenimiento. El mayor porcentaje de las partes del túnel son cargas muertas y solo en la parte de la cámara de pruebas se desarrollarán pequeñas fluctuaciones de fuerzas, debido al peso de las piezas de ensayo que allí se dispongan,

pero ya que las fuerzas cambiantes en esta zona son de magnitudes considerablemente pequeñas respecto a las demás secciones, se toma en su totalidad que la naturaleza de todas las fuerzas que afectan el diseño serán fuerzas estáticas.

3.7. Cálculo, análisis y determinación de magnitud de fuerzas que al que estará sometido el diseño

Como ya se mencionó la estructura va a soportar todos los componentes del túnel de viento, a continuación, se analiza cada parte de dicho elemento con el fin de buscar las cargas que estos producen y afecta directamente le diseño.

Ilustración 5: Masa de cada una de las partes que constituyen el túnel de viento



Fuente: Autores

3.7.1. Análisis de cargas producidas por el ventilador

El ventilador instalado en el túnel de viento se aloja por dentro de una cubierta de lámina de acero galvanizada, la masa aproximada del ventilador es de 62 kilogramos, y la masa de la

lámina es de 5.86 kilogramos, dando un total entre los dos de 67.86 kilogramos, a continuación, se procede a encontrar el peso total de los componentes anteriores:

Ecuación a: Fuerza

$$F = m \times a \quad (43)$$

$$F = 67.86 \text{ kg} \times \left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F = \frac{665.7 \text{ kg}}{\text{s}^2} \rightarrow 665.7 \text{ N}$$

Para el análisis de fuerzas y la obtención de las magnitudes que producen las cargas, se debe asumir el peso total del ventilador en una viga a flexión, con una carga distribuida a lo largo de esta y con dos apoyos simples, lo que facilitara el cálculo de sus reacciones. La longitud de la viga es el espacio ocupado del ventilador dentro de todo el conjunto de partes, en este caso este tiene una medida de 0.4 metros, la carga distribuida se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

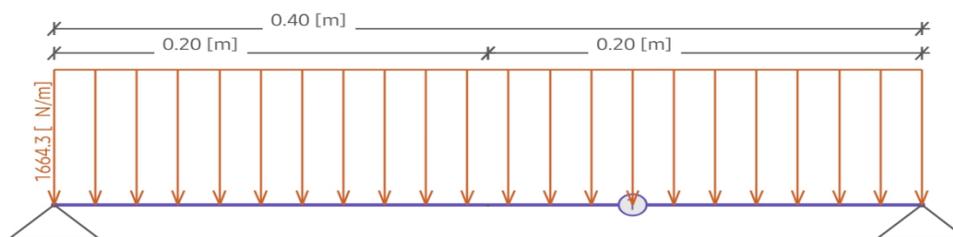
Carga distribuida:

Ecuación b: Carga distribuida

$$F_d = \frac{F}{d} \quad (44)$$

$$F_d = \frac{665.7 \text{ N}}{0.4 \text{ m}} \rightarrow \frac{1664.25 \text{ N}}{\text{m}}$$

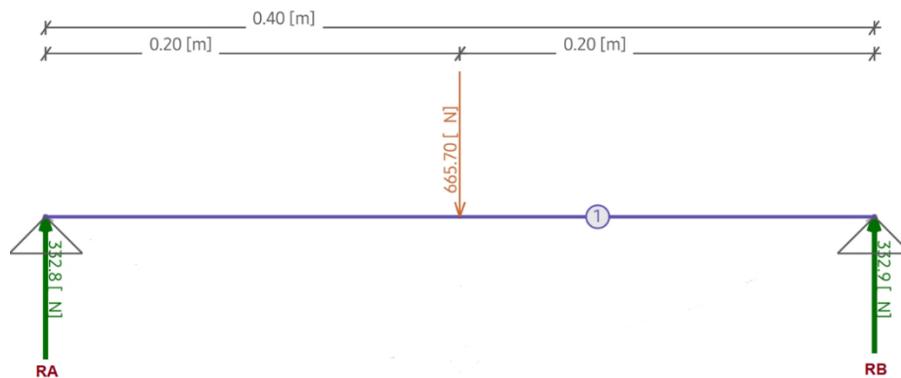
Ilustración 6: Diagrama con la fuerza distribuida que produce el ventilador



Fuente: Autores

Ya realizado el diagrama general de las fuerzas implicadas, y con el cálculo de la fuerza distribuida, se procede al realizar un diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas, reacciones y restricciones que se contemplen.

Ilustración 7: Diagrama de cuerpo libre (ventilador)



Fuente: Autores

Se procede por medio de las ecuaciones de equilibrio encontrar todas las reacciones como se observa a continuación:

Ecuaciones de equilibrio:

Ecuación c: Ecuaciones de equilibrio eje x

$$\sum F_x = 0 \quad (45)$$

Ecuación d: Ecuaciones de equilibrio eje y

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0 \quad (46)$$

$$R_A - 665,7N + R_B = 0$$

Ecuación e: Ecuación de equilibrio de momento

$$+\uparrow \sum M_A = 0 \quad (47)$$

$$-665.7N(0.2m) + R_B(0.4m) = 0$$

$$-133.14Nm + R_B(0.4m) = 0$$

$$R_B = \frac{133.14Nm}{0.4m}$$

$$R_B = \frac{133.14Nm}{0.4m} \rightarrow \mathbf{332.85N}$$

Se sustituye la fuerza R_B en la ecuación 1 para encontrar el valor de R_A :

$$R_A - 665.7N + R_B = 0$$

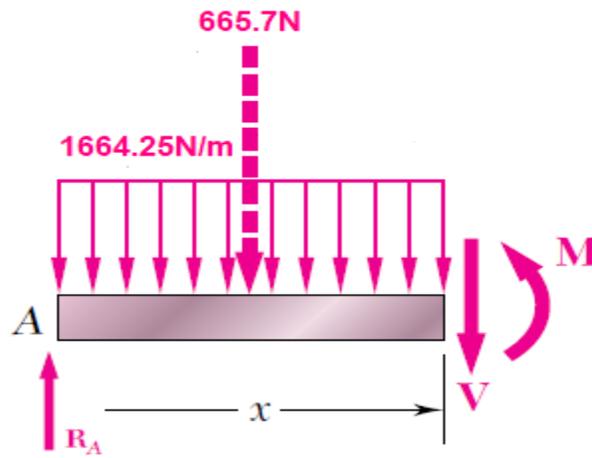
$$R_A = 665.7N - 332.85N \rightarrow \mathbf{332.85N}$$

Ahora el paso a seguir es encontrar las cargas internas que se producen en la viga, la fuerza cortante (V) y el momento flector(M). Estas cargas se pueden hallar utilizando el método de secciones, como se instruye a continuación:

Como solo hay una fuerza perpendicular a la viga solo, se realiza un corte, y se analiza para obtener las ecuaciones de fuerza cortante y momento flector.

Sección $0 \leq x \leq 0.4$

Ilustración 8: Corte de sección



Fuente: Autores

Ecuación de fuerza cortante

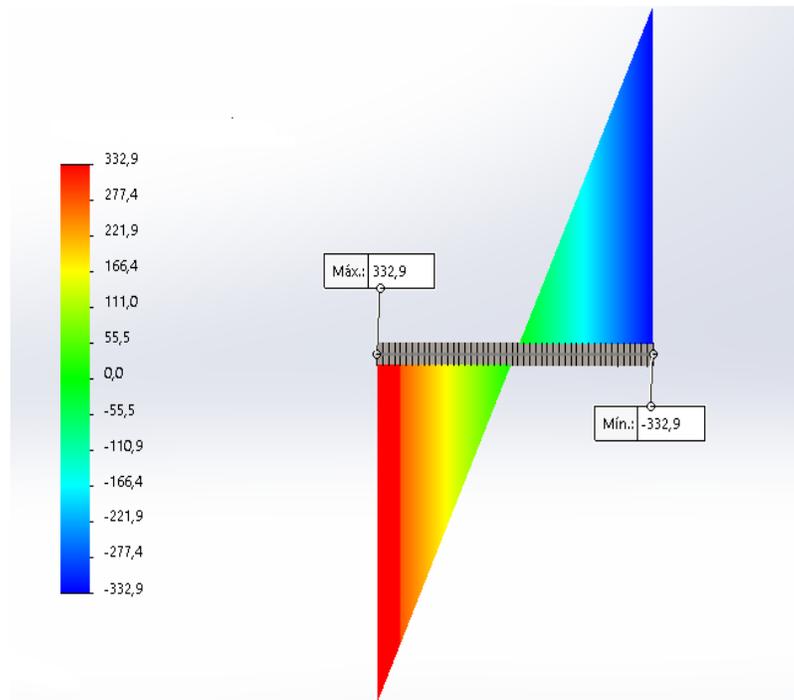
$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 1664.25(x) - V = 0$$

$$V = R_A - 1664.25x$$

$$V = 332.85 - 1664.25x$$

Ilustración 9: Diagrama fuerza cortante (ventilador)



Fuente: Autores

La fuerza cortante mínima producida en la viga por la carga(ventilador) es de -332.9N y una maxima de 332.9N

Ecuación de momento flector

$$+\uparrow \sum M = 0$$

$$-1664.25x \left(\frac{x}{2}\right) - Vx + M = 0$$

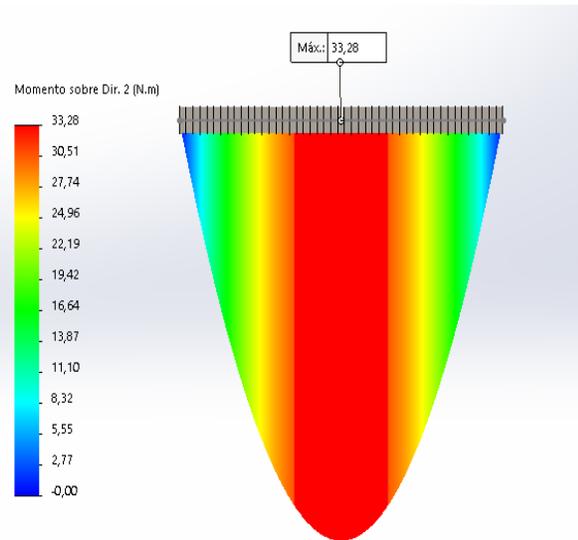
$$M = 1664.25x \left(\frac{x}{2}\right) + Vx = 0$$

$$M = 832.125x^2 + (-1664.25x + 332.85)x$$

$$M = 832.125x^2 - 1664.25x^2 + 332.85x$$

$$\mathbf{M = -832.125x^2 + 332.85x}$$

Ilustración 10: Diagrama momento flector (ventilador)



Fuente: Autores

El momento flector máximo producido en la viga por la carga (ventilador) es de 33.28 Nm

3.7.2. Análisis de cargas producidas por el difusor

El difusor que posee el túnel de viento está fabricado en lámina de acero galvanizada, este a su vez tiene adaptado el panel de control que maneja todo el túnel de viento, la masa aproximada del difusor es de 30.12 kilogramos, y la masa promedio del panel es de 15 kilogramos, dando un total de los dos componentes de 45.12 kilogramos, a continuación, se procede a encontrar el peso total de las unidades anteriores:

Peso total:

$$F = 45.12 \text{ kg} \times \left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right)$$

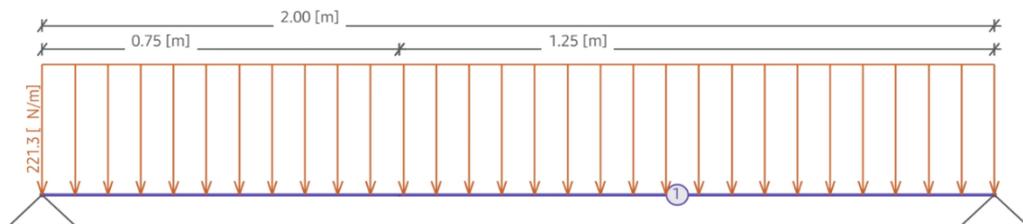
$$F = \frac{442.62 \text{ kg}}{\text{s}^2} \rightarrow 442.62 \text{ N}$$

Para el análisis de fuerzas y la obtención de las magnitudes que producen las cargas, se debe asumir el peso total del difusor y el panel de control en una viga a flexión, con una carga distribuida a lo largo de esta y con dos apoyos simples, lo que facilitara el cálculo de sus reacciones. La longitud de la viga es el espacio ocupado por el difusor dentro de todo el conjunto de partes, en este caso este tiene una medida de 2 metros, la carga distribuida se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Carga distribuida:

$$F_d = \frac{442.62 \text{ N}}{2 \text{ m}} \rightarrow \frac{221.31 \text{ N}}{\text{m}}$$

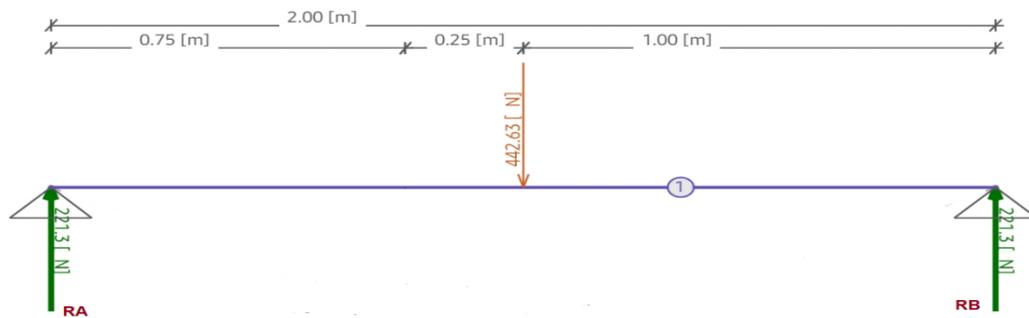
Ilustración 11: Diagrama con la fuerza distribuida que produce el difusor



Fuente: Autores

Con el diagrama general de las fuerzas implicadas, y con el cálculo de la fuerza distribuida, se procede a realizar un diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas, reacciones y restricciones que se contemplen.

Ilustración 12: Diagrama de cuerpo libre (difusor)



Fuente: Autores

Por medio de las ecuaciones de equilibrio se obtienen las reacciones, como se muestra a continuación:

Ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_x = 0 \quad \uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 442.62N + R_B = 0$$

$$+\curvearrowleft \sum M_A = 0$$

$$-442.62N(1m) + R_B(2m) = 0$$

$$R_b = \frac{442.62N \cdot m}{2m} \rightarrow \mathbf{221.31N}$$

Se sustituye la fuerza R_B en la ecuación 1 para encontrar el valor de R_A :

$$R_A - 442.62N + 221.31N = 0$$

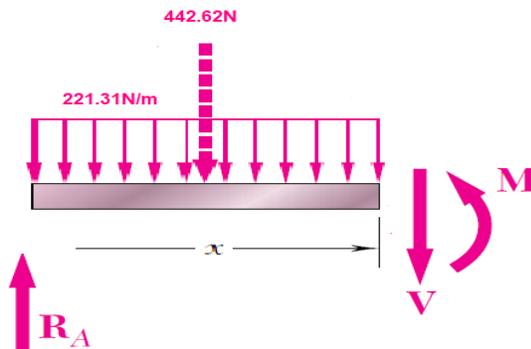
$$R_A = 221.31N$$

Para encontrar las cargas internas que se producen en la viga, la fuerza cortante (V) y el momento flector (M). Estas cargas se pueden hallar utilizando el método de secciones, como se instruye a continuación:

Como solo hay una fuerza perpendicular a la viga solo, se realiza un corte, y se analiza para obtener las ecuaciones de fuerza cortante y momento flector.

Sección $0 \leq x \leq 2$

Ilustración 13: Corte de sección



Fuente: Autores

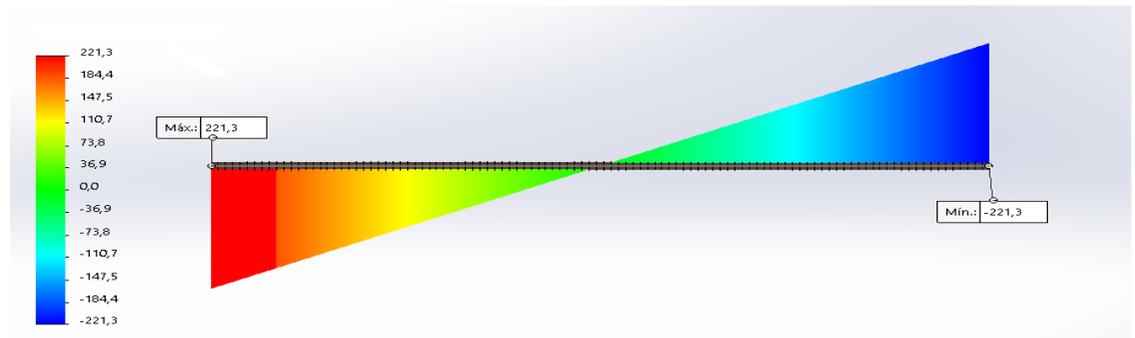
Ecuación de fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 221.31x - V = 0$$

$$V = 221.31N - 221.31x$$

Ilustración 14: Diagrama de fuerza cortante (difusor)



Fuente: Autores

La fuerza cortante mínima producida en la viga por la carga(difusor) es de -221.3N y una máxima de 221.3N

Ecuación de momento flector

$$+\uparrow \sum M = 0$$

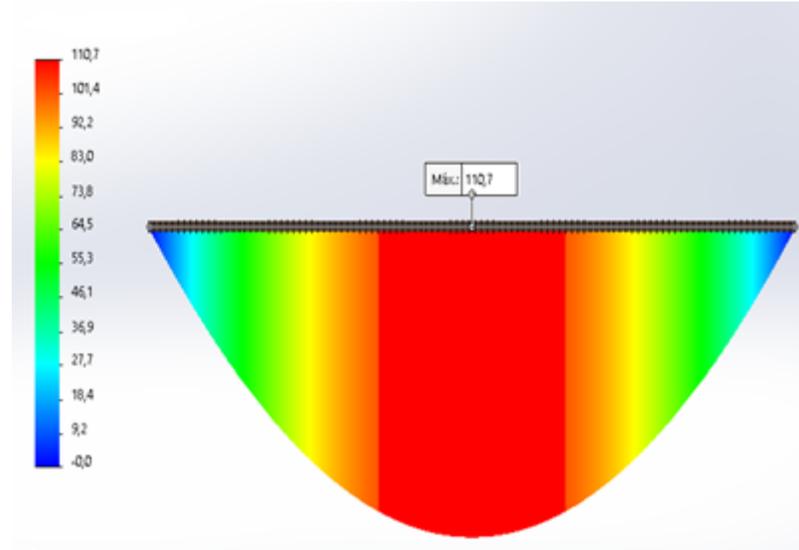
$$-221.31x \left(\frac{x}{2}\right) - Vx + M = 0$$

$$M = \frac{221.31x^2}{2} + (-221.31x + 221.31)x$$

$$M = 110.655x^2 - 221.31x^2 + 221.31x$$

$$M = -110.655x^2 + 221.31x$$

Ilustración 15: Diagrama de momento flector (difusor)



Fuente: Autores

El momento flector máximo producido en la viga por la carga(difusor) es de 110.7 Nm

3.7.3. Análisis de cargas producidas por la cámara de pruebas

La cámara para la realización de ensayos está fabricada en acrílico de alto impacto con unas pequeñas incrustaciones de acero estructural, la masa aproximada de dicho artefacto es de 2.5 kilogramos a continuación, se procede a encontrar el peso:

Peso total:

$$F = 2.5 \text{ kg} \times \left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F = \frac{24.525 \text{ kg}}{\text{s}^2} \rightarrow 24.525 \text{ N}$$

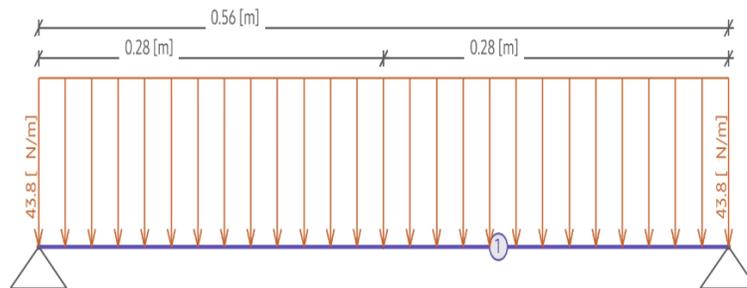
Para el hallar las fuerzas y la calcular las magnitudes producidas por las cargas, se debe asumir el peso total de la cámara de pruebas en una viga a flexión, con una carga distribuida a lo

largo de esta y con dos apoyos simples, esto ayudara a realizar el cálculo de sus reacciones. La longitud de la viga es el espacio que ocupa la cámara de ensayos internamente en todo el compendio de partes, en este caso esta tiene una medida de 0.56 metros, la carga distribuida se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Carga distribuida:

$$F_d = \frac{24.525 \text{ N}}{0.56 \text{ m}} \rightarrow \frac{43.79 \text{ N}}{\text{m}}$$

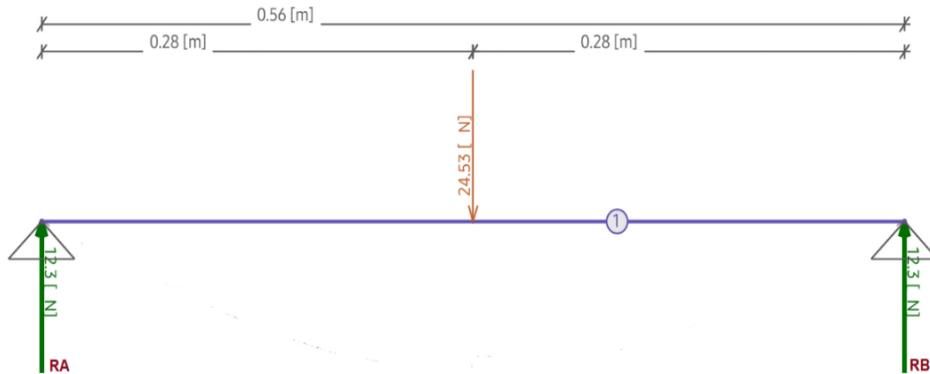
Ilustración 16: Diagrama con la fuerza distribuida que produce la cámara de ensayos



Fuente: Autores

Realizado el diagrama general de las fuerzas implicadas, y el cálculo de la fuerza distribuida, se procede a ejecutar un diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas, reacciones y restricciones que se asuman.

Ilustración 17: Diagrama de cuerpo libre (cámara de pruebas)



Fuente: Autores

Por medio de las ecuaciones de equilibrio se calculan las reacciones, como se describe a continuación:

Ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_x = 0 \quad \uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 24.52N + R_B = 0$$

$$+\curvearrowleft \sum M_A = 0$$

$$-24.52N(0.28m) + R_B(0.56m) = 0$$

$$R_B = \frac{6.867N \cdot m}{0.56m} \rightarrow \mathbf{12.26N}$$

Se sustituye la fuerza R_B en la ecuación 1 para encontrar el valor de R_A :

$$R_A - 24.26N + 24.52N = 0$$

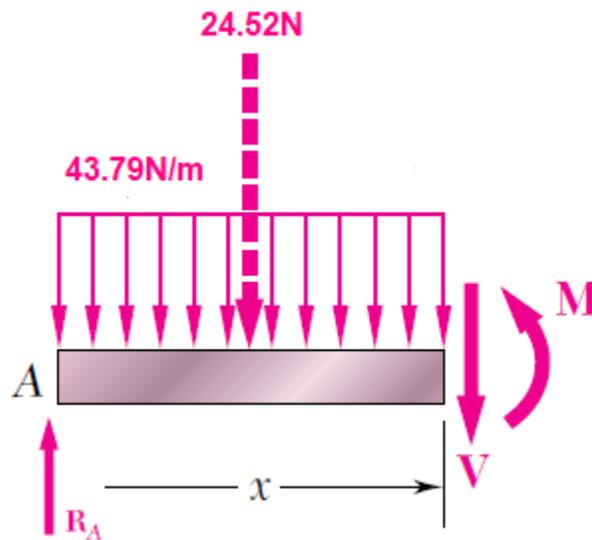
$$R_A = 12.26N$$

El procedimiento que se sigue es encontrar las cargas internas que se producen en la viga, la fuerza cortante (V) y el momento flector (M). Estas cargas son encontradas manejando el método de secciones, como se instruye a continuación:

Como solo hay una fuerza perpendicular a la viga solo, se realiza un corte con sus dos limites definidos, y se analiza para obtener las ecuaciones de fuerza cortante y momento flector.

Sección $0 \leq x \leq 0.56$

Ilustración 18: Corte de sección



Fuente: Autores

Ecuación fuerza cortante

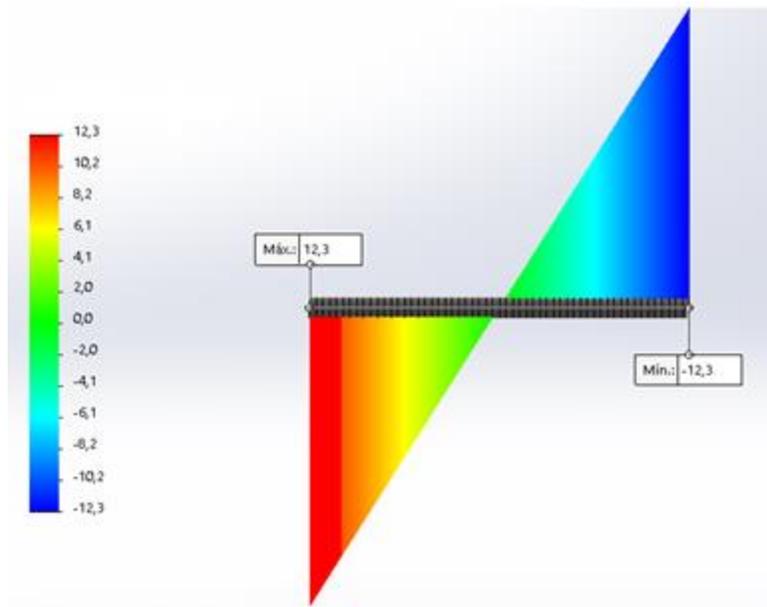
$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 43.79x - V = 0$$

$$V = R_A - 43.79x$$

$$V = 12.26\text{N} - 43.79x$$

Ilustración 19: Diagrama fuerza cortante (cámara de pruebas)



Fuente: Autores

La fuerza cortante mínima producida en la viga por la carga(cámara) es de -12.3N y máxima de 12.3N

Ecuación momento flector

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

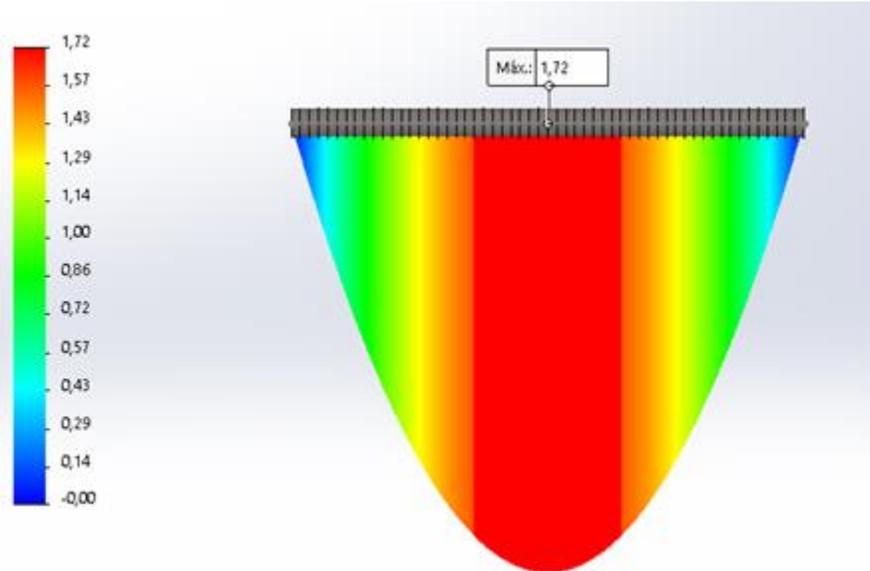
$$-43.79x \left(\frac{x}{2}\right) - Vx + M = 0$$

$$M = \frac{43.79x^2}{2} + (-43.79x + 12.26)x$$

$$M = 21.895x^2 - 43.79x^2 + 12.26x$$

$$\mathbf{M = -21.895x^2 + 12.26}$$

Ilustración 20: Diagrama de momento flector (cámara de pruebas)



Fuente: Autores

El momento flector máximo producido en la viga por la carga (cámara de pruebas) es de 1.7 Nm

3.7.4. Análisis de cargas producidas por la boquilla

La boquilla que tiene instalado el túnel de viento está fabricada en lámina de acero galvanizada, a la entrada de esta posee una especie de malla o panel hecho a partir de una lámina de madera aglomerada (MDF), la masa aproximada de la boquilla con el panel es de aproximadamente 26.4 kilogramos, a continuación, se procede a encontrar el peso total de los anteriores componentes:

Peso total:

$$F = 26.4 \text{ kg} \times \left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right)$$

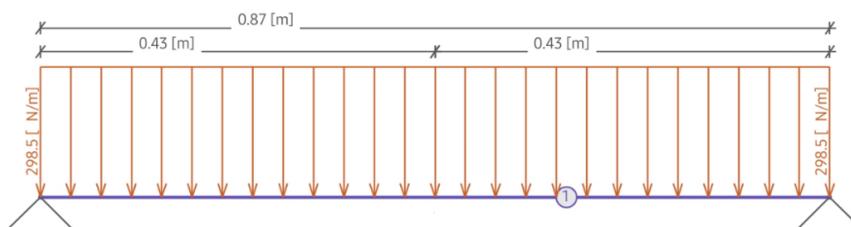
$$F = \frac{258.984 \text{ kg}}{\text{s}^2} \rightarrow 258.984 \text{ N}$$

Para poder encontrar las fuerzas y la calcular las magnitudes producidas por las cargas, se debe asumir el peso total de la boquilla y el panel que esta tiene en una viga a flexión, con una carga distribuida a lo largo de esta y con dos apoyos simples, esto facilitara a proceder con el cálculo de sus reacciones. La longitud de la viga es el espacio que ocupa la boquilla internamente en todo el compendio de partes, en este caso esta tiene una medida de 0.8675 metros, la carga distribuida se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Carga distribuida:

$$F_d = \frac{258.984 \text{ N}}{0.8675 \text{ m}} \rightarrow \frac{298.54 \text{ N}}{\text{m}}$$

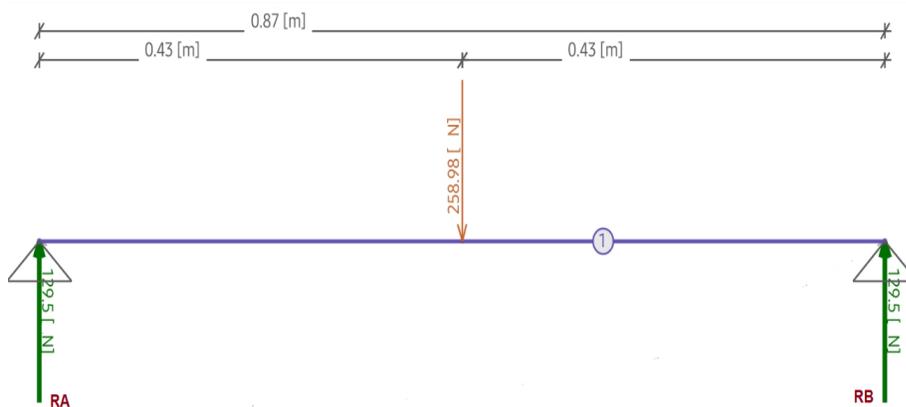
Ilustración 21: Diagrama con la fuerza distribuida que produce la boquilla



Fuente: Autores

Hecho el diagrama general de las fuerzas implicadas, y el cálculo de la fuerza distribuida, se procede a realizar un diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas, reacciones y restricciones que se tengan.

Ilustración 22: Diagrama de cuerpo libre (boquilla)



Fuente: Autores

Por medio de las ecuaciones de equilibrio se procede a encontrar las reacciones en los apoyos, como se ve a continuación:

Ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_x = 0 \quad \uparrow \sum F_y = 0$$

$$R_A - 258.984N + R_B = 0$$

$$+\curvearrowleft \sum M_A = 0$$

$$-258.984N(0.43375m) + R_B(0.8675m) = 0$$

$$R_b = \frac{112.3N \cdot m}{0.8675m} \rightarrow 129.45N$$

Se sustituye la fuerza R_B en la ecuación 1 para encontrar el valor de R_A :

$$R_A - 258.984N + 129.45N = 0$$

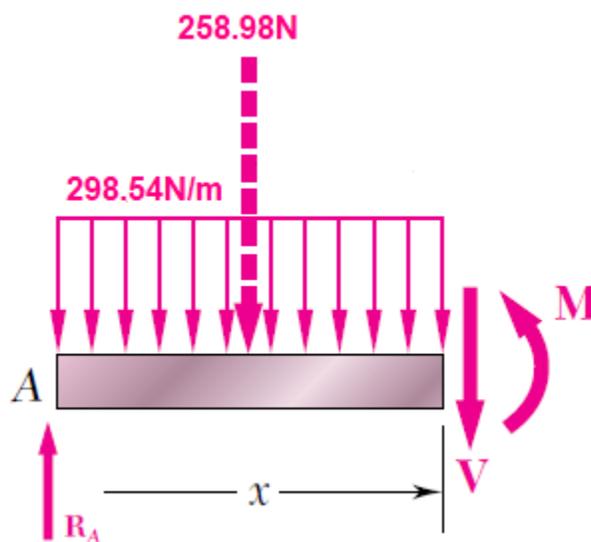
$$R_A = 129.45N$$

Para encontrar las cargas internas que se producen en la viga, la fuerza cortante (V) y el momento flector (M). Estas cargas se pueden hallar utilizando el método de secciones, como se instruye a continuación:

Como solo hay una fuerza perpendicular a la viga solo, se realiza un corte, y se analiza para obtener las ecuaciones de fuerza cortante y momento flector.

Sección $0 \leq x \leq 0.8675$

Ilustración 23: Corte de sección



Fuente: Autores

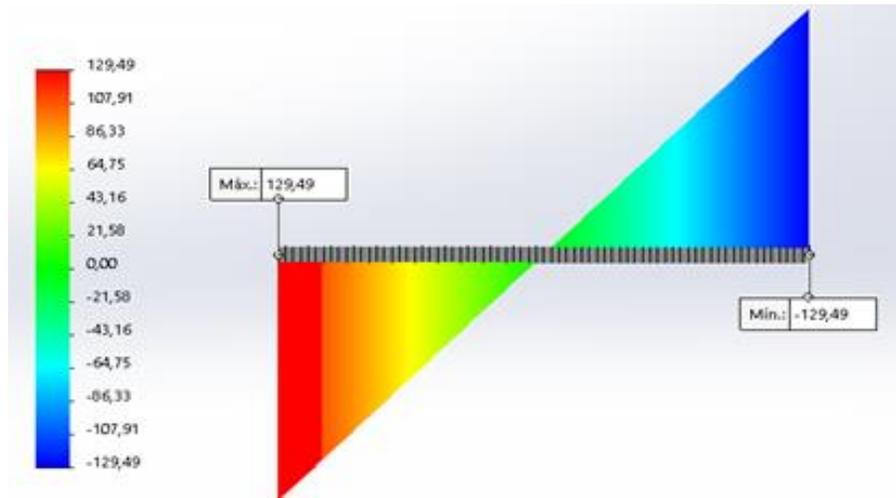
Ecuación fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 298.54x - V = 0$$

$$V = 129.45 \text{ N} - 298.54x$$

Ilustración 24: Diagrama de fuerza cortante (boquilla)



Fuente: Autores

La fuerza cortante mínima producida en la viga por la carga (boquilla) es de 129.49N y máxima de 129.49N

Ecuación del momento flector

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

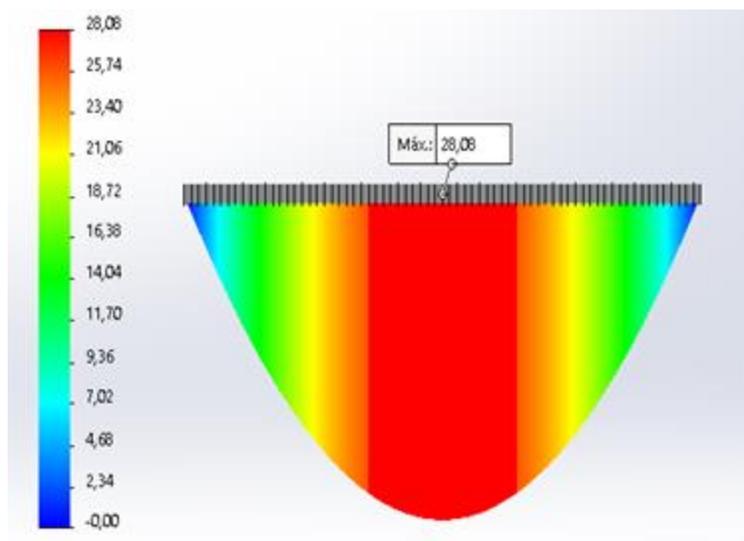
$$-298.54x \left(\frac{x}{2}\right) - Vx + M = 0$$

$$M = \frac{298.54x^2}{2} + (-298.54x + 129.45)x$$

$$M = 149.27x^2 - 298.54x^2 + 129.45x$$

$$M = -149.27x^2 + 129.45x$$

Ilustración 25: Diagrama del momento flector (boquilla)



Fuente: Autores

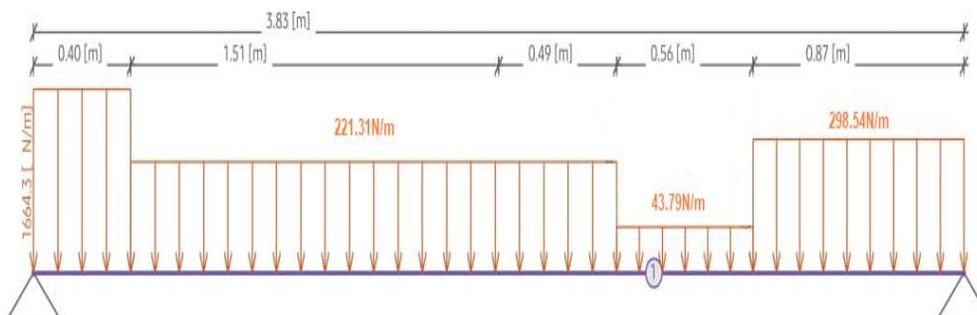
El momento flector máximo producido en la viga por la carga(boquilla) es de 28.08 Nm

3.7.5. Análisis de cargas producidas por todos los componentes que constituyen el túnel de viento.

Como ya se observó en todos los anteriores procedimientos, se analizó parte por parte de los componentes que la estructura va a tener que soportar y las fuerzas que lo afectan. A continuación, se hace un estudio de la unión de todos los componentes y se analizarán las fuerzas y los esfuerzos en conjunto que se presenten.

Se realiza un diagrama (viga) que muestre todas las cargas distribuidas, estas son la representación de cada una de las partes que conforman el túnel de viento, los valores de las cargas que se observan son las mismas que se emplearon para los estudios individuales de cada componente, como se puede observar en la siguiente ilustración:

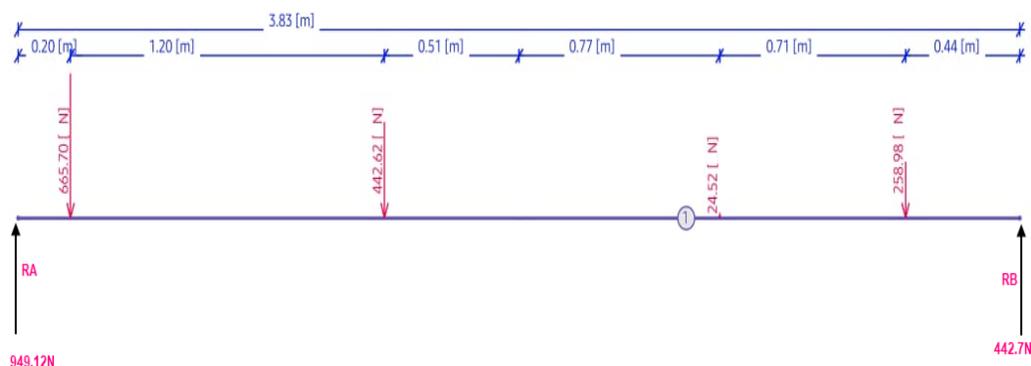
Ilustración 26: Viga unificada con todas las cargas distribuidas



Fuente: Autores

Ya con la construcción de la viga con todas las cargas, se procede a hacer un diagrama de cuerpo libre para visualizar mejor las fuerzas, restricciones y algún otro aspecto que influya en el problema. Cabe recordar que la longitud de la viga es la sumatoria de todos componentes que la constituyen, en este caso la medida total de esta es de 3.83 metros, siendo la parte del difusor la que más espacio longitudinal ocupa con 2 metros y el ventilador con una medida de 0.4 metros que menos espacio aporta dentro de todo el sistema (túnel de viento). A continuación, se observa el diagrama de cuerpo libre descrito.

Ilustración 27: Diagrama de cuerpo libre (Túnel de viento)



Fuente: Autores

El siguiente procedimiento por seguir es formular y resolver la continuación, ecuaciones de equilibrio, para poder calcular las fuerzas externas (reacciones), dicha labor se ve a continuación:

Ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_x = 0$$

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$1. R_A - 665.7N - 442.62N - 24.52N - 258.98N + R_B = 0$$

$$R_A = 1391.82 - R_B$$

$$+\curvearrowright \sum M_A = 0$$

$$2. -655.7N(0.2m) - 442.62N(1.4m) - 24.52(2.68m) - 258.98(3.39) + R_B(3.8275m) = 0$$

$$-131.14Nm - 619.668Nm - 65.7136Nm - 877.9428Nm + R_B(3.8275m) = 0$$

$$R_B = \frac{1694.46Nm}{3.8275m} \rightarrow \mathbf{442.7N}$$

Se sustituye la fuerza R_B en la ecuación 1 para encontrar el valor de R_A :

$$R_A - 665.7N - 442.62N - 24.52N - 258.98N + R_B = 0$$

$$R_A - 665.7N - 442.62N - 24.52N - 258.98N + 442.7N = 0$$

$$R_A - 1391.82N + 442.7N = 0$$

$$R_A = 1391.82N - 442.7N$$

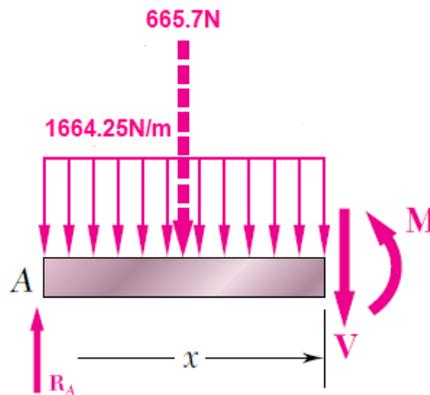
$$R_A = \mathbf{949.12N}$$

Para encontrar las cargas internas que se producen en la viga, la fuerza cortante (V) y el momento flector (M). Estas cargas se pueden hallar utilizando el método de secciones, se deben realizar cortes cada vez que la fuerza cambie, para este caso, como la fuerza cambia de magnitud cuatro veces, se procede a realizar cuatro cortes. En cada corte se debe tener definido los límites y es indispensable ubicar el sentido de las fuerzas internas, tanto la fuerza cortante (V) como el momento flector (M). Por cada sección (corte) se formula y resuelve las ecuaciones de equilibrio para el cálculo de las fuerzas internas (V, M). Por último, se realizan los diagramas de fuerza cortante y momento flector, en este caso en especial se unen todos resultados obtenidos a partir de las ecuaciones y se presentan dos diagramas, uno de fuerza cortante y el otro de momento flector, identificando sus valores mínimos y sus valores máximos.

Todos pasos mencionados se muestran a continuación:

Sección $0 \leq x \leq 0.4$

Ilustración 28: Corte de sección



Fuente: Autores

Ecuación de fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 1664.25x - V = 0$$

$$V = 949.12N - 1664.25x$$

Ecuación momento flector

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

$$-1664.25x \left(\frac{x}{2}\right) - Vx + M = 0$$

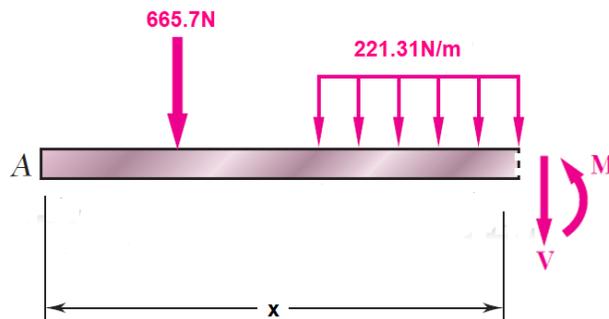
$$M = \frac{1664.25x^2}{2} + (-1664.25x + 949.12)x$$

$$M = 832.125x^2 - 1664.25x^2 + 949.12x$$

$$M = -832.125x^2 + 949.12x$$

Sección $0.4 \leq x \leq 2.4$

Ilustración 29: Corte de sección 2



Fuente: Autores

Ecuación fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_A - 665.7 - 221.31(x - 0.4) - V = 0$$

$$949.12 - 665.7 - 221.34x + 88.524 - V = 0$$

$$V = 371.944N - 221.31x$$

Ecuación momento flector

$$+\uparrow \sum M = 0$$

$$-Vx - 665.7(x) \left(\frac{1}{12} \right) - 221.3(x) \left(\frac{7}{12} \right) + M = 0$$

$$-Vx - 665.7 \left(\frac{x}{12} \right) - 221.3(x - 0.4) \left(\frac{7x}{12} \right) + M = 0$$

$$-Vx - 665.7 \left(\frac{x}{12} \right) - 221.3 \left(\frac{7x^2 - 2.8x}{12} \right) + M = 0$$

$$-Vx - 665.7 \left(\frac{x}{12} \right) \left(\frac{-1549.1x^2}{12} + \frac{619.64x}{12} \right) + M = 0$$

$$-Vx - 55.475x - 129.09x^2 + 51.63x + M = 0$$

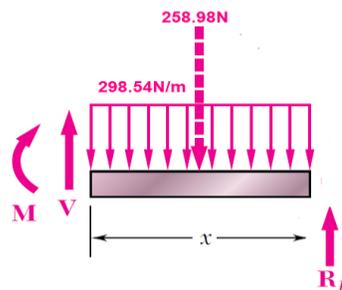
$$M = 55.475x + 129.09x^2 - 51.63x + Vx$$

$$M = 55.475x + 129.09x^2 - 51.63x + (371.948 - 221.31x)x$$

$$M = 375.789x - 92.22x^2$$

Sección 0.8675 ≤ x ≤ 0

Ilustración 30: Corte de sección 3



Fuente: Autores

Ecuación fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_B - 298.54x + V = 0$$

$$442.7N - 298.54x + V = 0$$

$$V = -442.7 + 298.54x$$

Ecuación momento flector

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

$$-Vx + 298.54(x) \left(\frac{x}{2}\right) - M = 0$$

$$-Vx + \left(\frac{298.54x^2}{2}\right) - M = 0$$

$$-Vx + 149.27x^2 - M = 0$$

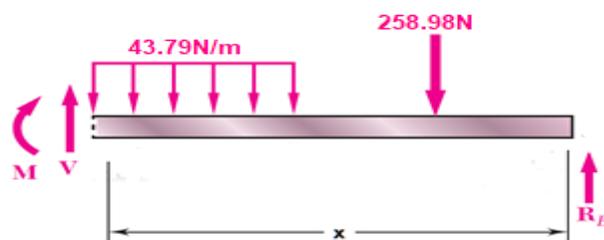
$$M = -Vx + 149.27x^2$$

$$M = -(-442.7 + 298.54x)x + 149.27x^2$$

$$M = -149.27x^2 + 442.7x$$

Sección 1. $4275 \leq x \leq 0.8675$

Ilustración 31: Corte de sección 4



Fuente: Autores

Ecuación fuerza cortante

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_B - 258.98 - 43.79(x - 0.8675) + V = 0$$

$$442.7 - 258.98 - 43.79x + 37.98 + V = 0$$

$$V = -221.7 + 43.79x$$

Ecuación momento flector

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

$$258.98(x) \left(\frac{347}{1142} \right) + 43.79(x - 0.8725)(x) \left(\frac{459}{571} \right) - Vx - M = 0$$

$$\frac{89866.06x}{1142} + 43.79(x - 0.8725) \left(\frac{459x}{571} \right) - Vx - M = 0$$

$$78.69x + 43.79 \left(\frac{459x^2 - 400.47x}{571} \right) - Vx - M = 0$$

$$78.69x + 35.20x^2 - 30.71x - Vx - M = 0$$

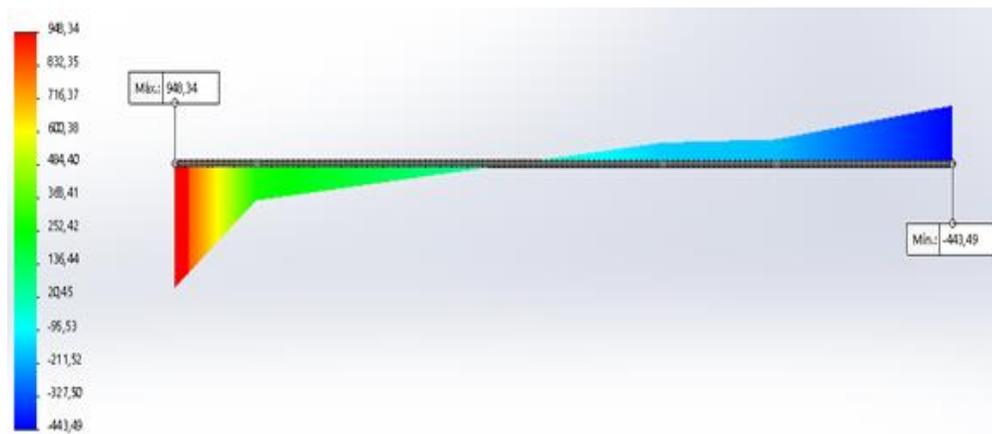
$$47.98x + 35.2x^2 - Vx - m = 0$$

$$47.98x + 35.2x^2 - (-221.7 + 43.79x)x - M = 0$$

$$M = 47.98x + 35.2x^2 + 221.7x - 43.79x^2$$

$$\mathbf{M = 269.68x - 8.59x^2}$$

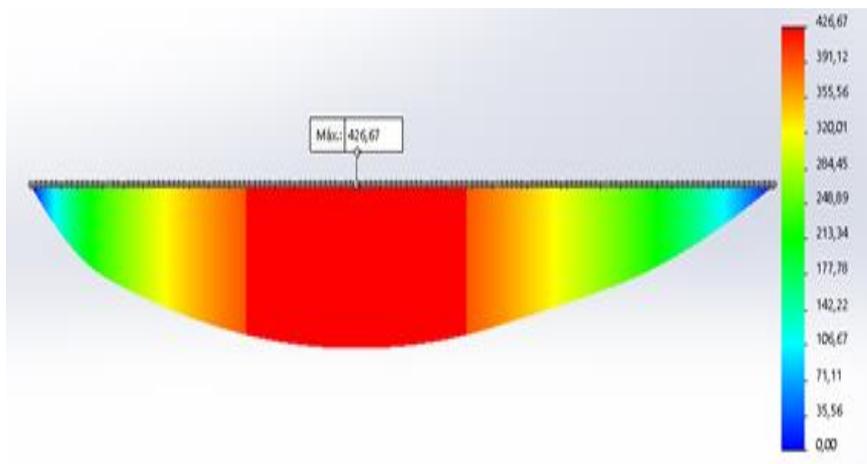
Ilustración 32: Diagrama de fuerza cortante (viga unificada)



Fuente: Autores

La fuerza cortante máxima es de 943.34 N ubicada en el inicio de la viga, y la fuerza cortante mínima es de -443.49N

Ilustración 33: Diagrama de momento flector (viga unificada)



Fuente: Autores

El diagrama de momento flector tiene forma de parábola, debido a que las cargas que se estudian son cargas distribuidas, que en su gran mayoría arrojan graficas de este tipo, el momento flector máximo es de 426.67 Nm este se ve reflejado en el centro de la viga.

3.7.6. Tipos de esfuerzos identificados en el estudio previo

Observando los diagramas individuales de cuerpo libre y el diagrama de cuerpo libre general de todos los componentes unificados, con el soporte e identificación de las gráficas de momento flector y fuerza cortante, se puede decir que la mayor parte de la viga soporta fuerzas perpendiculares a sus ejes longitudinales y, en consecuencia, funciona, como una viga en flexión (esfuerzo flector), también es importante identificar, ya en el diseño si se tienen un esfuerzo cortante vertical. Al ya tener identificados los tipos de esfuerzos que se producen, esto conducirá más adelante al uso de un determinado tipo de análisis de esfuerzo.

3.8. Geometría básica de los elementos que conforma el nuevo diseño

La geometría base de la estructura que va a servir de soporte a todo el túnel de viento, va a estar constituida fundamentalmente en perfiles de acero estructural ya sean tipo ángulo, rectangular o cuadrado. La decisión de hacer el diseño en este tipo material es fundamentalmente porque ofrece las siguientes ventajas:

Prefabricación: Ofrece la oportunidad de previamente producir en secciones o partes los elementos que componen la estructura, teniendo la ventaja de realizar el trabajo en algún taller especializado, reduciendo del tiempo de elaboración.

Adaptabilidad: Las estructuras en acero brindan una alta adaptación tanto de diseño como de espacio, lo que facilita su implementación de cualquier terreno y ambiente.

Bajo costo de fabricación: Las estructuras realizadas con perfilera en acero estructural, tiene un bajo costo de fabricación, comparado con otros materiales similares, y posee una ventaja extra que es la rápida ejecución en la fabricación de esta.

3.8.1. Propiedades del material de construcción de la estructura

Como ya se mencionó anteriormente todas las partes de la estructura van a ser con perfil de acero, a continuación, se muestran las propiedades de interés de los aceros que se manejarán, extraídos propiamente del catálogo de la empresa “STECKERL HIERROS Y ACEROS (anexo digital A).

Tabla 4: Propiedades de acero de perfiles

| Calidades de acero utilizado para fabricación de perfiles | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Tipo de perfil | Designación del material | Propiedades mecánicas | | |
| | | Resistencia a la Tensión | Resistencia de Fluencia | Ductilidad (% elongación) |
| Ángulo tipo americano de lados iguales | ASTM A 36 | 400 Mpa | 250MPa | 21 |
| Rectangular y cuadrado | ASTM A 500 Grado C | 427MPa | 350 Mpa | 21 |

Fuente: Steckerl hierros y aceros

3.9. Razonamiento para elegir el factor de diseño (N)

El diseño (estructura de soporte) que se va a realizar va a estar sometido a cargas estáticas (carga muerta), que previamente fueron estudiadas y analizadas, estas fuerzas producen esfuerzos de flexión y esfuerzos normales, la construcción de la estructura es acero ASTM A36 que es un material dúctil, el ambiente en donde va estar instalado el diseño es un lugar poco corrosivo y no a va tener cambios de temperatura bruscos; el grado de confianza en los datos obtenidos de la magnitud de las cargas es de un 90%, debido a la dificultad que se presentó para la medición personal de todos los elementos de interés, el cálculo de esto datos estuvo a cargo del software CAD SolidWorks, en el cual se diseñó lo más detalladamente posible todos los elementos que influyen en la construcción de la estructura, entendiendo de antemano que por más precisos que sean los diseños este va a tener un porcentaje de error, en este caso se asume que es de 10%. Ya

expuestos todos los elementos que interviene en la selección del factor de diseño se decide que este va a ser de **2.8**. Mas adelante en el desarrollo de los cálculos se comprobará si este valor es el adecuado o hay que hacer una modificación.

3.9. Desarrollo y cálculos del diseño

3.9.1. Datos para considerar:

- ✓ Momento flector máximo:

$$M = 426.67 Nm$$

- ✓ Fuerza cortante máxima:

$$V = 943.34 N$$

- ✓ Factor de diseño:

$$N = 2.8$$

- ✓ Resistencia de fluencia acero ASTM A 36

$$S_y = 250 Mpa$$

- ✓ Resistencia de fluencia acero ASTM A500 Grado C

$$S_y = 350 MPa$$

3.9.2. Análisis de las ecuaciones a utilizar

Como se describió anteriormente las cargas producen momentos de flexión en la viga, las cuales en consecuencia producen el desarrollo de esfuerzos de flexión, como se describe a continuación en la siguiente formula:

Ecuación f: Esfuerzo de flexión

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (48)$$

Donde:

M = Magnitud del momento flector

I = Momento de inercia

c = Distancia desde el punto de análisis hasta el centroide del elemento

Para el diseño de la estructura, se conviene definir el termino módulo de sección “S”, como:

Ecuación g: Modulo de sección

$$S = \frac{I}{c} \quad (49)$$

Donde:

I = Momento de inercia

c = Distancia desde el punto de análisis hasta el centroide del elemento

Entonces, la fórmula del esfuerzo de flexión se transforma en:

Ecuación h: Esfuerzo

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (50)$$

Donde:

M = Magnitud del momento flector

S = Módulo de sección

Se debe calcular el valor mínimo del módulo de sección (S), para esto se debe utilizar el método de resistencia de fluencia para esfuerzos estáticos, que es el caso de este diseño, la fórmula de este método se describe así:

Ecuación i: Resistencia de fluencia para esfuerzos estáticos

$$\sigma < \sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (51)$$

Donde:

σ_d = Esfuerzo de diseño

S_y = Resistencia de fluencia

N = Factor de diseño

Primero se debe calcular el esfuerzo de diseño con $\sigma_d = \frac{S_y}{N}$, seguido de esto, se debe garantizar que el esfuerzo máximo $\sigma = \frac{M}{S}$, no sea mayor que el esfuerzo de diseño. Se puede sustituir $\sigma = \sigma_d$, y se despeja S .

$$S = \frac{M}{\sigma_d} \quad (52)$$

Cuando ya se tenga el módulo de sección requerido, se debe buscar en las tablas de cada tipo de perfil, un módulo de sección que esté por encima del calculado, esto asegura que el perfil escogido cumple bien la función del diseño que se haga.

3.9.3. Desarrollo de cálculos para la selección de perfil en ángulo tipo americano de lados iguales

Cálculo del esfuerzo de diseño:

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (53)$$

$$\sigma_d = \frac{250MPa}{2.8} = 89.285 \text{ Mpa}$$

Cálculo del módulo de sección:

$$S = \frac{M}{\sigma_d}$$

$$S = \frac{426.67Nm}{89.285 \times 10^6 Pa} = 4.778 \times 10^{-6} m^3 \rightarrow 4.778 cm^3$$

Ya deducido el módulo sección requerido se debe buscar en el catálogo de perfiles de la empresa “STECKERL HIERROS Y ACEROS” (anexo digital A) un módulo de sección mayor al calculado, para este perfil en ángulo tipo americano de lados iguales, se encontraron los siguientes:

$$\checkmark L 3/16'' \times 2 1/2'' \rightarrow S = 4.92 \text{ cm}^3$$

$$\checkmark L 5/16'' \times 2'' \rightarrow S = 4.92 \text{ cm}^3$$

3.9.4. Desarrollo de cálculos para la selección de perfil rectangular y perfil cuadrado

Tanto los perfiles rectangulares y cuadrados están hechos del mismo acero (ASTM A 500 Grado C) poseen la misma resistencia de fluencia (S_y) 350 Mpa, los cálculos para hallar el módulo de sección requerido son los mismos, como se ve a continuación:

Cálculo del esfuerzo de diseño:

Ecuación j: Esfuerzo de diseño

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_d = \frac{350 \text{ MPa}}{2.8} = 125 \text{ Mpa}$$

Cálculo del módulo de sección:

$$S = \frac{M}{\sigma_d}$$

$$S = \frac{426.67 \text{ Nm}}{125 \times 10^6 \text{ Pa}} = 3.41336 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \rightarrow 3.41336 \text{ cm}^3$$

Ya con el módulo de sección requerido encontrado, se indaga en el catálogo de perfiles de la empresa "STECKERL HIERROS Y ACEROS" (Anexo digital A) un módulo de sección superior al calculado, para los perfiles cuadrados y rectangulares, se hallaron los siguientes:

Perfil cuadrado:

$$\checkmark 1 1/2'' \times 1 1/2'' \rightarrow S = 3.47 \text{ cm}^3$$

Perfil rectangular:

$$\checkmark 2 3/8'' \times 1 1/2'' \rightarrow 4.61 \text{ cm}^3$$

$$\checkmark 2'' \times 1 1/16'' \rightarrow S = 4.44 \text{ cm}^3$$

3.10. Elección y especificaciones del tipo de perfil que se implementara en el rediseño de la estructura

El perfil elegido para el rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento es el **perfil estructural cuadrado de 1 ½ “x 1 ½ “**, con un módulo de sección de 3.47cm^3 , este cumple satisfactoriamente con todos los cálculos realizados, además por su mayor adaptabilidad a la hora de su uso se llegó a su escogencia.

Algunas especificaciones y propiedades se muestran a continuación:

Tabla 5: Propiedades y características del perfil estructural cuadrado

| CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACIÓN | | | | | | | PROPIEDADES ESTÁTICAS | | | | | | UNIDADES DE EMPAQUE |
|--------------------------------|------------|------|-----|-------------------------|-------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| TAMAÑO PERFIL | | | | Espesor de pared e mm | Peso P kg/m | Área A cm^2 | FLEXIÓN | | | Módulo plástico cm^3 | TORSIÓN | | |
| TAMAÑO NORMAL | | REAL | | | | | Momento de inercia cm^4 | Módulo elástico cm^3 | Radio de giro | | Momento de inercia cm^4 | Módulo elástico cm^3 | |
| PULGADAS | MILÍMETROS | dmm | bmm | | | | | | | | | | |
| 1 1/2" X 1 1/2" | 40X 40 | 40 | 40 | 2 | 2,32 | 2,96 | 6,94 | 3,47 | 1,53 | 4,13 | 11,36 | 5,25 | 25 |

Fuente: Steckerl hierros y aceros

3.11. Comprobación del factor de diseño (N)

Ya elegido el tipo de perfil estructural, se procede a corroborar si este cumple con el factor de seguridad ya antes calculado, para esto realizan las siguientes operaciones:

Esfuerzo de diseño calculado:

$$\sigma_d = \frac{350\text{MPa}}{2.8} = 125\text{ Mpa}$$

Módulo de sección según el proveedor:

$$S = 3.47\text{cm}^3 \rightarrow 3.47^{-6}\text{m}^3$$

Esfuerzo

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{426.67\text{N} * \text{m}}{3.47^{-6}\text{m}^3} = 122.96\text{ Mpa}$$

De la fórmula de esfuerzo de diseño esfuerzo de diseño: $\sigma_d = \frac{S_y}{N}$ se procede a despejar el factor de diseño así:

Ecuación k: Factor de diseño

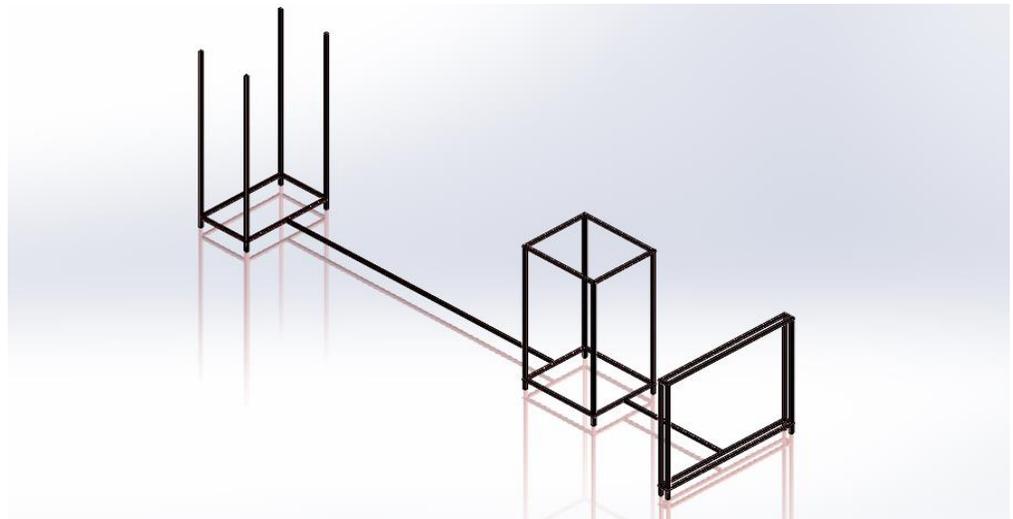
$$N = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{350 \text{ Mpa}}{122.96 \text{ Mpa}} = 2.846$$

Como se evidencia el factor de diseño calculado es de 2.8 y el factor de diseño del perfil escogido es de 2.84, lo que nos indica todos los razonamientos que se tuvieron presentes fueron acertados. Dando valides todos los cálculos hechos a partir de dicho valor son acertados.

3.12. Descripción general del nuevo rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento

El rediseño de la estructura de soporte está construido en su plenitud en tubo estructural cuadrado de 1 ½ “x 1 ½ “, de módulo de sección 3.47cm³. La estructura posee cuatro apoyos que sirven de soporte a la parte del ventilador, unido por un travesaño vertical que conecta la parte que sustenta la cámara de pruebas, seguido por un eslabón que se une con los soportes que sostienen la boquilla del túnel.

Ilustración 34: Rediseño de la estructura de soporte



Fuente: Autores

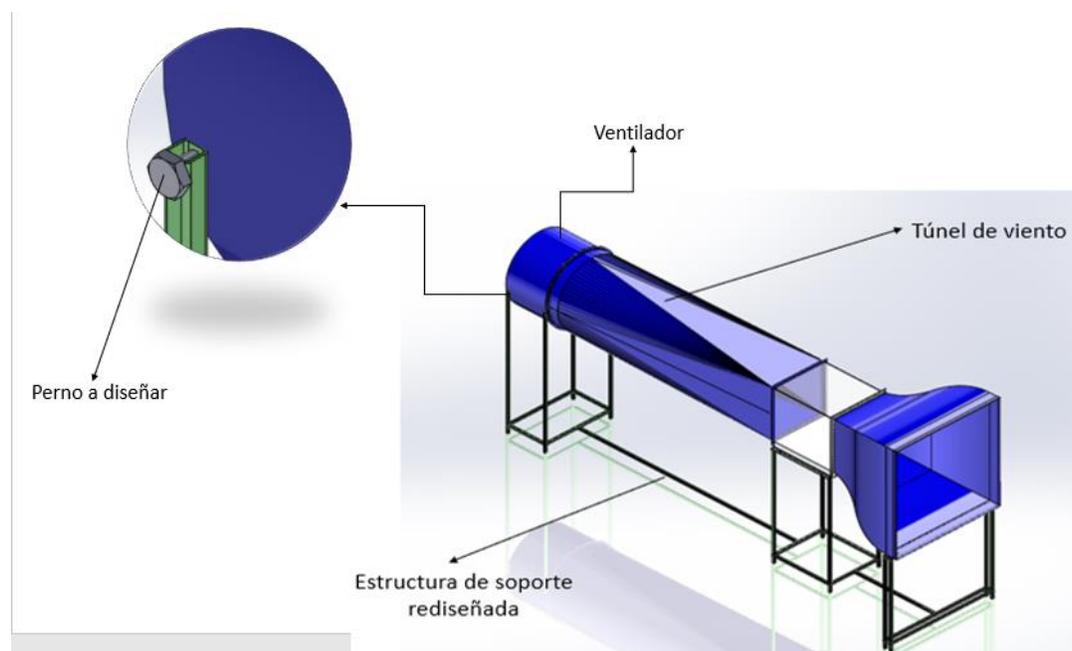
3.13. Documentación del diseño y realización de planos de construcción

Para mayor detalle de la realización del rediseño de la estructura ver planos de fabricación (Anexo D).

3.14. Diseño de perno de soporte

Como se puede observar (ver ilustración 35) con el nuevo rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento, la parte inicial de la estructura encargada de sostener el ventilador debe hacerlo expresamente por medio de unos pernos o tornillos, lo cual conlleva a la realización del diseño del diámetro de este.

Ilustración 35: Identificación del perno a diseñar



Fuente: Autores

Datos por considerar:

La parte del ventilador que compone túnel de viento, cuando esta se encuentra en estado de reposo (apagado) impone una carga cortante de $67.86\text{Kg} \rightarrow 149.6\text{lb}$, al encender el ventilador el motor de este ejerce una fuerza mayor para poder comenzar a mover las aspas, debido a este fenómeno, la carga cortante inicial se incrementa un 10%, pasamos de 149.6lb a 164.56lb . Se

espera que el sistema tenga muchos cientos de ciclos de carga y descarga (encender y apagar el ventilador).

Decisiones básicas del diseño del perno:

Se busca fabricantes de pernos sobresalientes en la industria y se encuentra la empresa: **Fabricaciones Electromecánica S.A.S (FEM)**, se adquiere el catálogo (Anexo digital B) de las diferentes clases de pernos que fabrican, y para este caso se escoge el tornillo estructural de cabeza hexagonal con norma ASTM 325 tipo 1.

En la ficha técnica de este componente indica que está fabricado con acero ASI 1040 estirado al frío, este es un acero de medio carbono que posee una resistencia a última tensión (S_u) de 80ksi y una resistencia a la fluencia (S_y) de 71ksi. Se evidencia que el perno está en cortante doble, por lo que son las secciones transversales las que sostienen la fuerza cortante producida. El ajuste que tendrá el perno entre la estructura de soporte y el ventilador debe ser estrecho para disminuir al máximo la flexión de este. El perno deberá tener un ajuste estriado con los orificios (huecos) que se le realicen a estructura, para evitar la rotación de este debido a las vibraciones producidas por el funcionamiento del ventilador.

Análisis:

El método de análisis de diseño que se aplica para este caso es el procedimiento de esfuerzos cortantes fluctuantes, debido a que el perno sufre estos esfuerzos, la ecuación que se ve a continuación describe este método:

Ecuación 1: Esfuerzos cortantes fluctuantes

$$\frac{K_t \tau_a}{S'_{sn}} + \frac{\tau_m}{S_{su}} = \frac{1}{N} \quad (54)$$

Ecuación m: Esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (55)$$

Debido a este método escogido se debe determinar la relación entre los esfuerzos medio y alternativo (τ_m y τ_a) en función de las cargas que lo afecten.

Por intermedio de estas ecuaciones se puede hallar la fuerza media:

Ecuación n: Fuerza media

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (56)$$

$$F_m = \frac{164.56 + 149.6}{2} = 157.07lb$$

La fuerza alternativa se halla así:

Ecuación o: Fuerza alternativa

$$F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \quad (57)$$

$$F_a = \frac{164.56 - 149.6}{2} = 7.48lb$$

Los valores de resistencia del material necesario para resolver el método de esfuerzos cortantes fluctuantes son:

La resistencia a la tensión en cortante se describe así:

Ecuación p: Resistencia en cortante

$$s_{su} = 0.75 s_u \quad (58)$$

$$s_{su} = 0.75(80ksi) = 60ksi \rightarrow 60000psi$$

La resistencia a la fatiga en cortante se expresa así;

Ecuación q: Resistencia a la fatiga en cortante

$$S'_{sn} = 0.577 S'_n \quad (59)$$

$$S'_n = C_R(S_n) \quad (60)$$

El factor C_R nos indica el grado de confiabilidad que se va a tener de la pieza a diseñar, en este caso se toma un grado de confiabilidad de 0.999, según la tabla $C_R = 0.75$

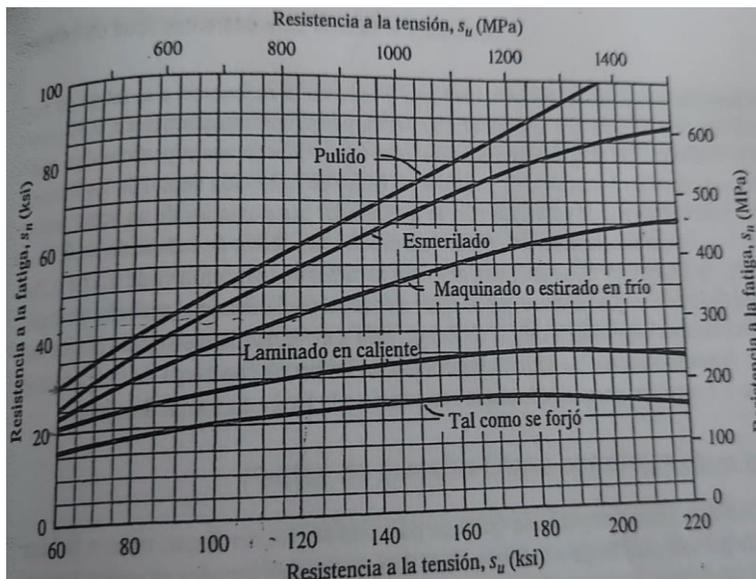
Tabla 6: Grado de confiabilidad

| Confiabilidad deseada | CR |
|-----------------------|------|
| 0.50 | 1.0 |
| 0.90 | 0.90 |
| 0.99 | 0.81 |
| 0.999 | 0.75 |

Fuente: Fabricaciones Electromecánica S.A.S (FEM)

Ya encontrado el grado de confiabilidad se debe buscar la resistencia a la fatiga S_n , para ello mediante la ilustración 36 se introduce resistencia a la tensión $S_u = 80\text{ksi}$ y para un perno estirando en frío, la resistencia a la fatiga (S_n) es de 30ksi

Ilustración 36: Resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión



Fuente: Diseño de elementos de máquinas Mott (2006)

Con el grado de confiabilidad encontrado y la resistencia a la fatiga se puede resolver la siguiente ecuación:

$$S'_n = C_R(S_n) \quad (61)$$

$$S'_n = 0.75(30) = 22.5ksi$$

Por consiguiente, se puede resolver la ecuación de la resistencia a la fatiga en cortante

$$S'_{sn} = 0.577 S'_n \quad (62)$$

$$S'_{sn} = 0.577(22500psi) = 12982.5psi$$

Con los datos ya encontrados se puede resolver la ecuación de esfuerzos cortantes fluctuantes

$$\frac{K_t \tau_a}{S'_{sn}} + \frac{\tau_m}{s_{su}} = \frac{1}{N}$$

Donde el factor $K_t = 1$ debido a que el perno debe tener un diámetro uniforme, ya que el pasador va a sufrir choques y vibraciones sobrios, se elige un factor de diseño $N = 3.5$, propio de estos dispositivos a diseñar.

Dado que $\tau_m = \frac{F_m}{2A}$ y $\tau_a = \frac{F_a}{2A}$ se procede a sustituir en la ecuación, quedando así:

$$\frac{F_m}{2As_{su}} + \frac{K_t F_a}{2AS'_{sn}} = \frac{1}{N} \quad (63)$$

Como se ve ya se tiene todos los valores, menos el área de la sección transversal del perno se procede a despejar A:

Ecuación r: Área sección trasversal perno

$$A = \left(\frac{N}{2}\right) \left(\frac{F_m}{s_{su}} + \frac{K_t F_a}{S'_{sn}}\right) \quad (64)$$

$$A = \left(\frac{3.5}{2}\right) \left(\frac{157.07}{6000} + \frac{1(7.480)}{12982.5}\right) = 0.0468 \text{ in}^2$$

Por último, se debe calcular el valor del diámetro mínimo admisible D del perno sabiendo que:

Ecuación s: Diámetro mínimo admisible

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (65)$$

El diámetro que requiere el perno es

$$D = \sqrt{\frac{4(0.0468)}{\pi}} = 0.241 \text{ in}$$

Decisiones finales del diseño del diámetro del perno:

El valor calculado mínimo que se debe admitir del diámetro del perno que sirve como anclaje de la estructura de soporte y el ventilador del túnel de viento es de 0.241 pulgadas, se remite al catálogo del proveedor, en este caso Fabricaciones Electromecánica S.A.S (FEM), y para el perno estructural de cabeza hexagonal con norma ASTM 325 tipo 1, el diámetro más pequeño que se fabrica es el de 0.5 pulgadas.

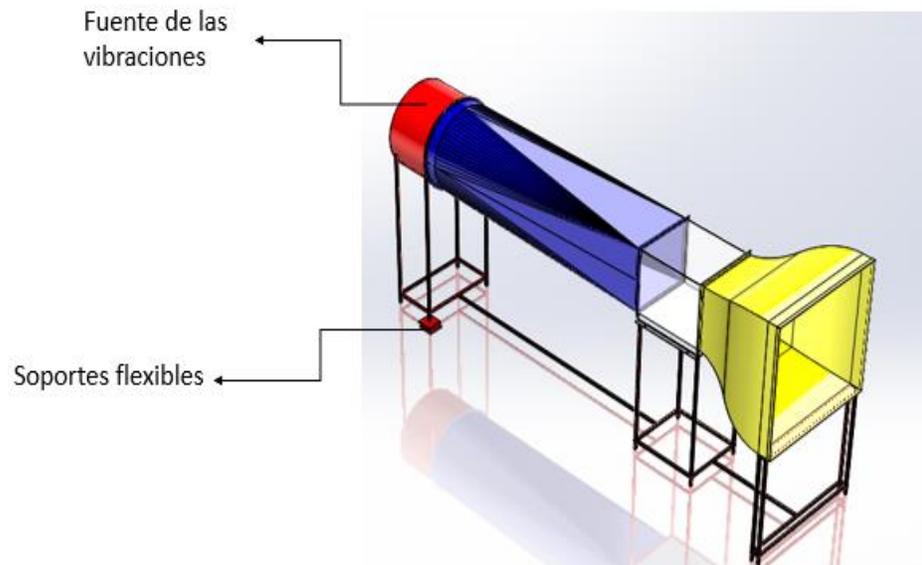
Se escoge diámetro de perno $D=0.5$ pulgadas que, aunque es un valor por encima del calculado es el más cercano a este.

3.15. Vibraciones mecánicas producidas en la estructura por la parte del túnel de viento

Ya realizado el rediseño de la estructura de soporte del túnel de viento, se evidencia que, en la parte donde va instalado el ventilador este, a la hora de estar en funcionamiento produce unas vibraciones que afectan considerablemente el funcionamiento de todo el sistema. De lo anterior sale la necesidad de lograr un buen aislamiento de las vibraciones de la zona de estudio, esto se logra a partir de una correcta selección y proyección de soportes flexibles que mitiguen las vibraciones.

Como se puede observar en la imagen la fuente de las vibraciones es el ventilador (color rojo) que utiliza cuatro soportes iguales, estos están distribuidos uniformemente a ambos lados del eje longitudinal de simetría. Las vibraciones se desplazan horizontalmente hacia la parte del difusor (azul), terminando en la boquilla (amarillo).

Ilustración 37: Fuente de las vibraciones en el túnel de viento



Fuente: Autores

3.15.1. Selección de los soportes flexible

La selección de los soportes flexibles se desarrollará para aislar la zona que sostiene la fuente de las vibraciones (ventilador), esta cuenta con 4 soportes, el procedimiento a seguir es el siguiente:

Datos necesarios:

- ✓ Peso de la maquina (ventilador):

$$w = 608.22 \text{ N}$$

- ✓ Velocidad angular:

$$n = 1300 \text{ rpm}$$

- ✓ Cantidad de soportes: La suma de soportes varía dependiendo de la estructura que se esté analizando, en este caso en particular se tienen que son 4

$$Csop = 4$$

Determinación de la parte del peso de la maquina (ventilador) que corresponde a cada soporte:

Ecuación t: Parte del peso que corresponde a cada soporte

$$P = \frac{w}{Csop} \quad (66)$$

$$P = \frac{608.22N}{4} = 152.056N$$

Determinación de la deflexión estática preliminar (enfoque analítico):

Para poder encontrar la frecuencia estática preliminar se debe encontrar la velocidad angular de la maquina

Ecuación u: Velocidad angular

$$wtr = n \frac{2\pi}{60} \quad (67)$$

$$wtr = 1300 \frac{2\pi}{60} = 136.13 \text{ rad/s}$$

Ya con la velocidad angular la frecuencia estática es:

Ecuación v: Frecuencia estática

$$\Delta estP = \frac{g}{\left(\frac{wtr}{3.5}\right)^2} \quad (68)$$

$$\Delta estP = \frac{9.81 \text{ m/s}}{\left(\frac{136.13 \text{ rad/s}}{3.5}\right)^2} = 6.48 \times 10^{-3} \text{ m} \rightarrow 6.48 \text{ mm}$$

Elección de los soportes flexibles:

Conociendo acerca de la cantidad de soportes flexibles que se pueden implementar para el aislamiento de las vibraciones, el que mejor se adapta al problema específico es el soporte tipo **sándwich**, debido a la sencillez y eficacia es bastante utilizado, este consta primordialmente de una placa metálica anclada a la estructura seguido de un bloque elastómero, estos dos componentes son atravesados por agujeros para el paso de pernos que fijan el sistema al suelo.

3.15.2. Proyección de los soportes elastoméricos

Ya escogido el tipo de soporte flexible que se va a utilizar se procede a realizar la proyección de los soportes elastomérico. Se sigue el siguiente procedimiento:

Datos necesarios:

- ✓ Peso de la maquina (ventilador):

$$w = 608.22 \text{ N}$$

- ✓ Masa de la maquina

$$m = 62 \text{ kg}$$

- ✓ Velocidad angular:

$$n = 1300 \text{ rpm} \rightarrow 136.13 \text{ rad/s}$$

- ✓ Cantidad de soportes:

$$C_{sop} = 4$$

Selección del material elastómero: El material se escoge de acuerdo con la siguiente tabla

Tabla 7: Propiedades de los materiales elastómeros

| Propiedad | Goma natural | Neopreno | Base Silicón |
|---|--------------|-----------|--------------|
| Adhesión al metal. | Excelente | Excelente | Buena |
| Resistencia a la tracción. | Excelente | Excelente | Buena |
| Resistencia a la rotura. | Buena | Buena | Regular |
| Resistencia a la compresión. | Buena | Buena | Regular |
| Factor de amortiguamiento. | 0.04 | 0.04 | 0.15 |
| Máxima temperatura de trabajo. | 93.3 °C | 93.3 °C | 176.66 °C |
| Aumento de la rigidez a 18.33 °C. | 10X | 10X | 2X |
| Resistencia a los aceites. | Mala | Buena | Regular |
| Resistencia al ozono. | Mala | Buena | Excelente |
| Resistencia al envejecimiento por la luz. | Mala | Muy buena | Excelente |
| Costo. | Bajo | Moderado | Alto |

Fuente: Vibraciones mecánicas volumen 2

Tabla 8: Parámetros característicos elastómeros

| Dureza Shore A | Módulo de Young (E ₀) | | Módulo a cizallamiento (G) | | Constante (K) de corrección | Módulo de compresibilidad (E _{ca}) | |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---|---------------------|
| | lbf/plg ² | kgf/cm ² | lbf/plg ² | kgf/cm ² | | lbf/plg ² | kgf/cm ² |
| 30 | 130 | 9.2 | 43 | 3.5 | 0.93 | 142 000 | 10 000 |
| 35 | 168 | 11.8 | 53 | 3.7 | 0.89 | 142 000 | 10 000 |
| 40 | 213 | 15.0 | 64 | 4.5 | 0.85 | 142 000 | 10 000 |
| 45 | 256 | 18.0 | 76 | 5.4 | 0.80 | 142 000 | 10 000 |
| 50 | 310 | 22.0 | 90 | 6.4 | 0.73 | 146 000 | 10 300 |
| 55 | 460 | 32.5 | 115 | 8.1 | 0.64 | 154 000 | 10 900 |
| 60 | 630 | 44.5 | 150 | 10.6 | 0.57 | 163 000 | 11 500 |

Fuente: Vibraciones mecánicas volumen 2

El material elegido es la goma natural, debido a sus buenas propiedades aislantes y al bajo costo de adquisición y tratamiento, este material tiene un factor de amortiguamiento de 0.04. Se elige que la goma natural tenga una dureza Shore A de 60, con un módulo de Young de 44.5 kgf/cm² y una constante de corrección adimensional (k) de 0.57

✓ Angulo de inclinación de los soportes:

Como no se tiene un ángulo de inclinación de los soportes este es $\alpha=0$

✓ Determinación de la deflexión estática preliminar

Ecuación w: Deflexión estática

$$\Delta_{estP} = \frac{9.81m/s}{\left(\frac{136.13rad/s}{3.5}\right)^2} = 6.48 \times 10^{-3}m \rightarrow 6.48mm$$

- ✓ Seleccionar la forma y dimensiones del soporte

Se decide tomar una forma rectangular para el soporte, para garantizar la estabilidad a compresión, se toma la relación: lado/ altura (L/H)

Ecuación x: Relación lado/altura

$$\frac{L}{H} \geq 1.65 \quad (69)$$

Se asume que el rectángulo tenga como medida de sus lados L=12cm Y L2= 10cm.

$$H \leq \frac{12}{1.65} = 7.27cm \quad (70)$$

Se escoge el valor de H= 7 cm

- ✓ Determinación del factor de forma del soporte:

El factor de forma de un rectángulo será:

Ecuación y: Factor de forma rectángulo

$$s = \frac{L1 L2}{2(L1 + L2)H} \quad (71)$$

$$s = \frac{12(10)}{2(12 + 10)7} = 0.389$$

- ✓ Determinación de modulo efectivo en compresión del soporte

Ecuación z: Modulo efectivo en compresión

$$E_c = E_0(1 + 2k s^2) \quad (72)$$

$$E_c = 44.5(1 + 2(0.57) (0.389^2))$$

$$E_c = 52.17kgf / cm^2$$

- ✓ Determinación de la deflexión estática real para el soporte proyectado

Ecuación aa: Deflexión estática real

$$\Delta_{str} = \frac{w H}{Area (E_c)} \quad (73)$$

Área de un rectángulo

Ecuación bb: Área rectángulo

$$A = L1 \times L2 \quad (74)$$

$$A = 12cm(10cm) = 120cm^2$$

$$\Delta_{str} = \frac{608.22 (7)}{120(52.17)} = 0.68cm \rightarrow 6.8cm$$

Como se puede observar la deflexión estática real determinada es mayor a la deflexión estática preliminar, lo que indica que el sistema está trabajando en la zona de aislamiento vibratorio, lo que nos indica que los resultados son válidos.

- ✓ Coeficiente de rigidez total de los soportes

Ecuación cc: Coeficiente de rigidez total

$$K_S = \frac{\text{Area} (E_C)}{H} \quad (75)$$

$$K_S = \frac{120(52.17)}{7} = 894.34 \frac{kgf}{cm} \rightarrow 8770 \frac{N}{m} .479$$

- ✓ Para encontrar el coeficiente de rigidez total se deben multiplicar la constante de rigidez por el número de soportes, debido a que todos los soportes son iguales.

Ecuación dd: Constante de rigidez

$$k = C_{sop} (K_S) \quad (76)$$

$$k = 4(8770.479 \frac{N}{m}) = 35081.916 \frac{N}{m}$$

- ✓ Frecuencia natural del sistema suspendido sobre los soportes

Ecuación ee: Frecuencia natural

$$wn = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (77)$$

$$wn = \sqrt{\frac{35081.916 \frac{N}{m}}{62kg}} = 23.78rad/s$$

- ✓ Relación de frecuencias

Ecuación ff: Relación de frecuencias

$$Rf = \frac{wtr}{wn} \quad (78)$$

$$Rf = \frac{136.13rad/s}{23.78rad/s} = 5.72$$

El rediseño del soporte del túnel de viento se hizo fundamentalmente siguiendo todos los criterios, básicos de un diseño de estructuras, en donde se toman como referencias, las fuerzas externas que se puedan encontrar y los esfuerzos producidos por las mismas, sin dejar de a un lado todas las propiedades referentes al material principal de construcción y a la definición de un grado de confiabilidad. La estructura de soporte fue realizada en perfil estructural cuadrado (26.4 metros lineales) debido a su versatilidad y manejo. Aparte del rediseño de la estructura de soporte se diseñó los diámetros de los pernos de sujeción, enfocados primordialmente en las zonas donde más son necesarios. Debido las vibraciones mecánicas a la que está sometido el sistema, por parte del ventilador axial que hace parte del túnel de viento, se diseñaron unos soportes elásticos tipo sándwich, para dar una solución de este inconveniente. Los soportes elásticos diseñados son de forma rectangular (12cm de largo y 7 cm de ancho) de goma natural, con una inclinación de cero grados; estos están ubicados en los cuatro apoyos que hacen parte de la estructura y sostienen el ventilador, para el diseño y escogencia de los apoyos elásticos se analizaron variables tales como: velocidad angular, propiedades de los elastómeros, frecuencia natural y coeficiente de rigidez.

4. Caracterización matemática del funcionamiento del ventilador con que opera el túnel de viento

4.1. Metodología de la caracterización

El método aplicado para la caracterización matemática teórica del ventilador, se basa primordialmente el seguimiento de una serie de pasos, que tienen como fin último encontrar la curva de trabajo de la máquina y todos aquellos datos de vital importancia con la cual funciona. Los valores iniciales de mayor relevancia fueron extraídos del catálogo propio de la máquina. El orden del procedimiento que se sigue se describe a continuación:

- a) Identificación del ventilador al cual se le va a realizar la descripción (nombre del ventilador conocido industrialmente y modelo)
- b) Generalidades del ventilador TAT 630/H
- c) Características más relevantes del ventilador
- d) Aplicaciones más comunes en donde se puede utilizar el equipo
- e) Características técnicas de funcionamiento
- f) Dimensiones y accesorios que lo componen
- g) Descripción de todas las leyes (formulas) aplicadas al ventilador
- h) Variables del ventilador de estudio TAT630/H
- i) Datos de condiciones ambientales
- j) Datos físicos y condiciones iniciales del equipo
- k) Construcción del triángulo de velocidades a la entrada del fluido
- l) Realización del triángulo de velocidades a la salida del fluido
- m) Cálculo de la velocidad del rodete periférica circunferencial a la entrada y a la salida
- n) Componentes de las velocidades absolutas meridionales a la entrada y salida
- o) Obtención del ángulo a la entrada y salida del álabe
- p) Computo de la velocidad al borde de entrada y salida del álabe w_1
- q) Cálculo de las velocidades absolutas c_1
- r) Deducción del ángulo de ataque tanto a la entrada como a la salida del fluido
- s) Cálculo de presiones producida por el ventilador

- t) Obtención de la potencia de salida y entrada del motor
- u) Cálculo de la eficiencia mecánica

Con el resultado de los anteriores ítems se encuentra finalmente la curva de trabajo con la que opera el ventilador, superando así el objetivo primordial de la descripción matemática de dicho equipo.

Al obtener la curva de trabajo del ventilador, se descubre la necesidad de realizar como complemento la pérdida de carga de este, este está ligado con el conducto en el cual está instalada la maquina hidráulica (cuerpo del túnel), para finalmente construir la gráfica que da como resultado el punto de trabajo. El proceso se da en los siguientes pasos:

- I. Cálculo de pérdida de carga por el método del coeficiente 'n'
- II. Esquema general de los conductos donde está instalado el ventilador
- III. Datos iniciales tales como velocidad el aire, caudal y presión dinámica
- IV. Computo uno a uno de los accidentes de conducción (boquillas, codos, boca campanas, etc.) del aire, adicionando los tramos rectos.
- V. Utilizar la fórmula de pérdida de carga y finalmente sumar todas las pérdidas para obtener la pérdida total.
- VI. Calcular todas las pérdidas de carga total siguiendo los pasos anteriores, modificando el caudal del ventilador.
- VII. Graficar los resultados para obtener la curva de pérdida de carga de todo el sistema.
- VIII. Superponer la curva de trabajo del ventilador con la curva de pérdida de carga de este, intersección de las dos graficas da como resultado el punto de trabajo.

4.2. Variables conocidas del ventilador de estudio (630/H)

4.2.1. Datos de condiciones ambientales

El ventilador TAT 630/H que hace parte del túnel viento que se encuentra ubicado en los laboratorios de mecánica de fluidos de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Antonio Nariño posee las siguientes condiciones ambientales:

Cuidad de ubicación: Bogotá D.C

Temperatura promedio: $14.55^{\circ} \text{ Celcius}$

Altitud media: 2640 (msnm)

Ya con los datos anteriormente descritos se puede encontrar el valor de la densidad del aire con la cual el ventilador va a trabajar. La ecuación que relaciona la temperatura y la altitud se presenta a continuación:

Ecuación gg: Densidad del aire

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (79)$$

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{14.55 + 273} \right) e^{-\left(\frac{2640}{8435}\right)}$$

$$\rho = 0.897 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

4.2.2. Datos físicos y condiciones iniciales del equipo

Los siguientes datos que se describen fueron obtenidos de acuerdo al catálogo encontrado del ventilador.

Velocidad: $1300 \frac{\text{Rev}}{\text{min}}$

Caudal: $14285 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \rightarrow 3.96 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Potencia: 2 Hp

Diámetro del ventilador a la entrada: 630 m

Diámetro del ventilador a la salida: 670 mm

Ancho del rodete a la entrada y a la salida:

$$b_1 = 60\text{mm} ; b_2 = 60\text{mm}$$

Por el tipo de ventilador se puede entender que la velocidad en los alabes es radial en la entrada.

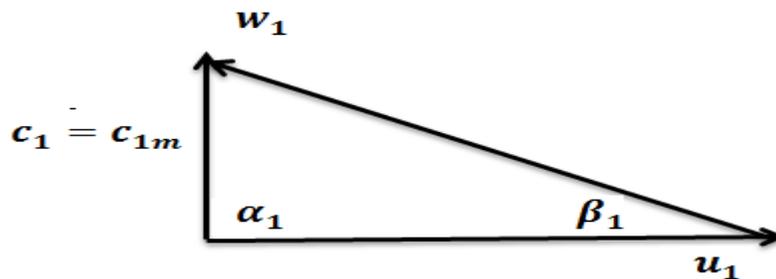
Con los datos anteriormente descritos se procede a buscar las demás especificaciones del ventilador para tener completamente todos los parámetros con que este opera, además poder encontrar la curva de trabajo con que este opera.

4.2.3. Desarrollo de los cálculos de la caracterización

Se inicia construyendo los triángulo de velocidades, seguido del cálculo de todas las velocidades, para posteriormente hallar los valores de potencia y eficiencia, para finalmente encontrar las presiones estáticas.

Triángulo de velocidades a la entrada

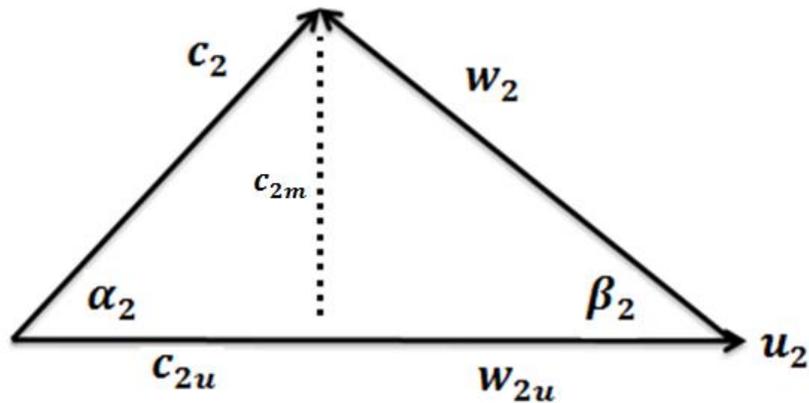
Ilustración 38: Triángulo de velocidades entrada



Fuente: Mecánica de fluidos Claudio Mataix

Triángulo de velocidades a la salida

Ilustración 39: Triángulo de velocidad salida



Fuente: *Mecánica de fluidos Claudio Mataix*

Velocidad del rodete periférica circunferencial a la entrada

Ecuación hh: Velocidad rodete periférica entrada

$$u_1 = \frac{\pi \times 0.63 \times 1300}{60}$$

$$u_1 = 42.88 \frac{m}{s}$$

Velocidad del rodete periférica circunferencial a la salida

Ecuación ii: Velocidad rodete periférica salida

$$u_2 = \frac{\pi \times 0.67 \times 1300}{60}$$

$$u_2 = 45.6 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta meridional a la entrada

Ecuación jj: Velocidad absoluta meridional entrada

$$c_{1m} = \frac{3.96}{\pi \times 0.06 \times 0.63}$$

$$c_{1m} = 33.346 \frac{m}{s}$$

Angulo de los alabes a la entrada

Ecuación kk: Angulo de los alabes entrada

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{33.346}{42.88}$$

$$\beta_1 = 37.87^\circ$$

Angulo de los alabes a la salida

Ecuación ll: Angulo de los alabes salida

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{0.315}{0.335} \times \cos 37.87 \right)$$

$$\beta_2 = 42.07^\circ$$

Velocidad absoluta circunferencial a la salida

Ecuación mm: Velocidad absoluta circunferencial salida

$$c_{2m} = \frac{\pi \times 0.63 \times 0.06 \times 33.346}{\pi \times 0.67 \times 0.06}$$

$$c_{2m} = 31.355 \frac{m}{s}$$

Velocidad relativa circunferencial a la salida

Ecuación nn: Velocidad relativa circunferencial salida

$$w_{2u} = \frac{31.355}{\tan 42.07}$$

$$w_{2u} = 34.73 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta circunferencial a la salida

Ecuación oo: Velocidad circunferencial salida

$$c_{2u} = 45.6 - 34.73$$

$$c_{2u} = 10.87 \frac{m}{s}$$

Altura del ventilador

Ecuación pp: Altura ventilador

$$H_u = \frac{45.6 \times 10.87 - 42.88 \times 0}{9.81}$$

$$H_u = 50.52m$$

Velocidad relativa radial a la entrada

Ecuación qq: Velocidad relativa entrada

$$w_1 = \left(\frac{33.346}{\text{sen}(37.87)} \right) \times \text{sen}(90)$$

$$w_1 = 54.32 \frac{m}{s}$$

Velocidad relativa radial a la salida

Ecuación rr: Velocidad relativa radial salida

$$w_2 = \left(\frac{31.355}{\text{sen}(42.07)} \right)$$

$$w_2 = 46.76 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta a la entrada

Ecuación ss: Velocidad absoluta entrada

$$c_1^2 = \left(42.88^2 + 54.32^2 - 2(42.88 \times 54.32 \cos(37.87)) \right)$$

$$c_1^2 = 1111.92$$

$$c_1 = \sqrt{1111.92}$$

$$c_1 = 33.34 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta a la salida

Ecuación tt: Velocidad absoluta salida

$$c_2^2 = c_{2u}^2 + c_{2m}^2$$

$$c_2^2 = 10.87^2 + 31.355^2$$

$$c_2^2 = 1101.29$$

$$c_2 = \sqrt{1101.29}$$

$$c_2 = 33.18 \frac{m}{s}$$

Angulo de ataque a la salida del fluido

Ecuación uu: Angulo de ataque a la salida

$$\text{sen}\alpha_2 = \left(\frac{w_{2u} \times \text{sen}\beta_2}{c_2} \right)$$

$$\alpha_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{w_{2u} \times \text{sen}\beta_2}{c_2} \right)$$

$$\alpha_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{34.73 \times \text{sen}42.07}{33.18} \right)$$

$$\alpha_2 = 44.53^\circ$$

Presión estática del rodete

Ecuación vv: Presión estática del rodete

$$P_t = \left(\left(\frac{\rho}{2} \right) \left((u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2) \right) \right)$$

$$P_t = \left(\left(\frac{0.897}{2} \right) \left((45.6^2 - 42.88^2) + (54.32^2 - 46.76^2) \right) \right)$$

$$P_t = 122.23 \text{ Pa}$$

Velocidad a la salida

Ecuación ww: Velocidad a la salida

$$V = \frac{Q}{A_2}$$

$$V = \frac{3.96}{0.3525}$$

$$V = 11.23 \frac{m}{s} \rightarrow 2210.6 \frac{ft}{min}$$

Presión de velocidad

Ecuación xx: Presión de velocidad

$$Vp = \left(\frac{V}{4005} \right)^2$$

$$Vp = \left(\frac{2210.6}{4005} \right)^2$$

$$Vp = 0.3046 \text{ inWC} \rightarrow 75.79 \text{ Pa}$$

Presión total

Ecuación yy: Presión total

$$Tp = P_t + Vp$$

$$Tp = 122.23 + 75.79$$

$$Tp = 198.02 \text{ Pa} \rightarrow 0.7957 \text{ in WC}$$

Potencia de salida del motor

Ecuación zz: Potencia de salida del motor

$$P_{out} = \left(\frac{Q \times Tp}{6356} \right)$$

$$P_{out} = \left(\frac{8390 \text{ cfm} \times 0.7957 \text{ inWC}}{6356} \right)$$

$$P_{out} = 1.050 \text{ hp}$$

Inercia del rodete

Ecuación aaa: Inercia rodete

$$i = w \times k^2$$

Sustituyendo las ecuaciones de la masa y del rango de giro del rodete tenemos que la inercia nos queda así:

$$i = \left(\frac{(\pi(r_2^4 - r_1^4) \times b \times g \times \rho)}{2 \times (1, 0)} \right)$$

$$i = \left(\frac{(\pi(0.335^4 - 0.315^4) \times 0.06 \times 9,8 \times 2.7)}{2 \times (1, 0)} \right)$$

$$i = 6.8620 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Torque del ventilador

Como ya se encontró la inercia del rodete (i) y el valor de (n) es igual a las máximas rpm del motor del ventilador, en este caso 1300, y el valor de (t) es el tiempo en cual se le asigna un segundo, para obtener el máximo valor del torque a tener sus máximas revoluciones por minuto al arranque. Se tiene que:

Ecuación bbb: Torque ventilador

$$T = \left(\frac{i(n_1 - n_2)}{\left(\frac{1}{2\pi}\right) \times t} \right)$$

$$T = \left(\frac{6.8620 \times 10^{-3}(1300)}{\left(\frac{1}{2\pi}\right) \times 1} \right)$$

$$T = 56.049 \text{Nm}$$

Para un régimen del motor estable se establece un tiempo de 5.5 segundos, y se vuelve a calcular el torque y este queda así:

$$T = \left(\frac{6.8620 \times 10^{-3} (1300)}{\left(\frac{1}{2\pi}\right) \times 5.5} \right)$$

$$T = 10.19 Nm$$

Como se ve en el resultado final el torque al arrancar el motor, es mucho más grande que el torque ya pasado unos segundos de operación, esto se debe a que, al arranque, el motor debe vencer la inercia del rodete que esta sin movimiento, lo que incrementa el torque.

Potencia requerida del motor trifásico

Ya con los valores de la inercia y del torque del motor en funcionamiento normal se procede reemplazar en la ecuación:

Ecuación ccc: Potencia requerida motor

$$P = \left(\frac{T \times n}{\frac{60}{2\pi}} \right)$$

$$P = \left(\frac{10.19 Nm \times 1300}{\frac{60}{2\pi}} \right)$$

$$P = 1387.22 watt \rightarrow 1.8578 hp$$

La potencia requerida para el motor trifásico es acorde a la potencia que se especifica en el catálogo del ventilador.

Eficiencia eléctrica del motor

Con el valor ya conocido de potencia del motor, y con los datos de voltaje, corriente y factor de potencia obtenidos directamente del catálogo del ventilador se procede a encontrar la eficiencia.

Ecuación ddd: Eficiencia eléctrica

$$Ef = \left(\frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I \times fp} \right)$$

$$V = 230V$$

$$I = 6,2 A$$

$$fp = 0.86$$

$$Ef = \left(\frac{1387.22 \text{ watt}}{\sqrt{3} \times 230V \times 6.2A \times 0.86} \right)$$

$$Ef = 0.65 \rightarrow 65\%$$

La eficiencia obtenida del motor eléctrico es acorde a los rangos establecidos para este tipo de máquinas.

Eficiencia mecánica del motor

Con el resultado de la potencia de salida y la potencia de entrada se obtiene la eficiencia mecánica, de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación eee: Eficiencia mecánica

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\eta_m = \frac{1.050hp}{1.8578hp}$$

$$\eta_m = 0.5665 \rightarrow 56.65\%$$

La eficiencia mecánica del motor del ventilador es de más del **50%**, esto ocurre debido a que los componentes con los que está construida la maquina al estar en movimiento están en constante fricción lo que implica que un porcentaje de la energía transmitida se convierta en calor.

4.2.4. Curva de trabajo del ventilador

Para poder encontrar la curva de trabajo del ventilador se procede a asignar diferentes valores de caudal manteniendo las revoluciones constantes. Al variar el caudal que desplaza el ventilador se obtienen diferentes presiones, utilizando la siguiente formula:

Ecuación fff: Curva de trabajo del ventilador

$$P_{est} = \left(V_2^2 - \left(\frac{V_2 \times \cot(\beta_2) \times Q}{(2\pi \times r_2 \times b_2)} \right) \right) \rho$$

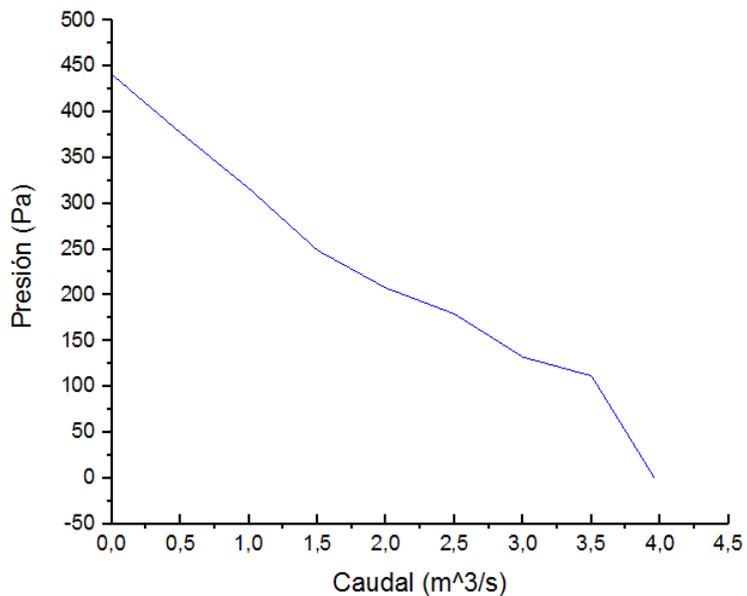
Para la realización y la obtención de los resultados se determina mantener las revoluciones constantes, en este caso 1300, con la variación del caudal que produce el ventilador de forma incremental.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

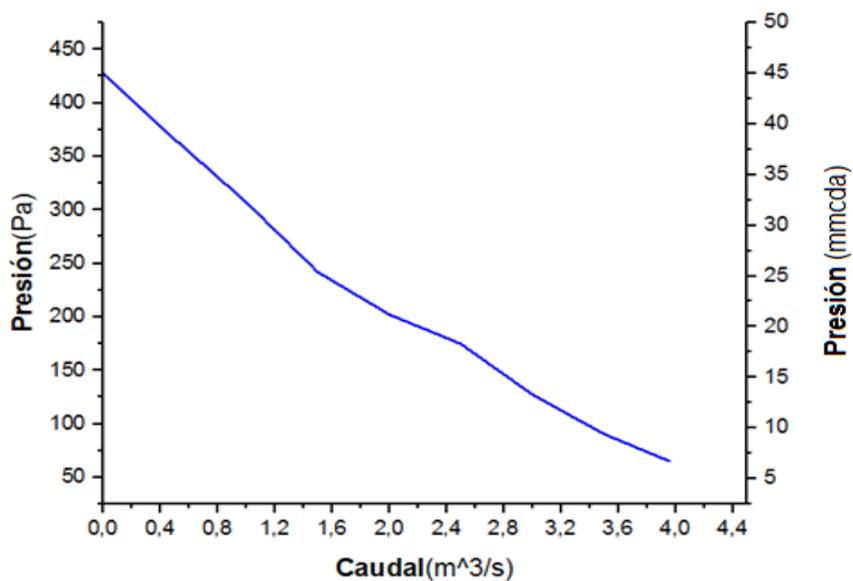
Tabla 9: Valores curva de trabajo del ventilador

| Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ | Presión [Pa] | Eficiencia [%] |
|-------------------------------------|--------------|----------------|
| 0 | 441,0035 | 0 |
| 0,5 | 377,3 | 7,105 |
| 1 | 316,54 | 14,27 |
| 1,5 | 248,92 | 21,42 |
| 2 | 207,76 | 28,5283 |
| 2,5 | 179,34 | 35,7 |
| 3 | 132,3 | 42,79 |
| 3,5 | 111,72 | 56,65 |
| 3,96 | 0 | 0 |

Fuente: Autores

Ilustración 40: Curva de trabajo del ventilador A

Fuente: Autores

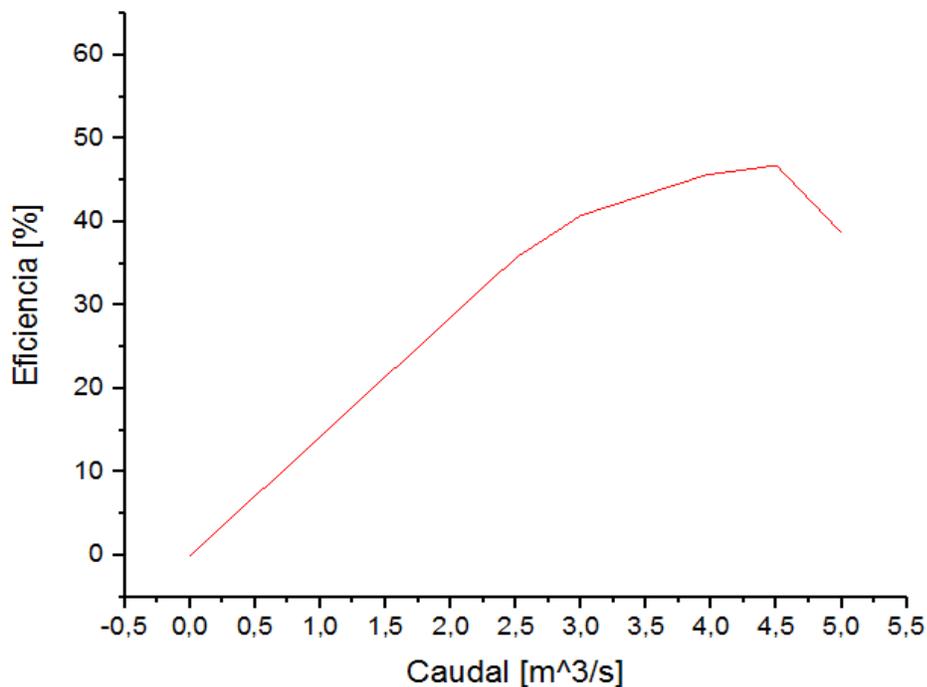
Ilustración 41 Curva de trabajo del ventilador B

Fuente: Autores

Como se puede observar en la gráfica de la curva de trabajo del ventilador, empieza con una presión de 441 pascales con un caudal nulo, a medida que va en crecimiento el caudal la

presión disminuye, son inversamente proporcionales. Se puede observar que cuando el ventilador está a descarga libre, es decir cuando la presión es cero, este proporciona el máximo caudal.

Ilustración 42 Eficiencia mecánica del ventilador



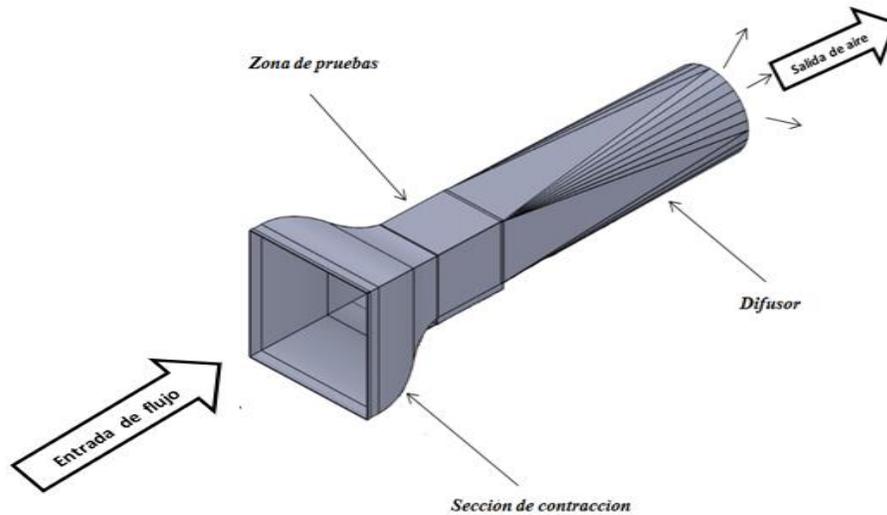
Fuente: Autores

La máxima eficiencia del ventilador es de 56,65% cuando proporciona un caudal aproximado de 4,5 ($\frac{m^3}{s}$), lo que nos indica que para sacar el máximo potencial de la máquina el rango de funcionamiento debe de estar alrededor de ese valor, claro esta se debe de tener en cuenta más variables.

4.2.5. Pérdida de carga del sistema

4.2.5.1. Cálculos de pérdida de carga

Ilustración 43: Esquema general de los conductos donde está instalado el ventilador



Fuente: Autores

4.2.5.2. Descripción del esquema y datos iniciales del sistema

El esquema anterior representa un túnel de viento, donde el aire de funcionamiento está a cargo de un ventilador axial que succiona el fluido, conduciéndolo por el difusor, pasándolo por la cámara de pruebas, para finalmente extraerlo nuevamente a la atmósfera por la sección de contracción. Por lo anteriormente descrito del funcionamiento de la máquina se sabe que el ventilador se encuentra a la entrada del aire en el extremo opuesto a la salida de este.

El caudal máximo que maneja el ventilador es de $14285 \frac{m^3}{h} \rightarrow 3.96 \frac{m^3}{s}$

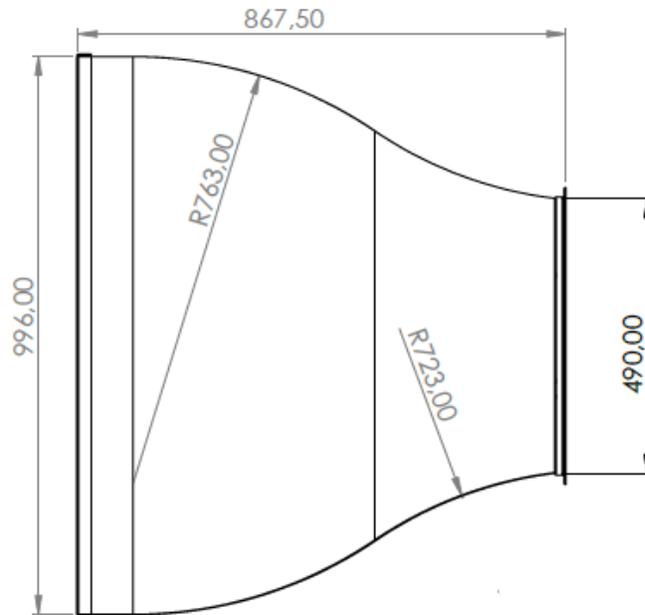
La velocidad del viento dentro del conducto se sabe que es de $11.23 \frac{m}{s}$

La presión dinámica promedio dentro del ducto es de $75.79 Pa \rightarrow 7.725 mmcda$

4.2.5.3. Cálculo de los accidentes de conducción

Difusor (Boca campana)

Ilustración 44: Medidas difusor



Fuente: Autores

De acuerdo con la gráfica del anexo F, el coeficiente (n) de pérdida de carga de la boca campana es de 1.2

Ecuación ggg: Pérdida de carga boca campana

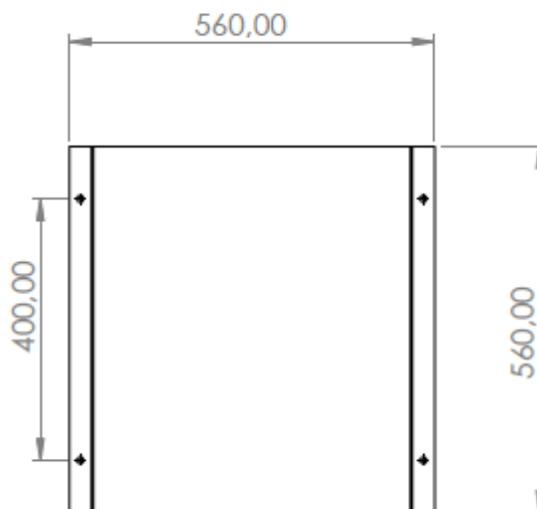
$$\Delta P1 = (\text{coeficiente } n \text{ de pérdida})(\text{perdida por metro})(Pd) \quad (80)$$

$$\Delta P1 = (1.2)(0.8675)(7.725 \text{ mmca})$$

$$\Delta P1 = 8.041 \text{ mmcda}$$

Zona de pruebas (conducto rectangular)

Ilustración 45: Zona de pruebas



Fuente: Autores

En esta sección, el conducto no es circular, es necesario determinar antes la sección circular equivalente, con el nomograma del anexo G, al introducir los datos de la sección que pide la tabla, da como resultado que posee una sección equivalente de aproximadamente 50 centímetros cuadrados, al utilizar este valor en el anexo, no es posible encontrar el coeficiente de pérdida, puesto que el valor encontrado no se encuentra en dicho gráfico. Se asume que como la sección rectangular es reducida a comparación del resto del ducto (túnel de viento), se toma como un ducto circular recto, con los datos de caudal y velocidad se puede decir que el coeficiente de pérdida es de 0.2, leído directamente del anexo.

Ecuación hhh: Pérdida de carga zona de pruebas

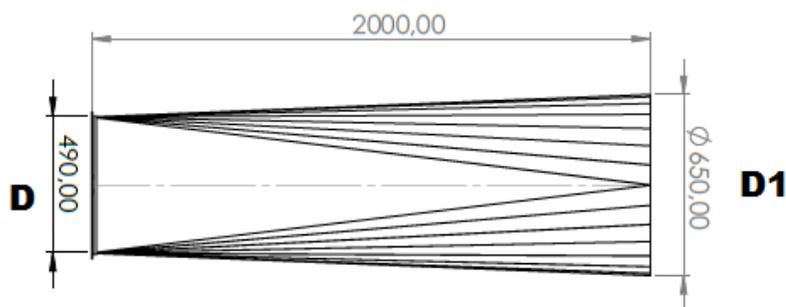
$$\Delta P_2 = (\text{coeficiente } n \text{ de pérdida})(Pd) \quad (81)$$

$$\Delta P_2 = (0.2)(7.725 \text{ mmca})$$

$$\Delta P_2 = 1.545 \text{ mmcda}$$

Difusor (Conducto recto circular)

Ilustración 46: Difusor

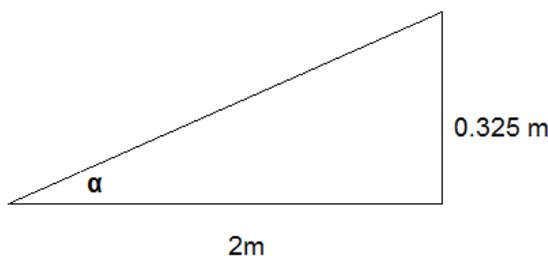


Fuente: Autores

Para encontrar el coeficiente de pérdida de carga de esta sección se debe identificar que es una sección de cambio gradual, en este caso en particular va de menor diámetro a mayor diámetro (aumento), es necesario recurrir al anexo H e identificar las tablas de cambio gradual y enfocarse en la parte de aumento. Como se observa en el anexo es necesario encontrar el ángulo de apertura y la relación de diámetros de la sección.

- ✓ La relación de diámetros de la sección es: $\frac{D}{D_1} = \frac{0.49}{0.65} = 0,75$ este resultado se aproxima a 0,8, para una mejor visualización en la tabla correspondiente
- ✓ Angulo de apertura de la sección, se utiliza la identidad trigonométrica tangente para hallar dicho valor, como se visualiza en la siguiente imagen:

Ilustración 47: Angulo apertura de la sección



Fuente: Autores

Ecuación iii: Angulo de apertura de la sección

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0.325}{2} \quad (82)$$

$$\alpha = 9.22^\circ$$

Con una relación de diámetros 0.75 y un ángulo de apertura 9.22 grados, el coeficiente (n) de pérdida de carga del conducto recto circular es de 0.275.

Ecuación jjj: Perdida de carga difusor

$$\Delta P3 = (\text{coeficiente } n \text{ de pérdida})(\text{perdidad por metro}) \quad (83)$$

$$\Delta P3 = (0.275)(2)$$

$$\Delta P3 = 0.55 \text{ mmcda}$$

Perdida de carga total

Ya con la pérdida de carga de cada uno de los accidentes de conducción calculada, se suman todos los resultados para finalmente hallar la pérdida total de carga.

Ecuación kkk: Perdida de carga total

$$\Delta Pt = \Delta P1 + \Delta P2 + \Delta P3 \quad (84)$$

$$\Delta Pt = 8.041 + 1.545 + 0.55$$

$$\Delta Pt_1 = 10.136 \text{ mmcda}$$

El ventilador axial con un caudal de $14285 \frac{m^3}{h} \rightarrow 3.96 \frac{m^3}{s}$, una presión dinámica de 7.725 mmca y una velocidad promedio de operación de $11.23 \frac{m}{s}$, conectado al ducto (túnel de viento), presenta una pérdida de carga de 10.136 mmcda.

Valor total de todas las pérdidas de carga

Ya encontrada la pérdida de carga inicial ΔPt_1 con un caudal determinado, se debe suponer un segundo caudal, para hallar un nuevo punto en la gráfica de la característica resistente ΔPt_2 , es necesario disponer de más caudales para obtener más puntos de pérdida de carga de la misma

instalación, los cuales completen dicha gráfica. La pérdida de carga de una conducción varía en proporción con el cuadrado del caudal según como lo muestra la siguiente fórmula:

Ecuación III: Pérdida de carga secundaria

$$\Delta Pt_2 = \Delta Pt_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \quad (85)$$

ΔPt_2 = Pérdida de carga secundaria

ΔPt_1 = Pérdida de carga inicial

Q_2 = Caudal secundario

Q_1 = Caudal primario

Para el cálculo de un nuevo punto de pérdida resistente se escoge un caudal secundario (Q_2)

de $0.5 \frac{m^3}{s}$

$$\Delta Pt_1 = 10.136 \text{ mmcda} \rightarrow 99.43416 \text{ Pa}$$

$$Q_1 = \frac{m^3}{s}$$

$$\Delta Pt_2 = \Delta Pt_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2$$

$$\Delta Pt_2 = 99.43416 \left(\frac{0.5}{3.96} \right)^2$$

$$\Delta Pt_2 = 1,5852 \text{ Pa}$$

Las demás pérdidas de carga con su variación de caudales se representan en la siguiente tabla:

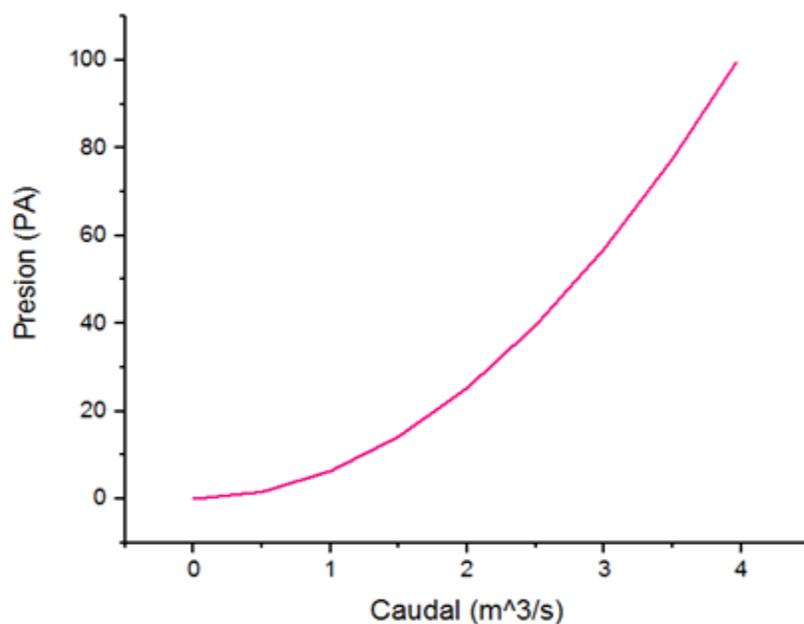
Tabla 10: Pérdida de carga

| Caudal ($\frac{m^3}{s}$) | Pérdida de carga (Pa) |
|--|--|
| 0.5 | 1.5852 |
| 1 | 6.34 |
| 1.5 | 14.26 |
| 2 | 25.36 |
| 2.5 | 39.63 |
| 3 | 57.06 |
| 3.96 | 99.4316 |

Fuente: Autores

Gráfica característica resistente de la instalación

Para la obtención de esta grafica se llevan el conjunto de valores de la tabla anterior, sobre unos ejes coordenados obteniendo la característica del sistema como se muestra en la siguiente gráfica.

Ilustración 48: Curva característica de la instalación

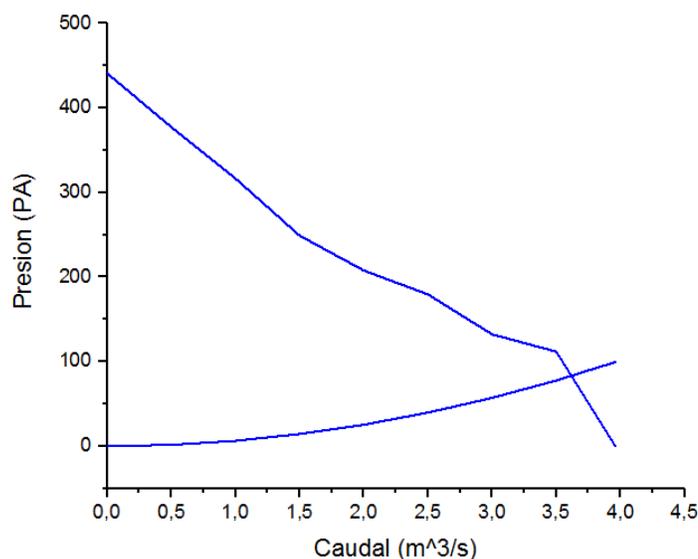
Fuente: Autores

Como se puede observar en la gráfica, el caudal del ventilador va ligado a la pérdida de presión resistente de la instalación, a mayor caudal que desplace el ventilador dentro del conducto en este caso todas las partes del túnel de viento va a incidir que este tenga mayores pérdidas de presión. Como se evidencio la geometría y la longitud de los ductos a los cuales la maquina hidráulica está conectado, hace que aumente o disminuya la perdida de carga de todo el sistema.

Punto de trabajo del ventilador

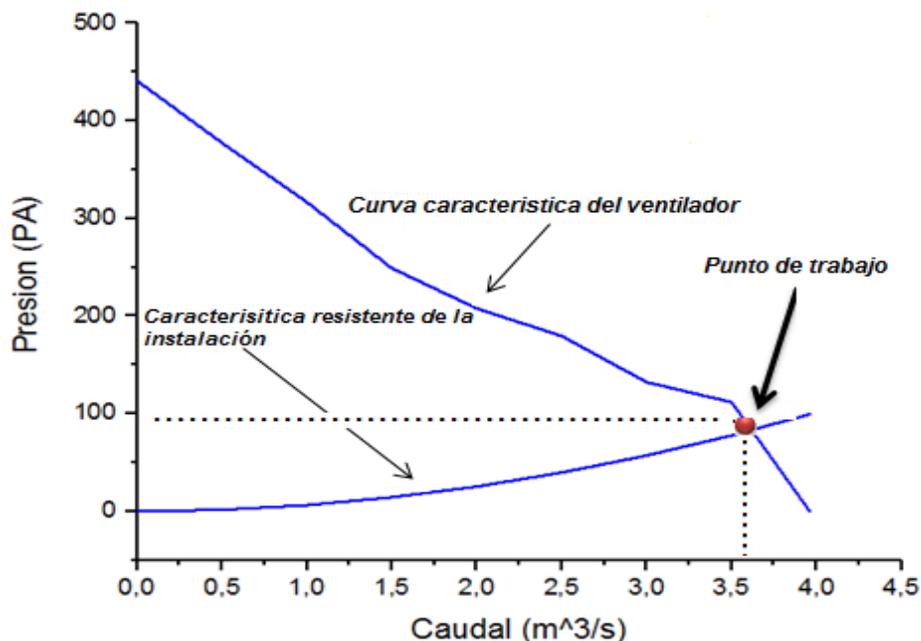
Con todo el conjunto de datos producto de los cálculos relacionados con el funcionamiento del ventilador, el cual es eje central del desempeño del túnel de viento, se obtuvieron como resultado varias graficas (curvas de trabajo) que describen las características más esenciales de la maquina hidráulica y de una forma teórica predecir como esta se comporta con los conductos de tiene instalado. La intersección de la curva de trabajo del ventilador, y la curva característica de la instalación, da como resultado el punto de trabajo del ventilador, como se muestra en la siguiente gráfica.

Ilustración 49: Punto de trabajo del ventilador



Fuente: Autores

Ilustración 50: Descripción del punto de trabajo del ventilador



Fuente: Autores

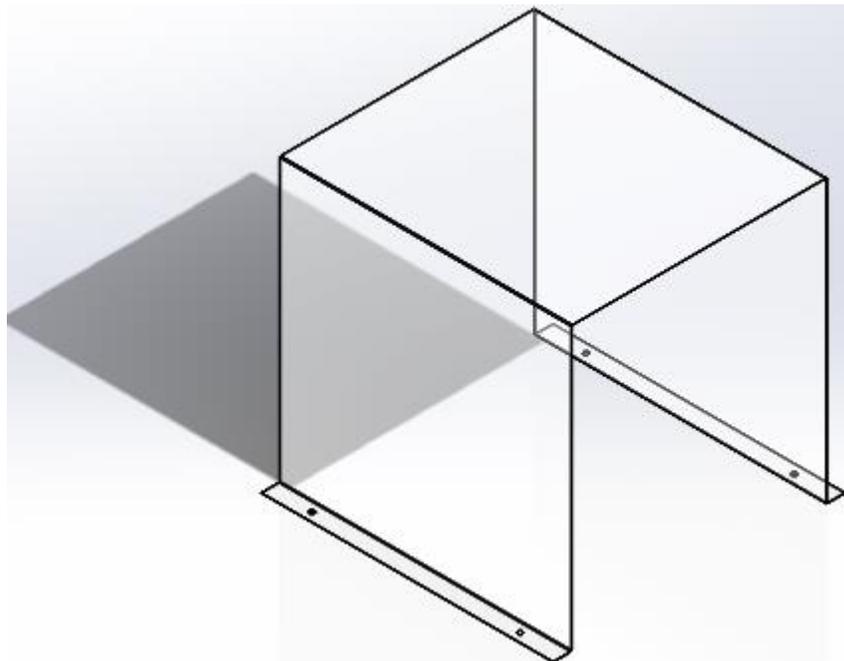
Como se observa en la ilustración anterior se describe la conformación del punto de trabajo del ventilador que se encuentra instalado a todo el sistema (túnel de viento), este nos indica que con un caudal de aproximadamente $3,5 \frac{m^3}{s}$ y una presión de 100 pascales, alcanza teóricamente el óptimo de funcionamiento, cabe aclarar que, si en algún momento se cambian las variables tales como presión, caudal, y velocidad angular, los resultados del punto de trabajo se modificarán.

5. Rediseño y optimización de la cámara de pruebas del túnel de viento

5.1. Descripción general de la actual zona de pruebas

La cámara de pruebas que actualmente está instalada en el túnel de viento, consta fundamentalmente de un habitáculo cuadrado (560 mm x 540 mm), el material de construcción en su totalidad es de acrílico transparente, este posee una serie de pestañas las cuales están ubicadas en la parte frontal inferior y posterior inferior, estas tienen como función principal, anclar por medio de tornillos toda la estructura (cámara de pruebas) en la superficie de madera que sirve como soporte de todo el sistema del túnel de viento.

Ilustración 51: Zona de pruebas actual del túnel de viento



Fuente: Autores

5.2. Proceso para el funcionamiento de la actual zona de pruebas

Para el funcionamiento de la actual zona de pruebas, en el desarrollo de ensayos aerodinámicos, se requiere seguir los siguientes pasos:

- ✓ Desatornillar las dos pestañas inferiores que se encuentran ancladas a la superficie de la base, para poder remover la cámara
- ✓ Introducir el perfil que va a ser objeto de estudio, dentro del espacio que fue diseñado para tal fin.
- ✓ Anclar y posicionar nuevamente la cámara de pruebas, en el lugar correspondiente, verificando que no presente ninguna fuga de aire en el momento de su instalación
- ✓ Una vez realizado el ensayo aerodinámico del perfil, en la posición deseada, se procede a desmontar nuevamente la cámara de pruebas para reposicionar el objeto de estudio. Cada vez que se tenga la necesidad de cambiar de posición o cambiar de objeto se debe realizar los anteriores pasos para su proceso

El diseño de la cámara de pruebas imposibilita la manipulación externa de los objetos que se introducen en ella, por esta razón es necesario el monte y desmonte de la estructura, cada vez que se requiera su funcionamiento.

5.3. Limitaciones del actual diseño de la zona de pruebas

En concordancia de lo descrito anteriormente, el diseño y construcción inicial de la cámara de pruebas del túnel de viento no tuvo presente que, para el funcionamiento de esta, se presentarían los siguientes inconvenientes técnicos al momento de su manipulación:

- ✓ Desgaste excesivo en la integridad de todo el habitáculo, por el monte y desmonte, cada vez que se fuera a realizar algún ensayo.
- ✓ Fuga de aire dentro de la cámara de pruebas, debido al deterioro de los sellos que hacen parte de esta, consecuencia de que como la zona no está fija, sino que es móvil, imposibilita que se pueda hacer un buen aislamiento, para evitar este problema.

- ✓ El procedimiento para la utilización de toda la cámara de pruebas es poco práctico, lo que deriva que para su manejo se tenga que disponer de más de una persona, aumentando considerablemente el tiempo de su uso.

Fundamentalmente por las anteriores dificultades en la utilización y manipulación de la zona de pruebas, se tiene la necesidad de volver a realizar un nuevo diseño, que ayude a mejorar su utilización e incentive el uso frecuente de todo el túnel de viento en el proceso de formación académica de los estudiantes y profesores en todas las áreas afines a mecánica de fluidos y aerodinámica de la universidad Antonio Nariño.

5.4. Requerimientos para el nuevo diseño de la zona de pruebas

Se planea la realización de un prototipo funcional para la zona de pruebas, la cual debe tener las siguientes características:

- ✓ El rediseño de la zona de pruebas debe mejorar el acceso y la manipulación de los perfiles de viento que se encuentren al interior de esta.
- ✓ La cámara de pruebas, que se diseña debe ser en un material translucido, para facilitar la visualización de corrientes de flujo de aire creadas por la interacción de los objetos de estudio.
- ✓ Diseño de un mecanismo para la variación del ángulo de inclinación de las piezas al interior de la cámara de pruebas, por medio de una operación externa a esta.

5.5. Análisis de optimización zona de pruebas

Generada la descripción general del funcionamiento de la antigua zona de pruebas del túnel de viento, se analizan varios aspectos importantes a mejorar y por ende a optimizar, entre los aspectos más relevantes a mejorar se encuentran los siguientes:

- ✓ Monte y desmonte de toda la cámara, cuando se necesita realizar un estudio perjudica enormemente la hermeticidad de todo el ducto.

- ✓ Inconveniente para el acceso y manipulación de los perfiles de viento que se están estudiando, es conveniente hacer un rediseño o buscar otro modo para la realización de dicha labor.
- ✓ Nula visualización de los perfiles de viento que se estudian, debido a la geometría y materiales utilizados con que está construida la cámara es prácticamente nula la posibilidad de visualizar líneas de flujo de aire.
- ✓ Nula variación en la posición de los cuerpos objeto de estudio, no existe ningún mecanismo o soporte que ayude a modificar la posición o los ángulos de inclinación de los objetos que se están analizando dentro de la cámara de pruebas.

Los anteriores aspectos son los más relevantes a tener en consideración para mejorar la optimización de un uso más eficiente de la zona de pruebas.

5.6. Estudio QFD rediseño zona de pruebas

Tabla 11: Matriz QFD rediseño zona de pruebas

| REDISEÑO DE LA CAMARA DE PRUEBAS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| REQUERIMIENTO DE CLIENTES | REQUERIMIENTO DE DISEÑO | | | | | | | | PLAN DE PRODUCTO / SERVICIO | | | | | | | |
| | COSTO DE REDISEÑO | CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE FABRICACION | FACILIDAD DE VISUALIZACION DE OBJETOS | FIABILIDAD EN EL ANALISIS DE PRUEBAS | MANUFACTURA IDONEA PARA LA FABRICACION | FACIL ACCESO PARA MANIPULACION DE PERFILES | MECANISMO PARA LA VARIACION DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS PIEZAS | REDISEÑO DE LA CAMARA | VALORACIÓN DE LOS CLIENTES | | | VISIÓN DEL PRODUCTO DE LA EMPRESA | | | IMPORTANCIA ABSOLUTA | IMPORTANCIA RELATIVA |
| | | | | | | | | | PRIORIDAD DEL CLIENTE | REFERENCIA COMPETITIVA DEL MERCADO | | PUNTO DE VENTA | PLAN ESTRATEGICO | RANKING DE IMPORTANCIA | | |
| | | | | | | | | | | UNIVERSIDAD UAN | UNIVERSIDAD LIBRE | | | | | |
| PRECIO DEL CONJUNTO DE COMPONENTES | 9 | 5 | | 1 | 5 | | 5 | 5 | 2 | 3 | 3 | 1,2 | 4 | 1,3 | 3,2 | 0,1 |
| DURABILIDAD DE MATERIALES DE CONSTRUCCION | 9 | 9 | 5 | 5 | 5 | | 5 | 9 | 3 | 4 | 4 | 1,5 | 4 | 1,0 | 4,5 | 0,1 |
| DISEÑO ADECUADO Y HERGONOMICO | 5 | 9 | 9 | 9 | 5 | 9 | 9 | 9 | 4 | 4 | 3 | 1,5 | 4 | 1,0 | 6,0 | 0,1 |
| FUNCIONAMIENTO EFICIENTE | | 5 | 9 | 9 | 5 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 3 | 1,2 | 4 | 1,0 | 6,0 | 0,1 |
| COMODIDAD EN SU OPERACIÓN | | 1 | 9 | 9 | 5 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 3 | 1,5 | 5 | 1,3 | 9,4 | 0,2 |
| VISUALIZACION DE LOS OBJETOS DE ESTUDIO | | 5 | 9 | 5 | 5 | 5 | 5 | 9 | 5 | 4 | 3 | 1,5 | 5 | 1,3 | 9,4 | 0,2 |
| CONFIABILIDAD PARA ESTUDIO DE PERFILES | | 5 | 5 | 9 | 5 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 4 | 1,2 | 5 | 1,3 | 7,5 | 0,2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | 46,0 | |

| REQUERIMIENTO DE DISEÑO | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|-----------------------|-------------|
| | COSTO DE REDISEÑO | CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE FABRICACION | FACILIDAD DE VISUALIZACION DE OBJETOS | FIABILIDAD EN EL ANALISIS DE PRUEBAS | MANUFACTURA IDONEA PARA LA FABRICACION | FACIL ACCESO PARA MANIPULACION DE PERFILES | MECANISMO PARA LA VARIACION DEL ANGULO DE INCLINACION DE LAS PIEZAS | REDISEÑO DE LA CAMARA | |
| | 0,62677 | 0,3482 | 0 | 0,06964 | 0,3482 | 0 | 0,3482 | 0,35 | |
| | 0,88139 | 0,88139 | 0,4897 | 0,48966 | 0,4897 | 0 | 0,4897 | 0,88 | |
| | 0,65288 | 1,17519 | 1,1752 | 1,17519 | 0,6529 | 1,17519 | 1,1752 | 1,18 | |
| | 0 | 0,65288 | 1,1752 | 1,17519 | 0,6529 | 1,17519 | 1,1752 | 1,18 | |
| | 0 | 0,20403 | 1,8362 | 1,83624 | 1,0201 | 1,83624 | 1,8362 | 1,84 | |
| | 0 | 1,02013 | 1,8362 | 1,02013 | 1,0201 | 1,02013 | 1,0201 | 1,84 | |
| | 0 | 0,8161 | 0,8161 | 1,46899 | 0,8161 | 1,46899 | 1,469 | 1,47 | |
| DISEÑO REQ IMPORTANCIA ABSOLUTO | 2,16104 | 5,09793 | 7,3286 | 7,23504 | 5 | 6,67573 | 7,5136 | 8,72 | 49,7 |
| DISEÑO REQ IMPORTANCIA RELATIVO | 0,04345 | 0,10251 | 0,1474 | 0,14548 | 0,1005 | 0,13423 | 0,1511 | 0,18 | |
| REFERENCIA TÉCNICA COMPETITIVA | UNI. UAN | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| | UNI. LIBRE | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |

| RELACIONES | |
|------------|--------|
| 9 | FUERTE |
| 5 | MEDIO |
| 1 | DEBIL |

| RELACIONES | |
|------------|-------------------|
| 1,5 | MUY PUBLICITABLE |
| 1,2 | PUBLICITABLE |
| 1,0 | NADA PUBLICITABLE |

| RELACIONES | |
|------------|-------------------|
| 5 | LO MAS IMPORTANTE |
| 4 | MUY IMPORTANTE |
| 3 | IMPORTANTE |
| 2 | ALGO IMPORTANTE |
| 1 | SIN IMPORTANCIA |

| RELACIONES | |
|------------|---------------|
| 5 | EXCELENTE |
| 4 | SOBRESALIENTE |
| 3 | BUENO |
| 2 | ACEPTABLE |
| 1 | INSUFICIENTE |

Fuente: Autores

El estudio QFD, hecho para el rediseño de la zona de pruebas del túnel de viento, permite una visualización objetiva de las necesidades del cliente con los requerimientos del diseño, en este caso en particular, las interacciones de estos dos factores dan como resultado, que las exigencias de mayor importancia para el cliente son: la comodidad de operación, visualización de los objetos y confiabilidad de los estudios; por ende el nuevo rediseño aplicado por los estudiantes de la universidad UAN permite satisfacer las necesidades del cliente poniendo un énfasis también en el

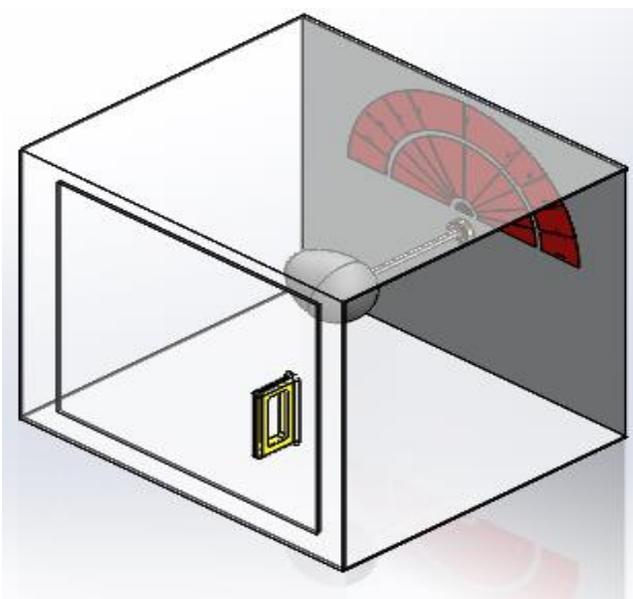
mecanismo para la variación de ángulos de inclinación de las piezas y un fácil acceso para la manipulación de los perfiles

5.7. Descripción general del nuevo rediseño de la zona de pruebas

Una vez se tenga el prototipo de la nueva zona de pruebas, se procederá al ensamble con la sección del túnel de viento, por medio de unos empaques elásticos de goma natural o neopreno, para evitar las fugas de fluido de aire en las uniones de las partes y garantizar la hermeticidad del habitáculo. A su vez se determinará si es necesario la utilización de algún otro tipo de producto que evite los escapes.

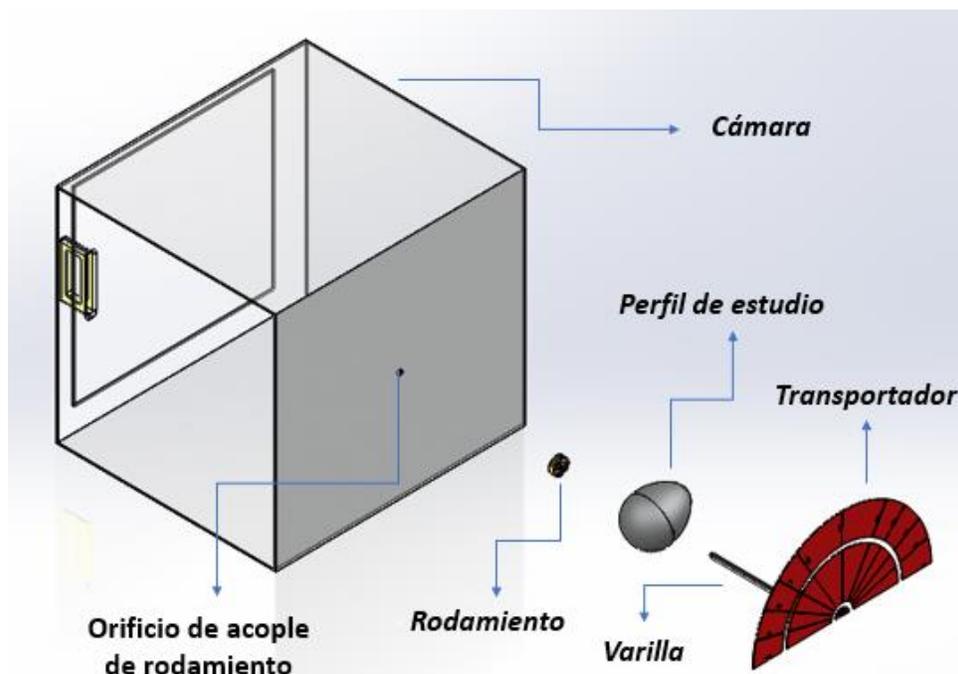
Con el nuevo rediseño de la zona de pruebas del túnel, se observan mejor los perfiles de viento dentro de la cámara, implementando de una forma más práctica y ergonómica la apertura y cierre de la misma, ya se mencionó ya no es necesario el desmonte de toda la estructura (zona de pruebas) para la manipulación de los objetos de estudio, estos se pueden ya maniobrar (cambiar inclinación) por medio de un mecanismo externo.

Ilustración 52: Zona de pruebas rediseñada



Fuente: Autores

Ilustración 54: Componentes de la zona de pruebas vista isométrica posterior

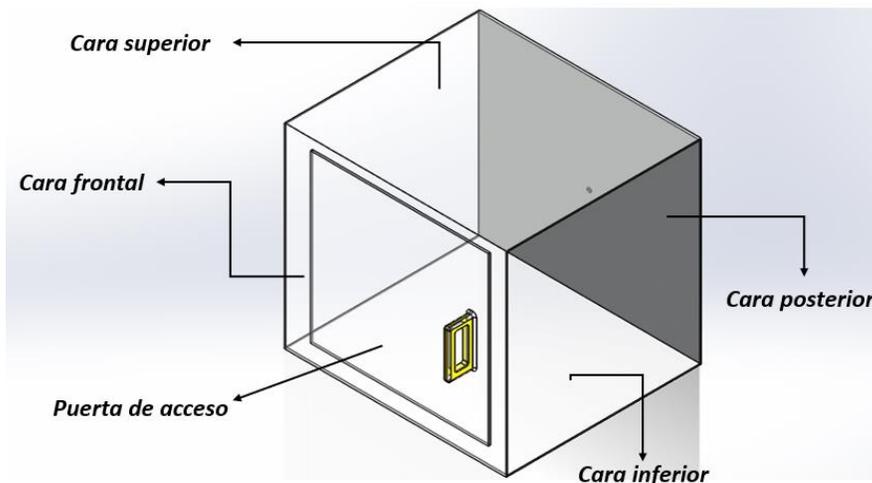


Fuente: Autores

5.9. Características de los componentes del rediseño la zona de pruebas

5.9.1. Cámara

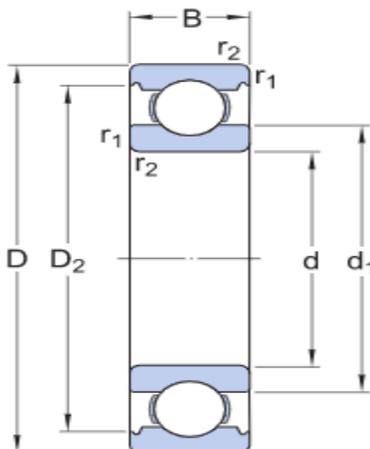
La nueva cámara diseñada para la zona de pruebas está construida en **polimetilmetacrilato** que es un acrílico translúcido, que por sus características de ser resistente al rayado y resistente a la intemperie fue el elegido (cara frontal, cara superior e inferior), y la cara posterior está construida con acrílico de tonalidad oscura, lo cual permite una visualización más óptima de los perfiles de viento. Para poder ingresar los objetos de estudio de una manera más sencilla, se diseñó una puerta en la cara frontal, lo cual ayuda a optimizar la utilización de esta. Todo el acrílico implementado es de un grosor de 4mm. Para mayor detalle de la cámara ver planos de fabricación.

Ilustración 55: Cámara

Fuente: Autores

5.9.2. Rodamiento

Se instaló un rodamiento rígido de bolas 6300, el cual está ubicado en el centro de la cara posterior de la cámara, alojado en un orificio (diámetro 35mm) por medio de un ajuste estrecho. La función principal es la de ayudar a la rotación de la varilla que hace parte del mecanismo que hace girar los objetos de estudio.

Ilustración 56: Rodamiento rígido de bolas 6300

Fuente: SKF

Tabla 12: Dimensiones rodamiento 6300

| DIMENSIONES | | |
|------------------|----------------|--|
| d | 10 mm | Diámetro del agujero |
| D | 35 mm | Diámetro exterior |
| B | 11 mm | Ancho |
| d ₁ | ≈ 17.5 mm | Diámetro del resalte del aro interior |
| D ₂ | ≈ 28.68 mm | Diámetro del rebaje del resalte del aro exterior |
| r _{1,2} | min. 0.6 mm | Dimensión del chaflán del aro exterior |

Fuente: SKF

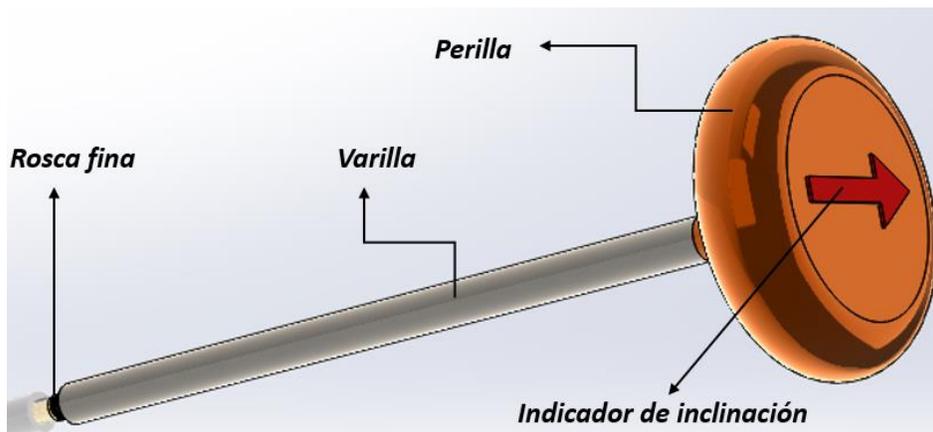
5.9.3. Mecanismo de giro de los objetos de estudio

Este mecanismo está construido a partir de dos componentes como lo son: varilla y perilla de giro

La varilla pasa por el centro del diámetro interior del rodamiento, ya que los valores de estos son similares, para evitar que la varilla se salga del centro del rodamiento se implementan dos tuercas a lado y lado del eje longitudinal.

La varilla está compuesta por acero, la cual en uno de sus extremos tiene grabado una rosca fina allí se anclará el objeto de estudio, en el otro extremo tiene unida una perilla, la cual tiene un grabado en forma de flecha cumpliendo la tarea de visualizar la inclinación del objeto que se esté analizando; la perilla puede estar fabricada en madera dura (roble, pino canadiense, etc.).

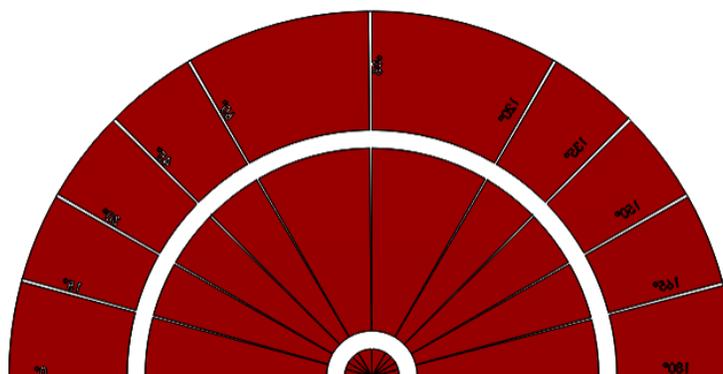
Estas dos partes constituyen el mecanismo que tiene como función principal, proporcionar el giro del objeto que se encuentre en el interior de la cámara. Si requiere más información acerca del ensamble del mecanismo de giro ver planos de fabricación.

Ilustración 57: Mecanismo de giro

Fuente: Autores

5.9.4. Medidor de grados de inclinación

Se diseñó este componente en lámina galvanizada calibre 20, grabada en laser dándole la forma de un transportador de 180°, este se encuentra situado en la parte superior de la cara posterior de la cámara, el cual permite visualizar los grados de inclinación del objeto de análisis. Más información de medidas ver planos de fabricación.

Ilustración 58: Medidor de grados

Fuente: Autores

La cámara de pruebas del túnel de viento, en su nuevo rediseño, cuenta con una cámara de 540 mm de largo, 560 mm de alto y 490 de ancho, constituida en su totalidad de acrílico translucido de 4mm de espesor, con la cara posterior de color oscuro para mejorar la visualización de los

perfiles de viento, en su parte frontal posee una puerta para el ingreso más práctico de los objetos de estudio, a su vez cuenta en su parte posterior con un mecanismo de giro el cual está acoplado a un rodamiento de bolas rígido para ayudar la rotación de este. Se adaptó un medidor de grados que cumple la función de la visualización de la inclinación de los perfiles que se encuentren en el interior de la cámara.

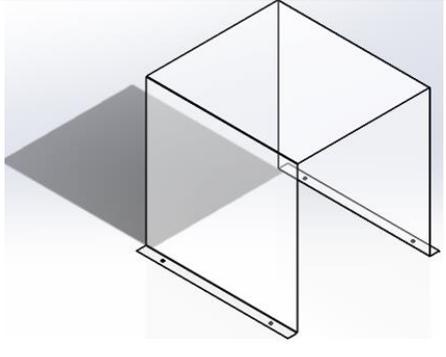
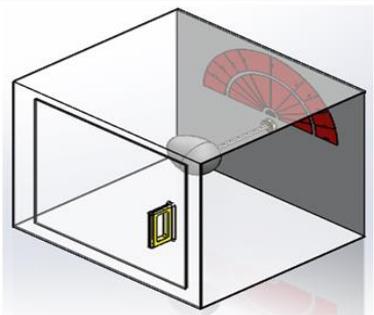
5.9 Aspectos incorporados para optimización de zona de pruebas

Los resultados obtenidos y la implementación de nuevos mecanismos que ayudan favorablemente a la optimización en la utilización en general de la zona de pruebas se describen a continuación:

- ✓ Rediseño de un habitáculo que no necesita ser removido cada vez que se requiera introducir algún objeto de análisis, ya que en la cara frontal de la cámara se diseñó una puerta o escotilla la cual permite y facilita el acceso al interior de esta para, el posicionamiento de la pieza; esto ayuda a que se mantenga un sello permanente en todo el sistema y evita que se produzcan fugas de fluido, además previene excesivos desgastes en la misma, por consiguiente es más práctico el uso en general de la cámara.
- ✓ Selección de un acrílico con perfil de 4 mm, lo que ayuda a prevenir vibraciones excesivas, que conlleven a fugas de fluido, seguido de la ubicación de un fondo de pared de color oscuro, para generar un contraste dentro de la cámara, lo que favorece satisfactoriamente a la mejor visualización de los perfiles de viento.
- ✓ Implementación del mecanismo de giro, el cual permite girar los objetos de estudio sin tener que desmontar la cámara de pruebas, lo que facilita la ejecución de múltiples ensayos en menor tiempo y menor distorsión para la toma de datos al evitar la manipulación excesiva de los cuerpos. Este se acompaña de un medidor de grados de inclinación, para mayor precisión en la ubicación de las piezas, lo que contribuye positivamente a tener más confiabilidad en los resultados obtenidos en los diferentes análisis que se realicen.

Todas las anteriores modificaciones realizadas, estuvieron basadas siempre en buscar la mayor optimización posible para el uso adecuado de este componente.

Tabla 13: Comparación diseño zona de pruebas

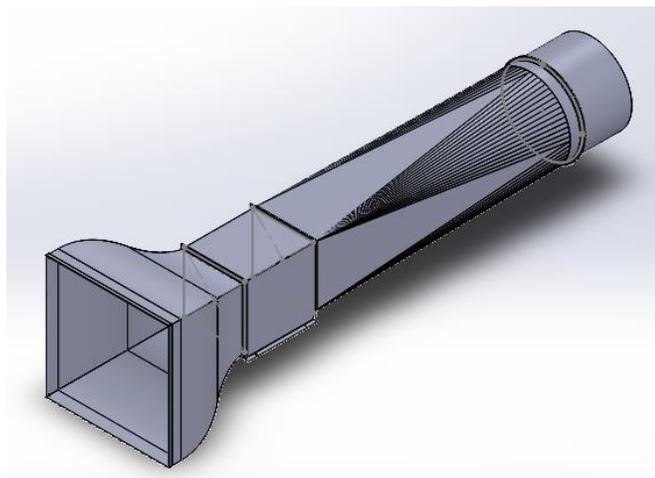
| Descripción | Zona de pruebas Actual | Rediseño de Zona de pruebas |
|---|--|--|
| Materiales de construcción | El principal material de construcción es acrílico transparente, de un grosor delgado. | Los materiales principales de construcción en el habitáculo son de acrílico translucido de un grosor de 4 mm y en los demás componentes que la constituyen se encuentran materiales tales como el acero, la madera y el hierro figurado |
| Acceso y manipulación de la cámara | La manipulación para el uso de la cámara no es nada practico, debido a que se debe desmontar toda la zona para poder realizar algún ensayo aerodinámico, la cámara es removible lo que ocasiona daños en los sellos y por ende fugas de fluido | La manipulación es óptima debido a que no se necesita ya de remover toda la zona para la utilización de esta, porque en la cara frontal se diseñó una puerta para la facilidad del acceso a su interior, como queda fija en toda la estructura general, se evita el desgaste de los sellos que ocasionan fugas |
| Visualización | La visualización es buena debido a que el material de la cámara es trasparente. | La visualización de los ensayos aerodinámicos se mejoró notalmente debido a que se implementó un acrílico translucido de mayor calidad, a su vez se dispuso que la cara posterior de la misma fuera de un color oscuro lo que aumento notablemente mayor distinción de los experimentos hechos en su interior. |
| Mecanismo de manipulación externa | Posee un mecanismo donde se pone el perfil aerodinámico, pero se maneja interiormente, imposibilitando su manipulación externa. | Se diseño un mecanismo de manipulación externa, lo que facilita y optimiza la realización de los estudios en el interior de la cámara, sin necesidad de que intervenga interiormente en este |
| Medidor de grados de inclinación de perfiles | No posee un mecanismo que realice algo parecido a esto | Se construyo un medidor de grados que facilita la visualización de la inclinación de los perfiles de viento que se están estudiando, este hace un buen equipo con el mecanismo de manipulación externa. |
| Diseño |  |  |

6. Modelado 3d, simulación CFD y análisis aerodinámico aplicado a cuerpos geométricos utilizando el software SolidWorks

6.1. Modelado 3D del túnel de viento

A continuación, se definirá el procedimiento de modelación en 3D del túnel de viento subsónico que se encuentra en la Universidad Antonio Nariño. Inicialmente se procede a un reconocimiento total de todas las partes que componen el túnel de viento subsónico sobre el cual se va a trabajar, seguido, la medición respectiva de todos los componentes (difusor, boquilla, cámara de pruebas), y, con los datos obtenidos se procede a realizar por medio del software SolidWorks el modelamiento de cada parte por separado, para, finalmente, realizar el ensamble y la construcción de este.

Ilustración 59: Modelo 3D Túnel de viento

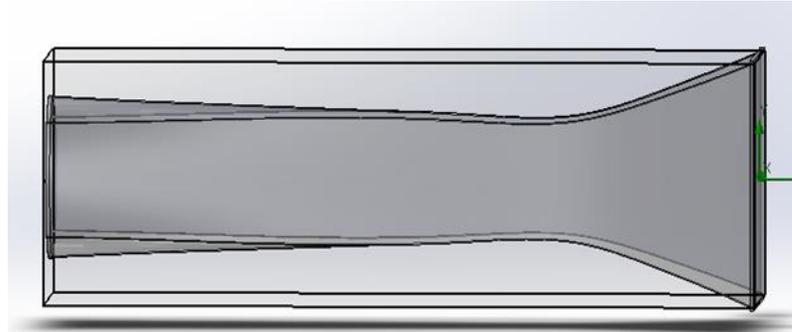


Fuente: Autores

Tras realizar el ensamble de todas las partes del modelo del túnel de viento y, al verificar problemas en la simulación de fluidos por la identificación de todas las formas que lo componen, se decide diseñar un modelo alternativo, de una sola pieza (ilustración 56). Este segundo modelo en 3D al ser de una sola pieza, facilita la elaboración de la simulación CFD; cabe aclarar, que la pieza

diseñada cumple con las medidas propias del modelo original, garantizando así que las simulaciones y los resultados de estas, sean válidos.

Ilustración 60: Modelo 3D Una sola pieza



Fuente: Autores

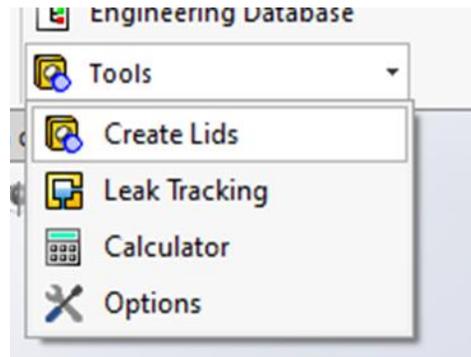
6.2. Procedimiento para la realización de simulación CFD utilizando el software

SolidWorks

Con el modelo CAD del túnel de viento se procede a la realización de la simulación CFD. A continuación, se presentan los pasos seguidos para la implementación del modelo en la simulación CFD, por medio de la herramienta Flow Simulation de SolidWorks.

- ✓ Se debe iniciar la configuración de la simulación, creando los límites del volumen del control con la opción “create lids” que se encuentra en el menú herramientas. (ilustración 57)

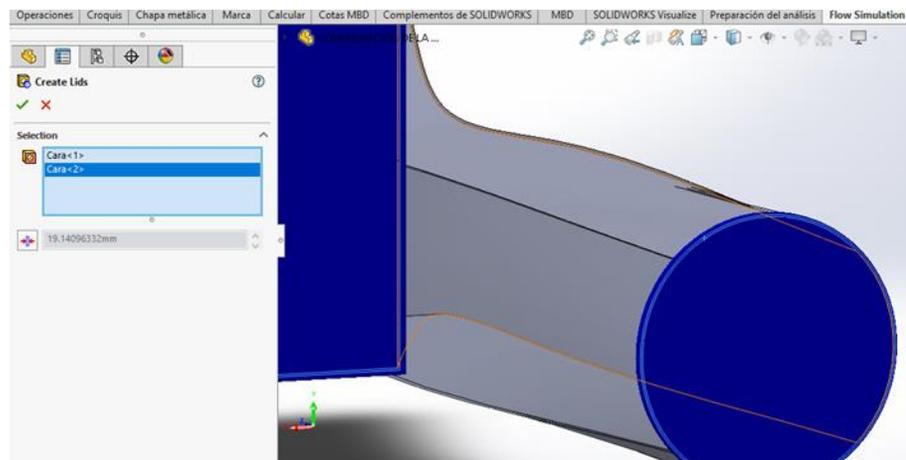
Ilustración 61: Límites del Volumen



Fuente: Autores

- ✓ Se procede a seleccionar caras planas que tengan secciones abiertas por donde será la entrada y la salida del fluido a trabajar; se selecciona la cara delgada que se encuentra en el borde del túnel de viento (quedará subrayada con un color azul) y está listo el lids número 1.
- ✓ Hay que repetir el proceso anterior con la otra cara del túnel de viento para crear el lids número 2.

Ilustración 62: Caras Lids

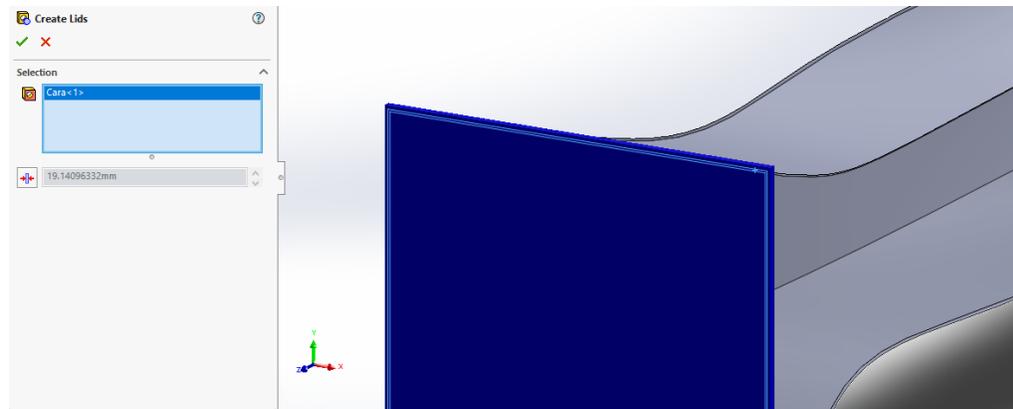


Fuente: Autores

- ✓ Al presionar OK, en el panel aparecerán las dos superficies creadas anteriormente, denominadas LID 1 Y LID 2, estas determinan el volumen de control con el que se va a trabajar.

- ✓ Creados LID 1 Y LID 2, se ingresa a la opción de WIZARD que conducirá a una pestaña donde se iniciará la configuración de la simulación iniciando por nombrarla; para efectos de este trabajo, se llamará “SIMULACIÓN CFD”, a continuación, la opción continuar.
- ✓ En la siguiente pestaña, el programa arroja la opción de escoger las unidades que va a utilizar la simulación para sus medidas, se utilizará el sistema internacional (SI) y se le da la opción de continuar.
- ✓ Se procede a seleccionar caras planas que tengan secciones abiertas por donde será la entrada y la salida del fluido a trabajar; se selecciona la superficie que conforma el plano XY (quedará subrayada con un color azul) y está listo el lids número 1.

Ilustración 63: Selección Caras

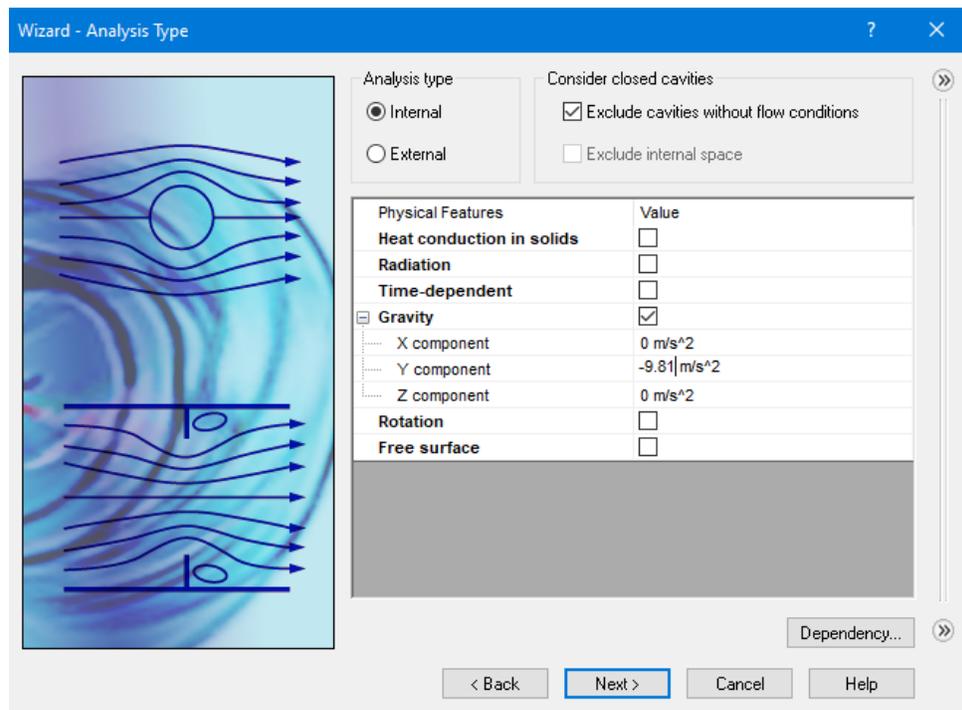


Fuente: Autores

- ✓ Hay que repetir el proceso anterior con la otra cara del túnel de viento para crear el lids número 2.
- ✓ Al presionar OK, en el panel aparecerán las dos superficies creadas anteriormente, denominadas LID 1 Y LID 2, estas determinan el volumen de control con el que se va a trabajar.
- ✓ Creados LID 1 Y LID 2, se ingresa a la opción de WIZARD que conducirá a una pestaña donde se iniciará la configuración de la simulación iniciando por nombrarla; para efectos de este trabajo, se llamará “SIMULACIÓN CFD”, a continuación, la opción continuar.

- ✓ En la siguiente pestaña, el programa arroja la opción de escoger las unidades que va a utilizar la simulación para sus medidas, se utilizará el sistema internacional (SI) y se le da la opción de continuar.
- ✓ En la siguiente ventana, se debe escoger el tipo de análisis (interno o externo) que se va a realizar; en este caso es un análisis interno; así mismo, se inserta la fuerza de gravedad (m/s^2) en el eje determinado y se procede a continuar.

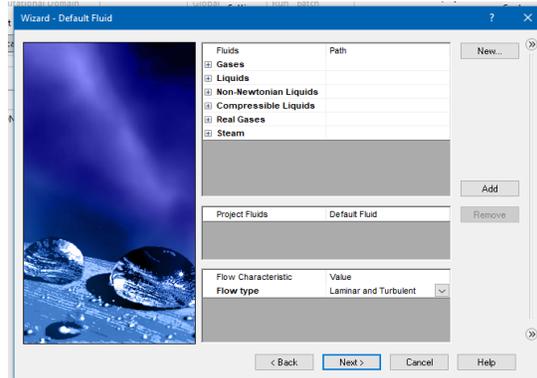
Ilustración 64: Tipo Análisis



Fuente: Autores

- ✓ Seguido, se encuentran los tipos de fluidos con los que se pueden trabajar en esta simulación, de las opciones presentadas se escoge aire; por otro lado, permite mirar las características del flujo que se quiere trabajar (solo laminar, solo turbulento o, laminar y turbulento), se elige laminar y turbulento. Lo anterior permite que se recreen zonas de vórtices en el flujo de aire.

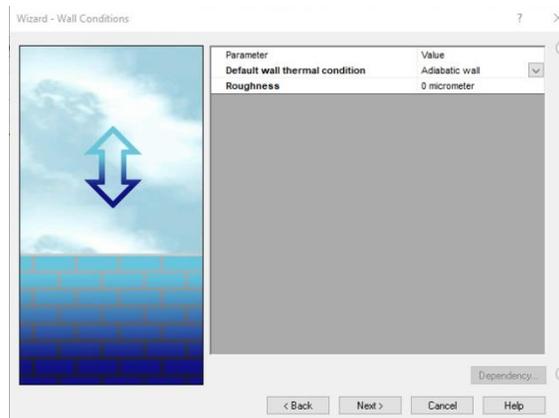
Ilustración 65: Tipos de fluido



Fuente: Autores

- ✓ En la siguiente ventana, se observa la opción de escoger el tipo de muro con la cual se va a trabajar (adiabático o con flujo de calor), en este caso se utiliza el muro adiabático, es decir, aquel en el cual el flujo de aire no intercambia calor con su entorno., así mismo, configurar el valor de la rugosidad en cero y, se presiona continuar.

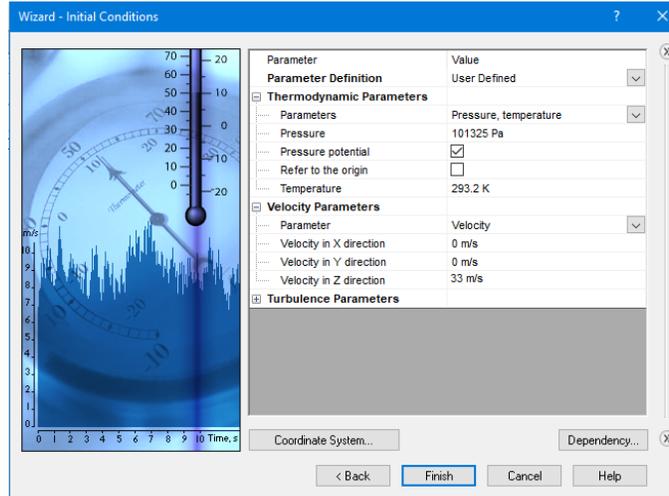
Ilustración 66: Tipo Muro



Fuente: Autores

- ✓ Posteriormente se definen los parámetros finales escoger los parámetros finales de la simulación, aquí se selecciona que la presión y temperatura iguales a “ambiente”, se le da una condición inicial a la velocidad, en este caso el túnel está en el plano de “Z” y, se le da finalizar, se procede a insertar una velocidad de 33m/s el cual fue una variable generada en estudios pasados del túnel de viento en el momento de su uso.

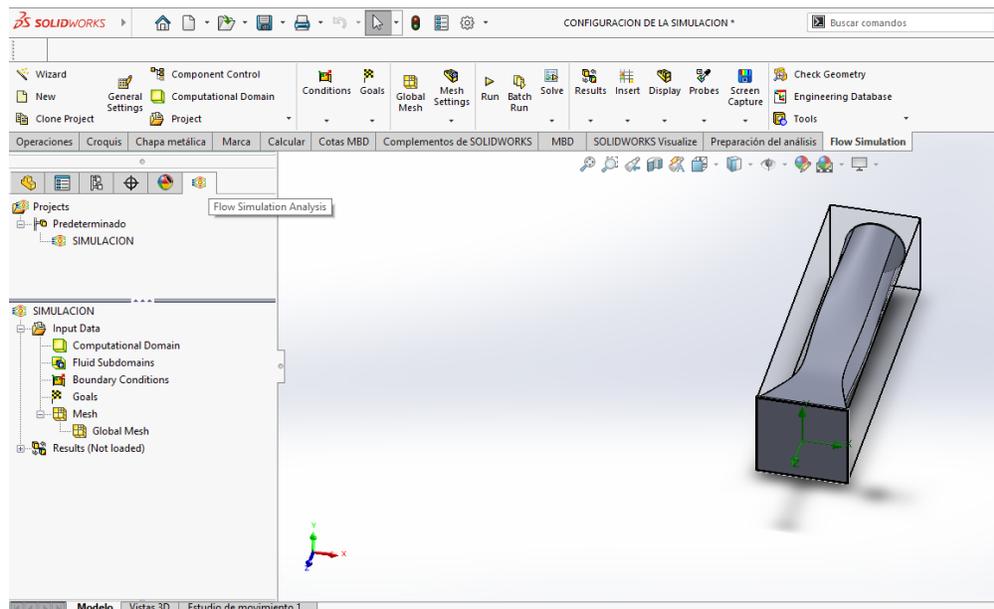
Ilustración 67: Parámetros Simulación



Fuente: Autores

- ✓ Al finalizar, el programa carga los datos escogidos para la simulación y aparece la pestaña a el lado derecho, “Flow simulación análisis”, donde se genera una caja alrededor de la figura, esta significa que se define el volumen requerido para la simulación.

Ilustración 68: Volumen Requerido

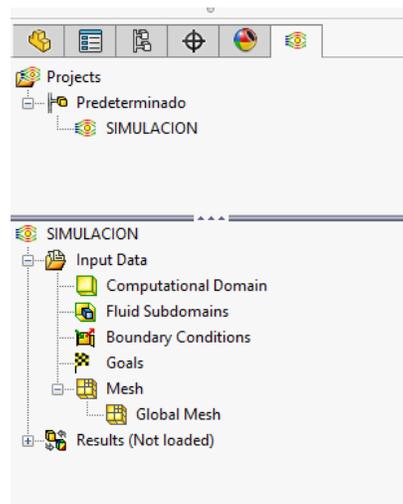


Fuente: Autores

6.3. Generación del Mallado

- ✓ Finalizada la configuración en wizard, se procede a realizar el resto de la configuración de la simulación, creando la malla por la cual SolidWorks va a ir resolviendo ecuaciones para definir las propiedades y las características del flujo en esta tubería; esto, se configura en Mesh (Global Mesh) dando clic derecho en edit. Definición.

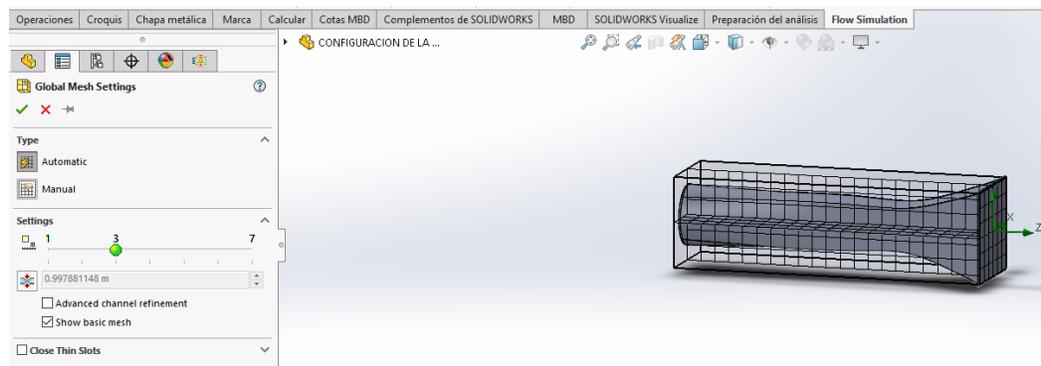
Ilustración 69: Mesh



Fuente: Autores

- ✓ Al configurar la malla, se selecciona en automático y, se selecciona la casilla “Show basic mesh” (mostrar la malla básica).

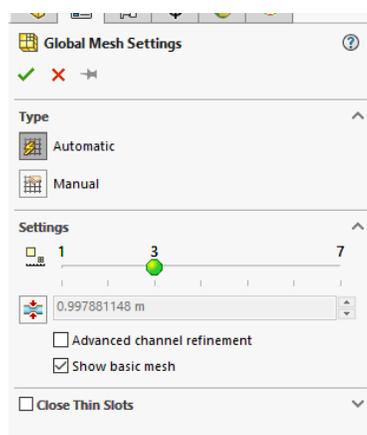
Ilustración 70: Malla



Fuente: Autores

- ✓ En la configuración del mallado se considera que para definir la cantidad de secciones en las cuales se va a dividir la pieza: entre mayor sea el valor más pequeño serán los cuadros o nodos SOLIDWORKS tomará más puntos de estudio para las propiedades y reacciones, si se procede a colocar un valor muy alto de nodos, significa que se requiere un mayor gasto computacional. Para este modelo se utilizan varias configuraciones de tamaño de malla entre 1 mm y 7 mm, de forma que se busca refinar y obtener el tamaño adecuado de malla. Finalizando con un tamaño base de 3 mm

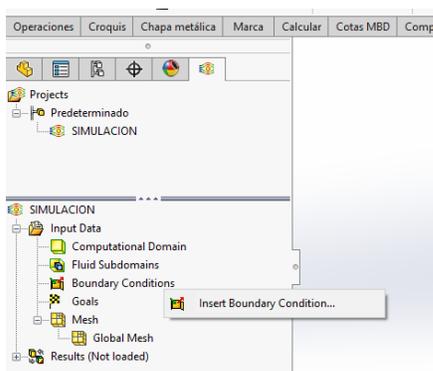
Ilustración 71: Tipo de Malla



Fuente: Autores

- ✓ Ahora, se procede a realizar las condiciones de frontera que se refieren a las condiciones a la entrada y la descarga de la máquina: para configurarlas se procede a darle clic derecho en “Insert Boundary Conditions”.

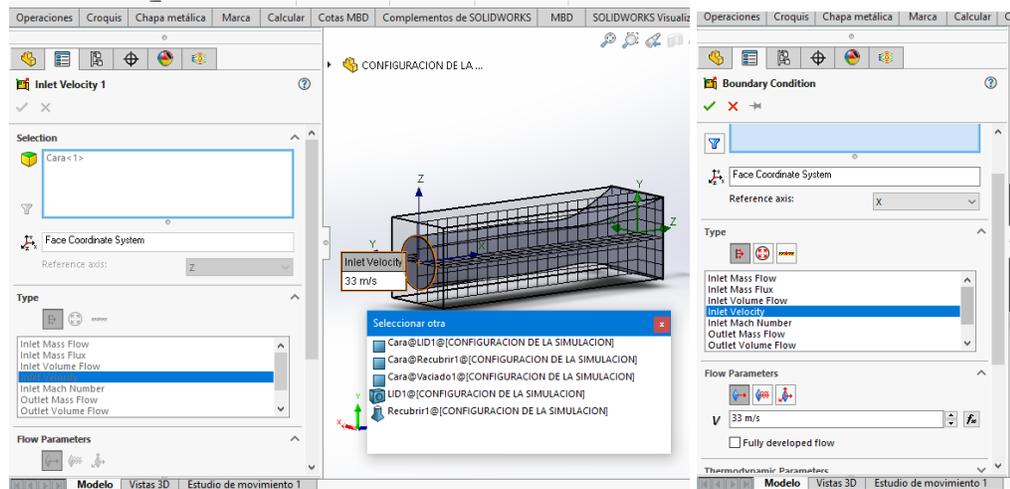
Ilustración 72: Boundary Conditions



Fuente: Autores

- ✓ Se requiere indicar la velocidad de fluido del aire y la cara o sección conocida como Superficie de Entrada, que emulará el ventilador, la velocidad de entrada y se elige la cara prevista para la entrada, en este caso, Cara@LID1, la cual se observa cara de entrada, clic derecho y se escoge en la opción “seleccionar otra”, se opta por la opción cara@lid1 y se inserta como condición de frontera 33 m/s. Ahora, se procede a ingresar la siguiente condición de frontera que es la presión.

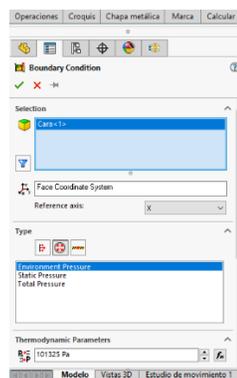
Ilustración 73: Condición de frontera



Fuente: Autores

- ✓ Después, se inicia seleccionando la cara de salida: se le da clic derecho seleccionar otra y se escoge Cara@LID2.
- ✓ Se procede a la casilla Type y se escoge la opción “Pressure Openings” como el tipo de condición; se selecciona presión atmosférica o presión ambiental y, aceptar.

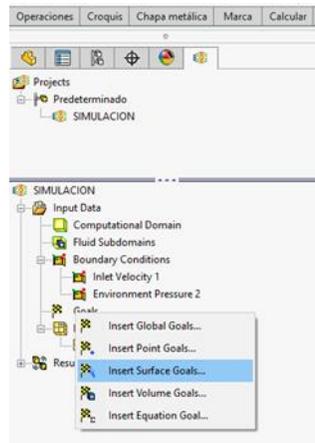
Ilustración 74: Pressure Openings



Fuente: Autores

- ✓ El siguiente paso para la configuración de la simulación son los objetivos o “Goals”, parámetros que el software calculará. Para configurar las metas se dirige a Goals, en el cual se le da clic derecho y se escoge la opción “Insert Surface Goals”.

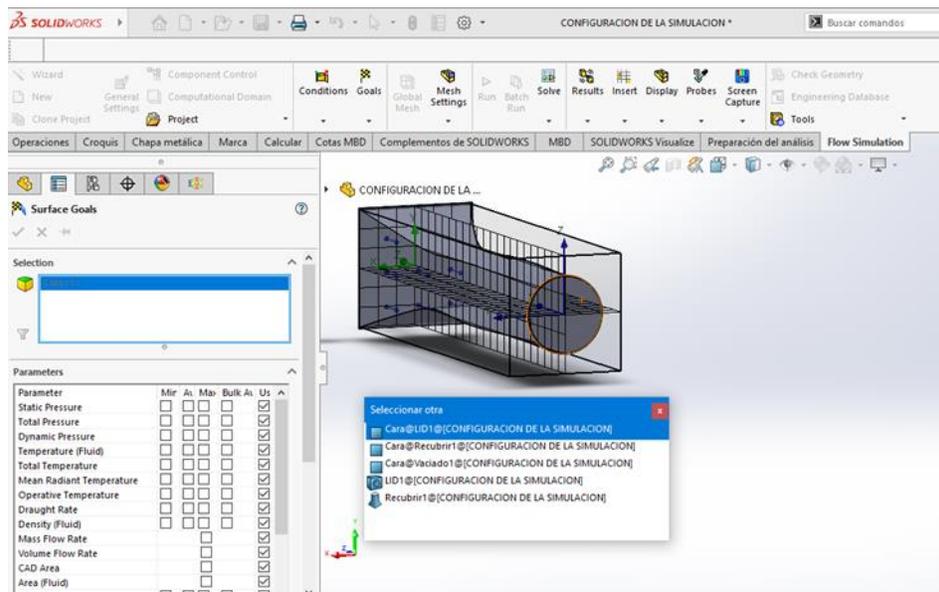
Ilustración 75: Surface Goals



Fuente: Autores

Seleccionadas las metas de superficie, se selecciona la cara de entrada.

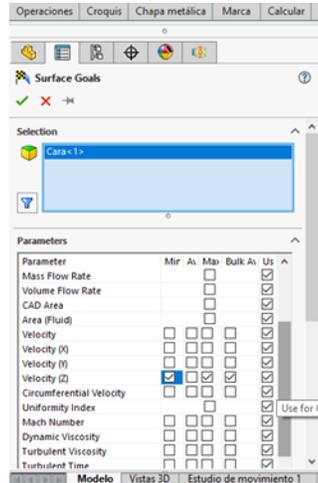
Ilustración 76: Metas de Superficie



Fuente: Autores

- ✓ Mientras, se dirige a los parámetros que se desean medir, en este caso, velocidad y presión, estos parámetros se miden en el plano Y-Z del modelo.

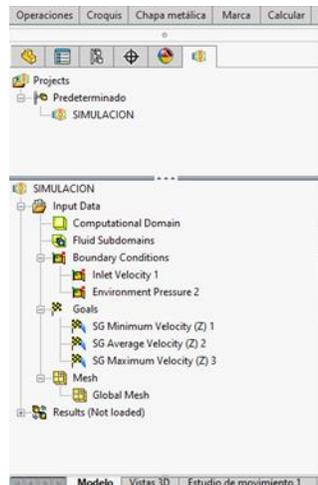
Ilustración 77: Variables Promedio



Fuente: Autores

- ✓ Finalmente, aparecerán esos parámetros en Goals. Además, se debe crear un nuevo Goals, o meta, en el cual se mida la presión de salida, por lo tanto, hay que repetir los pasos anteriores y proceder a seleccionar la cara de salida.

Ilustración 78: Goals



Fuente: Autores

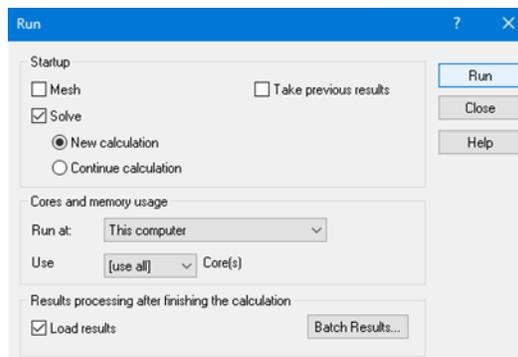
- ✓ Finalizada la configuración de la simulación, se puede ejecutar el análisis, dando clic en "Run"

6.4. Pos - procesamiento de Datos

6.4.1. Visualización de líneas de flujo aire

- ✓ El siguiente paso es realizar la nueva simulación y, seleccionar la opción de utilizar todos los núcleos del computador para que el programa calcule la simulación lo más rápido posible.

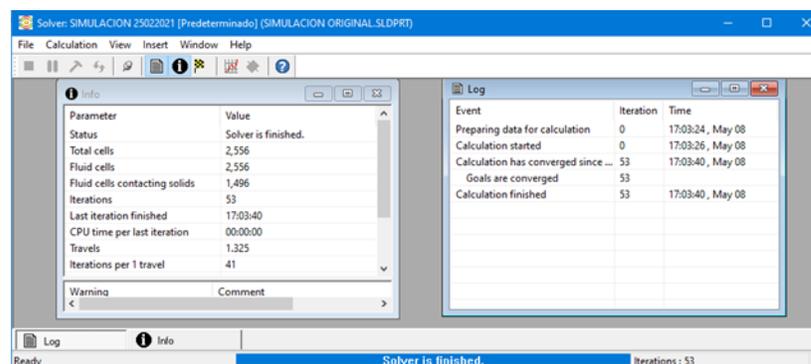
Ilustración 79: Procedimiento Nueva Simulación



Fuente: Autores

- ✓ Esto pasará a una nueva pantalla donde se muestra el número de iteraciones y muestra si hay algún tipo de advertencia en la simulación.

Ilustración 80: Iteraciones Simulación

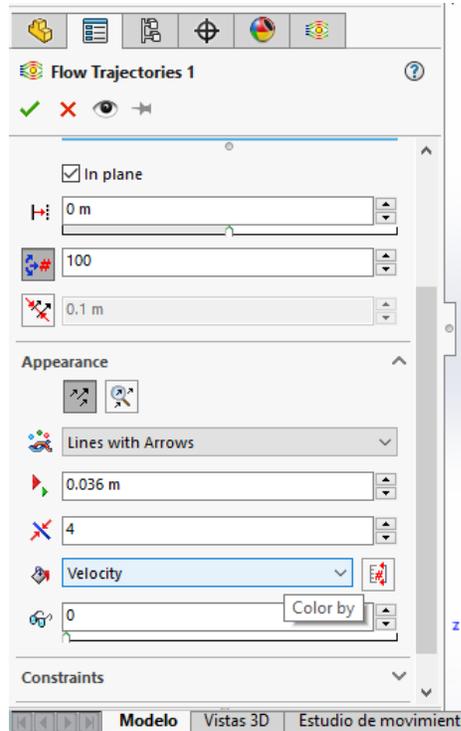


Fuente: Autores

- ✓ Seguido, generar las líneas de flujo mediante la opción "Flow trayectorias" clic derecho, "nuevo" y se escoge la vista lateral de la pieza, se inserta la opción de

escoger el número de líneas que flujo: en este caso se escogerá un valor alto (100) para que se puedan observar mejor los resultados, se escoge la opción de líneas con flechas, en el grosor de la flecha se hace de 4 y, finalmente, la opción de velocidad para que las líneas de flujo que se muestran sean con respecto a la velocidad.

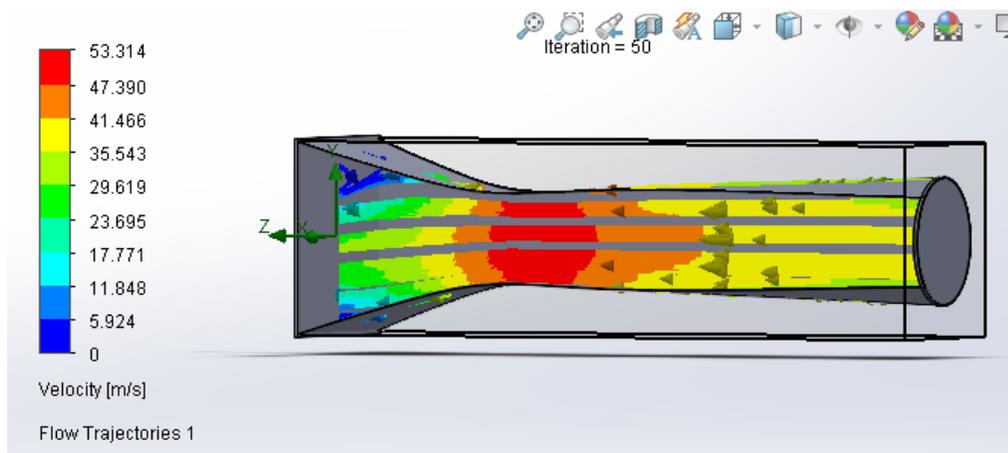
Ilustración 81: configuración líneas fluido



Fuente: Autores

- ✓ Este es el resultado de la simulación en “Flow trayectorias”, se muestran las líneas de flujo de la velocidad y, se puede observar que el punto más crítico o con mayor velocidad en donde se ubica la zona de pruebas en la cual muestra en escala de colores que la mayor velocidad generada es de 53.314 y se encuentra ubicada en la zona de pruebas.

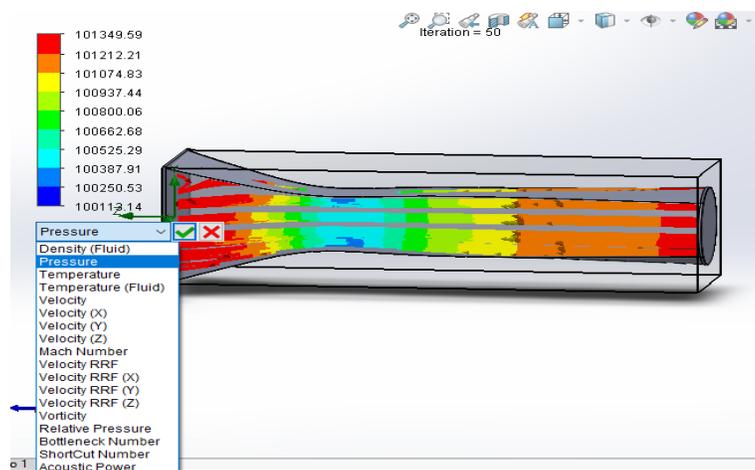
Ilustración 82: Túnel Velocidad



Fuente: Autores

- ✓ Se direcciona hacia la parte donde se muestra la velocidad (m/s) máxima promedio, haciendo clic sobre ella muestra todas las variables que se pueden medir; en este caso, se observa cómo se comporta la presión en el túnel, a saber, la mayor presión se encuentra en los extremos del túnel donde está ubicado el ventilador y la boquilla o contracción.

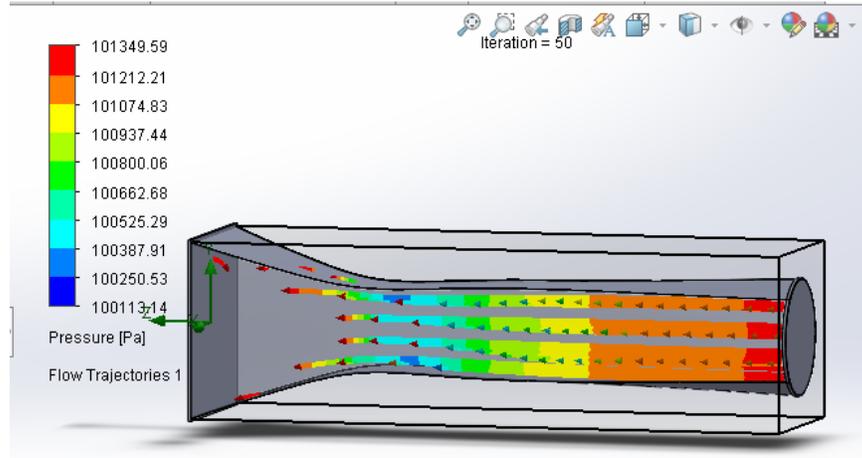
Ilustración 83: Túnel Presión



Fuente: Autores

- ✓ Para ver la animación de la simulación hay que dirigirse a “Flow trajectories”, clic derecho y en la opción play, esto mostrará una animación de la trayectoria de las líneas del fluido.

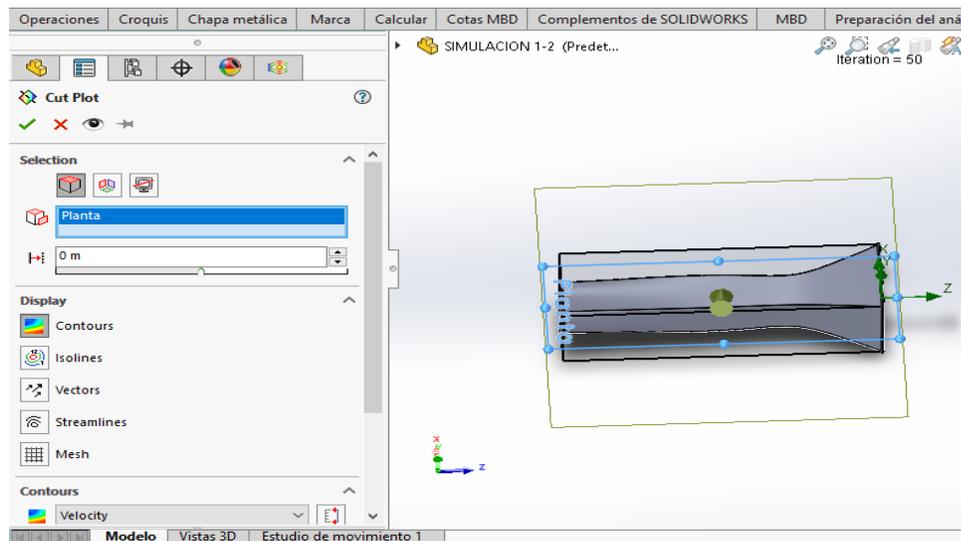
Ilustración 84: Túnel Líneas de Flujo



Fuente: Autores

- ✓ Para observar los resultados generados por el cut plot, se procede a generar un diagrama de corte para poder estudiar el resultado de cualquier plano, donde se pueden mostrar resultados como el contorno o un vector isolínea, Para esto, se dirige a la opción de resultados “cut plot”, clic derecho, insertar, aquí muestra un administrador de propiedades de la parcela cortada y, se procede a seleccionar un plano que abarque toda la figura que se va a medir (Planta), en este caso se escoge la opción de contorno y vectores y aceptar .

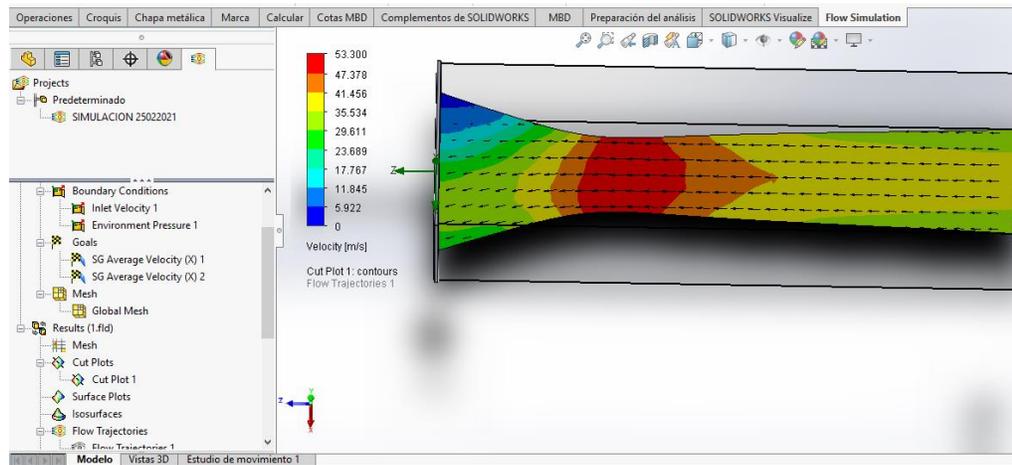
Ilustración 85 Túnel Cut Plot



Fuente: Autores

- ✓ Tras el paso anterior, se muestra el corte y la escala de velocidades en (m/s) visualizando, que la mayor velocidad se genera en la zona de pruebas con una velocidad máxima de 53.300 m/s por medio del principio de Bernoulli si se reduce el área transversal la velocidad aumenta.

Ilustración 86: Túnel de viento Cut Plot



Fuente: Autores

6.5. Diseño de perfil Naca 63 212

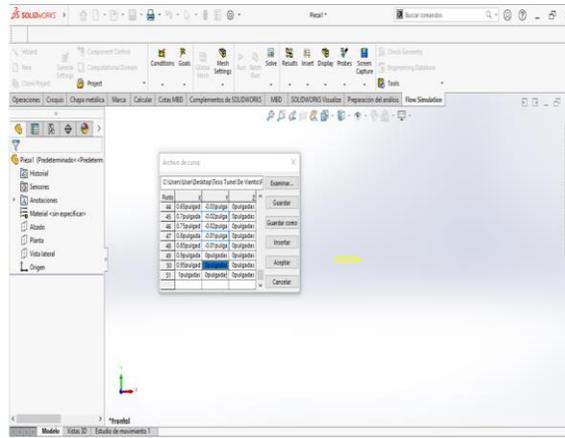
6.5.1. Explicación del diseño y construcción perfil naca

Para complementar el análisis CFD del túnel de viento se requiere anexar un cuerpo geométrico aerodinámico para comprobar el comportamiento del túnel. El perfil NACA seleccionado es 63-212 el cual es bastante utilizado en la industria aeronáutica.

Los parámetros para la réplica del perfil NACA 63 2-212 se obtienen en un conjunto de puntos en referencia a un sistema coordenado, que luego de ser exportados a SolidWorks, se extruye una geometría que forma la superficie del perfil (ver Ilustración 88)

Encontrándonos en el programa SolidWorks se busca la opción insertar curva con coordenadas XYZ la cual genera una nueva ventana donde se exportan los datos ya consignados en Excel y aceptar.

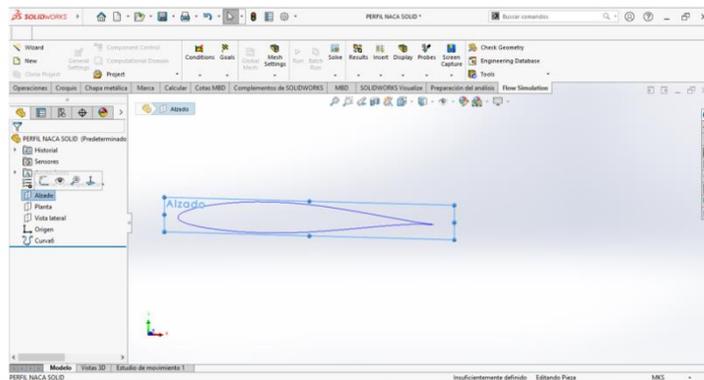
Ilustración 87: Datos Plot Naca



Fuente: Autores

SolidWorks después de exportar los datos suministrados en la curva XYZ genera la vista lateral del perfil que estamos diseñando en este caso Naca 63 212

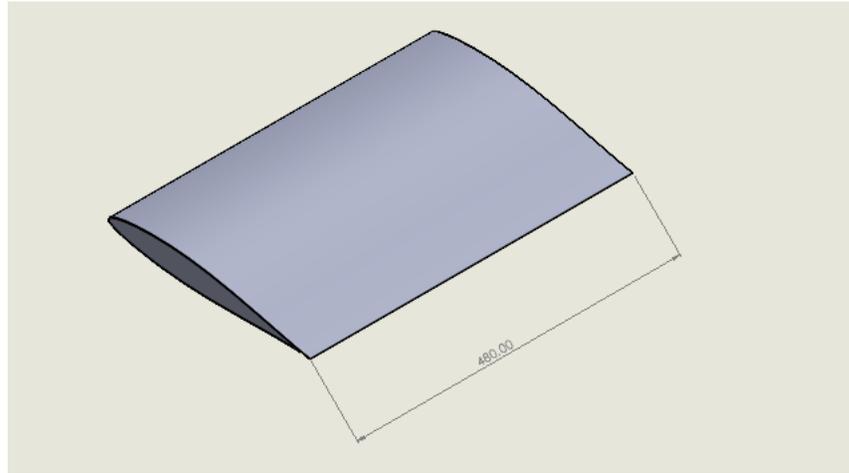
Ilustración 88: Perfil Naca 63 -212



Fuente: Autores

6.6. Análisis de presión y velocidad al perfil con diferentes tipos de inclinación

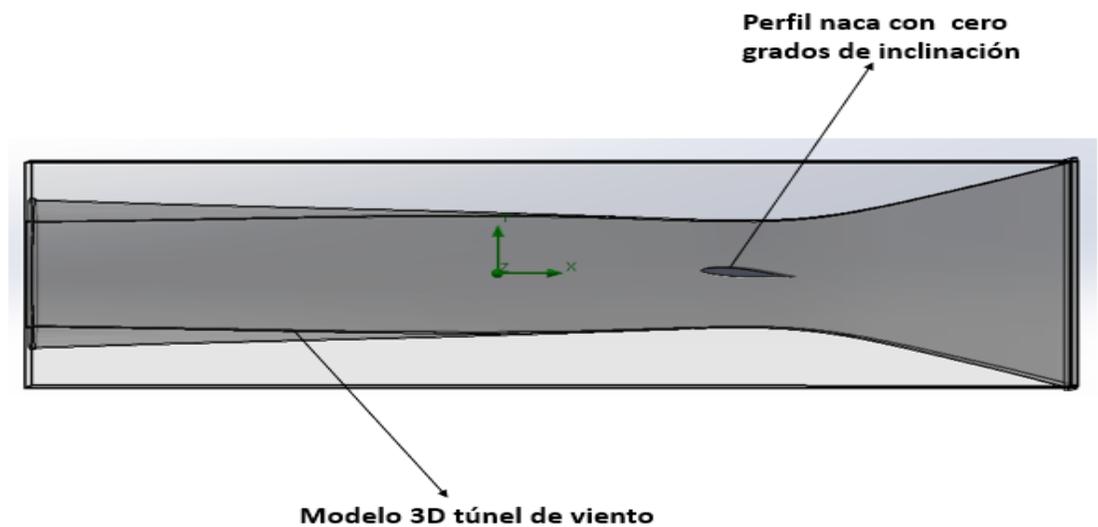
Una vez generado el perfil aerodinámico “naca 63-212” (ver ilustración 90), este será sometido a diferentes tipos de inclinación para observar su comportamiento.

Ilustración 89: Perfil Naca 63 212

Fuente: Autores

6.6.1. Simulación del perfil naca 63-212 sin inclinación

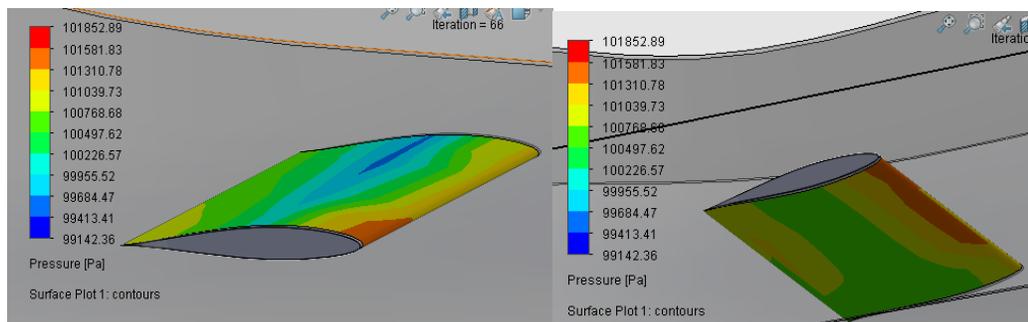
El primer estudio es con el perfil completamente horizontal. En el setup (túnel de viento 3D), se ubica en la zona pruebas donde se analizarán las presiones y las velocidades que este sufre.

Ilustración 90: Túnel de Viento

Fuente: Autores

6.6.1.1. Análisis de velocidades del perfil naca horizontal

Ilustración 91: Naca Horizontal



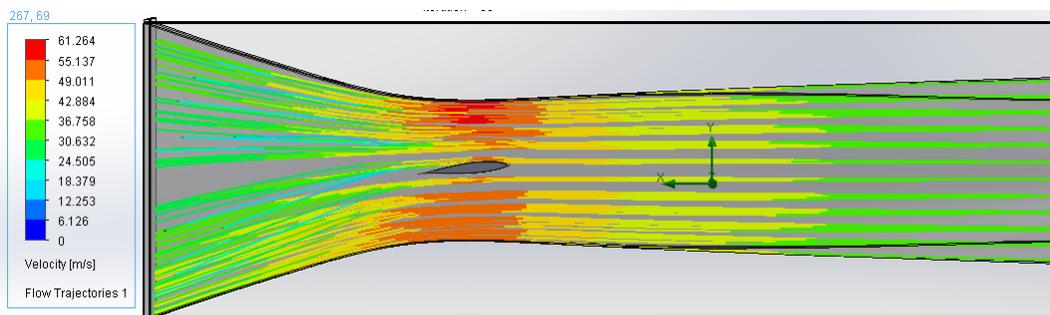
Fuente: Autores

Se puede visualizar en la figura del perfil naca con 0 grados de inclinación que, en la parte frontal de este, tanto superior como inferior, es donde se generan las mayores presiones en un rango promedio de (101.3Mpa a 101.65 Mpa), debido a que cuando el flujo de aire hace contacto con la parte frontal del perfil, se genera una disminución de la velocidad y consigo, un aumento notable de la presión, obedeciendo lo estipulado por el principio de Bernoulli.

En la parte superior del perfil, se observa que en el centro de este hay una presión baja, contrario a lo que sucede en la parte inferior del perfil, que muestra una presión promedio más alta y estable; La mayor presión actuando sobre la superficie inferior del perfil genera una fuerza de sustentación en el eje +Y vertical

6.6.1.2. Análisis de velocidades del perfil naca horizontal

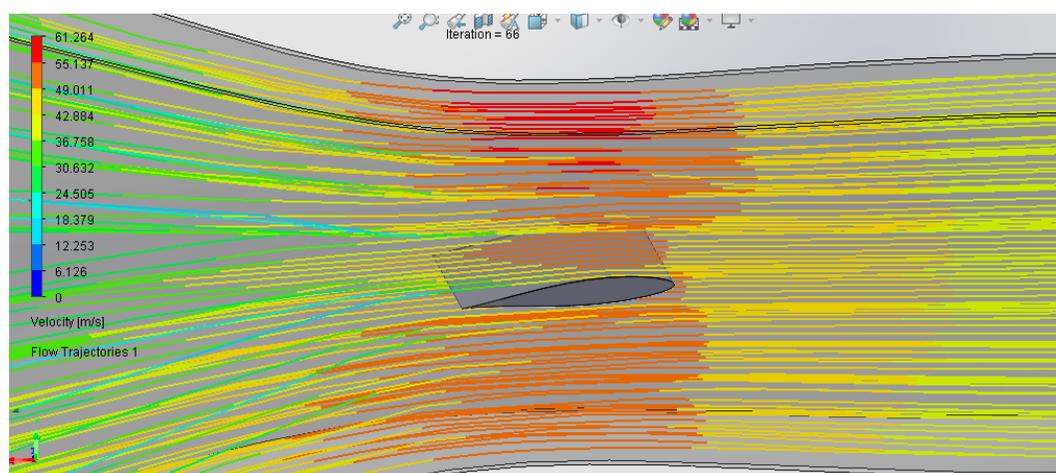
Ilustración 92: Perfil Horizontal



Fuente: Autores

Como se aprecia en la imagen, el flujo de aire, que trae una velocidad constante, comienza a tener una disminución al momento que hace contacto con la cara frontal del perfil. La velocidad del flujo empieza a aumentar hasta el punto de 61.264 m/s cuando ha recorrido más de una cuarta ($\frac{1}{4}$) parte de la cara del perfil horizontal. La estabilización de la velocidad del flujo de aire se logra cuando este ha terminado el paso por el perfil.

Ilustración 93: Perfil Horizontal



Fuente: Autores

En la trayectoria de líneas de flujo podemos observar el cambio de velocidad por medio de la escala de valores, en las cuales se puede visualizar un flujo laminar una vez entra en contacto con el cuerpo. Por eso, este se considera un perfil aerodinámico.

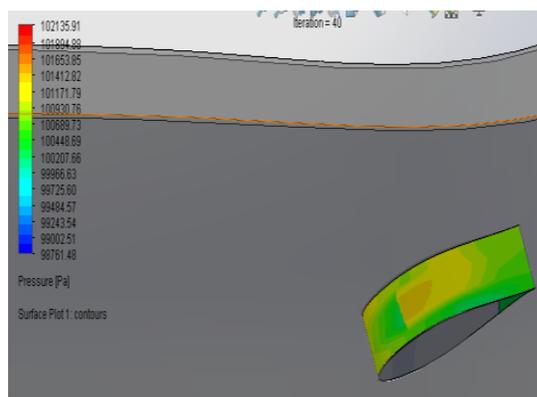
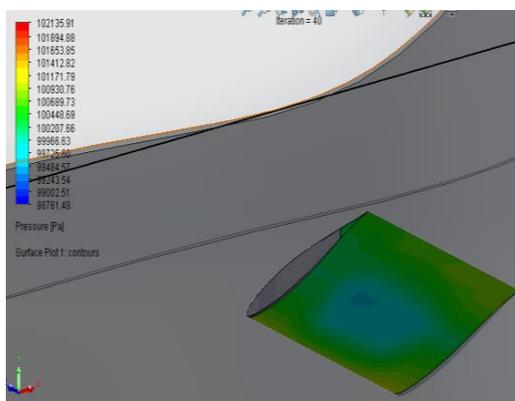
6.6.2. Simulación del perfil naca 63-212 con una inclinación de -10 grados

Se ubica el perfil con una inclinación de -10° respecto al eje Y, con el objetivo de observar los cambios de presión cuando el perfil Naca 63 212 se encuentra sometido a este tipo de fuerza en la cual muestra en la escala de presiones los lugares en los cuales se encuentra a una mayor presión en este caso con la inclinación mostrada nos muestra que el punto con mayor presión es la

parte plana central del perfil en la cual se encuentra sometida a una presión de 101.171 Mpa por lo tanto observamos que en la parte baja del perfil se muestra todo lo contrario ,

El punto con menor presión nos muestra en la escala el valor de 99.484 Mpa se encuentra situado al respaldo del punto con mayor índice de presión lo que significa que el perfil al generarse una mayor presión en la cara superior del perfil, esta se traduce en una Fuerza de Sustentación Negativa, lo cual forzaría a que el perfil descienda del nivel en el que se encuentra.

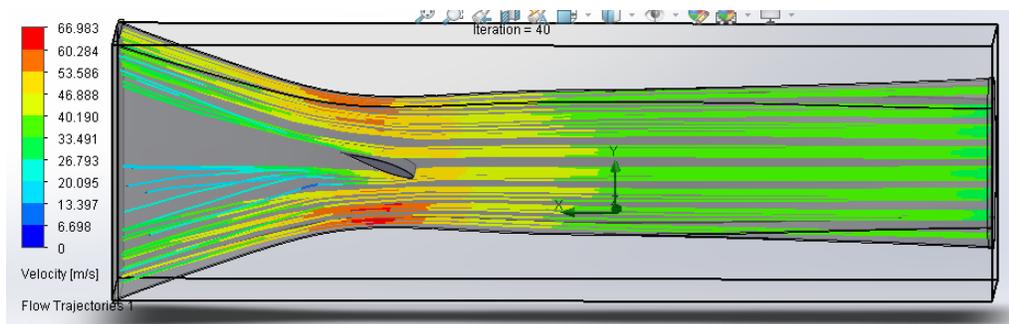
Ilustración 94: Naca -10 grados



Fuente: Autores

6.6.2.1. Análisis de velocidades del perfil naca inclinación -10 grados

Ilustración 95: Perfil -10 grados



Fuente: Autores

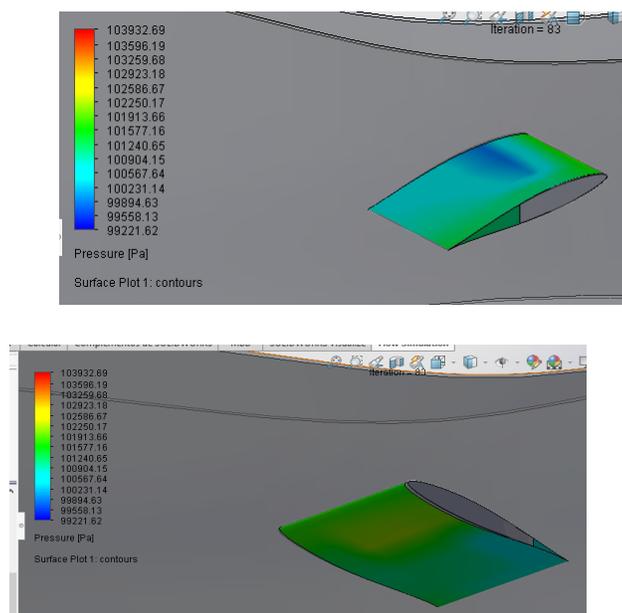
Como se puede apreciar en la imagen en el momento que la velocidad del fluido realiza un contacto con el perfil se observa una disminución notable en la velocidad. Se observa que el punto con menor velocidad se encuentra situado en la parte trasera inferior del perfil en la cual se generan remolinos en la cual nos registra una velocidad mínima de 20,095 m/s y la velocidad máxima que nos genera es una velocidad de 68 m/s.

Se puede evidenciar también (ver ilustración 100) que con la inclinación de -10° se produce un vórtice o distorsión en la trayectoria del flujo de aire en la parte inferior del perfil, esto se produce por un desprendimiento de capa límite de aire que está en contacto con el perfil al detenerse o reducirse drásticamente la velocidad de flujo.

6.6.3. Simulación del perfil naca 63-212 con una inclinación de veinte grados

En el análisis de la simulación con un perfil inclinado 20 grados en sentido positivo se podría decir que es el estudio de un perfil aerodinámico naca la cual se dispone a elevar su altura a despegar. Podemos observar que el perfil en la parte inferior está sometido a una presión muy alta en la zona del inicio del perfil la cual nos muestra una presión de 102.586 Mpa, el perfil se encuentra inclinado 20 grados en sentido positivo lo que genera que en la zona donde no está recibiendo el fluido directamente la presión es bastante baja pero aumenta su velocidad.

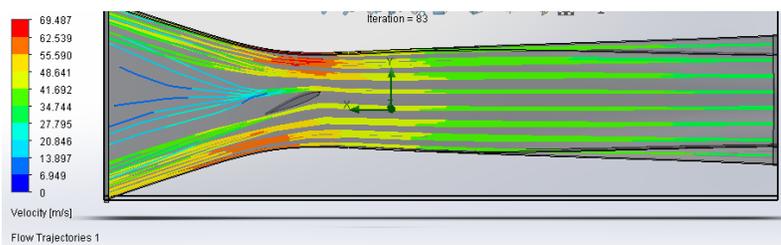
Ilustración 96: Naca +20 Grados respecto a Y



Fuente: Autores

6.6.3.1. Análisis de velocidades del perfil naca inclinación 20 grados

Ilustración 97: Perfil inclinado 20 grados



Fuente: Autores

Como se aprecia en la simulación podemos ver que tiene una velocidad de flujo constante que al hacer contacto con el perfil naca inclinado a 20 grados observamos que en la parte frontal del perfil encontramos el punto donde se observa que tenemos un punto donde la velocidad promedio que genera es alrededor de 55.590 m/s y disminuye drásticamente generando que con el

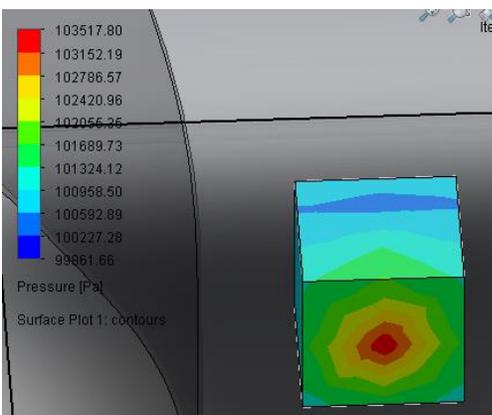
paso del fluido en este caso aire observamos que llega a su punto mínimo en la parte trasera del perfil y genera remolinos.

6.7. Simulación de otros cuerpos geométricos

Se procede a utilizar un cubo de madera de 20 centímetros de alto por 20 centímetros de ancho para observar y analizar el comportamiento de un cuerpo que no se considera ser aerodinámico, con el fin de describir el comportamiento del flujo de aire al entrar en contacto con este.

6.7.1. Análisis de presiones cubo de madera Cara frontal

Ilustración 98: Cubo Madera



Fuente: Autores

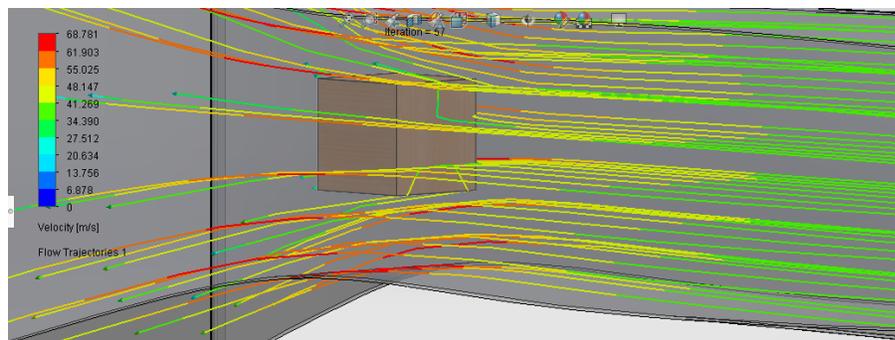
Al observar las imágenes de las presiones que genera el cubo de madera dentro de la simulación, se origina un análisis específico puesto que no es una figura aerodinámica, se observa, debido a que la mayor presión se produce en la cara frontal en un punto específico, este punto específico se conoce como el punto de estancamiento de flujo, zona en la cual la presión tan elevada conlleva a que la velocidad de flujo se detenga por completo, aumentando de esta forma la fuerza de arrastre que el cuerpo ejerce sobre el flujo. la cual es la que recibe todo el flujo el aire. La presión va disminuyendo a medida que aumenta la superficie.

6.7.1. Análisis de presiones cubo de madera Cara posterior

Dado a que la figura no es aerodinámica, la presión no se distribuye equitativamente, generando que en la parte posterior del cubo no fuese afectada por el cambio de presión en el fluido.

6.7.2. Análisis de velocidades cubo de madera

Ilustración 99: Cubo de madera



Fuente: Autores

Al exponer el cubo de madera a un flujo laminar de aire y, al este hacer contacto con el espacio frontal, genera un fenómeno de repulsión, el cual a su vez produce una disminución drástica de la velocidad la cual llega al punto más bajo de velocidad (27.512), en consecuencia, un aumento puntual de la presión de la superficie. La velocidad del fluido aumenta cuando la superficie del cubo de madera disminuye debido a que el área de choque es menor.

7. Guía de laboratorio referente a simulación en SolidWorks

Como complemento se desarrollan dos guías de laboratorio en las cuales se pretende generar un recurso de estudio experimental para estudiantes y docentes. De forma que los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas anteriormente puedan ser validados de forma experimental real utilizando el túnel de viento físico que se encuentra en las instalaciones de la Facultad FIMEB de la UAN.

La primera guía se generó con la finalidad de que el estudiante o maestro sea capaz de llevar a cabo una simulación de cualquier fluido, también se generó para poder comparar los valores entre la simulación y un estudio realizado presencialmente en el túnel de viento que se encuentra en la universidad Antonio Nariño (ver anexo digital D)

La segunda guía se crea con la finalidad de comparar figuras geométricas no aerodinámicas para observar el comportamiento de la velocidad y presión. (ver anexo digital E)

Conclusiones

- De acuerdo con la metodología de diseño mecánico y resistencia de esfuerzos aplicada para el rediseño de la estructura, se logró optimizar la estructura de soporte del túnel de viento, permitiendo plantear una estructura modular mejorada con perfiles estructurales, con mayor facilidad de fabricación y armado, con el valor agregado de bajo costo en manufactura y materiales. Adicionalmente, la nueva propuesta de diseño permite disminuir las vibraciones y oscilaciones no deseadas que se generaban al utilizar el sistema, mediante la adaptación de un soporte elástico tipo “sándwich” ubicado en la parte inferior del túnel de viento, comprobado por medio de simulación de elementos finitos.
- Referente a la cámara de pruebas del túnel de viento, la nueva propuesta de diseño cumple de manera satisfactoria con el objetivo de ampliar su uso, facilitando la adaptación y manipulación de cuerpos geométricos diversos, los cuales pueden ser manipulados desde el exterior variando controladamente sus movimientos en ángulo y posición, para permitir ampliar el alcance de los tipos de estudios aerodinámicos que se puedan llevar a cabo. Adicionalmente, se controló de mejor manera los escapes o fugas de la presión del aire que estaban presentes en las uniones de la estructura metálica y la zona de pruebas, garantizando hermeticidad y preservación del caudal de aire durante su funcionamiento.
- La simulación en SolidWorks con el complemento Flow Simulation es una herramienta muy práctica en el momento de realizar estudios ya que genera variables muy precisas sobre la investigación que se desea obtener, en este caso fue una herramienta muy útil ya que permitió analizar el comportamiento de un perfil aerodinámico NACA 63212 sometido a velocidades de flujo e inclinaciones controladas, de forma que se pudo comprobar los principios establecidos desde la Ecuación de Bernoulli referente a la relación existente entre la variación de la velocidad y presión de flujo de aire en un tubo venturi, pero esta vez aplicado a varios objetos.
- Las guías de laboratorio se plantearon como un complemento importante para poder transmitir los conceptos teóricos desarrollados en este documento, apoyándose en una

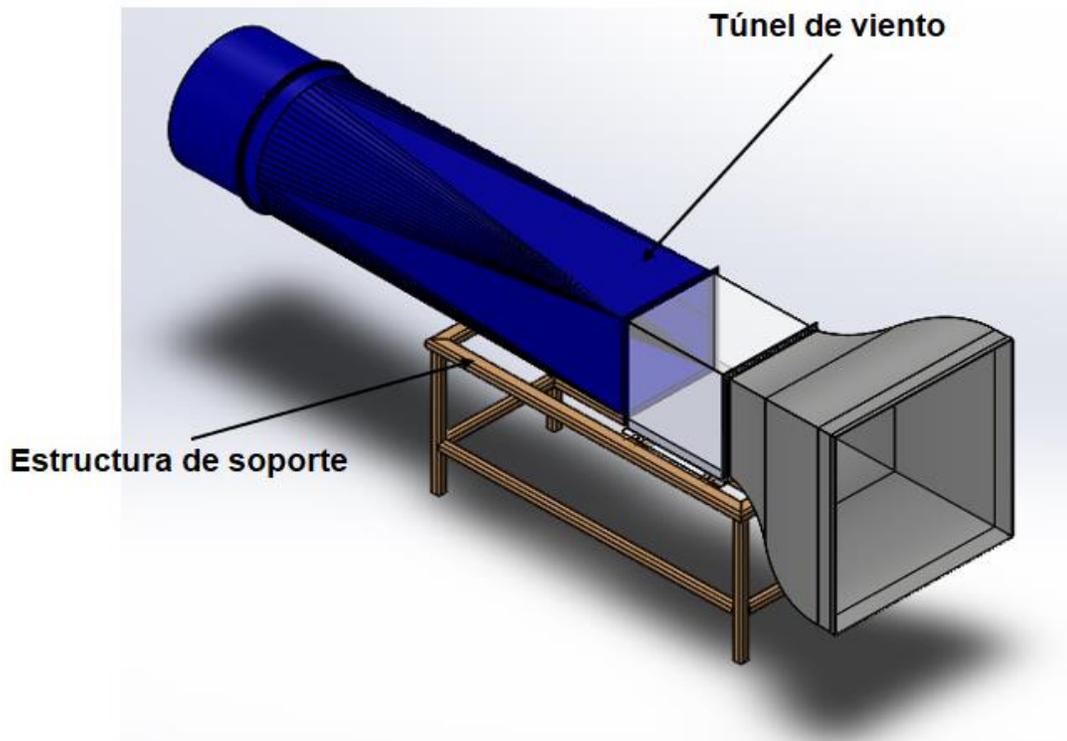
herramienta de software permitiendo apropiar los conocimientos de una forma más didáctica y práctica por medio de una simulación de dinámica de fluidos computacional.

Bibliografía

- Miguel Ángel Muñoz Navarro, «Manual de vuelo,» [En línea]. Available: https://www.manualvuelo.es/1pbav/12_aerod.html. [Último acceso: 15 abril 2021].
- Álvarez, J. P. Diseño y construcción de túnel de viento para ensayos aerodinámicos. Tesis de Licenciatura. Universidad internacional del Ecuador, 2011.
- Mataix, Claudio, Máquinas Hidráulicas, Madrid España (1982).
- Granados Mejía, y Torres Dorantes, Rehabilitación de un túnel de viento, Tesis de ingeniería. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. México D.F (2015).
- Álvarez, M. A. Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad. Proyecto de fin de carrera. Escuela Politécnica Superior, 2012.
- Ruíz, J. M. (2007). Aerodinámica del Vuelo: Aves y Aeronaves. Madrid: Centro de documentación y Publicaciones de AENA.
- Álvarez, J. P. Diseño y construcción de túnel de viento para ensayos aerodinámicos. Tesis de Licenciatura. Universidad internacional del Ecuador, 2011.
- Murcia, Sandro, Quitian, Argemiro. Influencia del número y orientación angular de los álabes externos en el desempeño de un pico turbina eólica tipo savourious modificada. Tesis de ingeniería mecánica. Universidad Antonio Nariño. Colombia.2010.
- Robert, L. Mott, P.E, (2006). Diseño de Elementos de Máquinas. Naucalpan de Juárez. Edo de México. Editorial Pearson.
- Yunus A. Cengel y John M. Cimbala (2010). Mecánica de Fluidos, Fundamentos y aplicaciones. Editorial Graw Hill Educación.
- Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR, John T. Dewolf, David F. Mazurek (2010). Mecánica de Materiales. Editorial Graw Hill Educación.
- Russell C. Hibbeler. (2010). Ingeniería Mecánica Estática. Naucalpan de Juárez. Edo de México. Editorial Pearson.
- Soler & Palau Ventilation Group. (2012). Manual de Ventilación. Volumen 2. Madrid, España.
- Robert, L. Mott, P.E, (1996). Mecánica de Fluidos Aplicada. Naucalpan de Juárez. Edo de México. Editorial Pearson.

- Ramón M. Bastidas, Julio C. Pino, Héctor C. Terán, Oscar B. Arteaga (2014). Vibraciones Mecánicas Volumen 2. Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.
- Alma V. Granados, Juan M. Torres (2015). Rehabilitación y mantenimiento de un túnel de viento. Tesis de ingeniería civil. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (Unidad Zacatenco). México D.F.
- Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke. (1998). Diseño en ingeniería Mecánica. México. Editorial Graw Hill Educación.
- Ertas, Atila y Jesse C. Jones (1993). Descripción del proceso del diseño, desde la definición de los objetivos del diseño hasta la certificación y manufactura del producto.
- Antonio B. Ripoll, José M. Ruiz (2011). Aerodinámica de altas velocidades. Garceta Grupo Editorial.
- Coss Bú, Raúl. Simulación un enfoque practico (1993). Editorial LIMUSA- Noriega Editores.
- Carrera Akutain, X., Hualde Garaikoetxea, J., & Mateos Pastor, M. (s.f). AERODINÁMICA. Obtenido de AERODINÁMICA: <https://www.kimerius.com/app/download/5782300313/Aerodin%C3%A1mica.pdf>.
- DA RIVA DE LA CAVADA, I. (1991). AERODINAMICA. Recuperado el 2021, de <https://oa.upm.es/13758/1/C14.pdf>.
- ast INGENIERÍA. (2019). Simulación de sistemas Fluidodinámicos mediante la aplicación del método de los volúmenes finitos. Obtenido de Simulación de sistemas Fluidodinámicos mediante la aplicación del método de los volúmenes finitos: <http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd>.
- Cangrejo Guzmán J. Fernando. Diseño de túnel de viento abierto para el laboratorio de hidráulicas de la Universidad Libre mediante simulación CFD. Tesis de ingeniería mecánica. Universidad Libre de Colombia.2021

Anexos

Anexo A: Montaje de la estructura de soporte actual con el túnel de viento

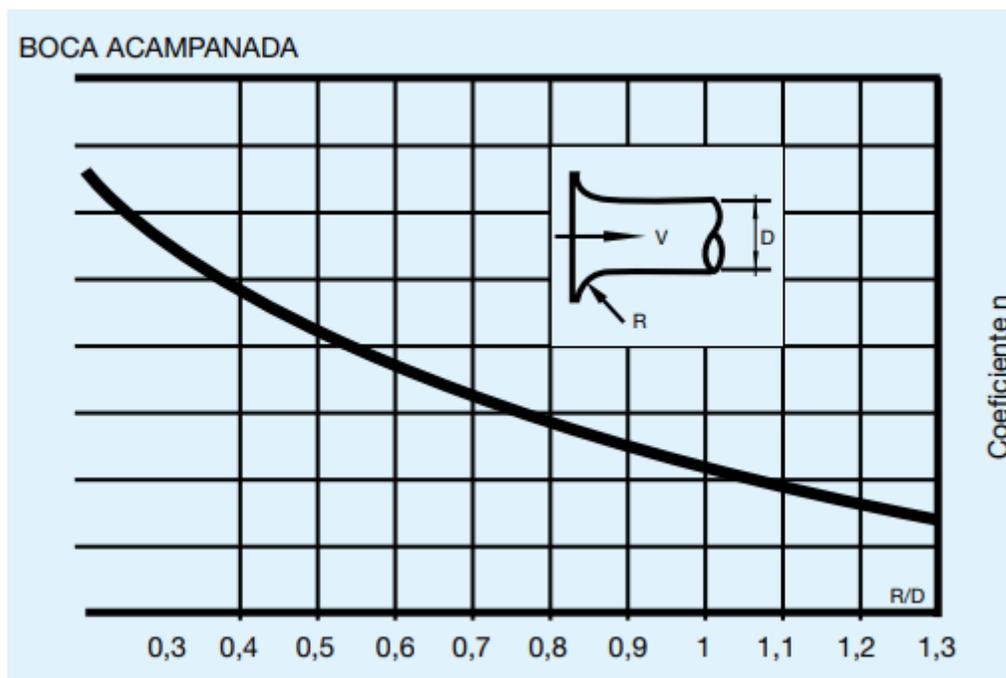
Fuente: Autores

**Anexo B: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista
isométrica**

**Anexo C: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista:
superior**

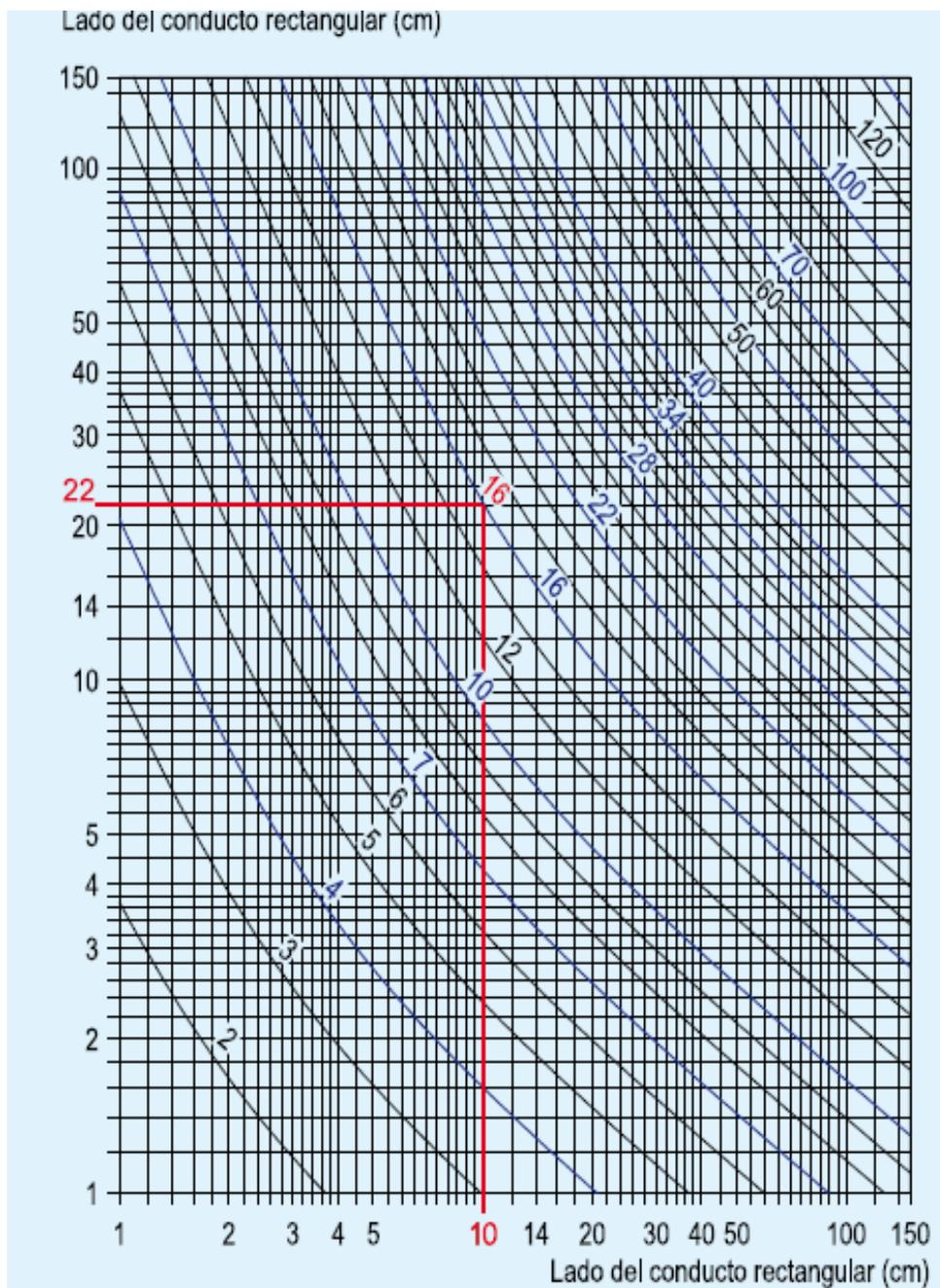
**Anexo D: Planos de fabricación del rediseño de la estructura de soporte vista:
frontal**

Anexo E: Cotización del rediseño de soporte del túnel de viento

Anexo F: Coeficiente de pérdida de carga de una boca campana

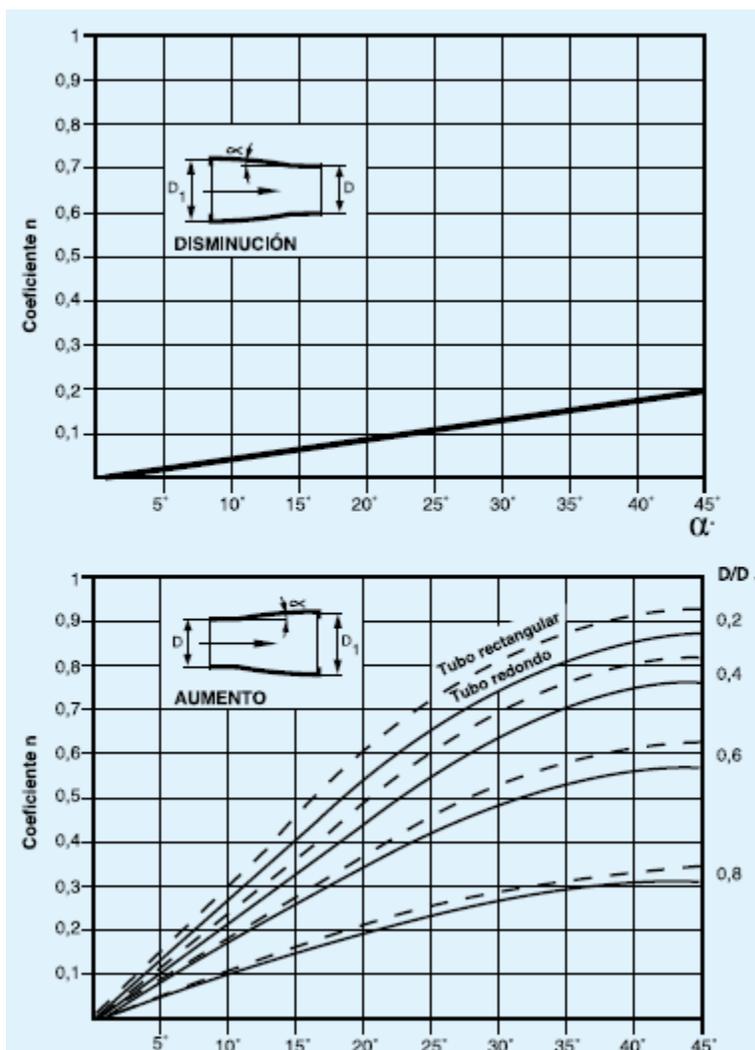
Fuente: Manual de ventilación. Soler & Palau. volumen 2

Anexo G: Diámetro equivalente de un conducto rectangular con igual pérdida de carga



Fuente: Manual de ventilación. Soler & Palau. volumen 2

Anexo H: Pérdida de carga en secciones graduales de sección



Fuente: Manual de ventilación. Soler & Palau. volumen 2

Anexo I: Lista de componentes zona de pruebas

Anexo J: Planos de fabricación cámara de pruebas

Anexo K: Plano de fabricación mecanismo de giro

Anexo L: Plano de fabricación medidor de grados

Anexo M: Cotización rediseño zona de pruebas