



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**GENERACIÓN Y CONTROL DE TURBULENCIAS
EN UN TÚNEL DE VIENTO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

América Torres Tinoco

Director de tesis:

Dr. Roberto Tapia Sánchez



Morelia, Michoacán, México.

Julio 2016

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen por permitirme concluir la presente tesis.

A mi hija que es mi motor para mejorar día a día no sólo profesionalmente sino como persona.

A mi esposo por todo el amor, cariño y apoyo que ha brindado durante esta experiencia.

A mi madre que siempre ha sido un pilar lleno de amor, confianza y apoyo no sólo a lo largo de mi preparación académica sino durante toda mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Posgrado.

A mi director de tesis, Dr. Roberto Tapia Sánchez, por el tiempo invertido para el desarrollo de esta investigación, por sus valiosas aportaciones y observaciones, así como su guía y paciencia sin los que no hubiera sido posible la realización del mismo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de esta tesis.

A mis profesores, compañeros y amigos de quienes siempre he tenido la oportunidad de seguir aprendiendo.

Resumen

En esta tesis se presenta la propuesta del diseño de un túnel de viento, el cual permite la generación y control de turbulencias, dentro de su cámara de pruebas para fines de diseño, análisis y experimentación de turbinas eólicas para uso doméstico.

Se exponen conceptos de la mecánica de fluidos, los cuales son necesarios para realizar el diseño del túnel de viento. En específico, la Ecuación de Bernoulli, el tipo de flujo (laminar y turbulento), así como el número de Reynolds, son mencionados con el fin de comprender la generación de flujos turbulentos. Dichos conceptos son aplicados al diseño del túnel viento.

Se presentan las modificaciones al diseño del túnel de viento para la generación de turbulencias en la cámara de pruebas, y el análisis de las turbulencias se agrupa en casos de acuerdo al concepto de simetría reflectiva.

El modelado y análisis del túnel es realizado en el programa computacional de la dinámica de fluidos CFD incluido en el programa computacional ANSYS. En específico la plataforma o módulo conocido como Fluent es utilizada para realizar el análisis de las turbulencias generadas en el túnel de viento. Para realizar los cálculos en el módulo de Fluent se utiliza el procesamiento en paralelo con el fin de mejorar el tiempo de simulación.

Se muestra en la presente tesis una propuesta del diseño de un túnel de viento con generación y control de turbulencias. Para lo anterior, se realiza el diseño del controlador, así como su verificación por medio de simulaciones. El concepto de co-simulación es utilizado por medio del módulo Simplorer, con el objetivo de conjuntar la parte de la electrónica de potencia, el controlador y el motor, con el modelo del túnel de viento propuesto.

Palabras Clave: Túnel de viento, turbulencia, control, diseño, modelado.

Abstract

In this thesis, the generation and control turbulence in a wind tunnel, for design, analysis and testing of wind turbines is proposed. The designed wind turbines will be focused for domestic use.

Essential fluid mechanics concepts are exposed in order to design the wind tunnel, i.e. the Bernoulli equation, the type of flow (laminar and turbulent), and the Reynolds number are mentioned in order to understand the generation of turbulent flows. These concepts are applied to the design of the tunnel.

Modifications to the wind tunnel are made in order to generate the turbulences in the test chamber. Specifically, for the turbulence analysis, the reflective symmetry concept is used to group the different turbulences cases.

The ANSYS software is used in order to modeling and analyzing the wind tunnel. Specific platform or module known as Fluent is used for the analysis of the turbulence generated in the wind tunnel. To improve the simulation time, the parallel processing is used in the Fluent module.

A design proposal of a wind tunnel capable to generate and controlling turbulences is exposed in this thesis. For this, the controller design and verification is performed by means of simulations. The concept of co-simulation is used by the Simplorer module, with the aim of combining the part of the power electronics, controller and motor, with the proposed model wind tunnel.

Key words: Wind tunnel, turbulence, control, design, modeling.

I. Índice

| | |
|-------------------------------------------|-------|
| DEDICATORIA | I |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| RESUMEN..... | V |
| ABSTRACT | VII |
| I. ÍNDICE..... | IX |
| II. LISTA DE FIGURAS | XV |
| III. TABLAS | XXI |
| IV. LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS..... | XXIII |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Definición del problema | 1 |
| 1.2 Objetivo | 2 |
| 1.2.1 Objetivos particulares..... | 2 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Antecedentes | 3 |
| 1.5 Metodología..... | 5 |
| 1.6 Aportaciones | 6 |
| 1.7 Descripción de Capítulos | 6 |
| CAPÍTULO 2..... | 8 |

| | | |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2 | TÚNEL DE VIENTO | 8 |
| 2.1 | Introducción | 8 |
| 2.2 | Componentes de un túnel de viento | 8 |
| 2.3 | Clasificación del túnel | 10 |
| 2.3.1 | Velocidad del túnel..... | 10 |
| 2.3.2 | Estructura física..... | 11 |
| 2.3.2.1 | Túnel de circuito cerrado..... | 11 |
| 2.3.2.2 | Túnel de circuito abierto..... | 12 |
| 2.3.3 | Principales componentes del túnel de viento..... | 13 |
| 2.3.3.1 | Admisión | 14 |
| 2.3.3.2 | Malla acondicionadora de flujo | 14 |
| 2.3.3.3 | Área de contracción..... | 15 |
| 2.3.3.4 | Cámara de pruebas | 16 |
| 2.3.3.5 | Área de difusión | 17 |
| 2.4 | Diseño del túnel de viento | 17 |
| 2.4.1 | Parámetros de diseño..... | 17 |
| 2.4.2 | Cálculo del flujo másico y el caudal de aire requerido..... | 18 |
| 2.4.3 | Elementos del túnel de viento..... | 19 |
| 2.4.3.1 | Cámara de pruebas | 20 |
| 2.4.3.2 | Área de Contracción..... | 22 |
| 2.4.3.3 | Malla acondicionadora de flujo | 24 |
| 2.4.3.4 | Difusor..... | 25 |
| 2.5 | Conclusiones | 25 |
| CAPÍTULO 3 | | 27 |
| 3 | GENERACIÓN DE VIENTO Y TURBULENCIAS | 27 |
| 3.1 | Introducción | 27 |
| 3.2 | Propuesta de generación de turbulencia | 27 |
| 3.3 | Simulación en ANSYS Fluent | 31 |
| 3.3.1 | Crear volumen sólido del túnel de viento..... | 34 |
| 3.3.2 | Importar geometría | 35 |
| 3.3.3 | Crear y diseñar malla..... | 36 |
| 3.3.3.1 | Definición del tamaño (Sizing Definitions) | 37 |
| 3.3.4 | Configuración del CFD para la simulación en ANSYS Fluent..... | 45 |
| 3.3.4.1 | Establecer la configuración general para el análisis CFD. | 46 |
| 3.3.4.2 | Configurar el túnel de viento para la simulación CFD..... | 47 |
| 3.3.4.3 | Configurar los materiales para la simulación CFD. | 47 |

| | | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.4.4 | Configurar las condiciones de contorno para el análisis CFD..... | 48 |
| 3.3.4.5 | Configurar parámetros de la solución para simulación CFD..... | 49 |
| 3.3.4.6 | Verificar el criterio de convergencia de las ecuaciones residuales..... | 52 |
| 3.3.4.7 | Configurar los monitores de la superficie de salida | 54 |
| 3.3.4.8 | Calcular la solución..... | 54 |
| 3.3.5 | Resultados | 55 |
| 3.3.5.1 | Residuos | 55 |
| 3.3.5.2 | Flujo másico | 56 |
| 3.3.5.3 | Flujo volumétrico | 57 |
| 3.6.5.4 | Post-procesamiento | 58 |
| 3.4 | Modificación del túnel de viento a 3 ventiladores en la entrada | 60 |
| 3.5 | Modificación del túnel de viento a 9 ventiladores en la entrada | 64 |
| 3.6 | Análisis de la generación de turbulencias | 65 |
| 3.6.1 | Casos de simetría..... | 69 |
| 3.6.2 | Caso de estudio: Caso 1, combinaciones 1_1_1 y 2_4_4..... | 73 |
| 3.6.3 | Caso de estudio: Caso 12, combinaciones 7_3_3 y 7_6_6..... | 75 |
| 3.7 | Conclusiones | 77 |
| CAPÍTULO 4..... | | 78 |
| 4 | LEY DE CONTROL DE GENERACIÓN DE VIENTO Y TURBULENCIAS | 78 |
| 4.1 | Introducción..... | 78 |
| 4.2 | Elementos del sistema | 78 |
| 4.2.1 | Convertidor CA- CD | 79 |
| 4.2.2 | Puente H..... | 81 |
| 4.2.3 | Ventiladores..... | 83 |
| 4.3 | Ley de control | 85 |
| 4.3.1 | Cálculo de las ganancias del controlador | 88 |
| 4.4 | Co-simulación en ANSYS Simplorer | 89 |
| 4.4.1 | Adaptación del modelo..... | 91 |
| 4.4.2 | Co-simulación Caso 1: combinaciones 1_1_1 y 2_4_4 | 93 |
| 4.4.2.1 | Combinación 1_1_1..... | 93 |
| 4.4.2.2 | Combinación 2_4_4..... | 95 |
| 4.4.2.3 | Comparación de resultados caso de estudio 1 | 97 |
| 4.4.3 | Co-simulación Caso 12: combinaciones 7_3_3 y 7_6_6 | 99 |
| 4.4.3.1 | Combinación 7_3_3..... | 99 |
| 4.4.3.2 | Combinación 7_6_6..... | 101 |
| 4.4.3.3 | Comparación de resultados para el caso de estudio 2 | 103 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5 Conclusiones | 106 |
| CAPÍTULO 5..... | 108 |
| 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... | 108 |
| 5.1 Conclusiones | 108 |
| 5.2 Trabajos futuros | 110 |
| V. BIBLIOGRAFÍA..... | 111 |
| APÉNDICES..... | 114 |
| APÉNDICE A | 114 |
| A. MECÁNICA DE FLUIDOS | 114 |
| A.1 Introducción..... | 114 |
| A.2 Mecánica de Fluidos | 114 |
| A.3 Propiedades de los fluidos..... | 115 |
| A.4 El flujo de los fluidos y la Ecuación de Bernoulli | 116 |
| A.5 Ecuación de continuidad para cualquier fluido..... | 118 |
| A.6 Conservación de la energía- Ecuación de Bernoulli | 119 |
| A.6.1 Interpretación de la Ecuación de Bernoulli | 122 |
| A.6.2 Pérdidas de energía por fricción y coeficiente de resistencia | 124 |
| A.7 Flujo laminar, flujo turbulento, número de Reynolds y radio hidráulico..... | 126 |
| A.7.1 Flujo laminar | 127 |
| A.7.2 Flujo turbulento | 128 |
| A.7.2.1 Clasificación de las turbulencias | 129 |
| A.7.3 Número de Reynolds. | 130 |
| A.7.4 Radio hidráulico | 133 |
| A.8 Efecto Venturi..... | 135 |
| A.9 Fuerza de arrastre y de sustentación | 136 |
| A.9.1 Fuerza de arrastre | 136 |
| A.9.1.1 Arrastre de presión | 138 |
| A.9.1.2 Arrastre de fricción..... | 139 |
| A.9.2 Fuerza de sustentación..... | 140 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| A.10 Capa límite | 142 |
| A.11 Número de Mach | 143 |
| APÉNDICE B | 145 |
| B. CÁLCULO DE PÉRDIDAS MENORES DE ENERGÍA POR FRICCIÓN, CONTRACCIÓN GRADUAL..... | 145 |
| APÉNDICE C | 147 |
| C. SIMETRÍA..... | 147 |
| C.1 Simetría geométrica..... | 147 |
| APÉNDICE D | 151 |
| D. CASOS DE ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE TURBULENCIAS..... | 151 |

II. Lista de figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Metodología. | 6 |
| Figura 2.1 Etapas para el diseño de un túnel de viento. | 9 |
| Figura 2.2 Túnel de circuito cerrado y sus componentes. | 12 |
| Figura 2.3 Túnel de circuito abierto y sus componentes. | 12 |
| Figura 2.4 Coeficientes de pérdidas (k) para diferentes geometrías de la malla acondicionadora. | 14 |
| Figura 2.5 Contracción gradual con extremo redondeado en $D2$ | 15 |
| Figura 2.6 Modelo del túnel de viento. | 20 |
| Figura 2.7 Cámara de pruebas. a) Diseño de cámara de pruebas, b) Calculo de radio hidráulico. | 21 |
| Figura 2.8 Contracción del túnel construido. | 23 |
| Figura 2.9 Malla, a) Vista frontal, b) Vista lateral de una celda. | 24 |
| Figura 2.10 Arreglo de celdas para la malla acondicionadora de flujo. | 25 |
| Figura 3.1 Capa de cortadura. | 28 |
| Figura 3.2 Ligera perturbación. | 28 |
| Figura 3.3 Cambio a inestabilidad en la capa de cortadura. | 29 |
| Figura 3.4 Cámara de pruebas modificada para generar turbulencia. | 30 |
| Figura 3.5 Arrastre inducido | 30 |
| Figura 3.6 Capa de cortadura en cámara de pruebas. | 31 |
| Figura 3.7 Discretización de variables. | 33 |
| Figura 3.8 Diseño de túnel de viento 3D en ANSYS SpaceClaim. | 34 |
| Figura 3.9 Fluid Flow (Fluent), ANSYS Workbench. | 35 |
| Figura 3.10 Geometría importada en ANSYS. | 36 |
| Figura 3.11 Geometría generada correctamente. | 36 |
| Figura 3.12 Malla creada con valores predefinidos. a) Vista isométrica, b) corte longitudinal. | 38 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.13 Valores de tamaño (Sizing)..... | 38 |
| Figura 3.14 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metric", con valores predeterminados. | 39 |
| Figura 3.15 a) Malla con "Proximity and Curvature", vista isométrica, b) corte longitudinal. | 40 |
| Figura 3.16 Detalles para la generación de la malla con "Proximity and Curvature". | 40 |
| Figura 3.17 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metrics", con "Proximity and Curvature". | 41 |
| Figura 3.18 Malla creada con "Relevance en 89". a) Vista isométrica, b) corte longitudinal. | 42 |
| Figura 3.19 Herramienta "Relevance" para mejorar la calidad del mallado. | 43 |
| Figura 3.20 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metrics" con "Relevance" en 89. | 43 |
| Figura 3.21 Entradas y Salidas del Túnel de Viento. | 44 |
| Figura 3.22 Malla generada correctamente. | 45 |
| Figura 3.23 Fluent Launcher. | 45 |
| Figura 3.24 Setup "General"..... | 46 |
| Figura 3.25 Verificación de la malla. | 46 |
| Figura 3.26 Configurar material. | 48 |
| Figura 3.27 Condiciones de contorno..... | 49 |
| Figura 3.28 Configuración del Método de Solución. | 50 |
| Figura 3.29 Evaluación de la celda centroide (ANSYS, 2010)..... | 50 |
| Figura 3.30 Monitor de residuos. | 53 |
| Figura 3.31 Calcular la solución..... | 54 |
| Figura 3.32 Residuos..... | 56 |
| Figura 3.33 Flujo másico..... | 57 |
| Figura 3.34 Flujo volumétrico..... | 58 |
| Figura 3.35 Presión, CFD post. | 59 |
| Figura 3.36 a) Post- CFD, ventilador encendido en entrada de túnel de viento. b) Post- CFD, ventilador encendido en entrada y 6 ventiladores encendidos en cámara de pruebas. | 59 |
| Figura 3.37 Modificación a 3 ventiladores. a) Vista isométrica, b) Vista lateral. | 60 |
| Figura 3.38 Sólido con tres ventiladores a la entrada..... | 61 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.39 Geometría de túnel de viento con 3 ventiladores. | 61 |
| Figura 3.40 Malla del túnel de viento con 3 ventiladores. a) Vista isométrica, b) corte longitudinal. | 62 |
| Figura 3.41 Número de elementos y nodos del túnel de viento con 3 ventiladores. | 62 |
| Figura 3.42 Calidad del mallado del túnel de viento con 3 ventiladores. | 63 |
| Figura 3.43 a) Post- CFD 3 ventiladores de entrada a túnel encendidos, b) Post- CFD 6 ventiladores de cámara de pruebas encendidos más 3 ventiladores de entrada a túnel encendidos. | 63 |
| Figura 3.44 Modificación con 9 ventiladores en la entrada a túnel de viento. | 64 |
| Figura 3.45 a) Post- CFD 9 ventiladores de entrada a túnel encendidos, b) Post- CFD 6 ventiladores de cámara de pruebas encendidos más 9 ventiladores de entrada a túnel encendidos. | 65 |
| Figura 3.46 Enumeración de ventiladores del túnel de viento. a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores en cámara de pruebas parte superior y c) Ventiladores en cámara de pruebas parte inferior. | 66 |
| Figura 3.47 Eje Coordinado. | 67 |
| Figura 3.48 Simetría reflectiva. | 68 |
| Figura 3.49 División virtual de cámara de pruebas. a) Vista isométrica, b) Vista superior, y c) Vista lateral izquierda. | 69 |
| Figura 3.50 Caso 1. | 73 |
| Figura 3.51 Caso 1, plano de simetría. | 74 |
| Figura 3.52 Caso 12. | 75 |
| Figura 3.53 Caso 12, plano de simetría. | 76 |
| Figura 4.1 Diagrama de flujo del control. | 79 |
| Figura 4.2 Convertidor trifásico (Rashid, 1995). | 80 |
| Figura 4.3 Forma de onda y ángulo de conducción de los diodos (Rashid, 1995). | 81 |
| Figura 4.4 Puente H. | 81 |
| Figura 4.5 Puente H, a) Motor gira en sentido horario, b) Motor gira en sentido antihorario. | 82 |
| Figura 4.6 Motor de CD. | 83 |
| Figura 4.7 Esquema a bloques de la ley de control. | 87 |
| Figura 4.8 Esquema a bloques de co-simulación realizado en Simplorer. | 90 |
| Figura 4.9 Adaptación del modelo con sensores. a) Vista isométrica, b) Vista desde la salida del túnel. .. | 91 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.10 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 1_1_1 (FLUENT1), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores. | 94 |
| Figura 4.11 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de combinación 2_4_4 (FLUENT2), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores. | 96 |
| Figura 4.12 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 1, sin perturbación de capa de cortadura. | 97 |
| Figura 4.13 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 1, con perturbación de capa de cortadura. | 98 |
| Figura 4.14 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 7_3_3 (FLUENT1), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores. | 100 |
| Figura 4.15 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 7_6_6 (FLUENT2), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores. | 102 |
| Figura 4.16 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 12, sin perturbación de capa de cortadura. | 103 |
| Figura 4.17 Simetría vertical Caso 12. a) Comparación de sensor 1 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 2 (7_6_6, FLUENT2), b) Comparación de sensor 4 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 3 (7_6_6, FLUENT2) y c) Comparación de sensor 5 ambas combinaciones. | 104 |
| Figura 4.18 Simetría horizontal Caso 12. a) Comparación sensor 1 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 3 (7_6_6, FLUENT2). b) Comparación sensor 2 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 4 (7_6_6, FLUENT2). | 105 |
| Figura A.1 Cambio de Sección circular. | 117 |
| Figura A.2 Sistema de distribución de un fluido en el que hay variaciones de velocidad, presión y elevación. | 119 |
| Figura A.3 Elemento de fluido en una tubería. | 119 |
| Figura A.4 Energía de flujo. | 121 |
| Figura A.5 Elementos de fluido utilizados en la Ecuación de Bernoulli. | 122 |
| Figura A.6 Carga total. | 123 |
| Figura A.7 Pérdidas menores, a) Expansión súbita, b) Pérdida de la salida, c) Expansión gradual, d) Contracción súbita, e) Contracción gradual y f) Contracción gradual con extremo redondeado. | 126 |
| Figura A.8 Flujo laminar. | 127 |
| Figura A.9 Análisis de la velocidad en un tubo con flujo laminar. | 127 |
| Figura A.10 Flujo turbulento. | 128 |
| Figura A.11 Análisis de la velocidad en un tubo con flujo turbulento. | 129 |
| Figura A.12 Turbulencia Mecánica. | 130 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A.13 Turbulencia convectiva. | 130 |
| Figura A.14 Diagrama de Moody (Mott, 2006). | 132 |
| Figura A.15 Secciones transversales cerradas que no son circulares, a) Círculo perforado circularmente en el centro, b) Cuadrado, c) Rectángulo y d) Cuadrado perforado circularmente en el centro. | 134 |
| Figura A.16 Tubo Venturi Herschel. | 135 |
| Figura A.17 Esfera en una corriente de fluido | 137 |
| Figura A.18. Coeficientes de arrastre comunes. | 139 |
| Figura A.19 Fuerza de sustentación | 140 |
| Figura A.20 Extensión y cuerda de un aeroplano. | 141 |
| Figura A.21 Arrastre inducido. | 142 |
| Figura A.22 Comportamiento de la velocidad bajo el efecto de la capa límite. | 142 |
| Figura A.23 Capa límite laminar y turbulenta. | 143 |
| Figura B.1 Coeficiente de resistencia- contracción gradual con $\theta \geq 15^\circ$ (Idel'chik, 1960). | 145 |
| Figura B.2 Coeficiente resistencia- contracción gradual con $\theta < 15^\circ$ (Idel'chik, 1960). | 146 |
| Figura C.1 Superficie esférica Gaussiana alrededor de una carga puntual (Serway, 1996). | 148 |
| Figura C.2 Simetría axial respecto a un eje, en todos los semiplanos π , como el de la figura es idéntica. | 148 |
| Figura C.3 Simetría axial de un triángulo. | 149 |
| Figura C.4 Ejes de simetría de un cuadrado. | 149 |
| Figura C.5 Ejemplos de simetría axial. | 150 |
| Figura C.6 a) Ejes de simetría, b) Planos de simetría. | 150 |

III. Tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 2.1 Clasificación respecto a la velocidad de túnel..... | 10 |
| Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de los tipos de túneles de viento (Barlow, et al., 1999). | 13 |
| Tabla 3.1 Variables de campo | 33 |
| Tabla 3.2 Valores de "Skewness" (ANSYS, 2010)..... | 39 |
| Tabla 3.3 Descripción de combinaciones de encendido o apagado de los ventiladores del túnel de viento. | 66 |
| Tabla 3.4 Casos de combinaciones simétricas del comportamiento del flujo en la cámara de pruebas..... | 70 |
| Tabla 4.1 Combinaciones de los interruptores del puente H..... | 82 |
| Tabla 4.2 Parámetros de los modelos de los motores..... | 88 |
| Tabla 4.3 Parámetros para modelo en Simplorer. | 92 |
| Tabla A.1 Flujos..... | 117 |

IV. Lista de abreviaturas y símbolos

| | |
|----------|-----------------------------------------|
| z | Altura |
| A | Área |
| c | Celda |
| C_D | Coefficiente de arrastre |
| C | Coefficiente de descarga del fluido |
| f | Coefficiente de fricción viscosa |
| k | Coefficiente de pérdidas |
| K | Coefficiente de resistencia |
| C_L | Coefficiente de sustentación |
| a_p | Coefficiente del centro de la celda |
| a_{nb} | Coefficiente para celdas vecinas |
| E_v | Compresibilidad |
| k_b | Constante de fuerza contraelectromotriz |
| R | Constante de los gases |
| k_a | Constante del par |
| $i_a(t)$ | Corriente eléctrica de armadura |
| ρ | Densidad |
| D | Diámetro |
| h_A | Energía agregada al fluido |
| E_c | Energía cinemática |
| E_f | Energía del flujo |
| E_p | Energía potencial |
| h_R | Energía removida del fluido |
| f | Factor fricción |
| W | Flujo en peso |
| M | Flujo másico |
| Q | Flujo volumétrico |
| $e_b(t)$ | Fuerza contraelectromotriz |
| F_D | Fuerza de arrastre |
| F_L | Fuerza de sustentación |
| g | Gravedad |

| | |
|-------------|---------------------------------------------------|
| L_a | Inductancia de rotor |
| J | Inercia |
| L | Longitud |
| $[J]$ | Matriz de coeficientes de la función de geometría |
| w | Matriz de pesos |
| N_M | Número de Mach |
| N_R | Número de Reynolds |
| $T(t)$ | Par del motor |
| b | Parte constante del término fuente |
| h_L | Pérdidas por fricción |
| PM | Perímetro mojado |
| γ | Peso específico |
| $\theta(t)$ | Posición angular |
| p | Presión |
| r | Radio |
| R_h | Radio hidráulico |
| r_o | Radio máximo |
| R^ϕ | Residual sin escala |
| R_a | Resistencia de armadura |
| T | Temperatura |
| ϕ | Valor centroide de la celda |
| $\omega(t)$ | Velocidad angular |
| U | Velocidad local |
| v | Velocidad promedio del flujo |
| n | Viscosidad |
| μ | Viscosidad cinemática |
| $V_a(t)$ | Voltaje de armadura |
| V | Volumen |

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Definición del problema

Actualmente los recursos naturales como el petróleo, el carbón y el gas natural, son utilizados como fuentes de energía primaria, los cuales son susceptibles de agotamiento aunado al deterioro del medio ambiente. Debido a esto, en las últimas décadas se han desarrollado trabajos importantes en el campo de las energías renovables las cuales son más seguras y menos contaminantes, tal es el caso de las tres fuentes renovables de energía de mayor impacto, penetración y desarrollo: la energía eólica, la energía fotovoltaica y la energía mareomotriz (Douglas & M., 2011), (Goldenberg, 2006).

Las fuentes alternas de energía son fuentes inagotables; sin embargo aún presentan dificultades de almacenamiento y de eficiencia, debido a que la mayoría de las instalaciones generan poca potencia y el costo de producción es elevado, en relación al costo de la generación tradicional. Adicionalmente, la energía eólica es una de las que ha tenido un repunte considerable en cuanto a penetración y desarrollo tecnológico, por tal motivo se ve como la fuente alterna de energía más prometedora (GWEC, 2013).

Por otra parte, es necesario continuar con las investigaciones dentro del desarrollo de tecnología aplicada en las fuentes de energía alterna, en especial la energía eólica, debido a la fácil penetración que tiene en el mercado. Nuevas tecnologías están siendo desarrolladas, tal es el caso del diseño de turbinas eólicas flotantes (Altaeros, 2014) o de levitación magnética (Nagarkar & J., 2013). Es importante resaltar que además de la innovación en el diseño de los aerogeneradores, una parte fundamental es el control que estos requieren, debido a que sin este sistema el aerogenerador podría sufrir daños considerables. En (Ackermann, 2005) pueden ser encontradas las características clásicas de los aerogeneradores y en

(Garduño, et al., 2012) pueden ser consultadas las características generales del control de los aerogeneradores convencionales.

Por lo anterior, el rendimiento de las nuevas tecnologías y los diseños de turbinas eólicas para uso doméstico, hace necesario contar con las herramientas adecuadas para realizar las adaptaciones o modificaciones (experimentaciones) pertinentes antes de poder comercializar un producto. Para efectuar estas pruebas es necesario contar con un banco de pruebas que permita observar el rendimiento y el comportamiento de los prototipos, así como también de las leyes de control necesarias para su correcto funcionamiento. El contar con un banco de pruebas, permite observar también el estrés al que está sometida la estructura de la turbina eólica y hacer un análisis de vibraciones. Las turbulencias, son un efecto natural al cual se encuentran sometidas todas las turbinas eólicas, haciéndose necesario conocer el impacto que se tiene sobre el sistema ante dichas turbulencias. Entonces, es importante contar con un túnel de viento que permita probar los aerogeneradores para uso doméstico considerando diferentes velocidades, direcciones del viento y generación de turbulencias.

Por tal motivo, en esta tesis se propone el diseño de un túnel de viento por medio del cual se puedan generar turbulencias y controlarlas, con el objetivo de probar los modelos de los aerogeneradores y sus respectivas leyes de control, ante las turbulencias presentes en el viento.

1.2 Objetivo

Diseño de un túnel de viento que permita la generación y control de turbulencias para fines de diseño, análisis y experimentación de turbinas eólicas para uso doméstico.

1.2.1 *Objetivos particulares*

Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Diseñar un túnel de viento.
- Incluir los elementos necesarios en el modelo del túnel de viento para generar las turbulencias.
- Realizar un análisis del modelo propuesto.
- Desarrollar una estrategia que permita controlar las turbulencias generadas en el túnel de viento.

1.3 Justificación

En los túneles de viento que existen comercialmente se obtiene el flujo de aire o viento rectilíneo uniforme a una velocidad determinada en la cámara de pruebas. En la cámara de pruebas del túnel de viento se sitúan objetos reales o maquetas de los mismos, para observar el efecto real que el viento ejerce sobre ellos, de manera que puedan evaluarse o diseñarse soluciones que puedan ser necesarias en el objeto de prueba. Por lo tanto, un túnel de viento es adecuado para ensayos aeronáuticos, en ingeniería civil, en diseños arquitectónicos, en el diseño de turbinas eólicas, en entrenamiento deportivo, etc. (ITER, 2011).

En esta tesis se diseña un túnel de viento que presenta características específicas enfocadas al diseño de las turbinas eólicas para uso doméstico. Para el tipo de túnel de viento que se propone, no se tiene referencia de algún producto comercial o de trabajo teórico realizado previamente, el cual presente dichas características.

Además, se obtiene con el desarrollo de la presente tesis un antecedente importante en el modelado de dicho túnel de viento, con el fin de poner en práctica los conceptos derivados de esta investigación y obtener un beneficio con la construcción de un banco de pruebas (túnel de viento) “ad hoc” para el diseño y pruebas del impacto de las turbulencias en la generación de energía eléctrica por medio de turbinas eólicas para ser utilizadas en zonas urbanas.

1.4 Antecedentes

Un túnel de viento es una herramienta usada en la investigación del impacto que tiene el viento sobre objetos sólidos como aviones, misiles, automóviles, edificios, puentes, etc. El primer túnel de viento, conocido como "tubo aerodinámico" fue diseñado y construido por Tsiolkovsky en 1897 (Barlow, et al., 1999).

Osborne Reynolds, en pruebas demostraba que el patrón del flujo de aire sobre un modelo a escala sería el mismo para el modelo real si cierto parámetro del flujo fuera el mismo en ambos casos. Este factor, ahora conocido como el Número de Reynolds, es un parámetro básico en la descripción de todas las situaciones fluido-flujo, incluyendo las formas de los patrones del flujo, la facilidad de transmisión del

calor, y la presencia de la turbulencia. Esto comprende la justificación científica central para el uso de modelos en los túneles aerodinámicos al simular los fenómenos de la vida real (Barlow, et al., 1999).

Los hermanos Wright usaron un túnel aerodinámico simple en 1901, para estudiar los efectos de la corriente de aire al pasar por varias formas mientras desarrollaban su Wright Flyer, que fue la primera máquina voladora con motor, que además registró el primer vuelo sostenido en una aeronave más pesada que el aire.

Los siguientes años, el uso de túneles aerodinámicos fue proliferando con el desarrollo de la ciencia aerodinámica y las disciplinas de ingeniería aeronáutica. Los túneles aerodinámicos estaban a menudo limitados por el volumen y la velocidad del flujo de aire que podría entregarse.

En la Segunda Guerra Mundial, el túnel aerodinámico usado por los alemanes es un ejemplo interesante de las dificultades asociadas con extender el rango útil de un túnel aerodinámico, donde se emplearon cuevas naturales que se aumentaron en tamaño mediante la excavación y entonces fueron selladas para guardar grandes volúmenes de aire que podría ser re-direccionado a través de los túneles. Esta innovación permitió la investigación de los regímenes de alta velocidad y aceleraron la proporción y los esfuerzos de la Ingeniería Aeronáutica de Alemania. El primer túnel de viento supersónico fue construido en Alemania, con una potencia de 100.000 caballos de vapor. Después de la Segunda Guerra Mundial, fue desmantelado y trasladado a Estados Unidos (Cook, 1978).

Hoy en día existen diferentes clasificaciones de túneles de viento de acuerdo a la circulación del aire y por su velocidad de flujo en su interior, tales como túneles de circuito cerrado o circuito abierto, subsónico o hipersónico, con la cámara de pruebas cerrada o abierta, entre otros.

En lo que se refiere a trabajos de investigación recientes se tienen los siguientes: en (Chang & Meroney, 2003) se utiliza la dinámica computacional de fluidos (CFD) para estudiar el efecto del viento que se tiene en una zona de edificios, así como en (Meroney, et al., 1999) se realiza el modelado numérico de flujo y la dispersión sobre varias formas de construcción de un túnel de viento utilizando la herramienta computacional CFD. También en (Ghani, et al., 2001) se utiliza CFD para simular el entorno natural de un vehículo de carretera en un túnel de viento climático (cerrado).

Por otra parte, en (Howell, et al., 2010) se presenta un estudio combinado entre experimental y computacional de la aerodinámica y el rendimiento de una pequeña turbina eólica de eje vertical, donde las pruebas experimentales son realizadas en un túnel de viento con flujo laminar en la cámara de pruebas. En (Sumner, et al., 2010) analizan las turbinas eólicas en un túnel de viento virtual realizado en CFD, sin embargo no modelan las turbulencias.

Adicionalmente, se han desarrollado trabajos específicos de diseños de túneles de viento, como por ejemplo: En (Caro Rincón, et al., 2012) se diseñan componentes y arreglos geométricos del túnel de viento a partir de procedimientos analíticos con base en los requerimientos expuestos en el trabajo, y después comprueban los resultados con el software ANSYS Fluent.

Si bien, todos los trabajos mencionados anteriormente, presentan el diseño y análisis de túneles de viento, todos ellos sólo proporcionan flujo laminar, por lo que la innovación de esta tesis, radica en diseñar un túnel específico que permita la generación de turbulencias, así como el control de las mismas.

1.5 Metodología

En la presente tesis se realiza el diseño de un túnel de viento que permite generar y controlar turbulencias, con el objetivo de analizar el comportamiento de los modelos de turbinas eólicas. La importancia que tiene el empleo del túnel de viento para realizar mediciones y observaciones experimentales de modelos físicos que son difíciles de analizar teóricamente y su utilidad en el campo de la investigación de los modelos de las turbinas eólicas, hacen posible hallar una justificación para la posterior construcción de dicho dispositivo.

Para diseñar el túnel de viento es necesario el análisis de fundamentos teóricos, es decir, conceptos de aerodinámica como por ejemplo: capa límite, fuerzas de sustentación y arrastre, efecto Venturi y principio de Bernoulli, números de Reynolds y Mach, así como también conceptos eléctricos y electrónicos como: efecto piezoeléctrico y piezoresistivo, efectos de Seebeck y Joule.

Para obtener el modelo del túnel de viento, se utilizan los conceptos mencionados anteriormente, en conjunto con algún programa computacional que permita realizar el modelado del mismo. Una vez obtenido su modelo, se analiza su comportamiento y se crean las leyes de control necesarias para controlar la velocidad del viento y así poder generar las turbulencias.

La Figura 1.1 muestra el diagrama de flujo que ejemplifica la metodología utilizada en el desarrollo de esta tesis. El punto de partida es el diseño del túnel de viento, considerando los diferentes elementos necesarios para su diseño. Como segunda etapa se pretende realizar el modelo teórico del sistema, y hacer un análisis del diseño para conocer las características que presenta y considerar las implicaciones físicas necesarias para su implementación o construcción. El siguiente paso consiste en la generación de turbulencias, y posteriormente desarrollar las leyes de control en donde sean incluidas, siendo necesario revisar la ley o leyes de control para su adaptación.

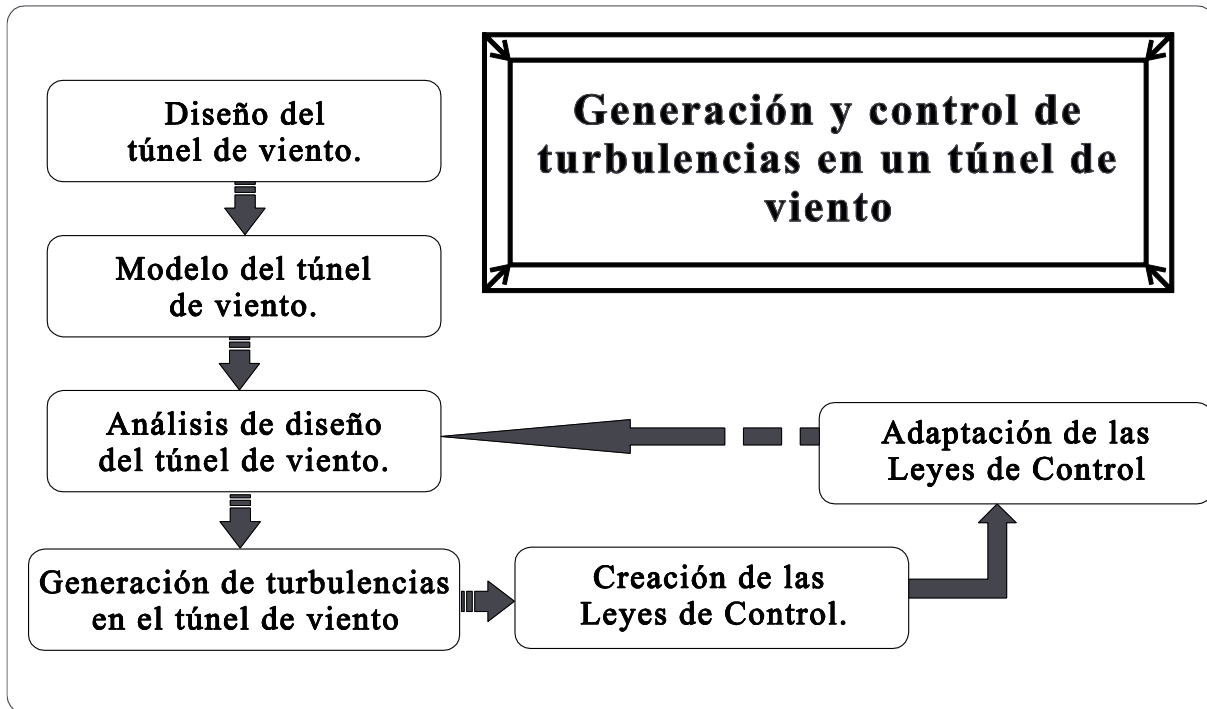


Figura 1.1 Metodología.

1.6 Aportaciones

La obtención del modelo de un túnel de viento con generación y control de turbulencias, permite:

- Tener una herramienta de análisis para estudiar a fondo el rendimiento y el comportamiento de las turbinas eólicas para uso doméstico.
- Analizar el estrés al que está sometida la estructura de dicha turbina.
- Realizar estudios de vibraciones sobre diferentes estructuras.
- Utilizar el concepto de co-simulación para el análisis del flujo y el control en ANSYS Simpler-Fluent.

1.7 Descripción de Capítulos

La presente tesis se ha dividido en cinco Capítulos, donde se señalan los aspectos más sobresalientes para el desarrollo del mismo.

En el Capítulo 2, se presentan los elementos básicos que componen el túnel de viento para su diseño, así como las clasificaciones de los túneles de acuerdo a su velocidad y su estructura física. En éste Capítulo, también se exponen las características para el diseño del túnel de viento y los parámetros iniciales que intervienen en éste con los cuales se calculan el flujo másico y el flujo volumétrico. Adicionalmente, se muestran las dimensiones que tendrá el túnel con base en las necesidades requeridas.

En el Capítulo 3, se expone la generación del viento y de las turbulencias en el túnel de viento. Se realizan las modificaciones necesarias para la generación de las turbulencias en el diseño previamente presentado en el Capítulo 2. Se realiza el análisis del modelo con base al comportamiento del flujo, el cual presenta características simétricas. Se exponen dos casos de estudio.

En el Capítulo 4, se presenta el modelo del motor de corriente directa elegido como sistema a controlar, así como la electrónica de potencia necesaria para su control. También se diseña el control de la generación de las turbulencias, utilizando el concepto de co-simulación (Fluent- Simplorer) para validar la ley y modelo propuesto. Lo anterior se comprueba con los dos casos de estudio presentados en el Capítulo 3.

En el Capítulo 5, se presentan las conclusiones generales de esta tesis y se sugieren trabajos de investigación futuros.

Capítulo 2

2 Túnel de viento

2.1 Introducción

En éste Capítulo se presentan los elementos básicos que componen al túnel de viento como lo son: la cámara de pruebas, el área de contracción, el difusor, la malla correctora de flujo con el fin de diseñar el túnel de acuerdo a las características requeridas. Además, se exponen los fundamentos matemáticos esenciales relacionados con cada uno de los componentes. Es importante mencionar que la teoría de la mecánica de fluidos es una de las bases fundamentales de los conceptos mencionados en éste Capítulo, por tal motivo, en el Apéndice A se pueden encontrar todos los conceptos que dan soporte a los presentado en la presente tesis.

2.2 Componentes de un túnel de viento

Un túnel de viento es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Con esta herramienta se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real. En un túnel de viento, el objeto o modelo, permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire o gas alrededor de él. Se utiliza para estudiar los fenómenos que se manifiestan cuando el viento pasa por objetos como: aviones, turbinas eólicas, misiles, automóviles, edificios o puentes (Barlow, et al., 1999).

En general, el tipo de túnel de viento que se decida construir, depende del espacio y/o elementos disponibles y del propósito en el cual va a ser empleado. Un túnel de viento está formado principalmente por cinco partes principales:

- Admisión
- Área de contracción
- Malla acondicionadora de flujo
- Cámara de pruebas
- Área de difusión

Cada una de las secciones debe ser diseñada de forma especial dado que cada una controla variables tales como presión, velocidad y turbulencia (Aguilar, et al., 2010).

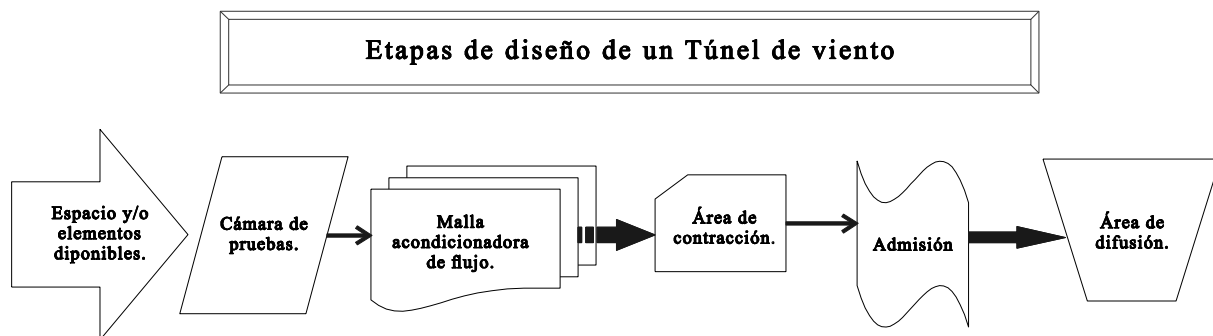


Figura 2.1 Etapas para el diseño de un túnel de viento.

La Figura 2.1 muestra las etapas de un túnel de viento de acuerdo a su importancia en el diseño. La primera etapa se refiere al espacio en donde se va a situar el túnel, debido a que la mayoría suele ser de grandes dimensiones y/o en ocasiones se encuentra limitado el espacio en donde será colocado. Como segunda etapa se encuentra la cámara de pruebas, que depende del tipo de objeto con el que se pretende experimentar, y que también está ligada a la primera etapa, referente al espacio de ubicación del túnel. La siguiente consiste en el diseño de la malla acondicionadora de flujo, donde su importancia recae en proporcionar flujo laminar en la cámara de pruebas. En lo sucesivo se encuentra el área de contracción, que es necesaria para incrementar la velocidad del fluido, para poder decidir cuál es la mejor alimentación de acuerdo a los parámetros de diseño. Finalmente, se encuentra el área de difusión, que para los casos de un túnel de circuito abierto no es tan importante; sin embargo para un túnel de circuito cerrado, el cual se compone de diversos difusores, es necesario un diseño especial para cada uno.

2.3 Clasificación del túnel

Un túnel de viento puede ser clasificado de diferentes formas, tomando en cuenta su presión, tipo de fluido, velocidad en el interior del túnel, la circulación de fluido, si el túnel es de circuito abierto o cerrado, si su cámara de pruebas es abierta o cerrada. Sin embargo, hay dos parámetros importantes que se toman en cuenta cuando se trata de un túnel de viento: la velocidad del túnel y su estructura física. Debido a esto, en las siguientes subsecciones se explican la clasificación de los túneles de viento considerando estos parámetros.

2.3.1 Velocidad del túnel

Esta clasificación de los túneles de viento se realiza con respecto a la velocidad generada en la cámara de pruebas, es decir, la velocidad a la cual es sometido el modelo. Las velocidades están especificadas con respecto al número Mach. El número Mach (N_M), es uno de los parámetros más importantes de los flujos unidimensionales que se presentan en el análisis de flujo compresible, el cual es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido. Considerando la velocidad en relación al tipo de túnel, se pueden encontrar 4 tipos diferentes de túneles de viento: subsónico, transónico, supersónico e hipersónico. La diferencia entre cada uno de los diferentes túneles de viento radica en la velocidad del fluido que circula en cada uno de ellos, y que está relacionada con el número Mach. La Tabla 2.1 resume los cuatro tipos de la clasificación.

Tabla 2.1 Clasificación respecto a la velocidad de túnel.

| Tipo | Velocidad |
|-------------|-------------------|
| Subsónico | $N_M < 0.7$ |
| Transónico | $0.7 < N_M < 1.2$ |
| Supersónico | $1.2 < N_M < 5$ |
| Hipersónico | $N_M > 5$ |

Tomando en cuenta la clasificación mostrada en la Tabla 2.1, el tipo de túnel que se diseña en la presente tesis corresponde a un túnel de tipo subsónico debido a que la velocidad máxima de diseño en la cámara de pruebas es 20 m/s y es menor a la velocidad del sonido. Así para cualquier velocidad de flujo menor a la del sonido, tendremos un flujo subsónico (Fox & McDonald, 2006).

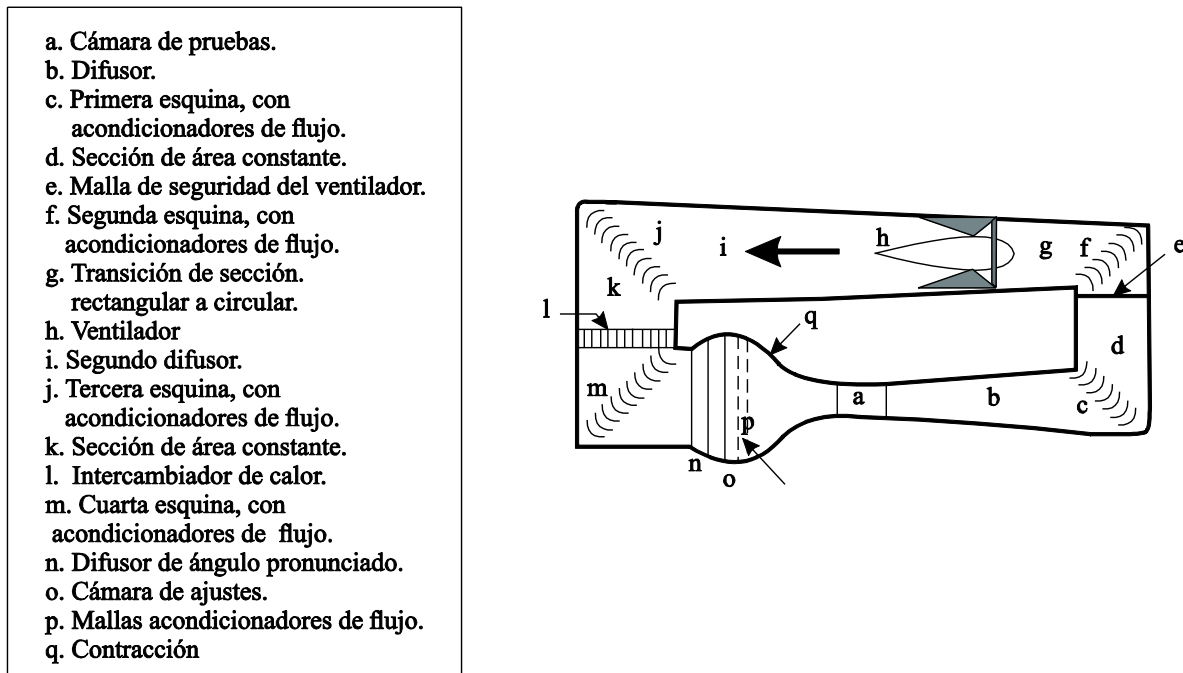
2.3.2 Estructura física

Para la clasificación considerando la estructura física del túnel, se tiene dos tipos principales:

- Túnel de circuito cerrado.
- Túnel de circuito abierto.

2.3.2.1 Túnel de circuito cerrado

Como su nombre lo indica, el túnel se encuentra cerrado, es decir que la entrada o generación del viento se encuentra unida con su salida, tal y como se muestra en la Figura 2.2. Para éste tipo de túneles de viento, en la cámara de pruebas, se genera una corriente de aire de velocidad controlada (Figura 2.2 punto a), el sistema de propulsión (ventilador), se encarga de hacer circular el aire. Consta así mismo de difusores (Figura 2.2 puntos b, i, n) cuya función es uniformizar la corriente de aire. La contracción disminuye la Sección de forma suave hasta la cámara de pruebas, acelerando la corriente hasta la velocidad que ha de tener en ella, y cumpliendo funciones importantes desde el punto de vista de la calidad de la corriente, como son el disminuir el nivel de turbulencia y el mejorar la uniformidad del perfil de velocidades en la cámara de pruebas y la dirección de la corriente. Al ser un túnel de circuito cerrado, es necesario forzar a la corriente a realizar giros, pero de manera ordenada, sin elevar más allá de lo razonable la pérdida de carga ni introducir perturbaciones en la corriente, lo anterior se puede ver reflejado en la Figura 2.2 en los puntos c, f, j m que representan los codos o esquinas del túnel. Algunos otros componentes necesarios para el funcionamiento del túnel pueden ser observados en la Figura 2.2 (Barlow, et al., 1999).



Tomando en cuenta la clasificación de ambos tipos de túneles, en la Tabla 2.2 se resumen las principales características de estas configuraciones de túneles de viento que consideran su estructura física.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de los tipos de túneles de viento (Barlow, et al., 1999).

| Configuración de túnel | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circuito cerrado | <ul style="list-style-type: none"> • Mayor control de la calidad del flujo en el interior del circuito. • Menor consumo de energía debido al continuo recircular del flujo por su interior. • Menor contaminación acústica. | <ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo inicial, debido fundamentalmente a la mayor necesidad de infraestructura. • Complejidad de diseño para posibilitar la utilización de técnicas de visualización determinadas (mediante humo, pintura, etc.) o la operación de motores de combustión interna. • Necesidad de dispositivos de refrigeración o intercambiadores de calor para instalaciones con tasas de operación elevadas. • Cámara de pruebas muy pequeña en comparación de toda la infraestructura. |
| Circuito abierto | <ul style="list-style-type: none"> • Menor costo de construcción. • Utilizar motores de combustión interna o introducir humo para visualizar el flujo, no hay problema porque tanto de entrada y de salida están abiertas a la atmósfera. | <ul style="list-style-type: none"> • Factores externos como el viento o bajas temperaturas pueden afectar su funcionamiento. • Mayor consumo de energía para tasas de operación elevadas. • Tienden a ser ruidosas, por lo que su contaminación acústica es mayor. |

Un túnel de circuito abierto es a menudo ideal para escuelas y universidades donde se requiere de un túnel de viento para la investigación, además la cantidad y la frecuencia de operación no son necesarias.

Después de analizar las ventajas y desventajas de las dos configuraciones de los túneles de viento, en la presente tesis el modelo que se empleará para la construcción del túnel de viento será el de circuito abierto.

2.3.3 Principales componentes del túnel de viento

Como se mencionó anteriormente, un túnel de viento está formado por cinco partes principalmente:

- Admisión
- Malla acondicionadora de flujo
- Área de contracción
- Cámara de pruebas
- Área de difusión

A continuación se explican cada una de estas partes o etapas.

2.3.3.1 Admisión

La zona de admisión es la entrada al conducto principal del túnel y es por donde se suministra el aire al túnel. El suministro del aire se realiza por medio de un motor acoplado a unas hélices radiales (ventilador). El flujo de las hélices presenta turbulencias lo cual no es adecuado para un análisis de estabilidad en el modelo, si el objetivo es observar la distribución de fuerzas semejantes en diferentes puntos del modelo.

2.3.3.2 Malla acondicionadora de flujo

También llamada comúnmente “panal de abeja”, es el dispositivo esencial en el diseño de un túnel de viento, que permite crear un flujo laminar dentro de la cámara de pruebas del túnel. El fluido circula a través de los diferentes elementos de la malla adoptando una disposición de filamentos paralelos a su paso, asimismo, permite que el flujo entrante pueda pasar a la zona de contracción como un flujo uniforme y de poca turbulencia.

No existe un método de diseño exacto, sin embargo existen varios diseños “base” de la estructura del panal como se muestra en la Figura 2.4 (Barlow, et al., 1999), donde se presentan diferentes coeficientes de pérdidas (k), éste afecta directamente a la velocidad y presión del viento; por lo que a menor coeficiente de pérdidas, menor es la pérdida de velocidad o presión del viento en la cámara de pruebas.

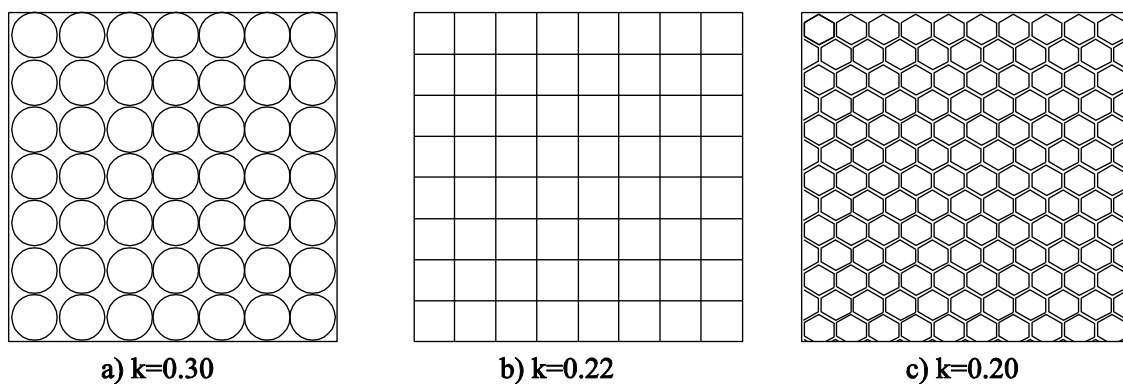


Figura 2.4 Coeficientes de pérdidas (k) para diferentes geometrías de la malla acondicionadora.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4a, se tiene una estructura de cada una de las celdas distribuidas en forma circular con un $k = 0.3$, lo que representa que si se elige esta configuración se tendrá una mayor pérdida de flujo. Por otra parte, la Figura 2.4b muestra una distribución de las celdas en forma cuadrada, obteniéndose una disminución del valor de k , lo que representa que habrá menor pérdida de flujo. Finalmente, la Figura 2.4c muestra una estructura hexagonal de las celdas, representando la mejor opción en cuanto a configuración debido a que presenta el menor coeficiente de pérdidas de flujo (k).

Además de las forma de las celdas en la estructura de la malla, es importante considerar el número de celdas en esta. Esto debido a que si no se tiene un número adecuado de celdas puede no cumplir con el objetivo de crear un flujo espaciado, relativamente uniforme y estable en la cámara de pruebas. Algunos estudios sugieren un total de 25,000 celdas necesarias en el acondicionador de flujo (Barlow, et al., 1999), sin embargo, esto solo puede lograrse en túneles de viento de grandes dimensiones.

2.3.3.3 Área de contracción

Es una zona donde ocurre la disminución del área de paso del túnel y su función es acelerar el flujo y disminuir las variaciones de velocidad. En esta zona, el fluido se acelera hasta alcanzar la velocidad de diseño en la zona de prueba (González, et al., 2014).

Existen diferentes formas de contracción como se ilustran en el Apéndice A.6.2 (ver Figura A.7), siendo la contracción gradual con un extremo redondeado, la que tiene menor coeficiente de resistencia como se muestra en la Figura 2.5.

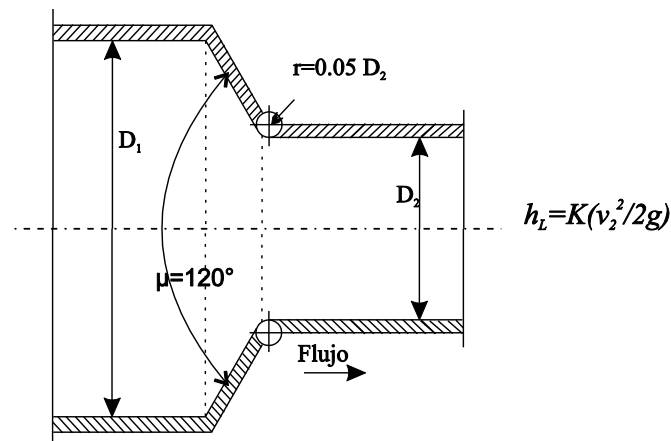


Figura 2.5 Contracción gradual con extremo redondeado en D_2 .

2.3.3.4 Cámara de pruebas

En la construcción de un túnel de viento, el componente más importante es la cámara de pruebas, siendo esta donde se realizan los ensayos. En la cámara de pruebas se instala el modelo a estudiar, además de los sensores necesarios para obtener las mediciones adecuadas.

Los parámetros de diseño se definen a partir de requisitos operativos, principalmente accesibilidad para la manipulación del modelo y los diferentes instrumentos de medida necesarios para el ensayo, así como la correcta caracterización del flujo para reproducir el entorno deseado. A causa de ello, por ejemplo, está el hecho de que muchas cámaras de ensayo presenten secciones de geometría rectangular, puesto que facilitan la operación, o que su superficie interna no debe presentar rugosidad significativa, para que las variaciones de velocidad y presión dinámica del flujo no superen el 25% y 50% de sus valores medios, respectivamente (Aguilar, et al., 2010).

La cámara de pruebas según su diseño se puede clasificar en:

- Cámara de pruebas cerrada.- Es una continuación de la Sección de salida de la zona de contracción, limitada por paredes donde habitualmente es una zona de Sección constante. Las paredes del túnel deben estar bastante alejadas del modelo para tener un perfil de flujo bastante similar al real, entonces si el cociente entre el área frontal del modelo y el área de la Sección de ensayos es mayor que 0.38, el modelo es un obstáculo al paso del aire. A mayores velocidades del flujo entre el modelo y las paredes, cambian los valores reales de los estimados de los coeficientes de sustentación y arrastre.

Por lo anterior, es deseable que el área de la cámara de pruebas sea lo mayor posible, pero a mayor área, el costo de la construcción y la potencia necesaria en el ventilador aumentan considerablemente. Todo esto hace que el tamaño del modelo sea condicionado por el tamaño de la cámara de pruebas disponible y por el límite del cociente de las áreas frontales del modelo y la cámara de pruebas. El bloqueo del flujo ocurre durante las pruebas con modelos relativamente grandes en la Sección de túneles de tamaño limitado. Este bloqueo se define como el radio de la Sección frontal del modelo al área de la Sección de prueba (González, et al., 2014).

- Cámara de pruebas abierta.- No está limitada por paredes es decir, el aire del interior del túnel se mezcla con el exterior, disminuyendo casi totalmente el problema de errores introducidos debido a la proximidad de las paredes al modelo y su interferencia con el flujo (capa límite).

Los modelos se colocan en la cámara de pruebas, donde llega la circulación de aire a la velocidad deseada. También se ubican los sensores que miden temperatura, velocidades, presión y fuerzas, tales como elevación y fricción, en el modelo. La elevación es la fuerza en el modelo de la gravedad. La fricción es la fuerza en el modelo en la dirección de la circulación de aire.

2.3.3.5 Área de difusión

Tiene la función principal de disminuir la velocidad de salida del flujo, gracias a un incremento del área de paso. Con esto, se aumenta paulatinamente la presión y se disminuye la velocidad del flujo, lo cual hace disminuir las pérdidas por fricción (González, et al., 2014).

2.4 Diseño del túnel de viento

En esta Sección se presentan los cálculos matemáticos para realizar el diseño del túnel de viento.

2.4.1 *Parámetros de diseño*

Considerando la construcción física de un banco de pruebas (túnel de viento) para estudiar los efectos del flujo de aire sobre aerogeneradores de pequeña a mediana escala para uso doméstico, es necesario tener en cuenta, el tamaño de los aerogeneradores escalados (para que no sea un obstáculo al paso del viento), las restricciones de espacio existentes en el laboratorio, los costos, así como los aspectos técnicos con los que cuente el sistema. Para el diseño del túnel se consideran las siguientes características:

- Túnel de viento subsónico de circuito abierto con aspiración de aire.
- Flujo laminar en la cámara de pruebas (inicialmente), con la expectativa de la incorporación de la generación de turbulencias.
- Longitud total máxima del túnel no mayor a 2.5m.
- Ductos de fibra de vidrio.

- Velocidad máxima en la cámara de pruebas de 20 m/s .
- Cámara de pruebas de vidrio.
- Área del modelo del aerogenerador a escala no mayor a 0.24m^2 .
- Área transversal de la cámara de pruebas es de $0.80\text{m} \times 0.80\text{m}$ (menos 0.10 m del panel que se coloca en la entrada a la cámara de pruebas).

Para continuar con el diseño y la selección de componentes es importante mencionar los parámetros iniciales que intervienen directamente con el diseño:

- Temperatura promedio del aire, $20^\circ\text{C} = 293\text{K}$.
- Altitud promedio de la ciudad de Morelia, Michoacán, 1913msnm .
- Presión atmosférica promedio en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo:

$$p = 758.449194\text{mmHg} = 101118.249\text{Pa} = 101118.249 \text{ N/m}^2$$

En función de estos parámetros y de los fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos (explicados en el Apéndice A), a continuación se presenta el cálculo del flujo másico y caudal de aire para túnel de viento, el flujo másico representa la masa del aire que circula en el túnel de viento por unidad de tiempo y el caudal de aire corresponde al volumen de aire que circula por el túnel de viento por unidad de tiempo.

2.4.2 Cálculo del flujo másico y el caudal de aire requerido

Para calcular el flujo másico es necesario obtener la densidad (ρ) que tiene el ambiente en la ciudad de Morelia, Michoacán a partir de la siguiente Ecuación (Mott, 2006):

$$\rho = \frac{p}{R*T} \tag{2.1}$$

dónde,

ρ = Densidad del aire.

$p = \text{Presión atmosférica} = 101118.249 \text{ N/m}^2$

$R = \text{Constante de los gases (aire)} = 287 \frac{\text{N.m}}{\text{Kg.}^\circ\text{K}}$ (Mohr & Taylor, 2000)

$T = \text{Temperatura ambiente} = 20^\circ\text{C} = 293^\circ\text{K}$

Así,

$$\rho = \frac{101118.249 \text{ N/m}^2}{\left(287 \frac{\text{N.m}}{\text{Kg.}^\circ\text{K}}\right)(293^\circ\text{K})} = 1.20248 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (2.2)$$

En seguida, con la velocidad máxima y el área de la Sección transversal en la cámara de pruebas se procede a calcular el flujo másico (M) de aire máximo requerido en el túnel de viento (Mott, 2006):

$$M = \rho Q = \rho A v = \left(1.20248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.56 \text{ m}^2) \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 13.4678 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.3)$$

Este flujo másico será constante en las diferentes secciones del túnel de viento. Finalmente, a partir del flujo másico se obtiene el caudal (Q) de aire máximo que debe entregar el ventilador (Mott, 2006).

$$Q = \frac{M}{\rho} = \frac{13.4678 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.20248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 11.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (2.4)$$

Los resultados del flujo másico y volumétrico se obtuvieron con las ecuaciones de la Tabla A.1 del Apéndice A.

2.4.3 Elementos del túnel de viento

El túnel de viento una vez construido será utilizado como un banco de pruebas para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos (aerogeneradores). Por consiguiente, para que proporcione datos confiables y funcione de forma adecuada, para su diseño se toman en cuenta las dimensiones y el modelo representado en la Figura 2.6.

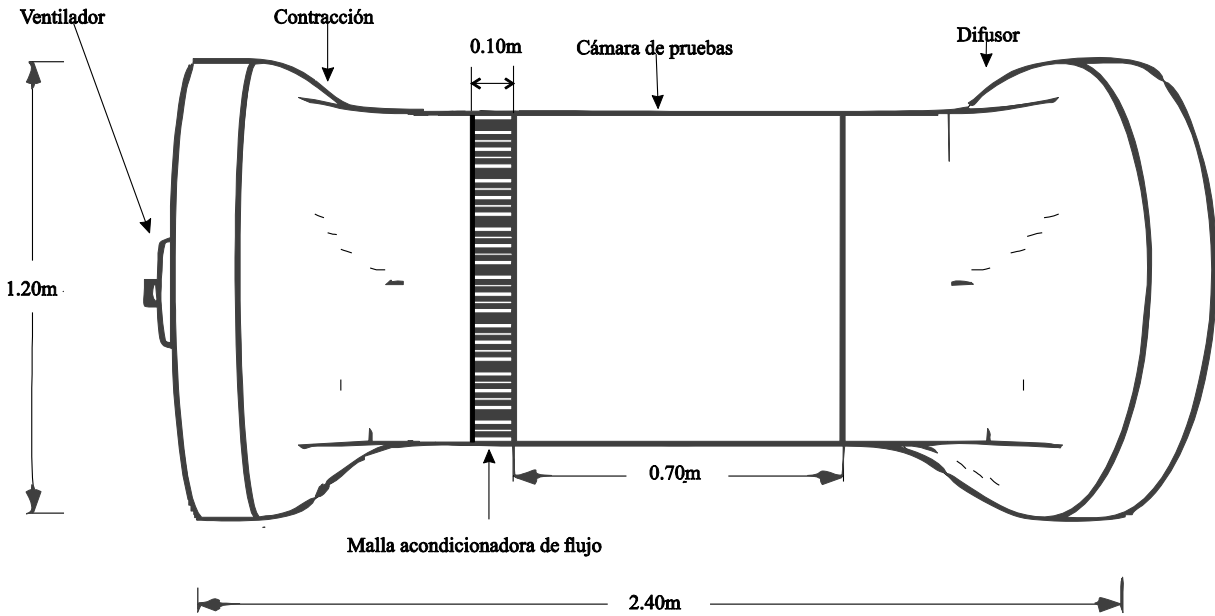


Figura 2.6 Modelo del túnel de viento.

El ventilador de entrada tiene un diámetro de $0.74m$. Los cálculos de las dimensiones de cada uno de los componentes son presentados a continuación.

Nota: Es importante mencionar que para algunos de los cálculos se hace referencia a ecuaciones o secciones del Apéndice A, debido a que son calculados realizados en base a la mecánica de fluidos.

2.4.3.1 Cámara de pruebas

El diseño del túnel de viento se realiza para aerogeneradores de uso doméstico de pequeña a mediana escala, por lo que la cámara de pruebas se elige rectangular de dimensiones $0.80m \times 0.80m$ (ver Figura 2.7a) para que al introducir el modelo a escala del aerogenerador, éste no sea un obstáculo al paso del viento. Además, la cámara de pruebas rectangular es la más empleada en diseños de túneles de viento por su facilidad de fabricación, tiene fácil acceso para colocar y quitar el modelo, bajo costo de producción y bajo coeficiente de pérdidas (Barlow, et al., 1999).

En esta cámara se pretende que el flujo de aire sea laminar y de velocidad constante, para lograr que el flujo sea laminar se instala en uno de sus extremos el panel. En la cámara de pruebas es donde se instala el modelo, se colocan los diversos sensores y se visualizan los cambios en el flujo del aire. Por estos motivos, el material que se selecciona para su posible fabricación es vidrio transparente. Asimismo, es dimensionada para evitar el desprendimiento de la capa límite.

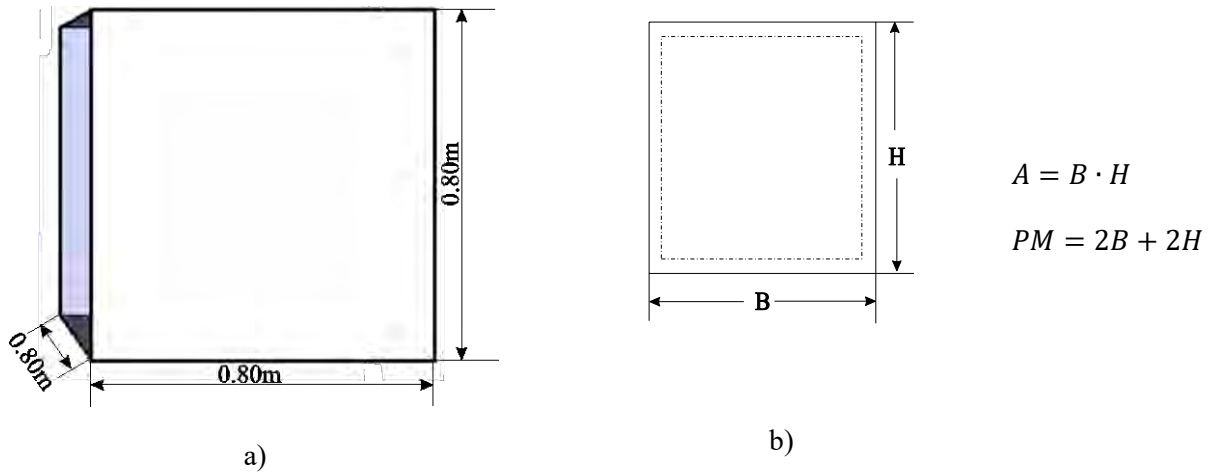


Figura 2.7 Cámara de pruebas. a) Diseño de cámara de pruebas, b) Cálculo de radio hidráulico.

Un parámetro importante a tener en cuenta al momento de diseñar la cámara de pruebas, es el que corresponde al radio hidráulico (ver Sección A.7.4). Así, el radio hidráulico (R_h) de acuerdo a la Figura 2.7b, se calcula considerando que a la base (B) se le restan 0.10 m, debido a que es colocada la malla correctora de flujo en la entrada de la cámara de pruebas. De esta manera, el área (A), el perímetro mojado (PM) y el radio hidráulico son calculados como se muestra en las siguientes expresiones (Mott, 2006).

$$A = B \cdot H = (0.8m - 0.10m)(0.8m) = 0.56m^2 \quad (2.5)$$

$$PM = 2B + 2H = 2(0.8m - 0.10m) + 2 * (0.8m) = 3m \quad (2.6)$$

$$R_h = \frac{A}{PM} = \frac{0.56m^2}{3.2m} = 0.1866m \quad (2.7)$$

El radio hidráulico es un parámetro necesario para obtener el número de Reynolds, el cual indica la dimensión característica para secciones transversales no circulares, el perímetro mojado es la suma de la longitud de las fronteras sólidas de la Sección que entra en contacto con el fluido para este caso el aire. Determinando el número de Reynolds con la Ecuación (A.21), (Mott, 2006):

$$N_R = \frac{v(4R_h)\rho}{n} = \frac{(20\frac{m}{s})(4*0.1866m)(1.20248\frac{kg}{m^3})}{1.8x10^{-5}\frac{kg}{m}\cdot s} = 997,256.75 \quad (2.8)$$

Como el número de Reynolds es mayor a 100,000 se utiliza para el cálculo del factor de fricción la Ecuación iterativa (A.22), la cual indica que el factor de fricción (f) es calculado como (Mott, 2006),

$$f = [2\text{Log}_{10}(N_R\sqrt{f}) - 0.8]^{-2} \quad (2.9)$$

Usando (2.9), y después de 10 iteraciones el error es $8.572987886000093 e - 06$, por lo que el factor de fricción no cambia significativamente y su valor se toma como $f = 0.0011786241167$.

El número de Reynolds permite realizar el cálculo de las pérdidas por fricción que se tendrán en la cámara de pruebas. Para lo anterior se utiliza la Ecuación (A.24) para el cálculo; así, las pérdidas por fricción (h_L) en la cámara de pruebas y que está dada por (Mott, 2006),

$$h_L = f \frac{L}{4R_h} \frac{v^2}{2g} = (0.00117862411) \left(\frac{0.7m}{4*0.1866m} \right) \frac{(20m/s)^2}{2*9.81m/s^2} = 0.022535267m \quad (2.10)$$

Como el valor de pérdidas es de $0.022535267m$, esto indica que la velocidad del viento disminuye en un 2.25% en su recorrido por la cámara de pruebas.

2.4.3.2 Área de Contracción

Como se mencionó anteriormente, esta etapa tiene dos funciones básicas: incrementar la velocidad del aire y reducir la variación de velocidad.

Para incrementar la velocidad del aire se utiliza el efecto Venturi que dice: *Si el caudal de un fluido es constante pero la Sección disminuye, la velocidad aumenta, asimismo, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye* (Streeter, 1992).

Los diferentes tipos de diseños del área de contracción son presentados a detalle en el Apéndice A. En específico, el diseño del cono de contracción considerado para el túnel es gradual con extremo redondeado en D_2 como se muestra en la Figura A.7e del Apéndice A. La pérdida de energía puede disminuir significativamente en una contracción gradual. La Figura 2.8 muestra las dimensiones y características seleccionadas para la etapa de contracción del túnel.

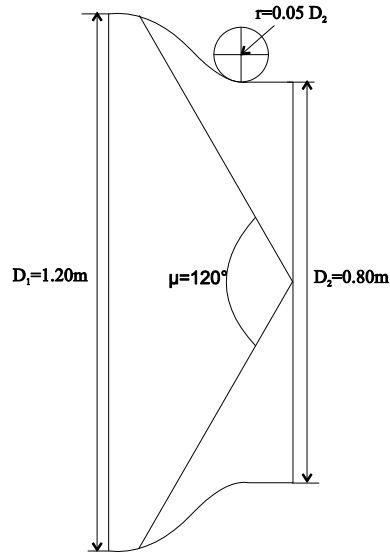


Figura 2.8 Contracción del túnel construido.

Para calcular la pérdida de energía por fricción, primero se obtiene la relación de los diámetros D_1 y D_2 , de la siguiente manera:

$$D_1 / D_2 = 1.20m / 0.80m = 1.5 \quad (2.11)$$

Enseguida, se calcula el coeficiente de resistencia (K) con base en las Figura B.1 y Figura B.2 (Apéndice B). El área de contracción diseñada tiene el extremo de la transición cónica redondeada, entonces el coeficiente de resistencia es $K = 0.075$ (Figura B.2) y la pérdida de energía por fricción o pérdidas menores se obtienen con la Ecuación (A.12), la cual indica que las pérdidas por fricción son:

$$h_L = K \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0.075 \frac{\left(\frac{20 \frac{m}{s}}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{2} = 1.529 m \quad (2.12)$$

Los resultados anteriores son interpretados de la siguiente manera: Lo que ocasiona la pérdida de energía es la turbulencia que induce la expansión y contracción subsecuente, por lo que el resultado indica que se pierde una energía de un Newton de viento por cada 1.529 m, que se disipa en forma de turbulencia.

2.4.3.3 Malla acondicionadora de flujo

Como ya se había mencionado anteriormente, su objetivo es proporcionar un flujo espaciado, relativamente uniforme y estable de aire en la cámara de pruebas del túnel de viento. En la Figura 2.4 se muestran los coeficientes de pérdida en la malla acondicionadora, se selecciona la malla con geometría hexagonal debido a que se tiene la menor pérdida.

A continuación se observa en la Figura 2.9 el diseño y las medidas que tiene cada una de las celdas que conforman la malla.

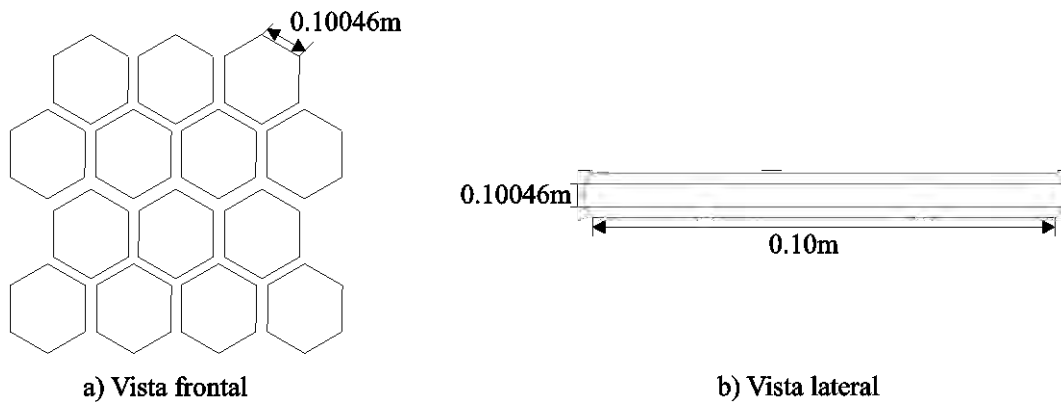


Figura 2.9 Malla, a) Vista frontal, b) Vista lateral de una celda.

En la Figura 2.10, se muestra la malla acondicionadora de flujo con las medidas utilizadas en la construcción del túnel.

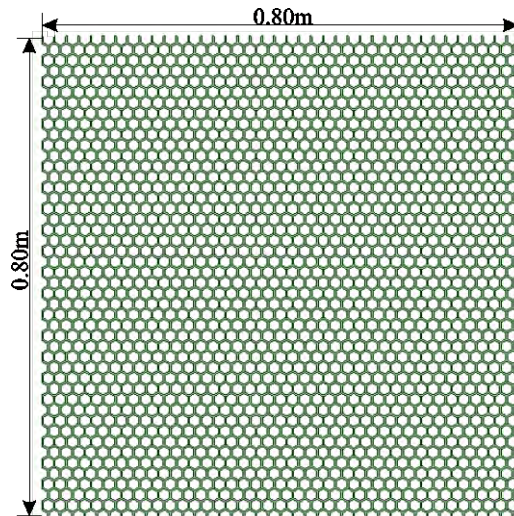


Figura 2.10 Arreglo de celdas para la malla acondicionadora de flujo.

2.4.3.4 Difusor

En el área de difusión no se presentan dificultades, por lo que se elige la misma forma del área de contracción, para mantener simetría en el túnel de viento.

2.5 Conclusiones

En el presente Capítulo se presentaron las diferentes clasificaciones de túneles de viento. Se elige diseñar y construir un túnel de viento subsónico debido a que la velocidad máxima considerada en la cámara de pruebas es de 20 m/s . Además, el túnel diseñado es de circuito abierto con la cámara de pruebas cerrada, dado que tiene menor costo de construcción, es más sencillo introducir alguna clase de humo para visualizar el flujo, y no es de uso continuo ya que el túnel se requiere para investigación.

También se presentaron los diferentes componentes que conforman al túnel de viento. Se mostró como la cámara de pruebas es el componente de mayor importancia debido a que es donde se realizarán los ensayos de los modelos a escala, para este caso, el de los aerogeneradores para uso doméstico que pueden ser diseñados con la ayuda de este túnel. Estos modelos a escala no deben ser mayores a 0.064m^2 de área frontal, debido a que, si sobrepasan esta área serán un obstáculo al paso del viento y no se reproducirán los fenómenos naturales.

Para el túnel de viento se elige una malla correctora de flujo con geometría hexagonal, puesto que es la que tiene el menor coeficiente de pérdidas (k), es decir, con la que se tiene una menor pérdida de velocidad en la cámara de pruebas.

Los diferentes cálculos matemáticos presentados en éste Capítulo son necesarios para la justificación de cada uno de los elementos diseñados.

Capítulo 3

3 Generación de viento y turbulencias

3.1 Introducción

En el presente Capítulo se aborda la propuesta para la generación de las turbulencias, así como, la simulación del túnel de viento, la cual permite trabajar en condiciones similares a las reales, pero con variables controladas como la velocidad de entrada del fluido (para este caso aire). El objetivo de esta simulación es probar el comportamiento del túnel y clasificar las turbulencias generadas.

3.2 Propuesta de generación de turbulencia

Existen dos tipos de turbulencias: mecánicas y convectivas. Las primeras se producen por el paso del aire sobre obstáculos (edificios, colinas, árboles, etc.) o por diferencia en las velocidades del viento, y las convectivas se generan al transportar calor por medio del movimiento de un fluido. En la Sección A.7.2.1 del Apéndice A, se presenta una explicación más completa de estos dos tipos de turbulencias. Así, se puede decir que las turbulencias dependen de varios factores tales como la velocidad del viento, la rugosidad de la superficie, el gradiente de la temperatura (variación de la temperatura por unidad de distancia).

Con el objetivo de hacer inestable la capa de cortadura, el tipo de turbulencia que se propone generar corresponde a la turbulencia de tipo mecánica.

La capa de cortadura es una región muy delgada, con grandes gradientes de velocidad. Las velocidades en ambos lados de la superficie de separación son diferentes, dando lugar a una delgada región donde la velocidad cambia rápidamente. Estas capas de cortadura pueden ser idealizadas como superficies de discontinuidad en la velocidad (Meseguer, et al., Julio-Agosto 2008).

La Figura 3.1 muestra la capa de cortadura formada entre dos velocidades de diferente magnitud que siguen la misma dirección (Figura 3.1a) y también la desarrollada entre dos velocidades de la misma intensidad, pero con sentidos opuestos (Figura 3.1b).

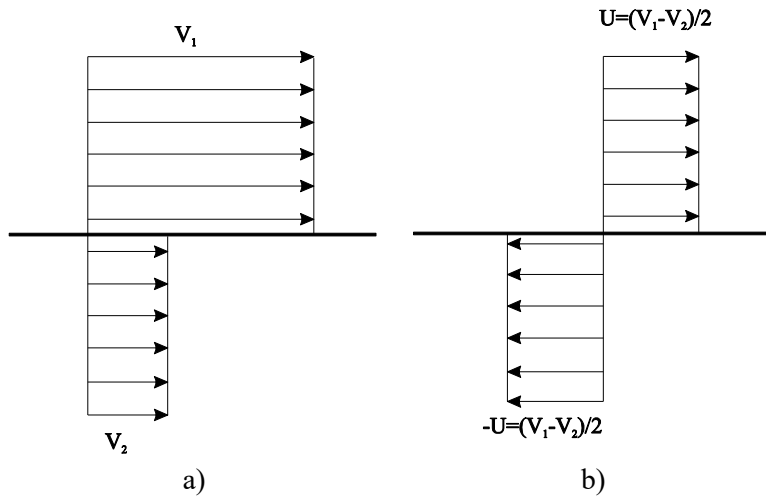


Figura 3.1 Capa de cortadura.

Para explicar el concepto de la capa de cortadura mostrada en la Figura 3.2, se supone una superficie de discontinuidad donde las velocidades sobre ambos lados de la discontinuidad son iguales y opuestas. Al introducir una pequeña perturbación, la cual genera una ligera ondulación como se ilustra en la Figura 3.2, aumentará sutilmente la velocidad del fluido sobre las partes convexas de la superficie (A, B', C, D') y disminuirá levemente sobre las cóncavas (A', B, C', D) (Meseguer, et al., Julio-Agosto 2008).

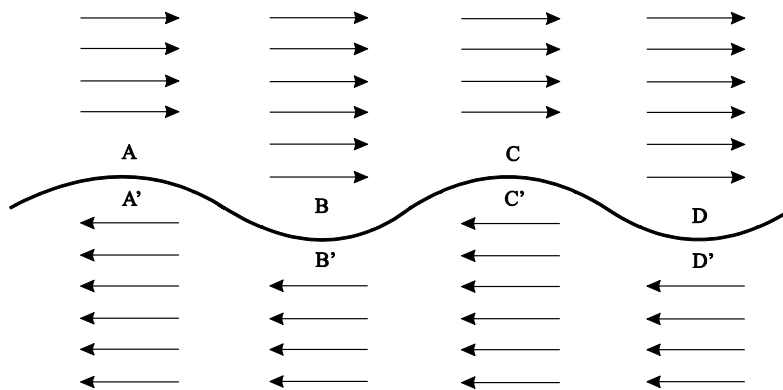


Figura 3.2 Ligera perturbación.

Al considerar el flujo estacionario, y al aplicar las ecuaciones de Bernoulli, se tiene que una fuerza neta de presión actúa amplificando las perturbaciones, así que la capa de cortadura es inestable y tiende a enrollarse. La onda se empieza a distorsionar más y más con el tiempo, convirtiéndose finalmente en vórtices.

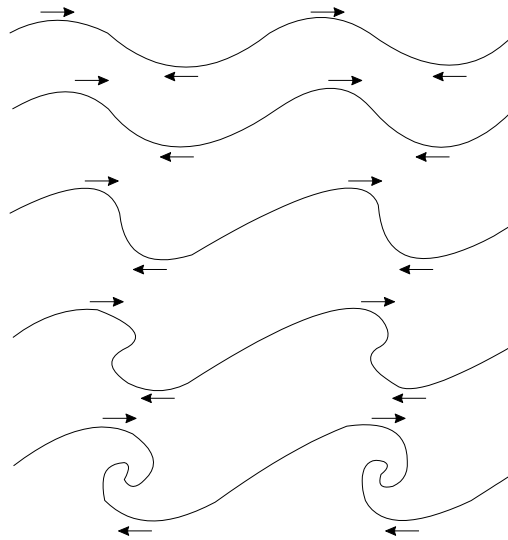


Figura 3.3 Cambio a inestabilidad en la capa de cortadura.

A números de Reynolds grandes surge la formación de torbellinos, siempre y cuando los efectos de la viscosidad sean despreciables. Para el caso de números de Reynolds bajos, la viscosidad influye y tiende a disipar o estabilizar la discontinuidad. En la Figura 3.3 se observan una zona de inicio de la inestabilidad con otra de torbellinos claramente definidos y otra de turbulencia completamente desarrollada.

Debido a que una turbulencia de tipo mecánica puede ser formada por medio de la aparición de una capa de cortadura, ya sea con flujos de diferente magnitud o diferente dirección, la propuesta para generar turbulencia dentro de la cámara de pruebas se realiza con la adición de seis secciones de entrada de aire con un diámetro cada una de $0.168m$, tres en la parte superior y tres más en la parte inferior, como se muestra en la Figura 3.4.

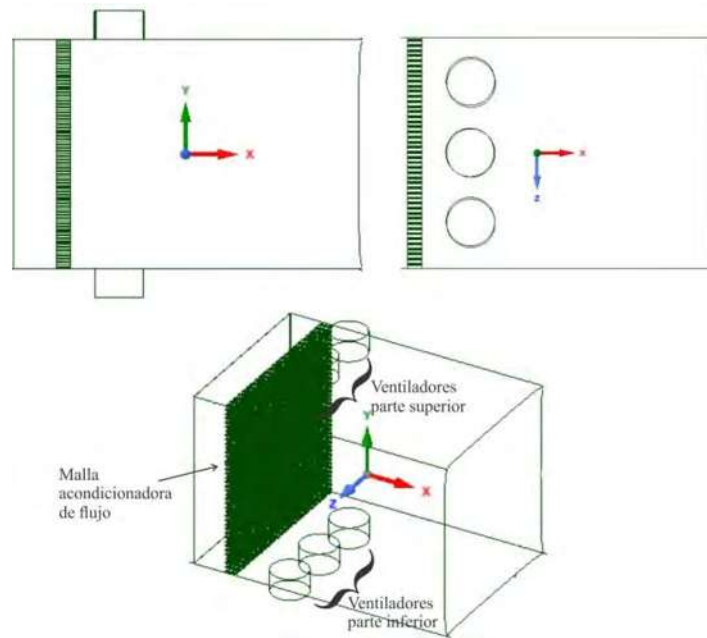


Figura 3.4 Cámara de pruebas modificada para generar turbulencia.

Se elige adicionar los seis ventiladores en la cámara de pruebas ya que los modelos a introducir son aerogeneradores para uso doméstico a escala (área máxima de $0.24m^2$), por lo que existirán tres zonas para afectar y analizar la estructura, es decir se tendrán tres ángulos de ataque en el modelo. Un ángulo de ataque es un ángulo que forma la línea de cuerda del objeto con la dirección de la velocidad del aire, como lo muestra la Figura 3.5. Modificando el ángulo de ataque se pueden cambiar las características de la fuerza de sustentación, la cual es una fuerza provocada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo (ver Apéndice A.9.2).

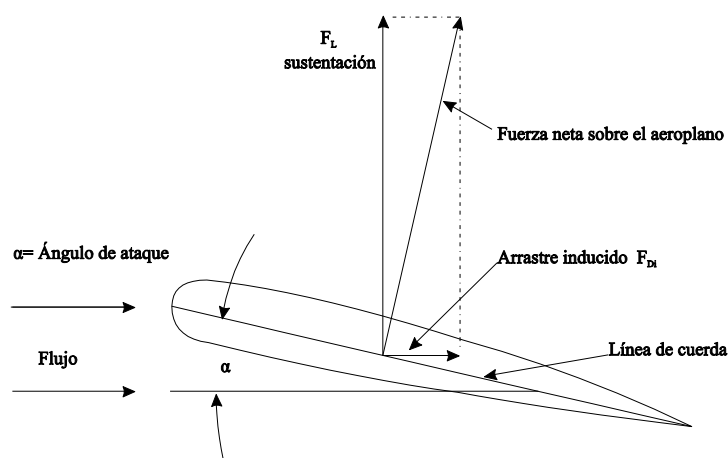


Figura 3.5 Arrastre inducido

Por lo anterior, al añadir otras secciones de aire, la turbulencia es generada perturbando la capa de cortadura en cizalladura vertical. Se observa en la Figura 3.6 el análisis del flujo que se tiene al colocar las secciones de aire en las posiciones mostradas, con el objetivo de lograr la cortadura en cizalladura vertical.

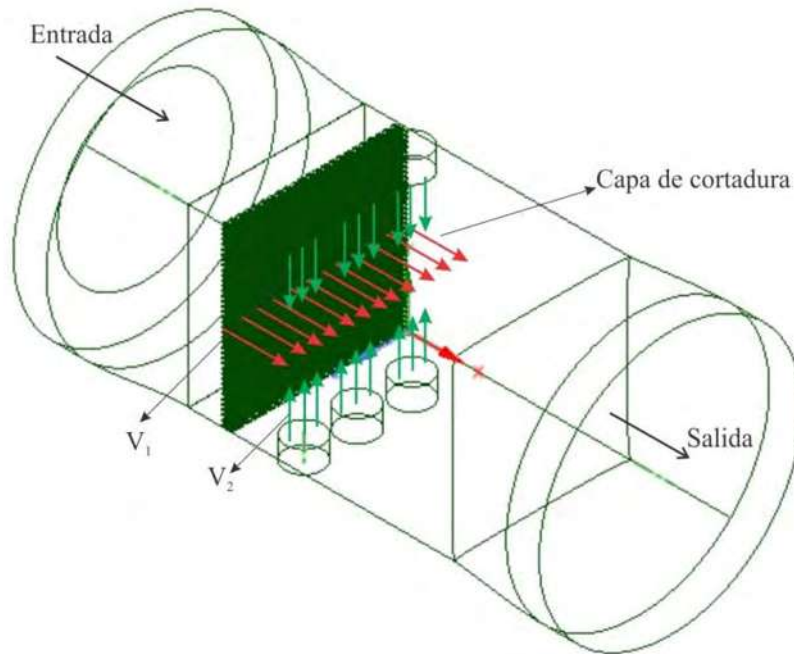


Figura 3.6 Capa de cortadura en cámara de pruebas.

Considerando el modelo del túnel de viento mostrado en la Figura 3.6, se realizará un análisis de las turbulencias generadas con la activación de las diferentes secciones de entrada del viento en la cámara de pruebas en conjunto con la entrada al túnel de viento. Con lo anterior, se busca encontrar similitudes entre las diferentes combinaciones con el fin de clasificar tipos de turbulencias generadas en la cámara de pruebas, con el fin de utilizar los resultados en la etapa de control.

Para realizar el análisis del modelo propuesto se utiliza el software ANSYS (ANSYS, 2010). Las siguientes Secciones muestran los resultados obtenidos.

3.3 Simulación en ANSYS Fluent

Debido a la complejidad en la resolución de ecuaciones diferenciales que involucran problemas de dinámica de fluidos, se hace necesario el uso de herramientas computacionales que permitan su manejo de una manera sencilla. Actualmente, se cuenta con la herramienta computacional CFD (Computational

Fluid Dynamics), donde se consigue predecir los fenómenos relacionados con fluidos para calcular velocidades, presiones, temperaturas, entre otros. Para predecir estos fenómenos, CFD resuelve ecuaciones de conservación de masa, movimiento, energía, entre otros.

Se utiliza el software ANSYS para la simulación del túnel de viento, con base a que es posible realizar un análisis íntegro de los fenómenos físicos involucrados en el sistema.

La plataforma ANSYS Workbench es la interfaz más importante, debido a que une todas las herramientas del software ANSYS para diferentes dominios de la física (sistemas multi-físicos), manejando el paso de datos entre herramientas de procesamiento como geometría, malla, soluciones y procesamiento de resultados. Es importante destacar la visualización gráfica de la construcción del proyecto y el poder realizar automáticamente los estudios de diseño (análisis paramétrico) para optimizarlo (ANSYS, 2010).

El ANSYS Fluent es la herramienta utilizada para el análisis del túnel de viento. Este software realiza el estudio por elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos, lo cuales permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean aptos para ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales. Este programa es capaz de resolver gran cantidad de ecuaciones diferenciales muy complejas por métodos numéricos, y permiten predecir con el comportamiento de un fluido alrededor un cuerpo muy aproximado al mundo real (Pradhan, 2011).

En el Apéndice A.4, se menciona que la cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo puede expresarse por medio de flujo volumétrico, flujo másico o flujo en peso. De aquí parten algunos principios físicos fundamentales para cualquier fluido:

- Conservación de la masa
- Conservación de la cantidad de movimiento
- Conservación de la energía.

La Ecuación general de conservación es (ANSYS, 2010):

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Inestable}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi V \cdot dA}_{\text{Convección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generación}} \quad (3.1)$$

Tabla 3.1 Variables de campo

| Ecuación | ϕ |
|--------------|--------------------------|
| Continuidad | 1 |
| Momento en X | u (velocidad en eje X) |
| Momento en Y | v (velocidad en eje Y) |
| Momento en Z | w (velocidad en eje Z) |
| Energía | h |
| Presión | p |

donde ρ es la densidad, Γ es el coeficiente de difusión, ϕ es una cantidad escalar, V es el control del volumen y A es el área.

Las ecuaciones diferenciales parciales Ecuación (3.1), se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas discretas. Es decir, las variables de campo (Tabla 3.1) se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos como se ilustra en Figura 3.7. Asimismo, también se discretizan las ecuaciones de movimiento con base en los valores de los nodos (ANSYS, 2010).

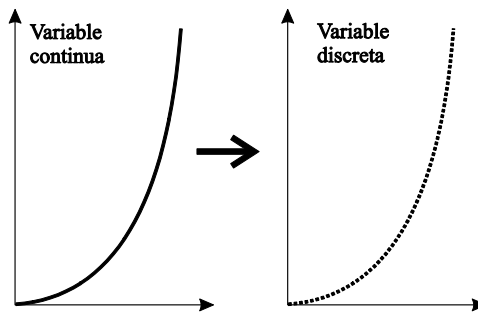


Figura 3.7 Discretización de variables.

Finalmente la dinámica de fluidos computacional (CFD), resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos.

Para realizar un análisis en CFD completo y fiable en ANSYS Fluent se tienen las siguientes etapas:

1. Crear volumen sólido del túnel de viento
2. Importar geometría
3. Crear y diseñar malla.
4. Configuración del CFD para la simulación en ANSYS Fluent.
5. Resultados

En las siguientes Subsecciones se explicaran a detalle la descripción de estas etapas así como la configuración del programa que se utilizó en la simulación.

3.3.1 Crear volumen sólido del túnel de viento

Del diseño mostrado en la Sección 2.4, se obtienen los datos de la geometría del túnel. En el software ANSYS SpaceClaim, se dibuja el sólido en 3D simplificando la geometría a dos sólidos el túnel y la malla correctora de flujo. En la Figura 3.8 se muestran diferentes vistas del túnel de viento modelado en 3D, así como la malla correctora de flujo.

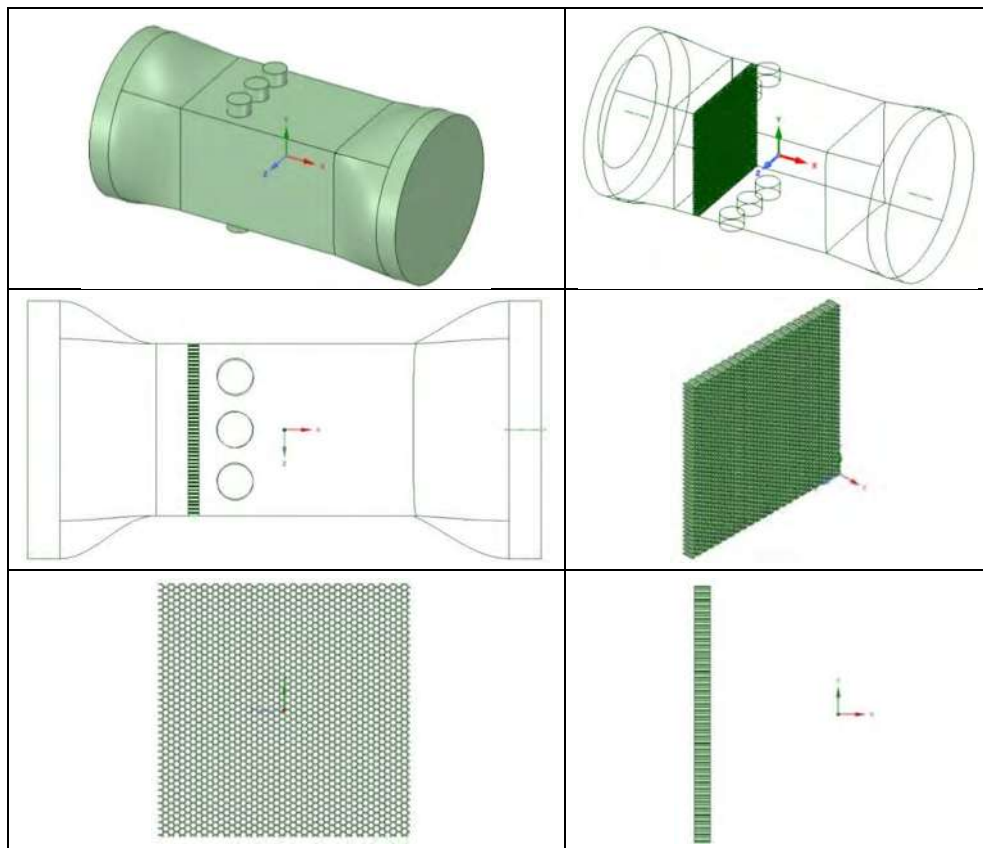


Figura 3.8 Diseño de túnel de viento 3D en ANSYS SpaceClaim.

Las dimensiones utilizadas para cada uno de los elementos mostrados en la Figura 3.8 corresponden a las mostradas en la Sección 2.4.

3.3.2 Importar geometría

El análisis del túnel de viento se realiza completamente en la ventana del ANSYS Workbench. Se agrega un sistema llamado “Fluid Flow (Fluent)” sobre el esquema del proyecto, el cual abre una plantilla predeterminada que incluye todos los sistemas individuales necesarios para el análisis. La plantilla se resuelve de arriba hacia abajo.

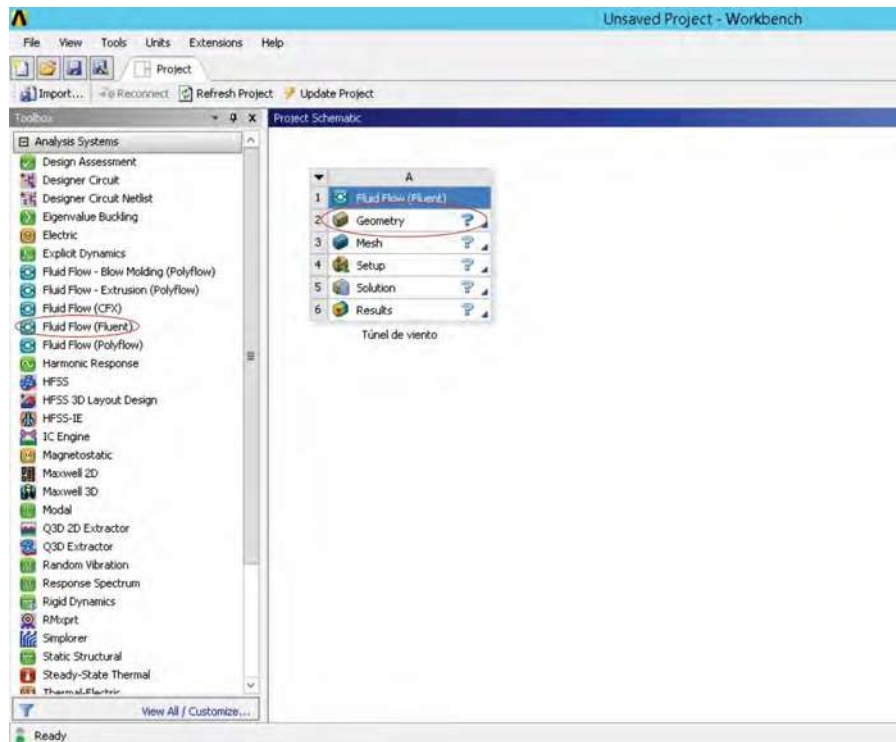


Figura 3.9 Fluid Flow (Fluent), ANSYS Workbench.

La Figura 3.9 muestra la ventana del ANSYS Workbench que indica los pasos que se deben de completar para realizar el análisis del Fluent en el proyecto.

La geometría creada anteriormente, es importada y con en ANSYS DesignModeler el modelo puede ser modificado si es requerido. Con el fin de crear un sólo sólido del modelo completo del túnel de viento, se generó la operación booleana de sustraer con los dos sólidos creados en un principio y así obtener un sólo cuerpo (ver Figura 3.10).

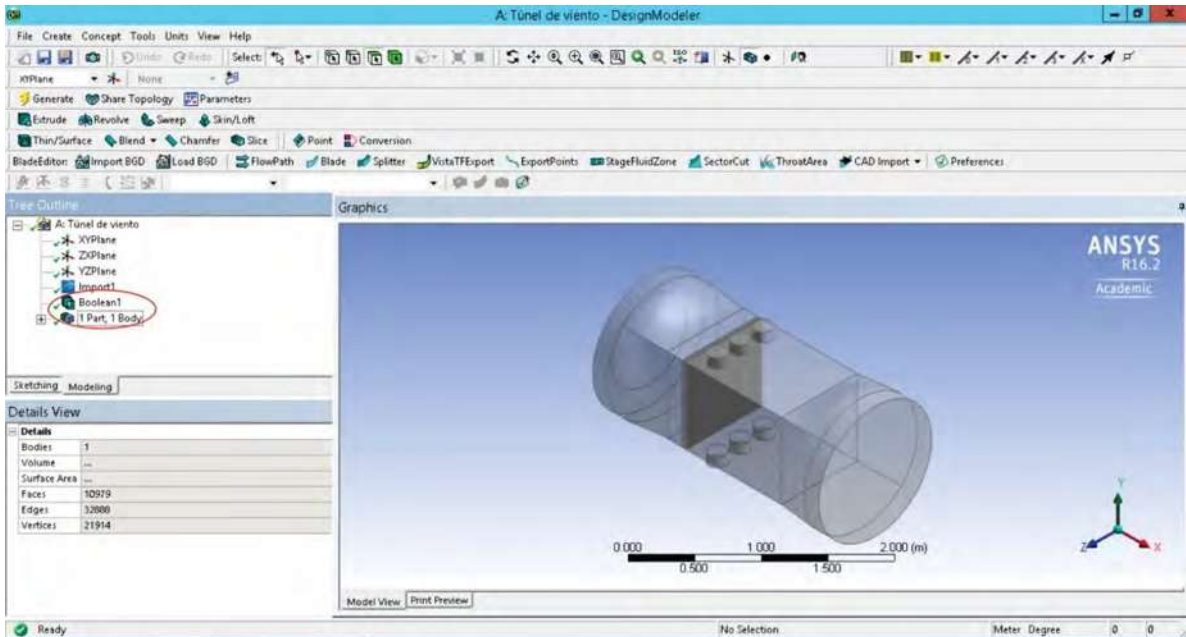


Figura 3.10 Geometría importada en ANSYS.

Al generar la geometría correctamente en la plataforma de Workbench como se muestra en la Figura 3.11, se puede continuar con las siguientes etapas del análisis.



Figura 3.11 Geometría generada correctamente.

3.3.3 Crear y diseñar malla

Como se muestra en la Figura 3.11, el siguiente paso es crear y diseñar la malla (Mesh). La malla es la primera parte para realizar el estudio de la dinámica de fluidos computacional, el cual realiza la discretización espacial (geométrica) del dominio, para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos de convección y de difusión. Los métodos principales para discretizar el problema son: diferencias finitas, elementos finitos y el que utiliza el ANSYS Fluent es una previa

discretización geométrica (malla) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que rigen al fluido. Los tipos de mallas son (ANSYS, 2010):

- Mallas estructuradas: es la malla en donde cada punto está bien identificado por los índices i, j, k en coordenadas cartesianas. Las celdas de las mallas en dos dimensiones son cuadriláteros y en tres dimensiones son hexaedros.
- Mallas no estructuras: en este tipo de malla las celdas y los nodos no tienen un orden en particular, es decir, las celdas o nodos cercanos no pueden identificarse claramente por sus índices. Para este caso, los elementos de la malla son una composición de cuadriláteros y triángulos en dos dimensiones y en tres dimensiones son tetraedros y hexaedros. Las ventajas de este tipo de malla es que tiene una gran flexibilidad para el tratamiento de figuras complejas, porque se generan automáticamente los cuadriláteros (2D) o los tetraedros (3D). Otra ventaja es el tiempo que una computadora requiere para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere para uno estructurado.

Por lo anterior, el tipo de malla a utilizar es no estructurado conformada por tetraedro. Las opciones que proporciona ANSYS Fluent para realizar el mallado son varias, sin embargo destaca la opción que corresponde al tamaño de la malla. Por lo anterior, en la siguiente Subsección se presenta la definición del tamaño de la malla.

3.3.3.1 Definición del tamaño (Sizing Definitions)

Esta herramienta de “Meshing” es de las más importantes, debido a que permite la configuración del tamaño mínimo y máximo de los elementos al crear la malla, el centro de relevancia, la transición rápida o lenta entre mallas de diferentes métodos, entre otros.

Al crear la malla con los valores predefinidos, se obtiene un modelo del túnel de viento que tiene 51,340 nodos y 252,323 elementos. Esta malla se muestra en Figura 3.12.

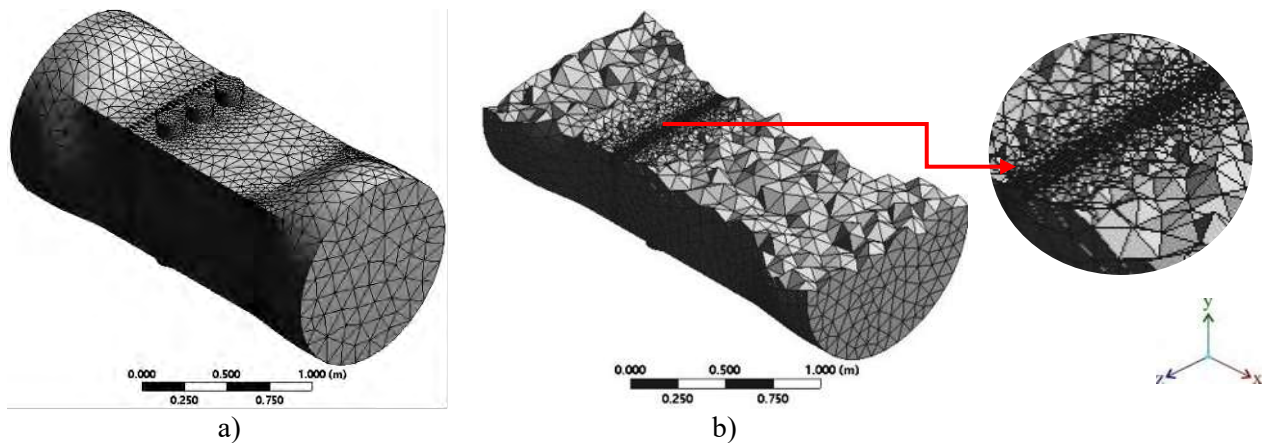


Figura 3.12 Malla creada con valores predefinidos. a) Vista isométrica, b) corte longitudinal.

La malla de la Figura 3.12, es creada con los valores predeterminados del programa “Meshing”, los cuales se muestran en la tabla de la Figura 3.13.

| Details of "Mesh" | |
|-------------------------------------------------|-------------------------|
| Sizing | |
| Use Advanced Size Function | On: Curvature |
| Relevance Center | Coarse |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | Medium |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18.0°) |
| <input type="checkbox"/> Min Size | Default (1.4651e-003 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size | Default (0.146510 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Size | Default (0.293020 m) |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | Default (1.20) |
| Minimum Edge Length | 1.1411e-004 m |

Figura 3.13 Valores de tamaño (Sizing).

Como se aprecia en la Figura 3.13, los valores predeterminados indican que se crea una malla con una relevancia gruesa y un suavizado medio, así como también un tamaño definido para cada una de las secciones.

Para verificar la calidad del mallado, el programa “Meshing” cuenta con la herramienta “mesh metric” donde existen varias opciones para verificarla. La principal es “Skewness” (asimetría), la cual se define como una propiedad para ciertos elementos que al aplicarles una regla de transformación efectiva, se observan cambios respecto al elemento original. Así pues, con la definición de la asimetría, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (peor). Las celdas degeneradas (astillas) se caracterizan por los nodos que son casi coplanares, es decir, que se encuentran aproximadamente en el mismo plano geométrico (ANSYS, 2010).

La Tabla 3.2 muestra la relación del valor obtenido de la asimetría, en relación con la calidad de la celda generada en el modelo.

Tabla 3.2 Valores de "Skewness" (ANSYS, 2010).

| Valor de "Skewness" | Calidad de la celda |
|---------------------|---------------------|
| 1 | Degenerada |
| 0.9 – < 1 | Mal (astillas) |
| 0.75 – 0.9 | Pobre |
| 0.5 – 0.75 | Razonable |
| 0.25 – 0.5 | Buena |
| > 0 – 0.25 | Excelente |
| 0 | Equilátera |

Las mallas de calidad tienen un valor de asimetría de aproximadamente 0.1 para 2D y 3D de 0.4. En 3D, la mayoría de las celdas debe ser buena o mejor, pero un pequeño porcentaje estarán generalmente en el intervalo justo y por lo general hay incluso unas pocas celdas pobres.

Al examinar la calidad de la malla de la Figura 3.12, se obtiene el siguiente histograma mostrado en la Figura 3.14.

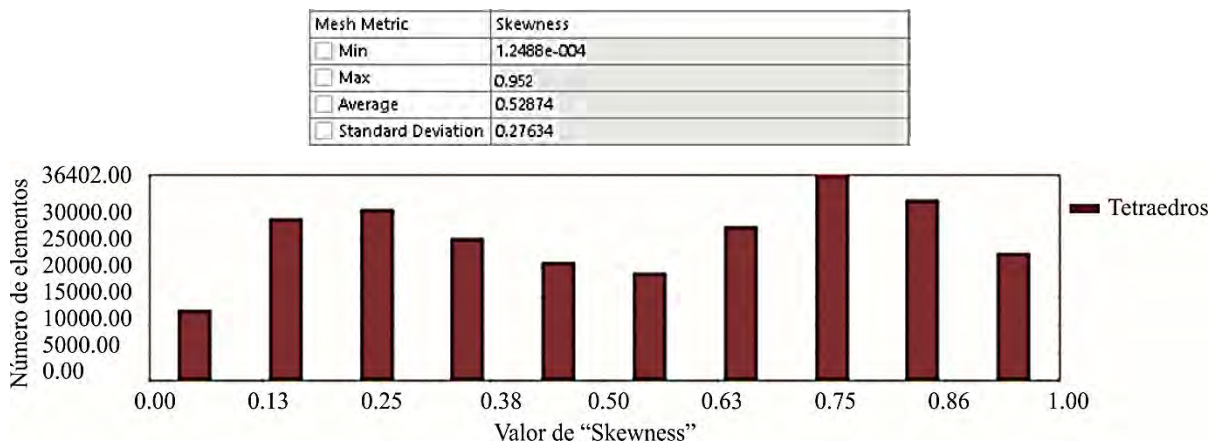


Figura 3.14 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metric", con valores predeterminados.

En la Figura 3.14 se observa que la calidad de la malla tiene 70,800 elementos excelentes, 45,500 elementos buenos, 82,000 elementos razonables y 54,023 elementos pobres. Por lo anterior podemos concluir que se tiene una malla de calidad razonable.

Como la calidad de la malla de la Figura 3.12 es razonable, entonces el programa “Fluent meshing” tiene funciones de tamaño que son muy flexibles, y pueden permitir definir tamaños globales para un mallado rápido, controlar el tamaño de la zona, aplicar la curvatura/ proximidad a un nivel más fino en toda la geometría o en ciertas áreas. En la Figura 3.15 se muestra el refinamiento de la malla, observándose el mayor número de elementos en la zona donde la geometría es más compleja.

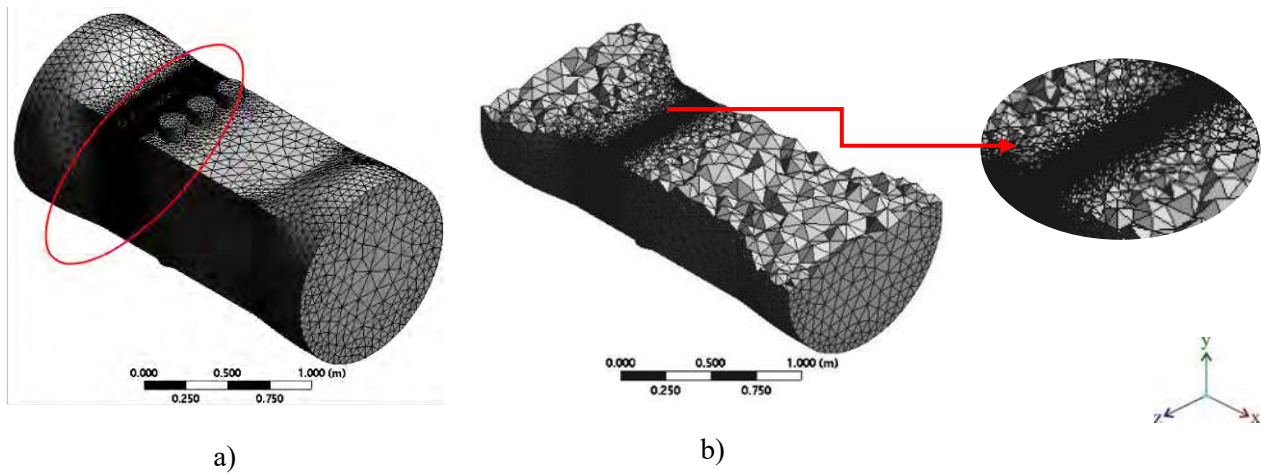


Figura 3.15 a) Malla con "Proximity and Curvature", vista isométrica, b) corte longitudinal.

| Details of Mesh | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|
| Sizing | |
| Use Advanced Size Function | On: Proximity and Curvature |
| Relevance Center | Coarse |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | Medium |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18.0°) |
| <input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap | Default (3) |
| Proximity Size Function Sources | |
| Faces and Edges | |
| <input type="checkbox"/> Min Size | Default (1.4651e-003 m) |
| <input type="checkbox"/> Proximity Min Size | Default (1.4651e-003 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size | Default (0.146510 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Size | Default (0.293020 m) |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | Default (1.20) |
| Minimum Edge Length | 1.1411e-004 m |

Figura 3.16 Detalles para la generación de la malla con "Proximity and Curvature".

En la Figura 3.16 se muestra en la opción “Sizing” la selección de Use Advanced Size Function, como: “Proximity and Curvature”. Donde la curvatura examina en los bordes y las caras, y refina el tamaño hasta el mínimo especificado para capturar la geometría, mientras más pequeño es el ángulo de curvatura mayor es el refinamiento. Y la proximidad es la separación mínima y máxima definida por el usuario de los bordes y las caras.

El centro de relevancia (Revelance Center), se selecciona en “Coarse” (grueso) para que el cálculo no utilice más elementos, mayor tiempo y más recursos del sistema. Elegir el centro de relevancia en grueso nos influye también en el tamaño mínimo y máximo del mallado.

En la transición (Transition) se escogen “Slow” (lento) ya que si se tiene un elemento pequeño el tamaño de las celdas será proporcional a los elementos.

Esta malla tiene 4,607,159 nodos y 24,357,172 elementos por lo que es una malla de mucha mayor calidad.

En la malla de la Figura 3.15, con la herramienta “Mesh Metrics Skewness” se obtienen los resultados mostrados en el histograma de la Figura 3.17.

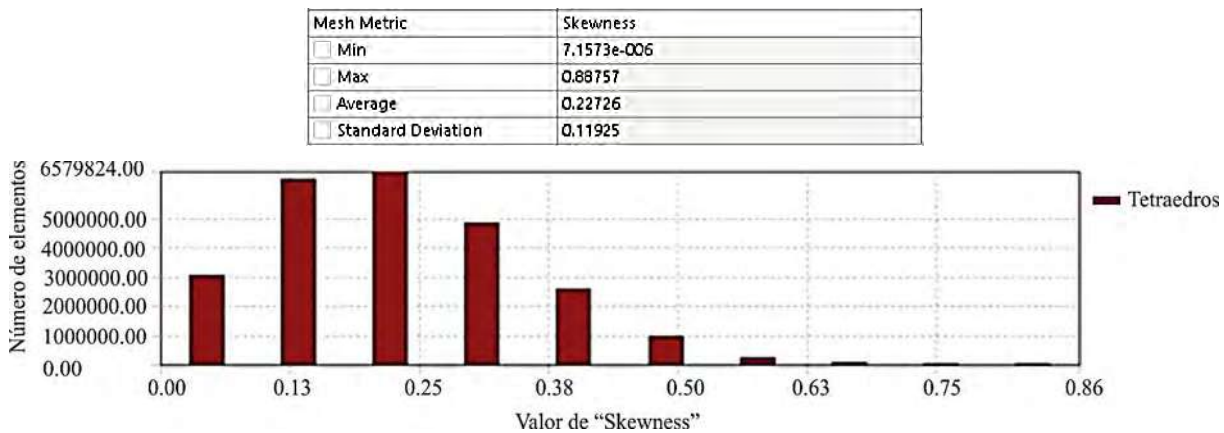


Figura 3.17 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metrics", con "Proximity and Curvature".

Se observa en la Figura 3.17 que la calidad de la malla es excelente, ya que la mayoría de los elementos que la componen se encuentran dentro del intervalo (0,0.25), y sólo 362 elementos son de calidad pobre debido a que se encuentran en 0.88757 (máximo). Sin embargo, existe la limitante de 512,000 elementos admitidos en el mallado del modelo, esto debido a que la licencia del software ANSYS es de tipo académico. Debido a esto, es necesario buscar una malla de mejor calidad que la presentada en la Figura 3.12 y que además no sobrepase el número de elementos permitidos para el tipo de licencia utilizada.

Para aumentar la calidad de la malla, se utiliza la opción “Relevance” la cual permite controlar la finura de la malla para todo el modelo. Una preferencia de soluciones de alta precisión se indica con un valor de +100 y para una velocidad rápida de -100. Es importante resaltar que cuanto mayor sea la malla, más preciso será el resultado. Una malla gruesa es menos precisa, sin embargo una malla más fina utiliza más elementos, más tiempo y más recursos del sistema. Para diseñar y crear la malla se optó por elegir una relevancia de +89 para aumentar la finura de la malla, además, se cambió el “Relevance Center” a mediano; el cual controla la resolución de la rejilla de la malla.

La malla generada con la opción de “Relevance” en +89 se muestra en la Figura 3.18.

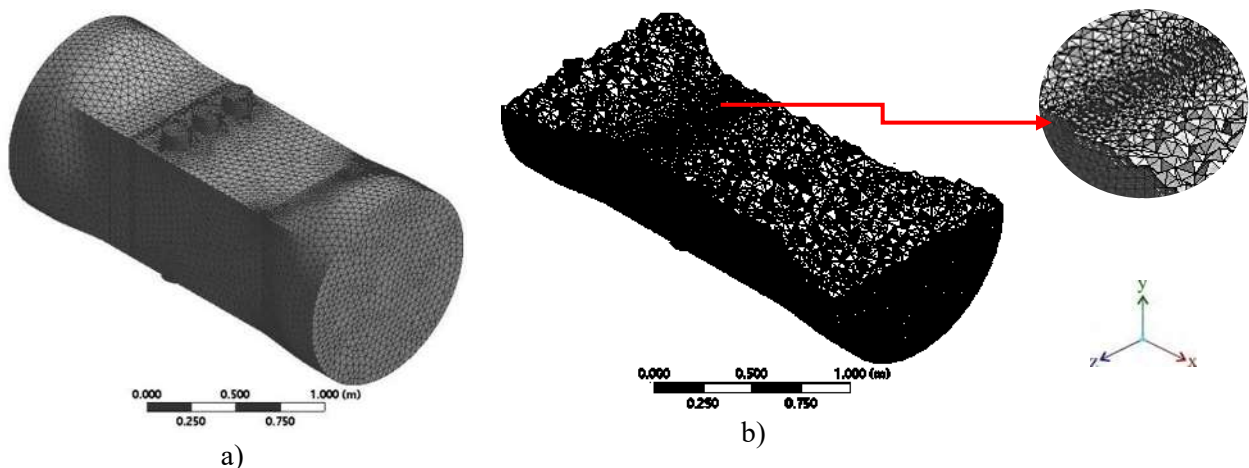


Figura 3.18 Malla creada con "Relevance en 89". a) Vista isométrica, b) corte longitudinal.

Al comparar la malla mostrada en la Figura 3.18 con las anteriores, se puede apreciar que se tiene una malla mejor distribuida.

La Figura 3.19 muestra una comparativa de los valores con que fue creada la malla inicial (Figura 3.12) considerando los valores predeterminados con los valores utilizados para la creación de la malla con las opciones de “Relevance” en +89 y “Relevance Center” en “Medium”.

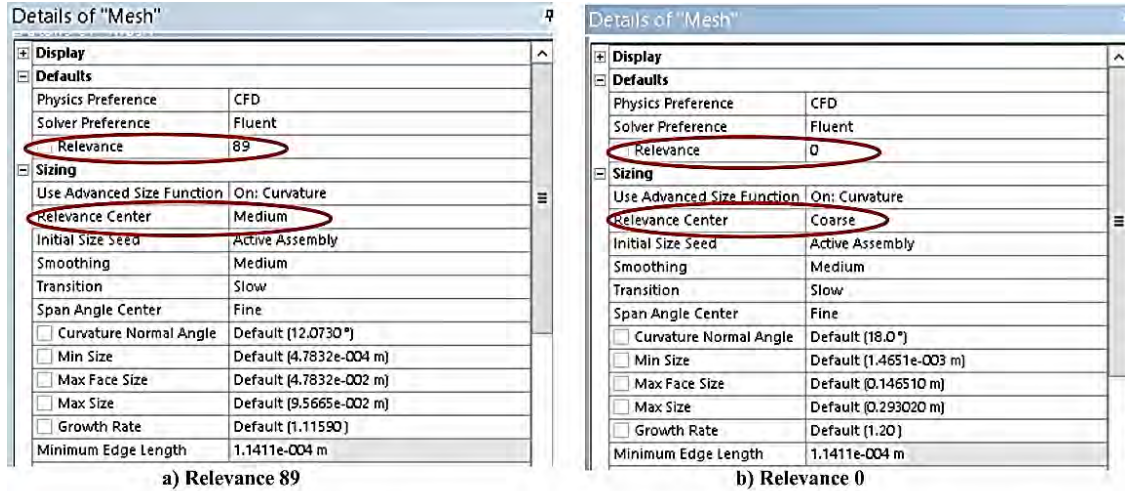


Figura 3.19 Herramienta “Relevance” para mejorar la calidad del mallado.

De la misma manera en cómo se presentó anteriormente, la calidad de la malla generada debe ser verificada con la herramienta “Mesh Metrics Skewness”. La calidad de la malla de la Figura 3.18, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 3.20.

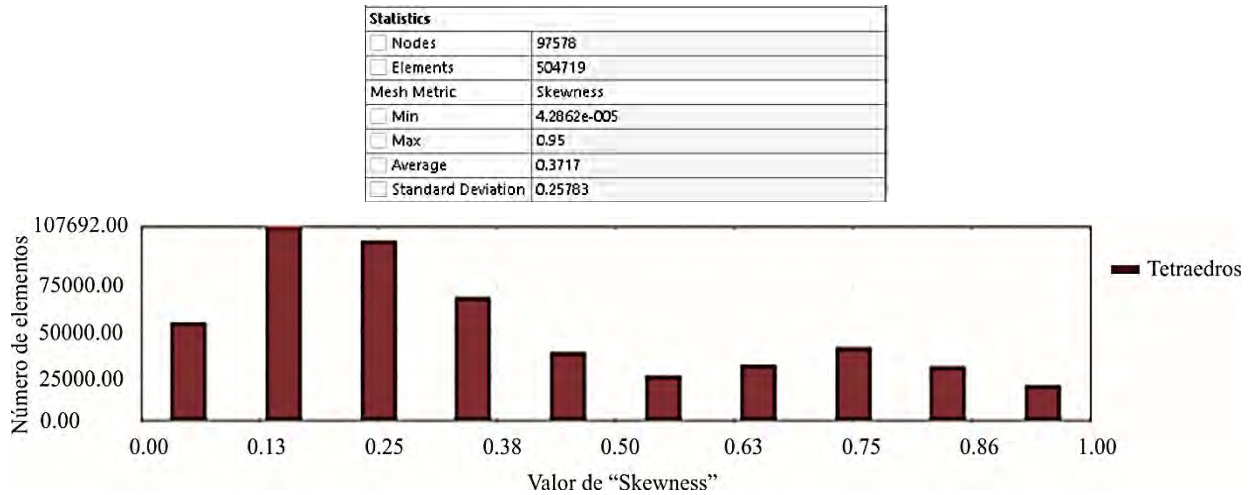


Figura 3.20 Calidad de la malla con la herramienta "Mesh Metrics" con "Relevance" en 89.

Se observa en la Figura 3.20 que la calidad de la malla es buena y está dentro de los valores de elementos máximos permitidos por la licencia del programa, ya que la mayoría de los elementos que la componen se encuentran dentro del intervalo (0,0.5), y sólo el 3.7% son de mala calidad ya que se

encuentran en 0.95 (máximo). Por lo anterior, esta malla es la que se utilizará para realizar el análisis y las simulaciones del modelo.

Después de generar la malla, se seleccionan las entradas y salidas posicionándose en la cara o superficie que se desea. Cada ventilador corresponde a una entrada de aire, en total tendremos 7 entradas, que llevaran el nombre de: inlet (ver Figura 3.21a) en la entrada al túnel de viento; inleta1, inleta2, inleta3, en la parte superior de la cama de pruebas (ver Figura 3.21c); inletb1, inletb2 e inletb3, en la parte inferior de la cama de pruebas (ver Figura 3.21d); y la salida del túnel de viento se llama outlet (ver Figura 3.21b).

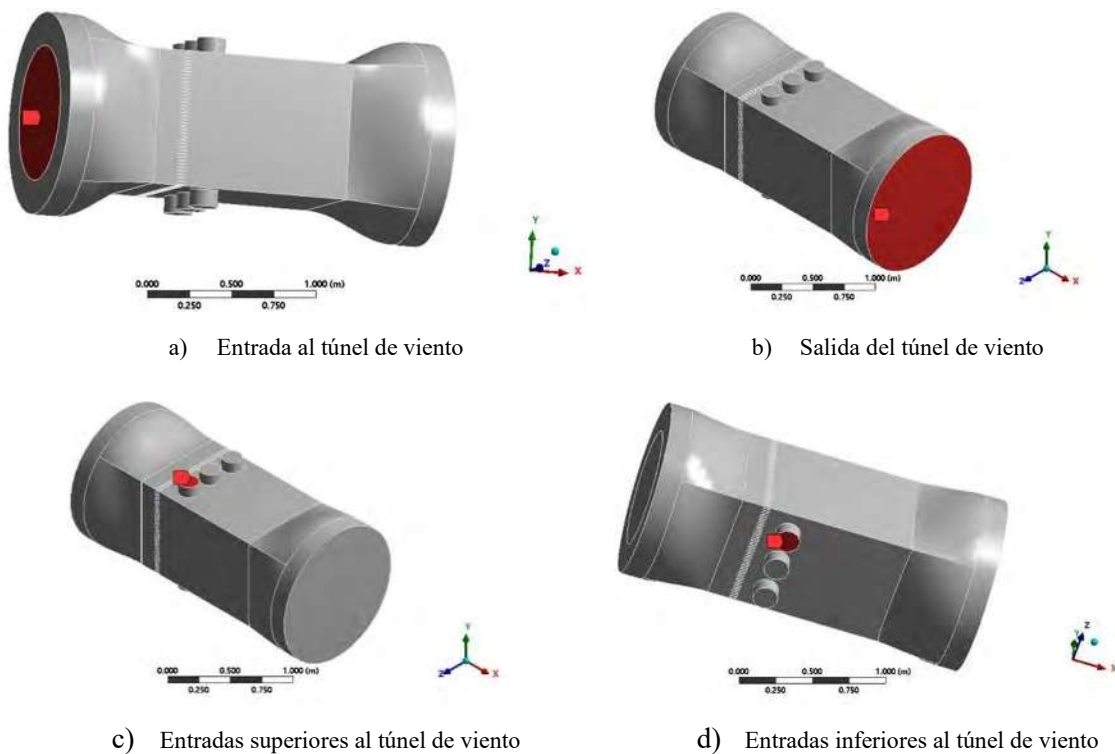


Figura 3.21 Entradas y Salidas del Túnel de Viento.

Una vez realizado lo anterior se cierra el “Meshing” y se actualiza el proyecto principal. Al crear la malla correctamente en la plataforma de Workbench, se puede continuar con la siguiente etapa, como lo muestra la Figura 3.22.

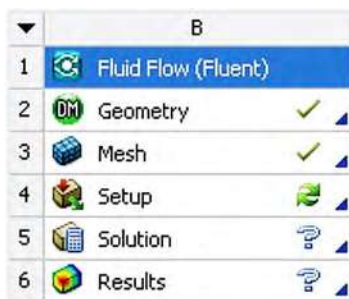


Figura 3.22 Malla generada correctamente.

3.3.4 Configuración del CFD para la simulación en ANSYS Fluent.

Una vez creada la malla computacional para la geometría del túnel de viento, en este paso se configura el análisis CFD utilizando ANSYS Fluent.

En el proyecto de ANSYS Workbench (Figura 3.22), en “Setup” se configuran las características iniciales con las que realizara el análisis el programa, como se muestra en la Figura 3.23.

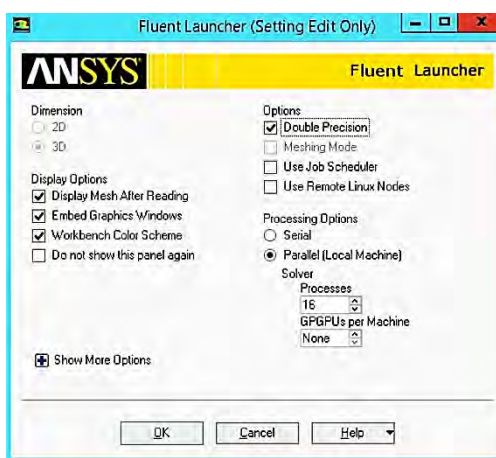


Figura 3.23 Fluent Launcher.

La configuración de dimensión y modo de mallado ya no pueden ser modificadas debido a que el programa se basa en la geometría ya especificada. En la configuración inicial, se elige un procesamiento en paralelo con 16 procesos, para que obtener mejor rendimiento computacional, con una doble precisión en la obtención de los resultados. Es importante mencionar que el programa se encuentra instalado en un servidor que tiene las siguientes características: Procesador Intel Xeon a 2.3GHz que opera a 64 bits, Memoria RAM de 32 GB y el sistema operativo es Windows Server 2012 R2.

3.3.4.1 Establecer la configuración general para el análisis CFD.

Dentro del programa se encuentra una Sección dedicada a aspectos generales del modelo. Dichos aspectos están relacionados con la verificación del modelo, reportes de la calidad de la malla, así como también lo relacionado al tipo de análisis que se desea realizar (estado estable, transitorio, de velocidad relativa o absoluta etc...) como lo muestra la Figura 3.24.



Figura 3.24 Setup "General".

Es importante verificar que no existe algún problema en la malla del modelo creado anteriormente. Debido a esto, la Figura 3.25 muestra el resultado de la verificación del modelo.

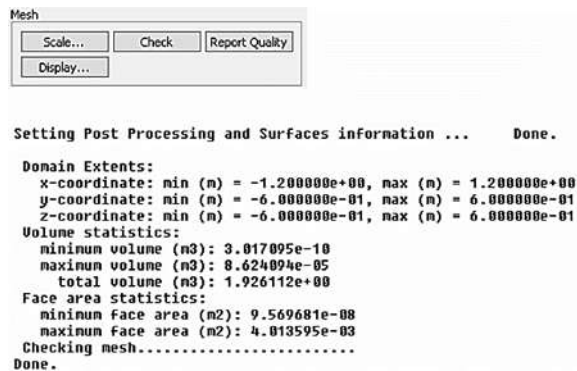


Figura 3.25 Verificación de la malla.

Existen varios programas que pueden ser utilizados para crear la malla como: el 3D CAD, COMSOL, Solidworks, entre otros, sin embargo, como la malla se genera en el programa “Meshing” que pertenece a la familia ANSYS no presenta anomalías, es decir, la escala del túnel de viento es la adecuada, como se observa en la Figura 3.25 en “Domain Extents”. De la misma forma, es importante verificar que ningún volumen sea negativo por más pequeño que sea, ya que en caso de tener un volumen negativo significa que la geometría del túnel de viento se alteró al realizar la transformación a volúmenes finitos. Lo anterior significa que los elementos de la malla apenas son positivos o que la malla esta deformada por elementos con volúmenes negativos (ANSYS, 2010).

En la parte que corresponde al tipo de solución o “Solver” que se muestra en la Figura 3.24, se realizar un análisis tipo “Pressure- Based” (basado en presión) ya que se tiene un flujo de baja velocidad e incompresible. En “Velocity Formulation” se elige “Absolute” debido a la dirección del flujo, ANSYS Fluent asume la velocidad absoluta como normal a la salida de la presión. Además, se selecciona una simulación transitoria (Transient) porque es un flujo variado (ANSYS, 2010).

3.3.4.2 Configurar el túnel de viento para la simulación CFD.

Los aspectos relacionados al tipo de modelo a simular tienen que ser seleccionados. Dentro de las diferentes opciones que se tienen para selección, se encuentran: el Energético, Viscoso, Radiación, Intercambio de calor, Acústico, etc... Para el caso del túnel de viento, se selecciona el viscoso debido a que se trata al aire como un fluido.

3.3.4.3 Configurar los materiales para la simulación CFD.

En lo que respecta a los materiales utilizados para cada una de las secciones del modelo, se elige como fluido al aire. La Figura 3.26 muestra las etapas de selección del tipo de material, así como sus características.

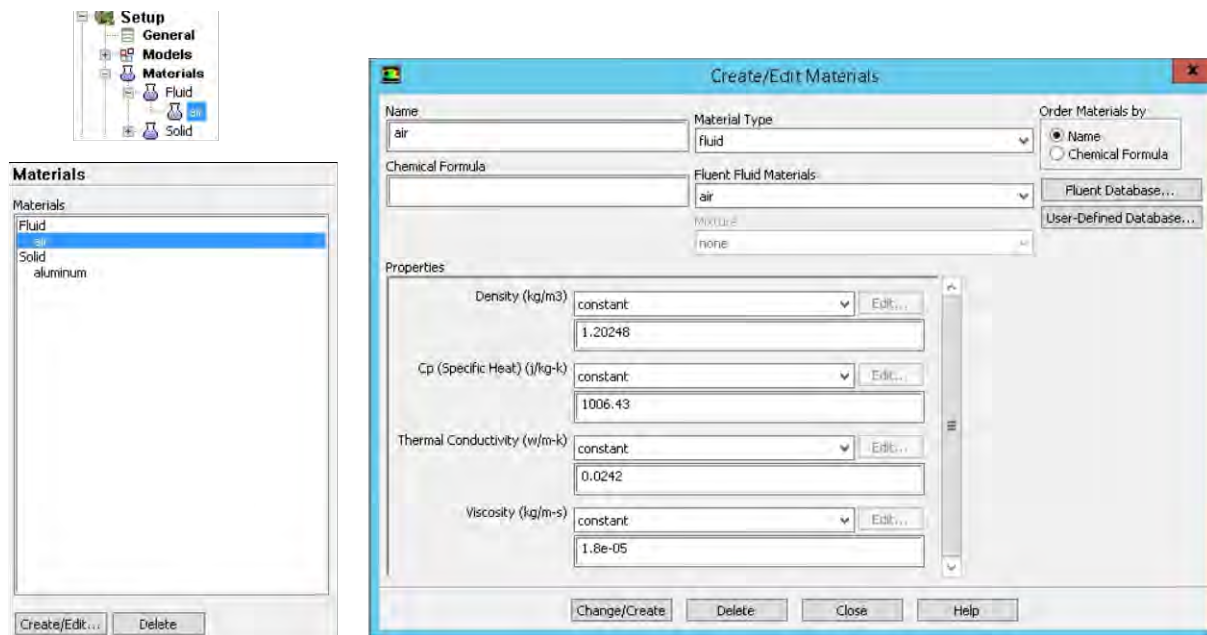


Figura 3.26 Configurar material.

La utilización del valor de la densidad calculada para la Ciudad de Morelia, Michoacán, México, así como la viscosidad de acuerdo a la temperatura promedio de dicha ciudad se hace necesaria incluirlas en dichos parámetros. Las demás condiciones son valores predefinidos.

3.3.4.4 Configurar las condiciones de contorno para el análisis CFD.

La condición del entorno en el que se realizara la simulación es importante, debido a que los parámetros que sean utilizados los tomara en cuenta para el análisis del modelo. De esta manera, en el modelo del túnel de viento, se tienen que establecer 8 condiciones, 7 de ellas están ligadas a las entradas de aire (inlet, inleta1, inleta2, inleta3, inletb1, inletb2 e inletb3), y una más a la salida (outlet).

La Figura 3.27 muestra la ventana donde pueden ser configuradas las condiciones de contorno (para el caso de la entrada inlet).

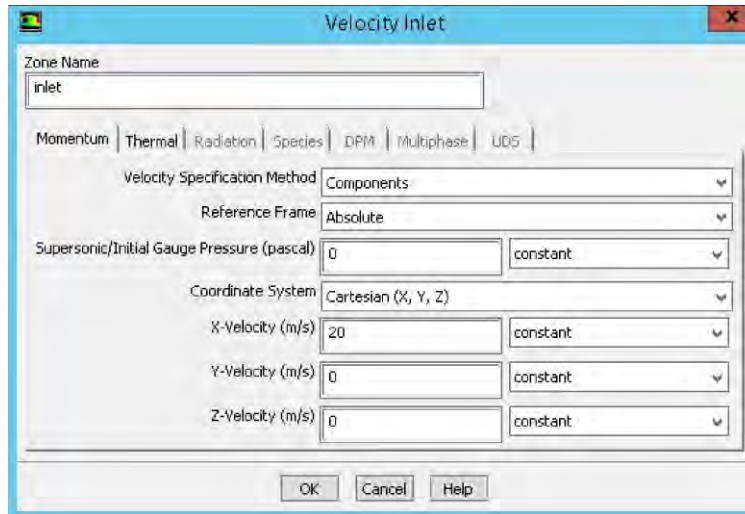


Figura 3.27 Condiciones de contorno.

En “Velocity Specification Method” (ver Figura 3.27), se elige la opción de componentes ya que permite especificar en términos cartesianos los componentes de la velocidad. Es importante tomar en cuenta en que eje coordenado se encuentran cada uno de las entradas, debido a que las entradas de los ventiladores superiores e inferiores de la cámara de pruebas se encuentran orientadas en otro eje de referencia.

3.3.4.5 Configurar parámetros de la solución para simulación CFD.

Una parte esencial en el análisis del modelo, corresponde al tipo de solución que se utilice para realizar los cálculos y posteriormente obtener los resultados. En este sentido, en el programa ANSYS se encuentran incluidos diferentes métodos de solución tales como: SIMPLE, SIMPLEC, COUPLED y PISO. La Figura 3.28 muestra la configuración del tipo de método utilizado en el modelo.

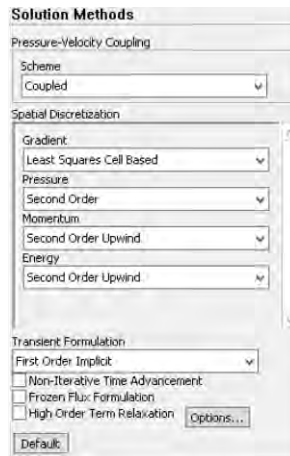


Figura 3.28 Configuración del Método de Solución.

Se elige el método de acoplamiento (COUPLED) porque resuelve todas las ecuaciones para la corrección de la velocidad de fase y corrección de presión compartida al mismo tiempo (Ghobadian & Vasquez, 2007) a diferencia del SIMPLE o SIMPLEC que utiliza una relación entre las correcciones de velocidad y presión para hacer cumplir la conservación de la masa y así obtener el campo de presión (ANSYS, 2010). Este método incorpora las fuerzas de elevación y las condiciones de transferencia de masa de forma implícita en la matriz general. Este método funciona de manera muy eficiente en situaciones de estado estable. El algoritmo acoplado basado en la presión obtiene una aplicación más robusta y eficiente de los flujos de estado transitorio (ANSYS, 2010).

Para la discretización espacial se tiene,

Gradient: en esta opción se utiliza el método de mínimos cuadrados a base de celdas (Least Squares Cell- Based Gradient Evaluation), en este método la solución se supone que varía linealmente. En la Figura 3.29, el cambio en los valores entre la celda y a lo largo del vector δr_i desde el centroide de celda a celda, se puede expresar como:

$$(\nabla\phi)_{c0} \cdot \Delta r_i = (\phi_{ci} - \phi_{c0}) \tag{3.2}$$

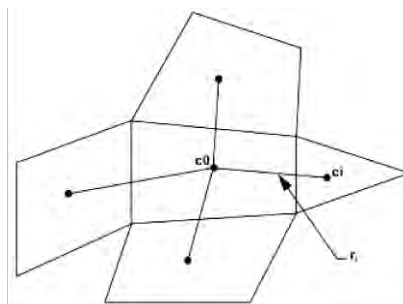


Figura 3.29 Evaluación de la celda centroide (ANSYS, 2010).

donde δ es una matriz identidad, ϕ_{c_i} es el centroide de la celda c_i , $\phi_{c_0}(x, y, z)$ es el centroide de la celda c_0 , $(\nabla\phi)_{c_0}$ es el gradiente de ϕ_{c_0} y se define como:

$$(\nabla\phi)_{c_0} = \frac{\partial}{\partial x} \phi_{c_0} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{c_0} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{c_0} \hat{k} \quad (3.3)$$

Y Δr_i se define como:

$$\nabla^2 r_i = \frac{\partial^2}{\partial x^2} r_i \hat{i} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} r_i \hat{j} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} r_i \hat{k} \quad (3.4)$$

Entonces, si se escriben ecuaciones similares a (3.2) para cada celda que rodea a c_0 , se obtiene el siguiente sistema:

$$[J](\nabla\phi)_{c_0} = \Delta\phi \quad (3.5)$$

donde $[J]$ es la matriz de coeficientes de la función de geometría.

El objetivo es determinar el gradiente de las celdas (3.3) resolviendo el problema de minimización para el sistema de la matriz de coeficientes no cuadrados por mínimos cuadrados.

El anterior sistema lineal de ecuaciones es sobredeterminado y es posible resolverlo por la descomposición de la matriz de coeficiente con el proceso de Gram- Schmidt (Anderson & Bonhus, 1994). De esta descomposición se obtiene una matriz de pesos para cada celda. Entonces, las tres componentes de los pesos ($W_{i0}^x, W_{i0}^y, W_{i0}^z$) se generan para cada una de las caras de la celda de c_0 .

Por lo tanto, el gradiente en el centro de la celda se puede calcular multiplicando los factores de peso por el vector de diferencia $\Delta\phi = (\phi_{c_1} - \phi_{c_0})$.

$$-(\phi_x)_{c_0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^x \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \quad (3.6)$$

$$-(\phi_y)_{c_0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^y \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \quad (3.7)$$

$$-(\phi_z)_{c_0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^z \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \quad (3.8)$$

Este método es el seleccionado por defecto en el programa ANSYS Fluent, ya que requiere menos esfuerzo computacional, asimismo, para mallas no estructuradas la exactitud del método gradiente por mínimos cuadrados es comparable a la del gradiente por nodos (ANSYS, 2010).

- *Pressure*: como la simulación está basada en presión, para discretizar esta Ecuación se utiliza “Second order”. En una precisión de segundo orden, las cantidades en las caras de celdas se calculan utilizando un enfoque de reconstrucción lineal multidimensional (Barth & Jespersen, 1989). La precisión de orden superior se logra a través de las caras de las celdas en un desarrollo de la serie de Taylor de la solución “cell-centered” sobre el “cell centroid”. Por lo tanto, cuando se elige esta opción, el valor nominal se calcula de la siguiente manera,

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla\phi\vec{r} \quad (3.9)$$

donde ϕ y $\nabla\phi$ son el valor del centroide y su gradiente en la celda respectivamente, y \vec{r} es el vector de desplazamiento del centroide de la celda al centroide cara. Se requiere determinar la pendiente en cada celda. Asimismo, el gradiente es limitado para que no se introduzcan nuevos máximos o mínimos (ANSYS, 2010).

- *Momentum*: se selecciona “Second Order Upwind”.
- *Energy*: se selecciona “Second Order Upwind”.

3.3.4.6 Verificar el criterio de convergencia de las ecuaciones residuales

La definición de los residuos para el proceso basado en presión: Después de discretizar, la Ecuación de conservación de una variable en general ϕ en una celda P esta dada por,

$$a_P \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.10)$$

donde a_P es el coeficiente del centro, a_{nb} son los coeficientes para las celdas vecinas y b es la parte constante del término fuente (S_c en $S = S_c + S_P\phi$) y por las condiciones de contorno. En la Ecuación (3.10), a_P está definido como:

$$a_P = \sum_{nb} a_{nb} - S_P \quad (3.11)$$

El residual R^ϕ calculado por ANSYS Fluent en el proceso basado en presión, es la inestabilidad en la Ecuación (3.10) sumado por todas las celdas P utilizadas en el cálculo. A lo anterior se le conoce como “Residuos sin escala” y se escriben como:

$$R^\phi = \sum_{celdas\ P} |\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P| \quad (3.12)$$

Debido a que la Ecuación (3.10) se emplea sin escala, es complicado calificar la convergencia por medio de residuos. Esto se aplica principalmente en los flujos cerrados, como convección natural en una habitación donde no existe velocidad de flujo de entrada de ϕ con el que comparar el residual (ANSYS, 2010).

La Figura 3.30 muestra la ventana de configuración para los residuos.

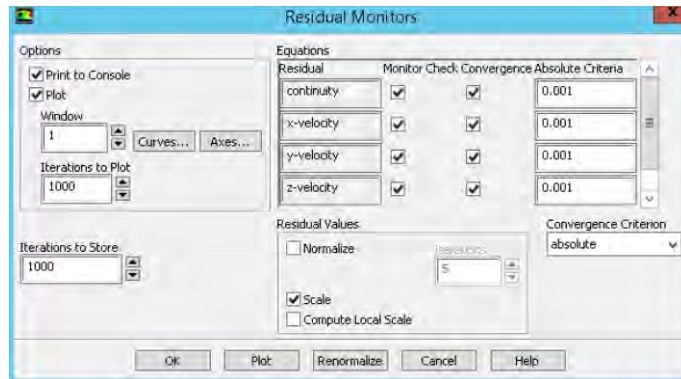


Figura 3.30 Monitor de residuos.

El criterio de convergencia se debe de elegir como “absolute” ya que el residual de una Ecuación en una iteración se compara con un valor especificado, esto se realiza en “Absolute Criteria” como se observa en la Figura 3.30. Si el residual es menor que el valor señalado por el usuario, la Ecuación se considera que ha convergido para un paso de tiempo.

3.3.4.7 Configurar los monitores de la superficie de salida

De la misma forma en cómo pueden configurarse los residuos, diferentes variables pueden ser monitoreadas durante la simulación. Esto con el objetivo de poder mostrar los resultados de los parámetros que se requieren seguir su funcionamiento.

El flujo másico y el flujo volumétrico son dos de los parámetros que serán monitoreados durante la simulación. Estos parámetros son elegidos para comprobar la Ecuación de Continuidad, con el objetivo de observar como la cantidad de aire que circula a través del túnel de viento en el tiempo de simulación es constante (flujo volumétrico), siempre y cuando no se enciendan los ventiladores en la cámara de pruebas. Así pues, la masa del aire que circula a la salida del túnel en el tiempo de simulación debe ser aproximada a la que circula a la entrada de éste.

3.3.4.8 Calcular la solución

Como todo simulador, es necesario indicar el inicio de la simulación, así como también el tamaño del paso en el método de integración elegido, y en este caso también el número de iteraciones realizadas durante cada paso. La Figura 3.31 muestra la ventana de configuración de estos parámetros.

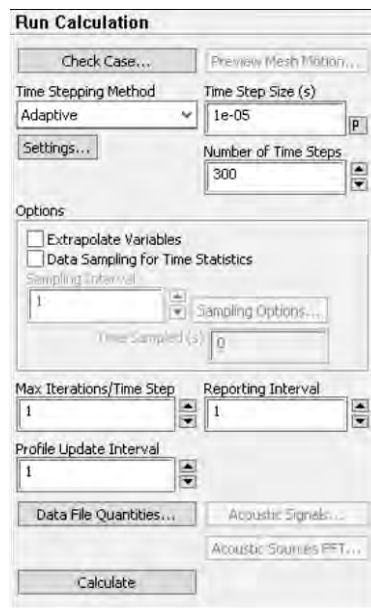


Figura 3.31 Calcular la solución.

Se configura el paso de tiempo en adaptativo. El método adaptativo consiste en la determinación automática del tamaño de paso de tiempo, y se basa en la estimación del error de truncamiento asociado con el esquema de integración de tiempo. Si el error de truncamiento es más pequeño que una tolerancia especificada, se aumenta el tamaño del paso de tiempo; si el error de truncamiento es mayor, el paso de tiempo se disminuye.

Una vez presentados todos los parámetros configurados para el modelo, es realizada la simulación, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

3.3.5 Resultados

En esta Sección son presentados los resultados obtenidos de la simulación del túnel de viento cuando sólo se encuentra encendido el ventilador a la entrada de éste a una velocidad de 20 m/s . Los resultados se enfocan principalmente en mostrar la convergencia de los residuos, el flujo másico para mostrar su conservación, y el flujo volumétrico. También son mostrados los resultados obtenidos en el post-procesamiento.

3.3.5.1 Residuos

Para mallas no estructuradas se utiliza el algoritmo “Algebraic Multigrid” (AMG), la característica principal de este algoritmo es que una vez que el sistema es linealizado, las no linealidades son despreciadas por el programa ANSYS Fluent hasta que el operador de nivel aproxima la siguiente actualización. ANSYS Fluent utiliza el método iterativo Gauss-Seidel para resolver el sistema de ecuaciones escalares AMG (Algebraic Multigrid) o el sistema AMG de ecuaciones acoplado, el cual es una técnica para la resolución de un sistema lineal de ecuaciones de uno en uno y en continuidad. Éste método utiliza los resultados previamente calculados y lleva a cabo dos barridos y/o recorridos en las incógnitas en dirección hacia adelante y hacia atrás (ANSYS, 2010).

El método converge cuando los residuos se han reducido en grado suficiente y ya no cambian en las demás iteraciones, entonces se puede decir que la solución ha convergido si ha sido alcanzado el criterio de convergencia para cada variable (Figura 3.32). El criterio de convergencia se configura en Fluent (ver Figura 3.30) y se establece en 10^{-3} para todas las variables residuales y en 10^{-6} para la variable residual

de la energía. La variable residual de continuidad se mide por unidad y para las variables de residuales de velocidad las unidades son m/s , mientras que la unidad de la variable residual de energía es $N \cdot m$ (ANSYS, 2010).

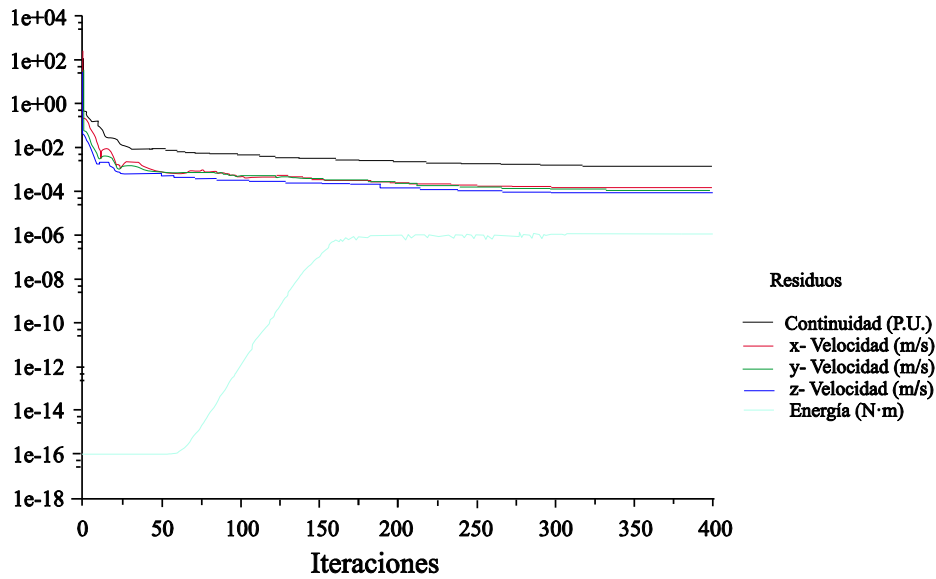


Figura 3.32 Residuos.

Se considera que la solución converge cuando ya no existe cambio, lo cual sucede con más de 50 iteraciones (ANSYS, 2010). Por lo tanto, analizando la Figura 3.32 los residuos convergen en aproximadamente 380 iteraciones.

3.3.5.2 Flujo másico

Para realizar el análisis del flujo másico se utiliza la siguiente convención de signos: un valor positivo representa el flujo de entrada al dominio y un valor negativo representa el flujo de salida del dominio. Lo anterior se muestra en la Figura 3.33, para la entrada del túnel el flujo másico es positivo (ver Figura 3.33a), mientras que para la salida del túnel el flujo másico es negativo (ver Figura 3.33b).

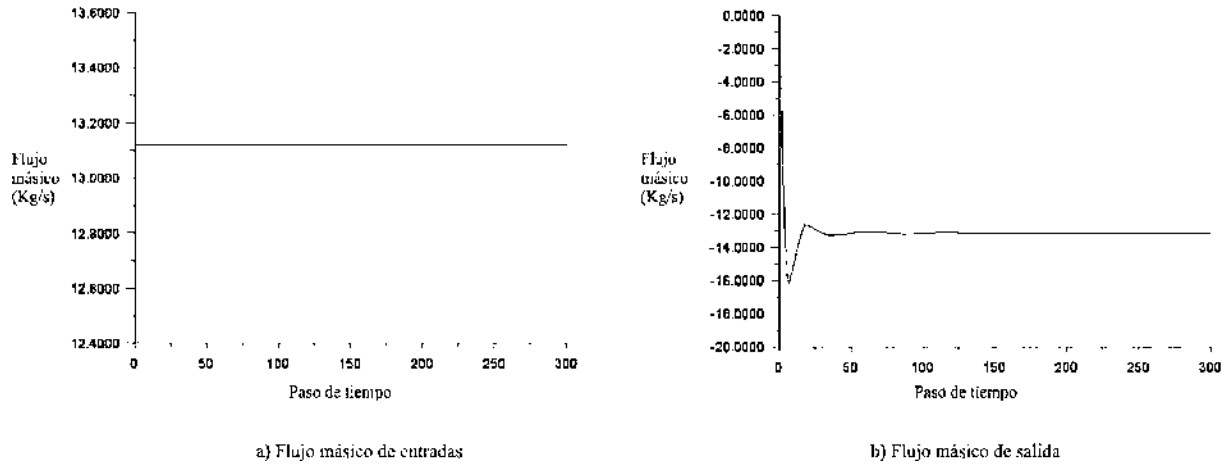


Figura 3.33 Flujo másico.

En la Sección 2.4.2 se calcula teóricamente el flujo másico resultando 13.4678 kg/s . En la Figura 3.33a se observa que el flujo másico de entrada es 13.1187 kg/s y el flujo másico en la salida converge a -13.1189 kg/s (Figura 3.33b) por lo que se comprueba que el flujo másico se conserva en todo el túnel de viento. El error entre el valor teórico y el de la simulación es de 2.59%. El signo negativo en el flujo másico de salida es debido a la convención de signos, positivo para la entrada y negativo para la salida.

Adicionalmente, se puede observar que la solución converge en aproximadamente 120 pasos de integración.

3.3.5.3 Flujo volumétrico

El flujo volumétrico se calcula teóricamente en el Apartado 2.4.2, el cual es $11.2 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 3.34a se ilustra que el flujo volumétrico de entrada es $10.9098 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la Figura 3.34b se observa que el flujo volumétrico de salida converge a $-10.9105 \text{ m}^3/\text{s}$ por lo que se demuestra que cumple con la Ecuación de continuidad y conservación de la masa en el túnel de viento. El error entre el valor teórico y el de la simulación es de 2.59%.

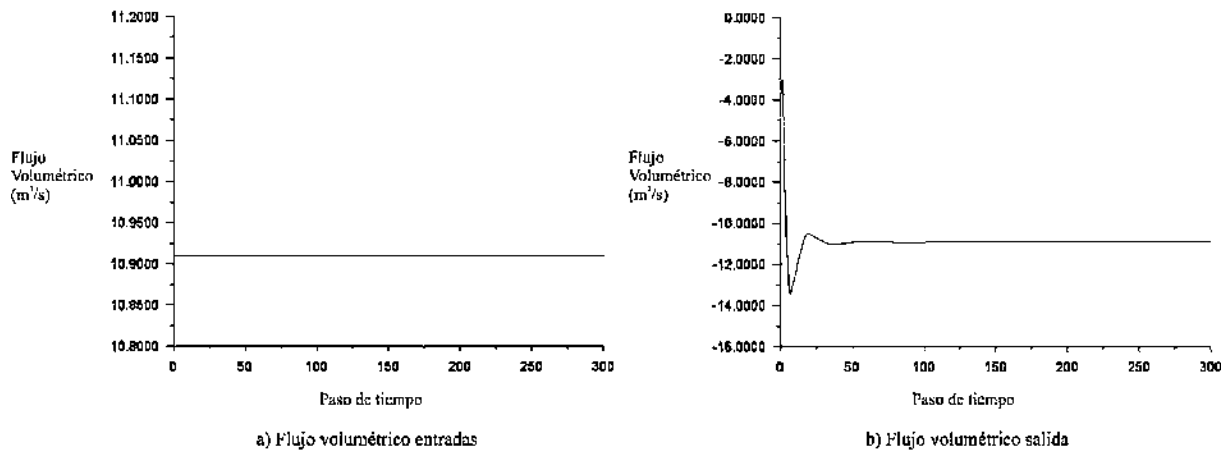


Figura 3.34 Flujo volumétrico.

La convención de signos tomada para el flujo volumétrico, es igual que en el flujo másico, positivo para caudal de entrada y negativo para caudal de salida.

Adicionalmente, igual que para el caso del flujo másico, la solución converge en aproximadamente 100 pasos de integración.

3.6.5.4 Post-procesamiento

El post-procesamiento, como su nombre lo indica es una etapa posterior al procesamiento del modelo CFD, en dicha etapa se pueden realizar estudios posteriores a los realizados tomando en cuenta los datos obtenidos previamente. Para el caso del túnel del viento, esta etapa es utilizada para realizar un análisis de la velocidad y presión en el modelo, debido a que son dos de los parámetros más importantes a tener en cuenta.

La Figura 3.35 muestra la distribución de la presión a lo largo del túnel. Se puede apreciar, como se tiene una presión mayor en la entrada donde se encuentra el ventilador principal. Adicionalmente se puede observar que cuando el flujo pasa por el área de contracción la presión disminuye, teniendo la menor presión en todo el recorrido del flujo dentro del túnel en la cámara de pruebas por lo que es donde se tendrá mayor velocidad, esto debido al principio de conservación de la energía, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye (ver Sección A.8).

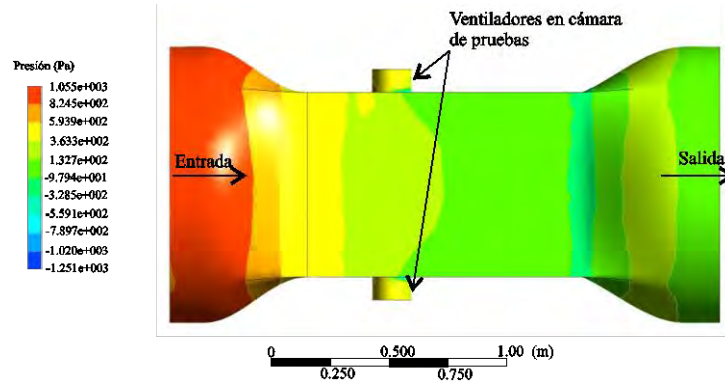


Figura 3.35 Presión, CFD post.

Además, la Figura 3.35 ilustra la reducción de la presión en la cámara de pruebas por el efecto Venturi (ver Sección A.8), y por lo tanto un aumento en la velocidad (Principio de conservación de la energía).

Por otra parte, es importante observar cómo se realiza la distribución de la velocidad del viento a lo largo del túnel. Para lo anterior, la Figura 3.36 muestra la velocidad del viento en el interior del túnel.

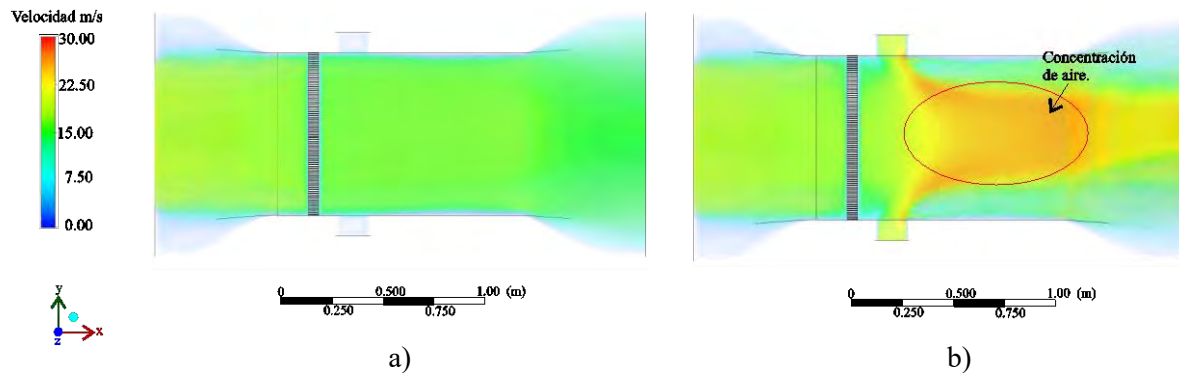


Figura 3.36 a) Post- CFD, ventilador encendido en entrada de túnel de viento. b) Post- CFD, ventilador encendido en entrada y 6 ventiladores encendidos en cámara de pruebas.

En la Figura 3.36a, se encuentra encendido sólo el ventilador de entrada al túnel de viento. De este modo, se observa que la velocidad en la cámara de pruebas no varía, sin embargo disminuye la velocidad de 20 m/s a la entrada a 18 m/s aproximadamente en la cámara de pruebas. La disminución de la velocidad sucede por el corrector de flujo, no obstante, es indispensable el corrector de flujo para obtener un flujo laminar en la cámara de pruebas y así poder manipularlo.

Con respecto a la Figura 3.36b, se encuentran encendidos todos los ventiladores (6 en la cámara de pruebas y uno en la entrada del túnel), distribuidos como se muestran en la Figura 3.6. También, se

examinan las variaciones en la velocidad obteniéndose como máxima alrededor de 30 m/s, por lo que es alterada la capa de cortadura, obteniendo así una zona de inestabilidad en la cámara de pruebas. Además, se observa la concentración de aire en el centro de la cámara de pruebas teniendo como consecuencia la ausencia de éste en los extremos.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en esta Sección, se puede observar que la distribución del viento y la presión aunada al flujo volumétrico y másico en el modelo, se mantienen en las condiciones esperadas. Una parte importante a destacar en relación a la velocidad del viento indica que cuando los ventiladores que se encuentran colocados en la cámara de pruebas son activados, es posible aumentar la velocidad del viento, así como también crear zonas dentro de la cámara de pruebas con disminución de la velocidad del viento (afectar la capa de cortadura). Lo anterior es tomado como referencia para crear la propuesta de la generación de turbulencias. Para esto, se realiza el cambio del ventilador principal de la entrada por 3 ventiladores, esto con el objetivo de poder dividir la cámara de pruebas en más zonas, donde la capa de cortadura sea afectada dependiendo de las condiciones y/o combinaciones que estén relacionadas con los ventiladores activados.

3.4 Modificación del túnel de viento a 3 ventiladores en la entrada

En esta Sección se presenta la modificación del túnel de viento de un ventilador en la entrada a tres (cada uno con un diámetro de 0.53m), con el propósito de tener una mayor cantidad de zonas afectadas por la capa de cortadura en el túnel y así generar turbulencias en diferentes zonas de la cámara de pruebas. Esta modificación se muestra en la Figura 3.37.

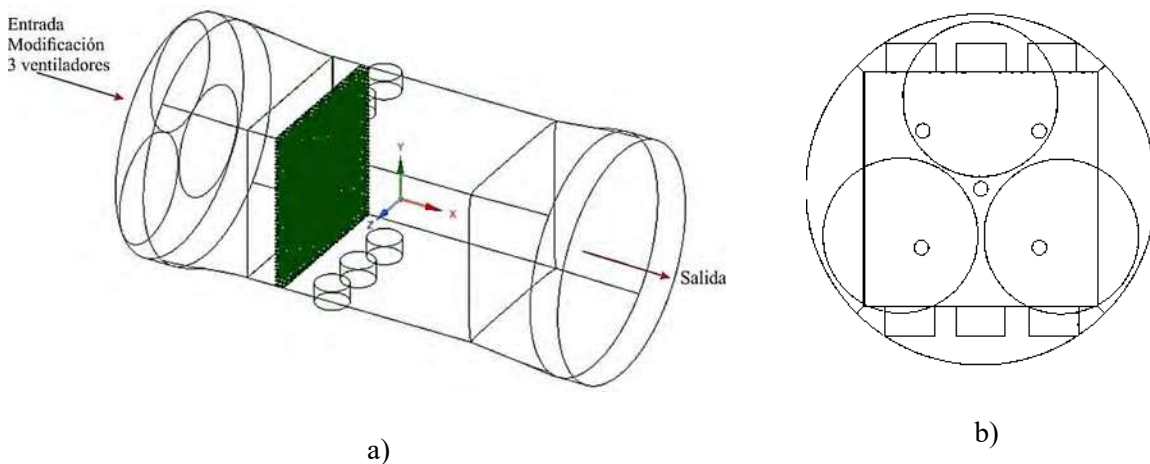


Figura 3.37 Modificación a 3 ventiladores. a) Vista isométrica, b) Vista lateral.

Como se puede observar en la Figura 3.37, en la entrada del túnel se tiene ahora tres ventiladores, los cuales están representados por los tres círculos en la Figura 3.37b.

Para realizar el análisis del modelo, es necesario aplicar todas las etapas descritas anteriormente, las cuales son resumidas a continuación.

1. Crear el volumen sólido del túnel de viento.

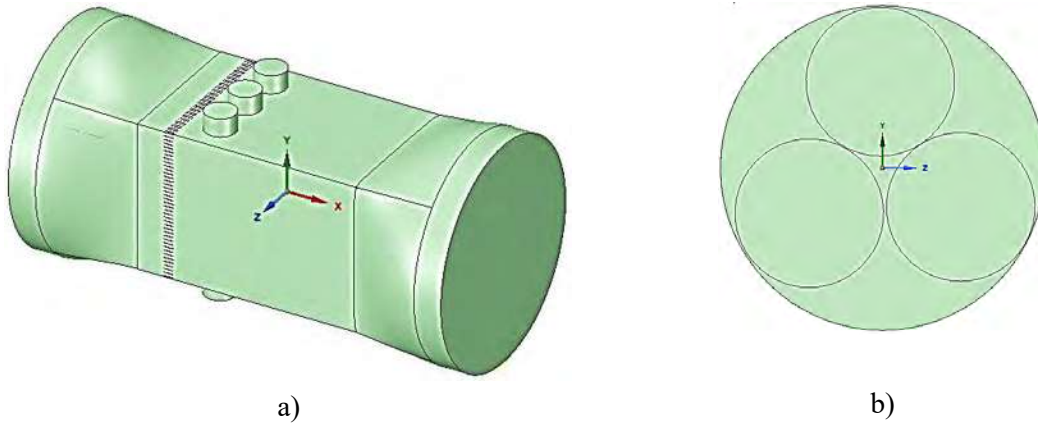


Figura 3.38 Sólido con tres ventiladores a la entrada.

La Figura 3.38 ilustra el diseño de la geometría del túnel con los tres ventiladores propuestos a la entrada, tratando de lograr una distribución uniforme del aire.

2. Importar la geometría al ANSYS Workbench para su análisis con el módulo de CFD Fluent.

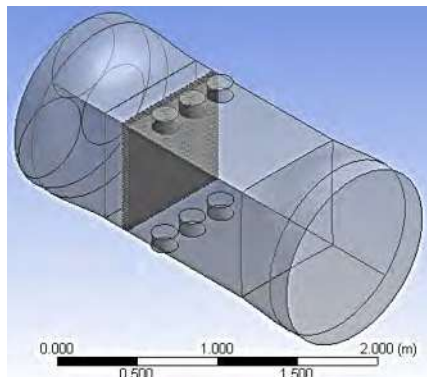


Figura 3.39 Geometría de túnel de viento con 3 ventiladores.

La Figura 3.39 muestra el modelo con 3 ventiladores en la entrada importado al Workbench. Al importar la geometría es importante aplicar la función booleana de sustraer con el objetivo de obtener un sólido.

3. Crear y diseñar malla:

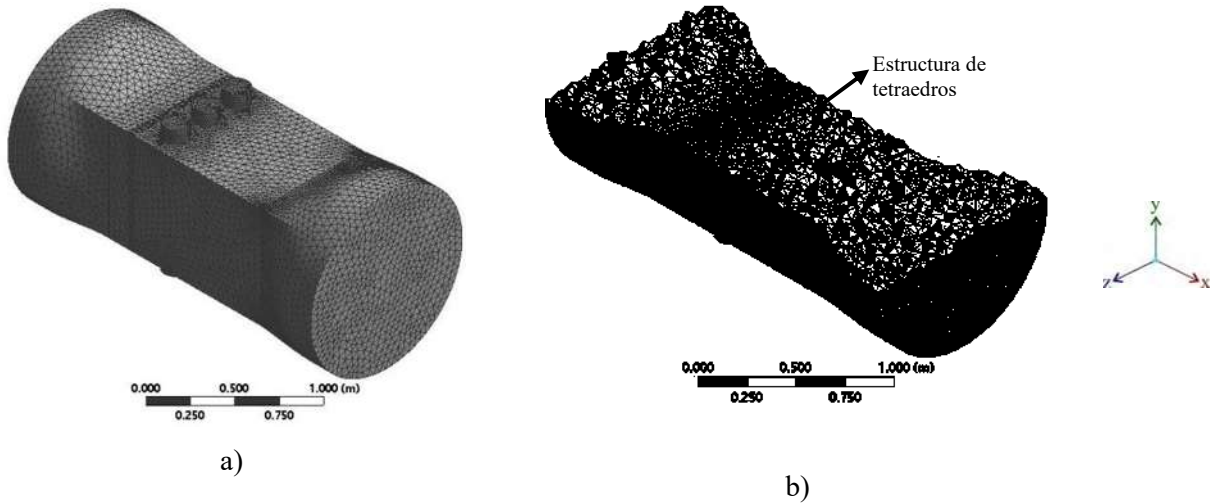


Figura 3.40 Malla del túnel de viento con 3 ventiladores. a) Vista isométrica, b) corte longitudinal.

La Figura 3.40 presenta la malla generada para el modelo del túnel de viento considerando los 3 ventiladores a la entrada. Los elementos y nodos de la malla generada se muestran en la Figura 3.41.

| Statistics | |
|--------------------|-------------|
| Nodes | 97764 |
| Elements | 505718 |
| Mesh Metric | Skewness |
| Min | 4.8946e-005 |
| Max | 0.95 |
| Average | 0.37276 |
| Standard Deviation | 0.25833 |

Figura 3.41 Número de elementos y nodos del túnel de viento con 3 ventiladores.

En el histograma de la Figura 3.42 se muestra el número de elementos y nodos, así como la calidad de la malla medida con la herramienta “Mesh Metric”.

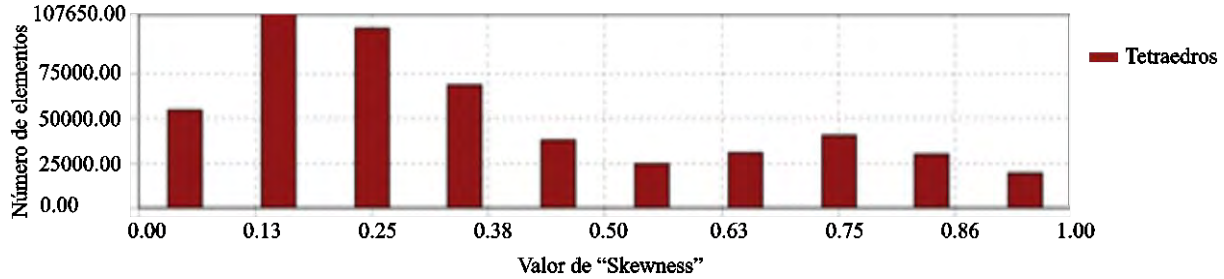


Figura 3.42 Calidad del mallado del túnel de viento con 3 ventiladores.

Al observar la Figura 3.42, se concluye que la calidad de la malla es buena y está dentro de los valores de elementos máximos permitidos por la licencia del programa, ya que la mayoría de los elementos que la componen se encuentran dentro del intervalo [0, 0.5], y sólo 19,000 elementos son de mala calidad debido a que se encuentran en el máximo permitido.

4. Para la simulación en ANSYS Fluent, se configura "Setup" como se indica en la Sección 3.3.4.
5. Se presentan los resultados obtenidos. Únicamente se presentan los resultados en cuanto a la velocidad del viento dentro del túnel.

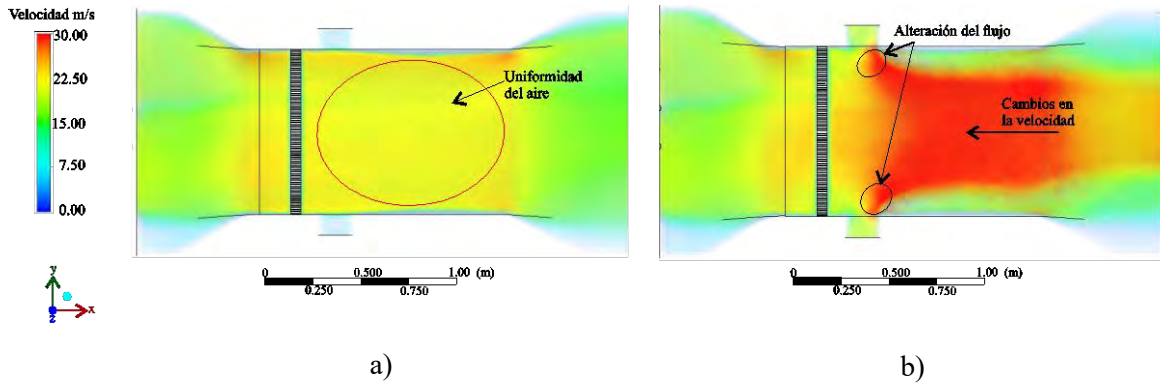


Figura 3.43 a) Post- CFD 3 ventiladores de entrada a túnel encendidos, b) Post- CFD 6 ventiladores de cámara de pruebas encendidos más 3 ventiladores de entrada a túnel encendidos.

En la Figura 3.43a se muestra la representación en 3D con 3 ventiladores de entrada al túnel de viento encendidos a una velocidad de 20 m/s, en la cual se observa que la velocidad en la cámara de pruebas es uniforme con un valor aproximado de 25 m/s. El aumento de la velocidad en la cámara de pruebas se debe a que se suma el flujo de los tres ventiladores de entrada.

En la Figura 3.43b se encuentran encendidos todos los ventiladores del túnel de viento, 3 de entrada y 6 en la cámara de pruebas. Asimismo, se ilustra como la velocidad no es uniforme y que su máxima es aproximadamente 30 m/s, entonces se logra alterar la capa de cortadura obteniendo una zona inestable en la cámara de pruebas.

En esta modificación se obtiene la concentración de aire en toda la cámara de pruebas por lo que la configuración de tres ventiladores a la entrada del túnel de viento es más adecuada que la anterior, sin embargo, también se realiza la prueba en el siguiente Apartado con el cambio a nueve ventiladores en la entrada al túnel de viento.

3.5 Modificación del túnel de viento a 9 ventiladores en la entrada

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con la modificación del túnel de viento, se hace evidente que la utilización de un número mayor de ventiladores en la entrada del túnel permite crear diferentes regiones dentro de la cámara de prueba, esto aunado a los ventiladores colocados en la cámara de pruebas. Se puede proponer el uso de más ventiladores en la entrada del túnel de viento, permitiendo así poder tener un número mayor de zonas en la cámara de pruebas debido al mayor número de combinaciones que se pueden generar.

A continuación, se realiza la propuesta de modificar los ventiladores de entrada al túnel de viento utilizando 9 ventiladores (con un diámetro de 0.30m), como se muestra en la geometría de la Figura 3.44.

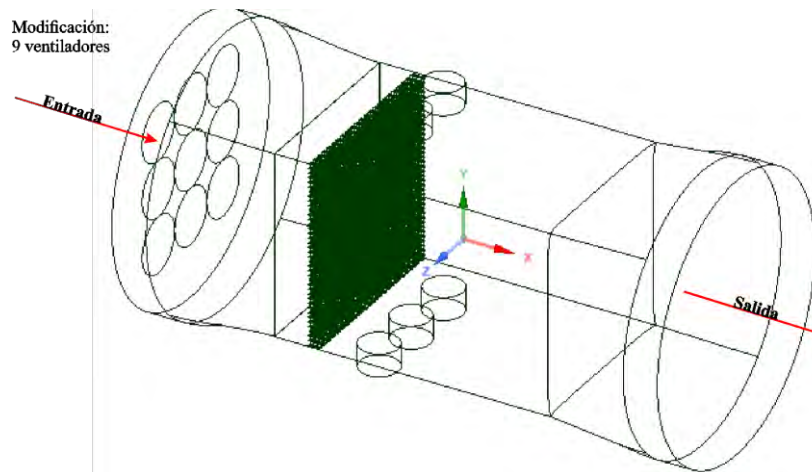


Figura 3.44 Modificación con 9 ventiladores en la entrada a túnel de viento.

Se realizan todas las etapas del paso 1 al 4 que se exponen en la Sección 3.3. En esta Sección únicamente se muestra la velocidad del fluido en la fase de post-procesamiento.

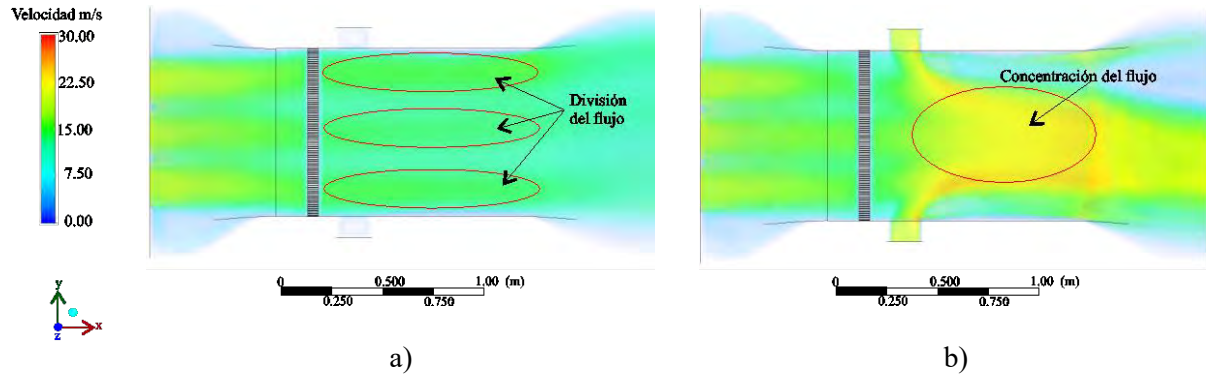


Figura 3.45 a) Post- CFD 9 ventiladores de entrada a túnel encendidos, b) Post- CFD 6 ventiladores de cámara de pruebas encendidos más 9 ventiladores de entrada a túnel encendidos.

Si se analiza la Figura 3.45a, se tiene que el flujo es dividido en tres secciones en la cámara de pruebas, lo cual permite generar tres zonas diferentes en la cámara de pruebas, se observa el mismo perfil en el flujo del viento para la parte superior e inferior del túnel de viento. Por otra parte, en la Figura 3.45b se observa el flujo concentrado en el centro debido a la entrada de aire por medio de los ventiladores de la cámara de pruebas. Los resultados obtenidos son semejantes al presentado anteriormente (Figura 3.43b), solamente se puede observar que se tiene una velocidad de viento inferior en la cámara de pruebas debido a que los ventiladores de entrada son de diámetro menor que en la modificación de 3 ventiladores y por lo tanto menor caudal.

En la siguiente Sección se realiza el análisis de la generación de turbulencias en el túnel de viento.

3.6 Análisis de la generación de turbulencias

Para realizar el análisis de la generación de turbulencias se utiliza la configuración de tres ventiladores a la entrada del túnel de viento, en base a las pruebas antes mencionadas. Asimismo, se enumeran todos los ventiladores del túnel de viento con la finalidad de identificar la combinación realizada en cada post-procesamiento y observar cómo se altera la capa de cortadura. La Figura 3.46 muestra la nomenclatura asignada a los diferentes ventiladores.

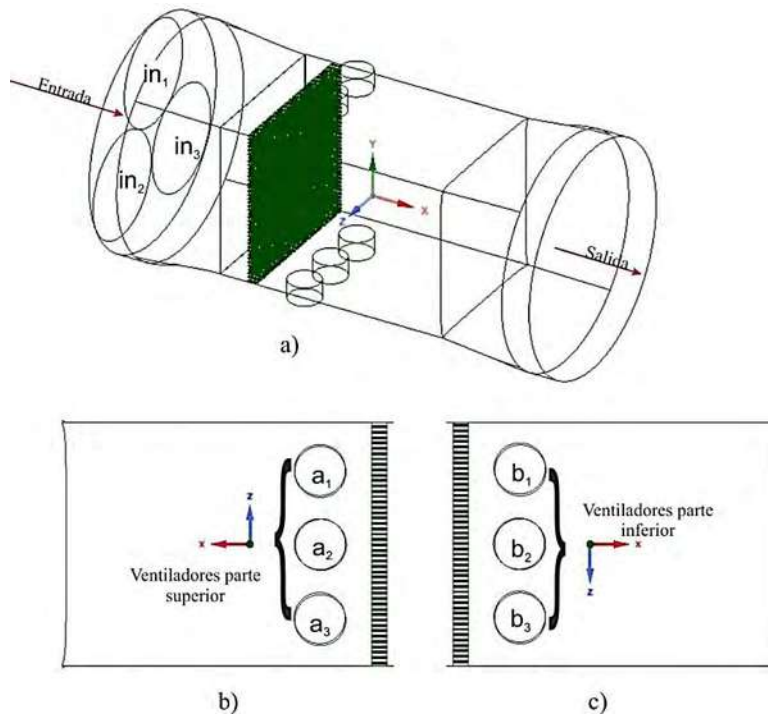


Figura 3.46 Enumeración de ventiladores del túnel de viento. a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores en cámara de pruebas parte superior y c) Ventiladores en cámara de pruebas parte inferior.

Teniendo en cuenta que se tienen tres ventiladores en cada una de las diferentes regiones del túnel de viento, diferentes combinaciones pueden ser realizadas, es decir que diferentes ventiladores pueden estar encendidos o apagados en diferente instante.

A continuación en la Tabla 3.3, se muestran las combinaciones posibles para cada región, donde 0 significa ventilador apagado y 1 ventilador encendido.

Tabla 3.3 Descripción de combinaciones de encendido o apagado de los ventiladores del túnel de viento.

| Ventiladores entrada | | | | Ventiladores cámara de pruebas superior | | | | Ventiladores cámara de pruebas inferior | | | |
|----------------------|--------|--------|-----------------|-----------------------------------------|-------|-------|-----------------|-----------------------------------------|-------|-------|-----------------|
| Nombre ventilador | | | Sistema decimal | Nombre ventilador | | | Sistema decimal | Nombre ventilador | | | Sistema decimal |
| in_1 | in_2 | in_3 | | a_1 | a_2 | a_3 | | b_1 | b_2 | b_3 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 1 | 0 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 6 | 1 | 1 | 0 | 6 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 1 | 1 | 1 | 7 | 1 | 1 | 1 | 7 | 1 | 1 | 1 | 7 |

De la Tabla 3.3, por ejemplo, si se tiene una imagen del post-procesamiento nombrada como: 7_7_7, significa que los tres ventiladores de entrada, y los seis ventiladores de la cámara de pruebas (3 superiores y 3 inferiores) están encendidos.

Por otra parte, como se están presentando imágenes de un modelo en tres dimensiones, es importante diferenciar la vista que se esté mostrando. Debido a esto, las imágenes de acuerdo a la vista son mostradas en relación al eje coordenado (ver Figura 3.47) en que están orientadas en el túnel de viento, como se describe a continuación:

- $X+$ = Salida.
- $X-$ = Entrada.
- $Y+$ = Parte superior.
- $Y-$ = Parte inferior.
- $Z+$ = Parte lateral izquierda.
- $Z-$ = Parte lateral derecha.

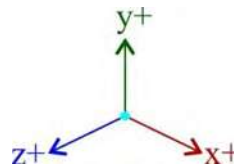


Figura 3.47 Eje Coordinado.

Una vez descrita la nomenclatura que se utiliza para identificar las combinaciones de ventiladores encendidos así como el punto de donde es visto el túnel, se presenta el concepto de simetría aplicado en el túnel de viento.

Para realizar el análisis de las diferentes combinaciones, se utiliza el concepto de simetría geométrica. La simetría geométrica representa las transformaciones en objetos físicos, elementos geométricos o figuras en relación a un eje, foco o plano (Wald, 1984). Esta simetría puede ser del tipo esférica, axial, especular o reflectiva, traslacional, antitraslacional, rotorreflexión, helicoidal, entre otros (ver Apéndice C).

En específico la simetría reflectiva es la que se utiliza para el análisis del comportamiento del flujo para las diferentes combinaciones. La simetría reflectiva es una transformación respecto de un plano de simetría, en la que cada punto de una figura se asocia a otro punto llamado imagen, que cumple con las siguientes condiciones (Wald, 1984):

- a. La distancia de un punto y su imagen al plano de simetría es la misma.
- b. El segmento que une un punto con su imagen, es perpendicular al plano de simetría.

El plano de simetría, se define como la superficie plana que dividen el objeto en dos mitades exactamente iguales (ver Figura 3.48). Y el centro de simetría son puntos imaginarios situados en el interior del objeto, en donde pasan los principales ejes y planos de simetría (Girbau, 1993). La Figura 3.48 muestra la simetría reflectiva.

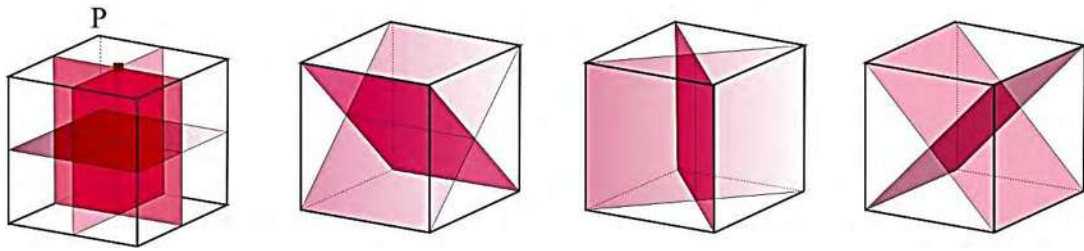


Figura 3.48 Simetría reflectiva.

Se propone tener dos planos simétricos (horizontal y vertical) entre dos o más combinaciones para comparar el flujo en la cámara de pruebas.

La Figura 3.49, muestra los cortes que se realizan en la cámara de pruebas con el objetivo de encontrar simetría en el comportamiento del flujo para las diferentes combinaciones. Se destacan los cortes del plano simétrico horizontal y vertical en el centro de la cama de pruebas, así como el centro de la simetría realizada.

Con lo descrito anteriormente, se pueden agrupar turbulencias generadas en zonas simétricas.

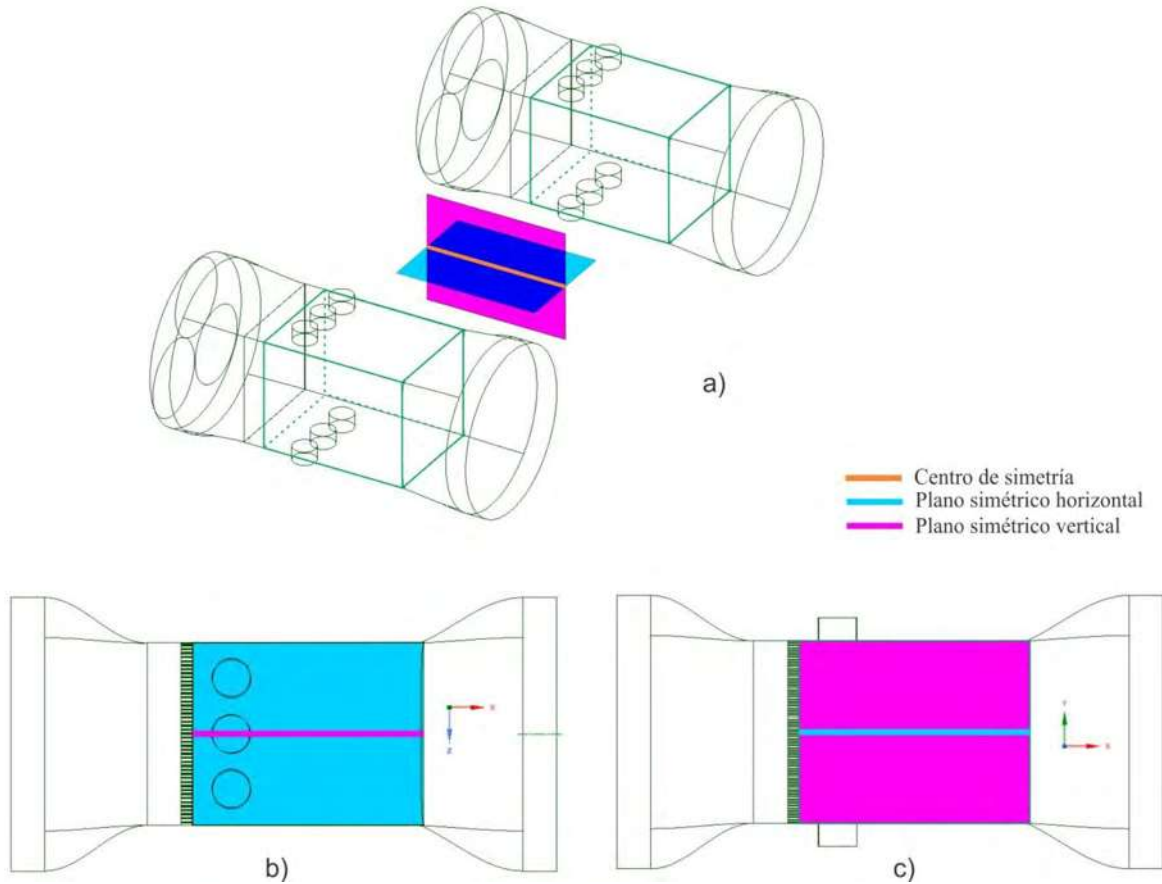


Figura 3.49 División virtual de cámara de pruebas. a) Vista isométrica, b) Vista superior, y c) Vista lateral izquierda.

En la siguiente Sección se presentan los casos en donde se obtiene simetría.

3.6.1 Casos de simetría

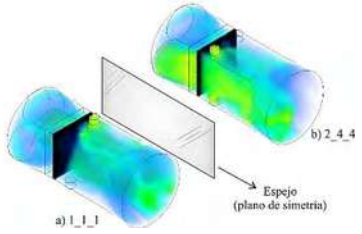
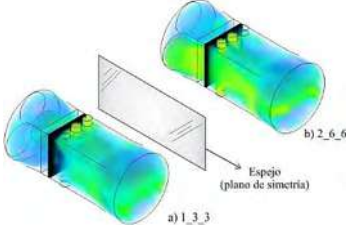
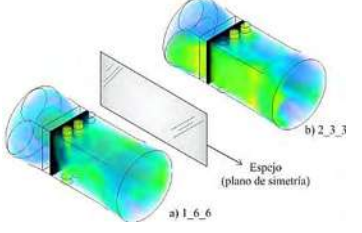
Primeramente, se modifica el encendido de los ventiladores a la entrada del túnel como lo indica el primer dígito de las combinaciones, en seguida se enciende de igual forma los ventiladores superiores e inferiores de la cámara de pruebas (ver Tabla 3.4), con el fin de perturbar la capa de cortadura como se explica en la Sección 3.2. Por cuestiones de presentación, para todos los ventiladores se considera que generan una velocidad de viento de 20 m/s .

En la Tabla 3.4 se muestra el número de caso asignado, así como las combinaciones que lo componen. De la Tabla 3.3 se obtienen las combinaciones para las columnas 2 y 3, por ejemplo, si es utilizada la combinación 1_1_1, significa que los ventiladores in_3 , a_3 y b_3 están encendidos (ver Figura

3.46). También, en las columnas 4 y 5 se indica si el caso tiene simetría horizontal, vertical o ambas; si el círculo se encuentra en color gris indica que se encontró simetría. Asimismo, en la columna de velocidad de cámara de pruebas se muestran la velocidad mínima y máxima, esta velocidad es obtenida del post-procesamiento de la simulación de los casos en ANSYS Fluent. Finalmente, la última columna presenta una imagen donde se muestra la simetría reflectiva del caso.

Para tener una mejor comprensión de la información de la Tabla 3.4, se presenta como ejemplo el Caso 12, el cual está conformado por dos combinaciones 7_3_3 y 7_6_6 en las cuales (al realizar la simulación en ANSYS Fluent) se observó simetría. La simetría que muestra este caso es horizontal y vertical (columnas 4 y 5), y su velocidad varía en la cámara de pruebas desde 20 a 30 m/s (columnas 6 y 7). La columna 8 ilustra lo descrito en las columnas previas, donde la simetría es reflectiva.

Tabla 3.4 Casos de combinaciones simétricas del comportamiento del flujo en la cámara de pruebas.

| Caso | Combinaciones simétricas | | Simetría | | Velocidad en cámara de pruebas (m/s) | | Plano de simetría |
|------|--------------------------|-------|------------|----------|--------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | Horizontal | Vertical | Min | Máx | |
| 1 | 1_1_1 | 2_4_4 | ● | ● | 10 | 22.5 |  |
| 2 | 1_3_3 | 2_6_6 | ● | ● | 15 | 25 |  |
| 3 | 1_6_6 | 2_3_3 | ● | ● | 15 | 25 |  |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|---|----|------|--|
| 4 | 3_1_1 | 3_4_4 | ● | ● | 17 | 25 | |
| 5 | 3_3_3 | 3_6_6 | ● | ● | 17 | 27 | |
| 6 | 4_1_1 | 4_4_4 | ● | ● | 15 | 22.5 | |
| 7 | 4_3_3 | 4_6_6 | ● | ● | 15 | 25 | |
| 8 | 5_1_1 | 6_4_4 | ● | ● | 17 | 25 | |
| 9 | 5_3_3 | 6_6_6 | ● | ● | 17 | 27 | |
| 10 | 5_4_4 | 6_1_1 | ● | ● | 17 | 25 | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|---|----|------|--|
| 11 | 7_1_1 | 7_4_4 | ● | ● | 20 | 27.5 | |
| 12 | 7_3_3 | 7_6_6 | ● | ● | 20 | 30 | |

Adicionalmente, la Tabla 3.4 muestra solamente algunos casos en donde se observa simetría en las combinaciones realizadas, otros 12 casos distintos son mostrados en el Apéndice D. Como ejemplos del análisis de la simetría y la generación de turbulencia se exponen los casos 1 y 12. Se eligen estos casos debido a que es donde existe mayor cambio en el comportamiento del flujo, por ejemplo, en el caso 1 se tiene una menor velocidad en la cámara de pruebas ya que en la entrada al túnel de viento sólo está encendido el ventilador in_3 , por lo que hay más pérdidas de velocidad (menor flujo), de lo anterior se observa que el comportamiento del flujo afecta la parte lateral derecha (combinación 1_1_1) o izquierda (combinación 2_4_4) de la cámara de pruebas. Por otra parte, para el caso 12 los tres ventiladores de entrada se encuentran encendidos, por lo tanto se tiene un incremento de la velocidad en la cámara de pruebas debido a que se incrementó el flujo de entrada. Con lo anterior se observa que para ambas combinaciones del caso 12 (7_3_3 y 7_6_6) el comportamiento del flujo afecta todas las zonas de la cámara de pruebas (ver Figura 3.49)

Por otra parte, el análisis de los casos puede ser comparo con los mostrados en la Figura 3.43a (ver Sección 3.4), debido a que presenta el túnel de viento con los 3 ventiladores de entrada encendidos a una velocidad de 20 m/s y ninguno encendido en la cámara de pruebas, es decir no se presenta una alteración en la capa de cortadura. También, en la Figura 3.43a se aprecia que la velocidad en la cámara de pruebas es uniforme con un velocidad próxima a 25 m/s .

En las siguientes subsecciones se muestran a detalle los dos casos de estudio seleccionados.

3.6.2 Caso de estudio: Caso 1, combinaciones 1_1_1 y 2_4_4

Considerando como caso de estudio el Caso 1 (Tabla 3.4), se tienen las combinaciones simétricas 1_1_1 y 2_4_4. La selección del Caso 1 permite realizar el análisis de las turbulencias considerando el encendido de un solo ventilador a la entrada del túnel de viento.

La Figura 3.50 presenta a detalle otras vistas de las dos combinaciones para este caso. El caso analizado presenta simetría en el plano vertical (plano Y) del comportamiento del flujo, es decir, que si se compara la Figura 3.50b con la Figura 3.50g, se puede observar la misma distribución del flujo de la velocidad del viento. Lo mismo sucede comparando la Figura 3.50d con la Figura 3.50i, debido a la simetría vertical que se tiene en el caso. Por otra parte, también se tiene simetría horizontal (plano Z) en el comportamiento del flujo, esto se ve reflejado si se compara la Figura 3.50c y la Figura 3.50j, así como también comparando la Figura 3.50e y Figura 3.50h.

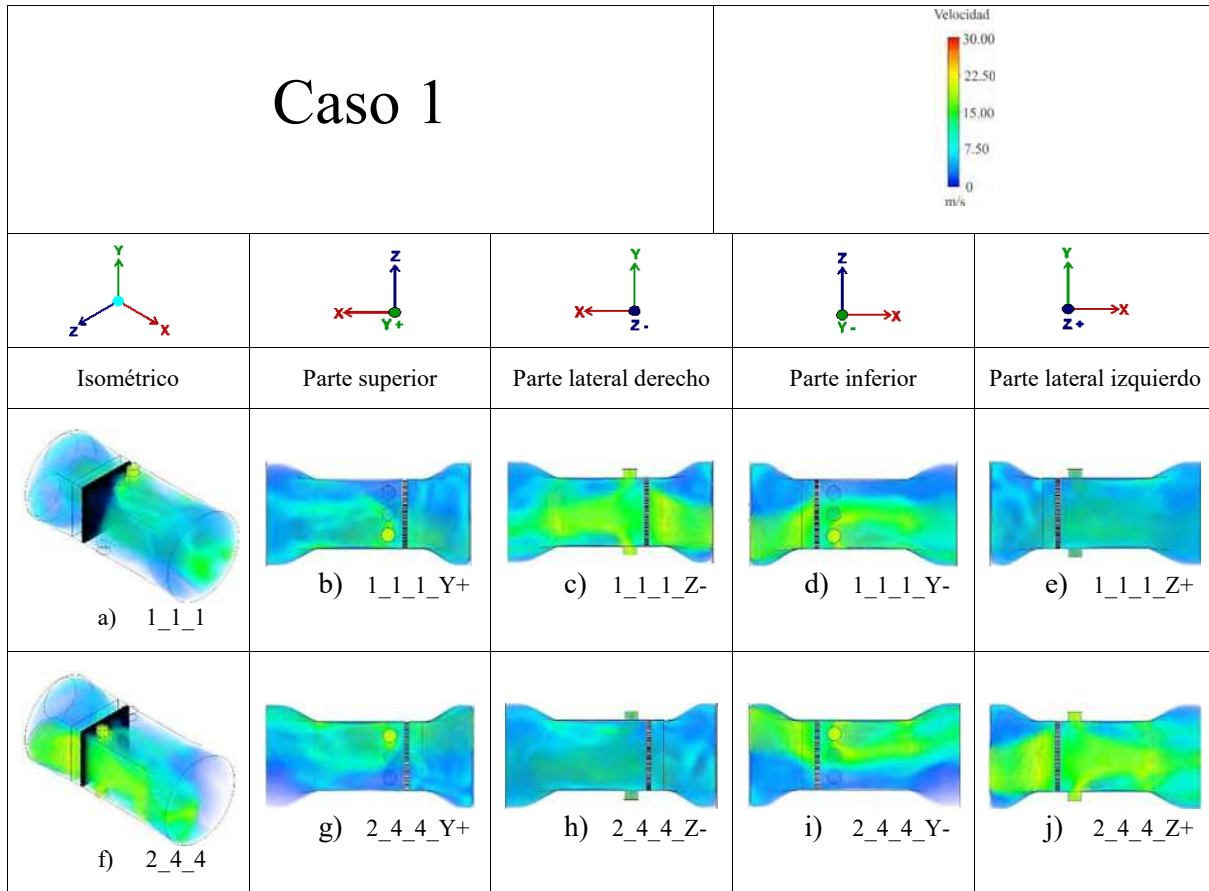


Figura 3.50 Caso 1.

Así, si se analiza el comportamiento del flujo en la cámara de pruebas del túnel de viento se observa que se pierde el flujo laminar con respecto al plano vertical (plano Y) orientado hacia la parte inferior del túnel, ya sea de lado derecho (Figura 3.50d) o izquierdo (Figura 3.50i) según sea la combinación, y se presenta una reducción de flujo en la parte inferior del túnel del lado opuesto, viendo de frente al túnel. También se observa que, si el flujo está orientado a la parte inferior del túnel, por ejemplo, el plano Y – (ver Figura 3.50d), se tendrá la mayor concentración de flujo en el centro del plano Z (parte lateral izquierda o derecha) como se ilustran en las Figura 3.50c y Figura 3.50j.

Asimismo, si cambiamos la perspectiva a una vista isométrica se observa de una mejor manera lo mencionado en el párrafo anterior, como se muestra en la Figura 3.51. La Figura 3.51 muestra la simetría que tienen las combinaciones del caso 1 si estas se reflejarán en un espejo. Lo anterior significa que, si se requiere generar una turbulencia orientada hacia la parte inferior de la cámara de pruebas (ver túnel en el plano Y), y con un comportamiento de flujo lateral centrado (perspectiva en plano Z) será necesario utilizar alguna de las dos combinaciones (esto dependiendo de la zona en la que se quiera tener la turbulencia).

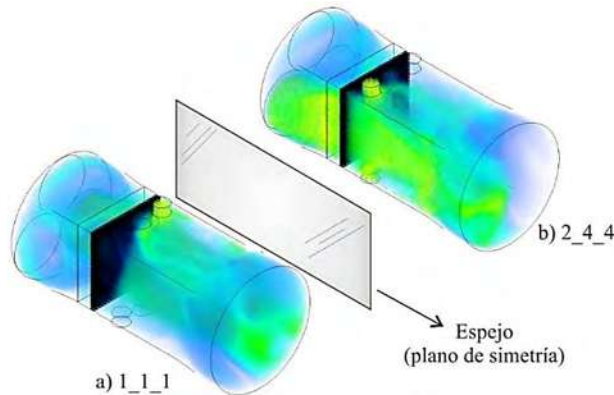


Figura 3.51 Caso 1, plano de simetría.

Con respecto al análisis de la velocidad del viento, se tiene que en ambas combinaciones de la Figura 3.50 la velocidad máxima es 22.5 m/s aproximadamente, la velocidad disminuye debido a que sólo un ventilador está encendido en la entrada al túnel de viento, es decir se tiene una menor cantidad de flujo de entrada. También, en la cámara de pruebas se encuentran encendidos dos ventiladores, uno en la parte inferior y otro en la parte superior, lo que provoca que el flujo en la cámara de pruebas no sea uniforme y además reduzca su velocidad hasta 10 m/s , es decir, se genera una turbulencia tipo mecánica al alterar la capa de cortadura (ver Sección 3.2).

3.6.3 Caso de estudio: Caso 12, combinaciones 7_3_3 y 7_6_6

Considerando el caso 12 (mostrado en la Tabla 3.4), la Figura 3.52 muestra las vistas posibles de este caso, el cual está conformado por las combinaciones simétricas 7_3_3 y 7_6_6 (ver Tabla 3.4). Las figuras que visualmente tienen una simetría en el plano vertical del comportamiento del flujo son: la Figura 3.52b con la Figura 3.52g, así como también la Figura 3.52d y Figura 3.52i. Por otra parte, las figuras que presentan una simetría horizontal de la velocidad del aire son: la Figura 3.52c con la Figura 3.52j y también la Figura 3.52e y Figura 3.52b. Además, las dos combinaciones tienen simetría en el plano horizontal, la cual se ve reflejada en la comparación de la Figura 3.52b con la Figura 3.52d y también de la Figura 3.52g con la Figura 3.52i. El tener una simetría horizontal significa que el comportamiento del flujo será igual tanto en la parte superior como en la parte inferior del túnel debido a que se encuentran encendidos los tres ventiladores a la entrada del túnel.

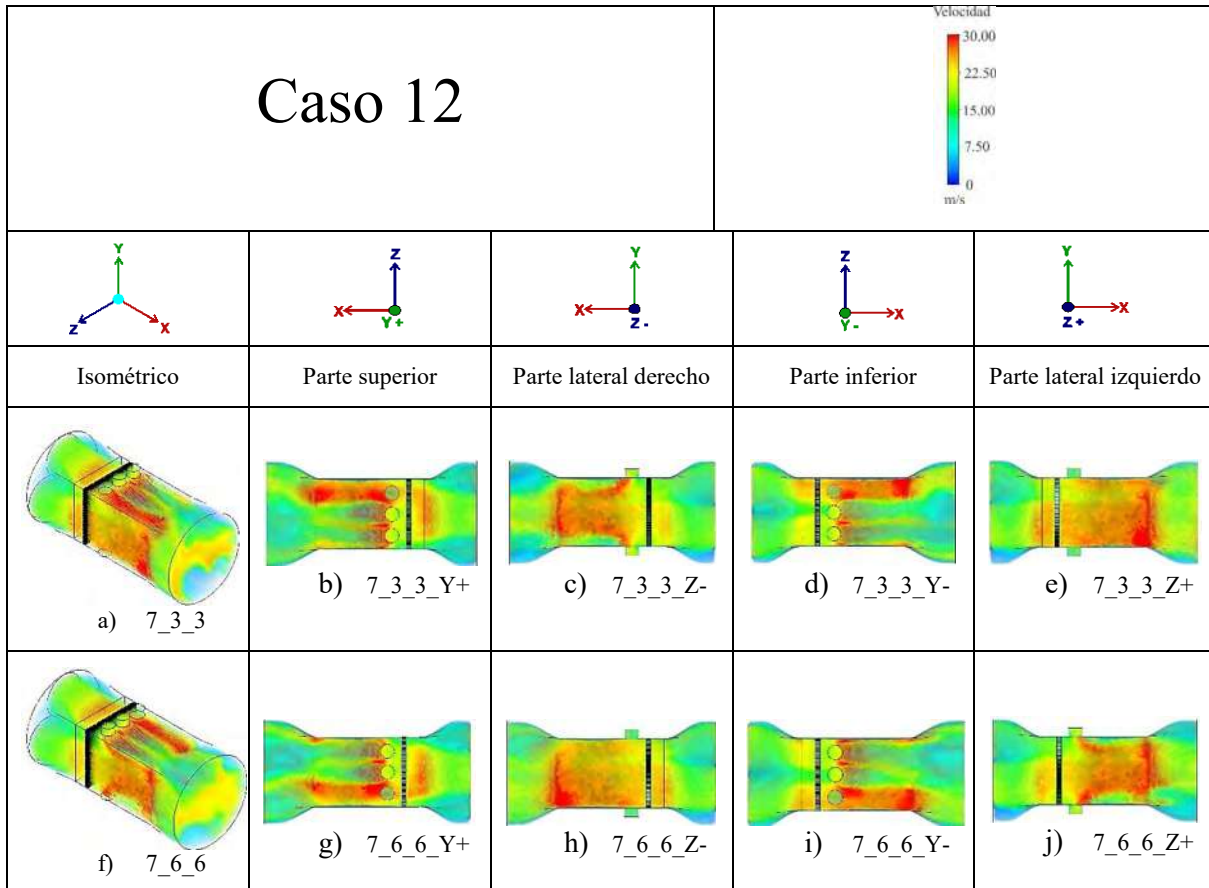


Figura 3.52 Caso 12.

Al examinar el comportamiento del flujo dentro del túnel de viento se tiene una alteración simétrica vertical del flujo en la parte superior del túnel (plano $Y +$) y en la parte inferior (plano $Y -$) teniendo mayor concentración de flujo en el lado izquierdo (Figura 3.52b y Figura 3.52d) o derecho (Figura 3.52g y Figura 3.52i) según sea la combinación, y menor concentración de flujo en el lado opuesto del mismo plano. Sin embargo, en las partes laterales (Plano Z) no se observa la misma simetría, por ejemplo, tenemos una simetría vertical en la Figura 3.52b con la Figura 3.52g y se esperaría una simetría igual en los laterales, pero no es así, existe simetría horizontal en la Figura 3.52c con Figura 3.52j y Figura 3.52e con Figura 3.52h, lo que significa que es simétrica la parte lateral derecha de la combinación 7_3_3 (ver Figura 3.52c y Figura 3.52e) con la parte lateral izquierda de la combinación 7_6_6 (ver Figura 3.52j y Figura 3.52h).

La Figura 3.53 muestra la perspectiva isométrica para ambas combinaciones, así como la simetría que comparten. Lo anterior significa que, si queremos generar una turbulencia con la mayor cantidad de flujo en el lado derecho o izquierdo de la parte superior e inferior de la cámara de pruebas (ver túnel en el plano Y), y con un comportamiento de flujo lateral derecho o izquierdo centrado y en lado opuesto un flujo más uniforme (perspectiva en plano Z) se puede utilizar cualquiera de las dos combinaciones, únicamente teniendo en cuenta en que zona se desean estas características.

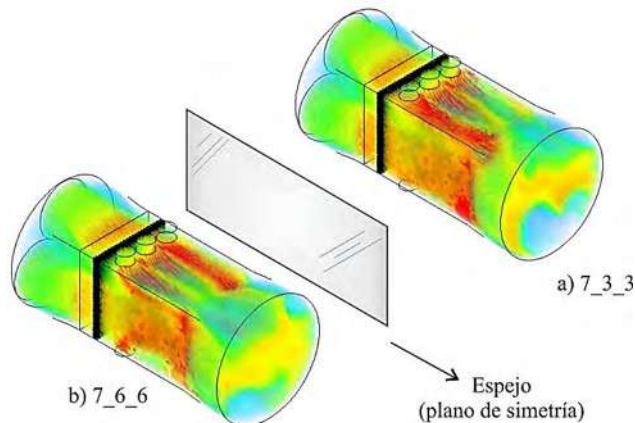


Figura 3.53 Caso 12, plano de simetría.

En lo que se refiere al análisis de la velocidad del viento en la cámara de pruebas, se tiene que en ambas combinaciones de la Figura 3.52 la velocidad máxima es 30 m/s aproximadamente, y la velocidad mínima es próxima a 20 m/s . También, en la cámara de pruebas se encuentran encendidos cuatro ventiladores, dos en la parte inferior y dos en la parte superior, lo que provoca que el flujo en la cámara de

pruebas no sea uniforme y además del lado donde el ventilador no está encendido se presenta la mayor velocidad al no alterar la capa de cortadura de ese lado. Lo descrito anteriormente, genera una turbulencia tipo mecánica al alterar la capa de cortadura (ver Sección 3.2).

En el Apéndice D se presentan los casos de simetría restantes que completan a los 12 casos presentados en la Tabla 3.4.

3.7 Conclusiones

La generación del viento y turbulencias fue presentada en el presente Capítulo. Para lo anterior, la simulación del túnel de viento se realizó utilizando el software ANSYS Fluent, el cual permite analizar el comportamiento del viento en su recorrido por la cámara de pruebas. Este programa aproxima la solución del comportamiento del flujo por medio de volúmenes finitos, por lo que los resultados obtenidos dependen del número de elementos utilizados en la malla, además estos se perfeccionan al tener una malla con el menor número de elementos asimétricos, lo cual es vital para obtener buenos resultados. La calidad de la malla se mide con la herramienta de asimetría (Skewness), la cual permite identificar cambios en los elementos del modelo con respecto a los elementos originales.

Se presentó la propuesta del diseño del túnel para poder generar una turbulencia de tipo mecánica, la cual se forma a partir de dos velocidades de la misma intensidad, pero con sentidos opuestos consiguiendo alterar la capa de cortadura.

Analizando las diferentes configuraciones se concluye que la más viable es la de tres ventiladores a la entrada del túnel de viento, puesto que el fluido que presenta es uniforme en toda la cámara de pruebas, y así se tiene la posibilidad de realizar experimentaciones con objetos de mayor tamaño.

También se realizaron 48 combinaciones de ventiladores activados para generar viento y turbulencias, en donde se observó que hay combinaciones que si se coloca un espejo entre ellas se reflejan, estos casos se agruparon introduciendo el concepto de simetría, en total se obtuvieron 24 casos que cumplen con este concepto. De los anteriores casos, sólo 12 fueron presentados en este Capítulo, los 12 restantes son mostrados en el Apéndice D.

En el presente Capítulo, se realizó un análisis de dos casos en específico, esto con el fin de mostrar las características que presentan en cuanto a su simetría y generación de la turbulencia en diferentes zonas. Los demás casos que no son presentados pueden ser analizados de la misma manera.

Capítulo 4

4 Ley de control de generación de viento y turbulencias

4.1 Introducción

En el presente Capítulo se expone la propuesta para el control de la turbulencia generada en la cámara de pruebas del túnel de viento. Se presenta el modelo del motor de corriente directa elegido como sistema a controlar, así como también la electrónica de potencia necesaria para realizar su control. La validación del control y del sistema es verificada realizando una co-simulación utilizando el modelo Fluent del túnel de viento, en conjunto con ANSYS Simpler. Se presentan los resultados obtenidos para los dos casos de estudio presentados en el Capítulo 3.

4.2 Elementos del sistema

En esta Sección se presentan los diferentes elementos que conforman el sistema completo del túnel de viento. La Figura 4.1 muestra el diagrama a bloques utilizado para realizar el control de la generación del viento y de las turbulencias.

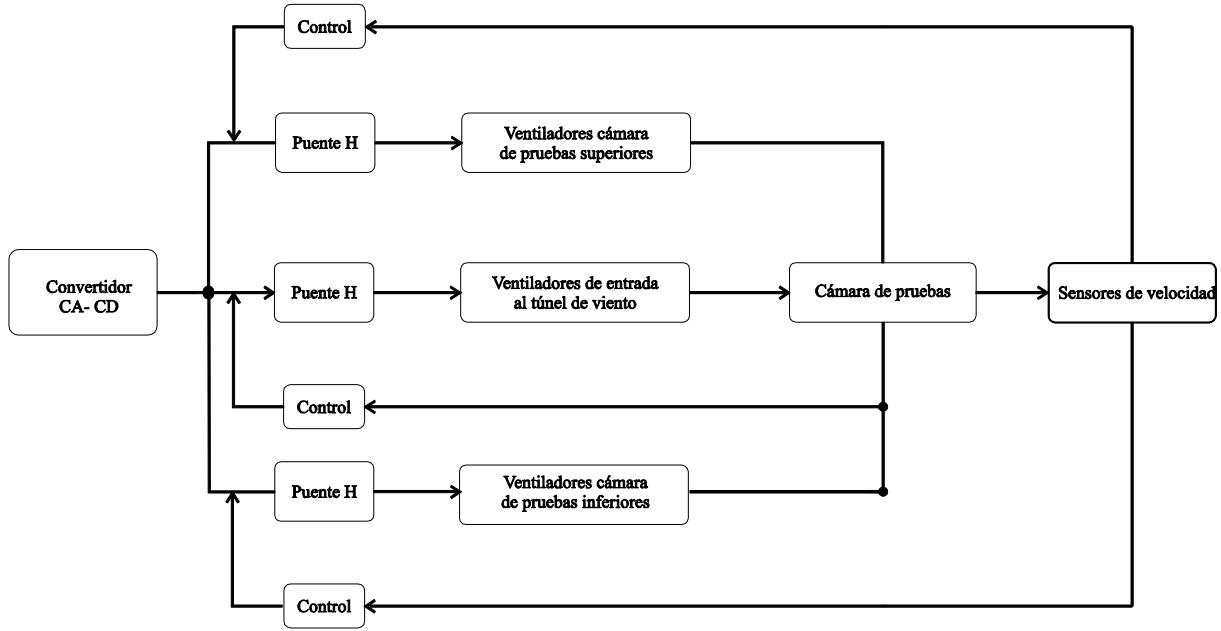


Figura 4.1 Diagrama de flujo del control.

En la Figura 4.1, el componente Convertidor CA-CD, realiza la conversión que proporciona el voltaje y corriente continua para impulsar los motores de CD (ventiladores). Los puentes H que se presentan en el diagrama son utilizados con el fin de controlar la velocidad del ventilador con el giro del motor y con ello mantener constante la velocidad elegida tanto en los ventiladores de entrada como en los ventiladores de la cámara de pruebas del túnel de viento. Los sensores de velocidad son necesarios para medir que velocidad hay en la zona de pruebas y así poder regular la velocidad de viento que está presente en cada una de las zonas de la cámara de pruebas y con esto identificar la turbulencia generada.

En las siguientes Subsecciones se explican cada uno de los elementos del diagrama de la Figura 4.1.

4.2.1 Convertidor CA- CD

Se utiliza un convertidor trifásico, el cual convierte una corriente alterna de entrada a una corriente continua de salida, por medio de dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias, llamado también rectificador trifásico. La ventaja de usar un rectificador trifásico en vez de uno monofásico es su mejor eficiencia, presenta menor rizado en la señal de salida y además es capaz de operar con grandes potencias, es decir produce voltajes y corrientes continuas que impulsan grandes cargas de potencias, tales como motores de CD (Rashid, 1995).

El rectificador trifásico es no controlado de seis pulsos debido a que se encuentra constituido por diodos como se muestra en la Figura 4.2.

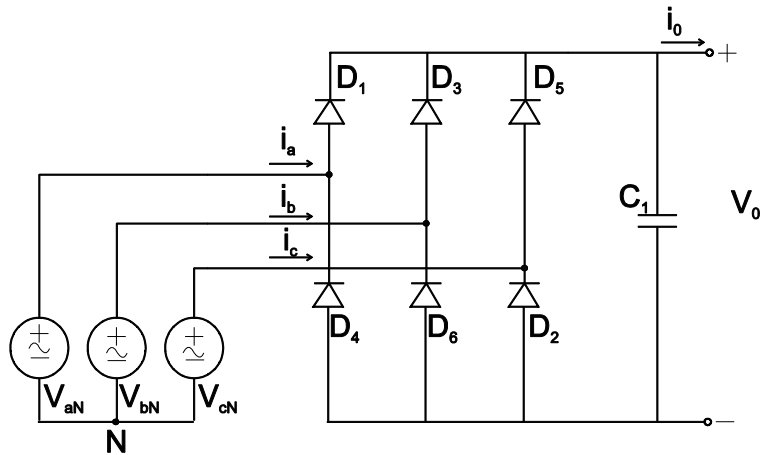


Figura 4.2 Convertidor trifásico (Rashid, 1995).

El rectificador es no controlado debido a que no importa controlar la potencia de salida del rectificador, esto significa que para un voltaje fijo de entrada, tendremos un voltaje de salida fijo. Las secuencias de conducción para los diodos son: $D_1 - D_2$, $D_2 - D_3$, $D_3 - D_4$, $D_4 - D_5$, $D_5 - D_6$ y $D_6 - D_1$. La Figura 4.3 muestra la conducción para el diodo D_1 , se observa que entre el periodo de $\pi/3$ a $2\pi/3$ conducen los diodos D_6 y D_1 ; durante el periodo de $2\pi/3$ a π conducen los diodos D_1 y D_2 , lo que implica que cada diodo conduce $2\pi/3$ radianes o 120° (Rashid, 1995).

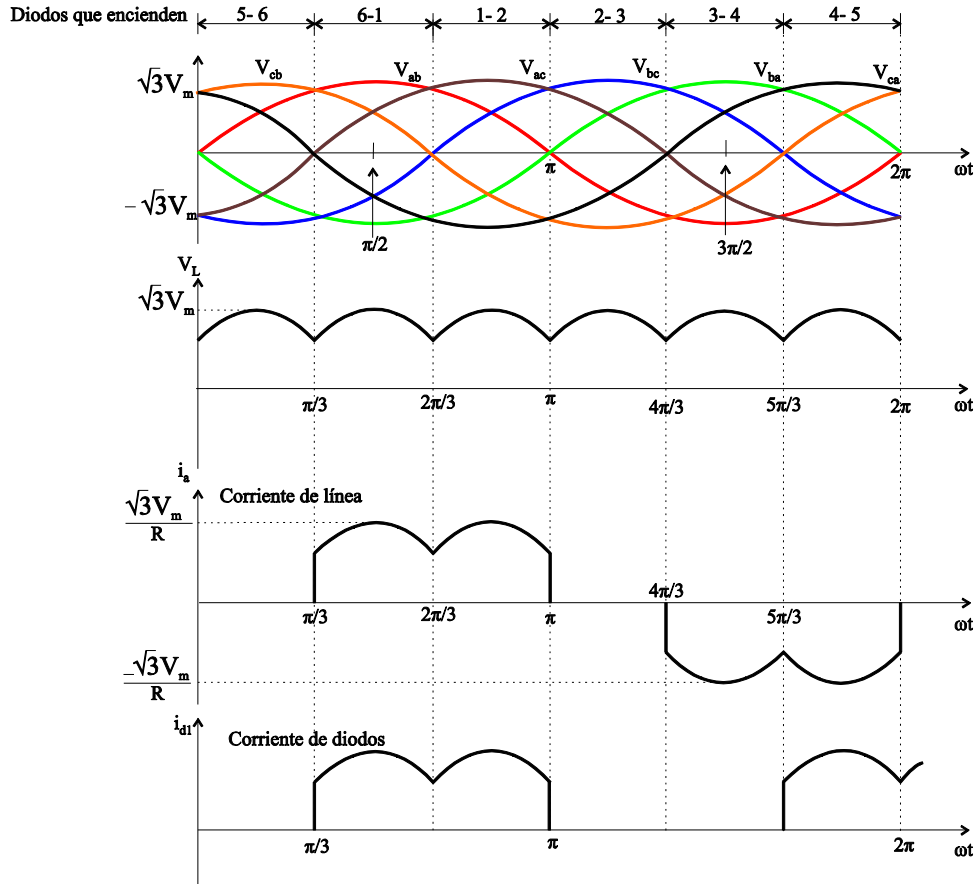


Figura 4.3 Forma de onda y ángulo de conducción de los diodos (Rashid, 1995).

4.2.2 Puente H

El Puente H es un circuito que permite controlar el giro de un motor de corriente continua, es decir, que gire en ambos sentidos (horario y antihorario) (Kosow, 1993).

Un puente H se construye a partir de cuatro interruptores como se muestra en la Figura 4.4.

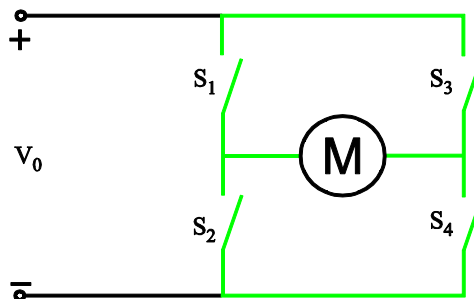


Figura 4.4 Puente H.

Es sencillo el funcionamiento del puente H, cuando los interruptores S_1 y S_4 están cerrados, así como S_2 y S_3 abiertos, se aplica un voltaje positivo al motor, es decir el motor gira en sentido horario (ver Figura 4.5.a). Entonces cuando S_2 y S_3 están cerrados y S_1 y S_4 abiertos, el voltaje se invierte, como consecuencia el motor gira en sentido inverso, es decir, antihorario (ver Figura 4.5.b).

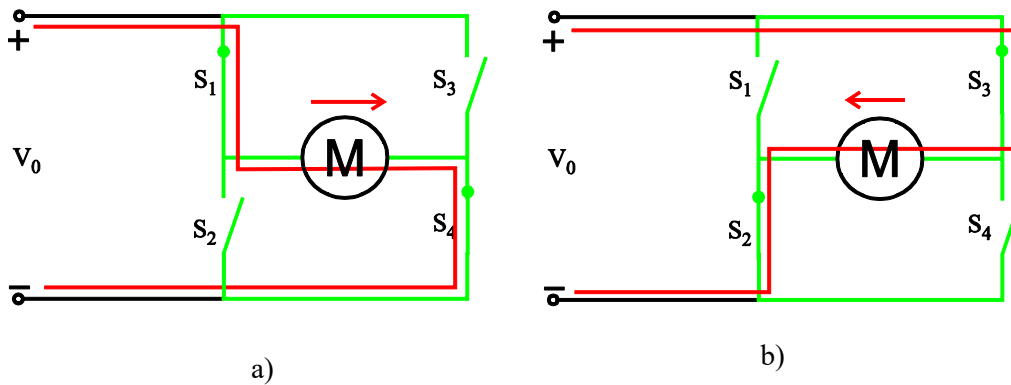


Figura 4.5 Puente H, a) Motor gira en sentido horario, b) Motor gira en sentido antihorario.

En relación a las aplicaciones del puente H, además de controlar el sentido del giro de un motor de CD, también es usado para frenar repentinamente al motor, haciendo corto circuito entre las terminales del motor. La Tabla 4.1 presenta las combinaciones de los interruptores, donde se describe la acción que presenta o realiza el motor de corriente continua (Kosow, 1993).

Tabla 4.1 Combinaciones de los interruptores del puente H.

| S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | Motor cd |
|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 | Gira en sentido horario |
| 0 | 1 | 1 | 0 | Gira en sentido antihorario |
| 0 | 0 | 0 | 0 | Frena baja su propia inercia |
| 1 | 0 | 1 | 0 | Frena bruscamente |

De igual forma, la Tabla 4.1 muestra que cuando todos los interruptores están abiertos, el puente H funciona también para frenar el motor bajo su propia inercia, se desconecta al motor de la fuente de alimentación (Kosow, 1993).

4.2.3 Ventiladores

Como ya se mencionó anteriormente, se utilizan motores de CD para cada uno de los ventiladores del túnel de viento. La Figura 4.6 muestra el diagrama esquemático de un motor de CD con excitación permanente, el cual es utilizado para la simulación en el programa ANSYS Simplorer.

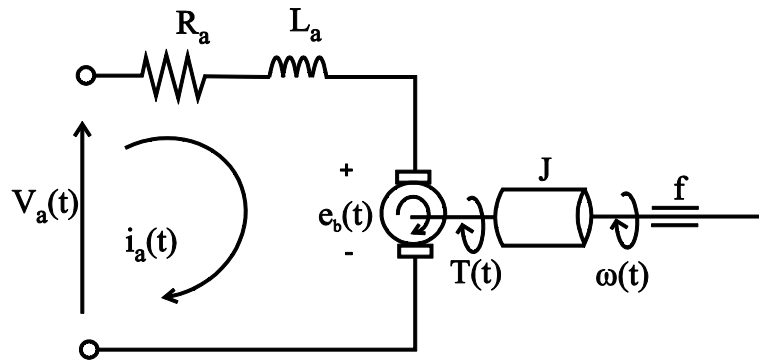


Figura 4.6 Motor de CD.

La Ecuación eléctrica del motor de la Figura 4.6 tiene la forma:

$$V_a(t) = i_a(t) \cdot R_a + \frac{di_a(t)}{dt} \cdot L_a + e_b(t) \quad (4.1)$$

donde $V_a(t)$ representa el voltaje de entrada de armadura, $i_a(t)$ la corriente eléctrica de armadura, $e_b(t)$ la fuerza contraelectromotriz, R_a la resistencia de armadura y L_a la inductancia del rotor.

La fuerza contraelectromotriz (e_b) está definida como:

$$e_b(t) = k_b \cdot \omega(t) \quad (4.2)$$

donde $\omega(t)$ la velocidad angular del motor, k_b constante de la fuerza contraelectromotriz.

La Ecuación de par que depende de la corriente de armadura es:

$$T(t) = k_a \cdot i_a(t) \quad (4.3)$$

donde $T(t)$ simboliza el par del motor y sus unidades son $N \cdot m$ y k_a la constante del par.

Para modelar la parte mecánica en un motor de CD, el par producido esta expresado como:

$$T(t) = f \frac{d\theta(t)}{dt} + J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (4.4)$$

Si consideramos la velocidad de salida:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Se tienen que,

$$T(t) = f \cdot \omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4.6)$$

donde J representa el momento de inercia del motor y su unidad es $kg \cdot m^2$ y f el coeficiente de fricción viscosa.

La Ecuación (4.1) puede simplificarse considerando que la constante electrica del motor es mucho menor que la constante mecánica, es decir se desprecia el factor de la inductancia L_a , entonces la Ecuación queda:

$$V_a(t) = i_a(t) \cdot R_a + k_b \cdot \dot{\theta}(t) \quad (4.7)$$

Si la Ecuación (4.3), la sustituimos en la Ecuación (4.4) y se despeja la corriente $i_a(t)$, se tiene que:

$$i_a(t) = \frac{f\dot{\theta}(t) + J\ddot{\theta}(t)}{k_a} \quad (4.8)$$

Así pues, la Ecuación (4.7) queda:

$$V_a(t) = \left(\frac{R_{af}}{k_a} + k_b\right) \dot{\theta}(t) + \frac{JR_a}{k_a} \ddot{\theta}(t) \quad (4.9)$$

$$V_a(t) = \left(\frac{R_{af}}{k_a} + k_b\right) \omega(t) + \frac{JR_a}{k_a} \dot{\omega}(t) \quad (4.10)$$

La Ecuación (4.9) representa la Ecuación del motor simplificada, la cual es una Ecuación diferencial de primer orden para la velocidad angular y de segundo orden para la posición angular.

Al aplicar la transformada de Laplace a la Ecuación (4.10), se obtiene la función de transferencia de la velocidad angular en relación con la entrada del motor:

$$G_{\dot{\theta}}(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_a}{(JR_a)s + (R_{af} + K_a K_b)} = \frac{1}{\frac{JR_a}{K_a}s + \left(\frac{R_{af}}{K_a} + K_b\right)} \quad (4.11)$$

4.3 Ley de control

Para formular la ley de control se utiliza el concepto de inversión del sistema. La variable elegida a controlar es la velocidad angular ω del motor de corriente continua, la cual se toma de la Ecuación (4.11), la cual se considera como el sistema inverso de control en lazo abierto.

A continuación, para cerrar el lazo de la ley de control, se impone la dinámica del error:

$$\varepsilon = (\omega_{ref} - \omega) \quad (4.12)$$

Escribiendo,

$$\dot{\varepsilon} + k\varepsilon = 0 \quad (4.13)$$

donde k representa la dinámica del regulador elegida.

De esta manera, si se reemplaza ω por $\omega_{ref} - \varepsilon$ en (4.10) la expresión de la ley de control es:

$$V_a(t) = \left(\frac{R_{af}}{k_a} + k_b \right) (\omega_{ref} - \varepsilon) + \frac{J R_a}{k_a} \cdot \frac{d}{dt} (\omega_{ref} - \varepsilon) \quad (4.14)$$

$$A = \frac{J R_a}{k_a} \quad y \quad B = \frac{R_{af}}{k_a} + k_b \quad (4.15)$$

$$V_a(t) = B(\omega_{ref} - \varepsilon) + A \cdot \frac{d}{dt} (\omega_{ref} - \varepsilon) \quad (4.16)$$

$$V_a(t) = B\omega(t) + A\dot{\omega}_{ref}(t) + Ak\varepsilon(t) \quad (4.17)$$

En esta ley de control (4.17) se encuentra una acción de control proporcional (k) en el trayecto directo, y una acción derivativa sobre la referencia, donde k es elegida a conveniencia. Aparece una acción derivativa, a consecuencia de la utilización del verdadero modelo inverso utilizado para su obtención. En la práctica, las acciones derivativas sobre la referencia no son comúnmente utilizadas, debido a que introducen ruido al sistema. Normalmente, la implementación de una acción derivada se realiza utilizando un filtro, o una aproximación de la acción derivativa.

Al aplicar la transformada de Laplace a la Ecuación (4.17), se obtiene,

$$V_a(s) = B \cdot \omega(s) + As \cdot \omega_{ref}(s) + A \cdot C(s) \cdot \varepsilon(s) \quad (4.18)$$

Se elige un corrector tipo proporcional + integral como controlador $C(s)$,

$$C(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (4.19)$$

Así, la Ecuación (4.18) se muestra en la Figura 4.7 en su esquema a bloques en lazo cerrado.

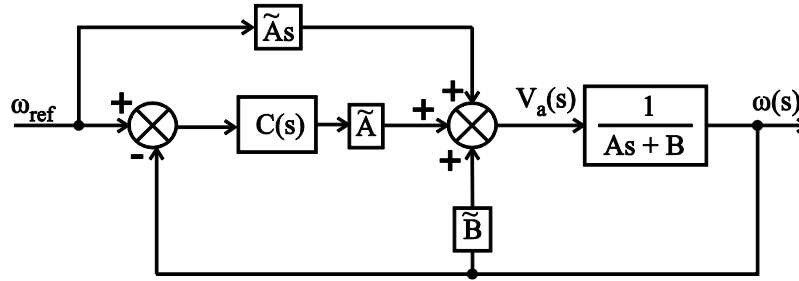


Figura 4.7 Esquema a bloques de la ley de control.

Del diagrama a bloques de la Figura 4.7, \tilde{A} y \tilde{B} corresponden a los parámetros que aparecen de forma implícita en la ley de control y se consideran una aproximación de los del sistema real (A y B). La función de transferencia en lazo cerrado está dada por:

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}} = \left(\frac{s}{C(s)} + 1 \right) \cdot \left(\frac{C(s) \cdot \tilde{A}}{As + B - \tilde{B} + C(s) \tilde{A}} \right) = \frac{\tilde{A}s + C(s) \tilde{A}}{As + B - \tilde{B} + C(s) \tilde{A}} \quad (4.20)$$

Si los valores estimados coinciden perfectamente a los reales ($\tilde{A} = A$ y $\tilde{B} = B$), se tiene:

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}} = \frac{\tilde{A}s + C(s) \tilde{A}}{As + C(s) \tilde{A}} = 1 \quad (4.21)$$

De la Ecuación (4.21), se verifica que la referencia es seguida perfectamente, si los valores estimados coinciden exactamente con los valores del sistema. Lo anterior sería un caso ideal, pero en la práctica es común que los parámetros presenten algunas variaciones o diferencias, sin embargo ha sido demostrado que la estructura de control es robusta ante una variación paramétrica en estos valores (Sánchez, et al., 2010). La robustez que presenta la estructura de control para este caso en específico permite que el control del motor de CD se realice de una manera correcta, aun cuando el modelo del motor o del túnel de viento no sean conocidos o identificados de una manera correcta.

El análisis de estabilidad no se presenta, debido a que el modelo del túnel de viento se desconoce, y además si se realiza un análisis de la estabilidad del sistema, éste se podría realizarse considerando

únicamente el modelo del motor de CD. Sin embargo, el realizar lo anterior no tendría una relevancia considerable, debido a que ya se ha demostrado que la ley de control aunada al sistema son estables.

4.3.1 Cálculo de las ganancias del controlador

Para el cálculo de las ganancias del controlador se utiliza el polinomio característico de la Ecuación (4.20), el cual se compara con la siguiente Ecuación general de segundo orden:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \tag{4.22}$$

Entonces, las ecuaciones para el cálculo de las ganancias del controlador son:

$$k_i = \frac{\omega_n^2}{\tilde{A}} \tag{4.23}$$

$$k_p = \frac{2\xi\omega_n}{\tilde{A}} \tag{4.24}$$

donde k_i es la ganancia integral, k_p es la ganancia proporcional, $\omega_n = 5\tau$, $\tau = 100ms$ y $\xi = 0.7$ (para respuesta sub-amortiguada). Los valores utilizados para el cálculo de las ganancias del controlador se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de los modelos de los motores.

| Ventiladores principales | Ventiladores cámara de pruebas |
|--------------------------|--------------------------------|
| Modelo | Modelo |
| $R_a = 1.2 \Omega$ | $R_a = 1.2 \Omega$ |
| $L_a = 9.5 mH$ | $L_a = 3.5 mH$ |
| $k_b = 0.544 Wb$ | $k_b = 0.244 Wb$ |
| $J = 0.05 kg.m^2$ | $J = 0.008 kg.m^2$ |
| $\tilde{A} = 0.1109$ | $\tilde{A} = 0.03934$ |
| $\tilde{B} = 1.3932$ | $\tilde{B} = 1.3520$ |

Así, las ganancias del control para los ventiladores principales (entrada al túnel de viento) son: $k_i = 2.267$ y $k_p = 6.347$; y para los ventiladores de la cámara de pruebas son: $k_i = 6.3548$ y $k_p = 17.7936$.

4.4 Co-simulación en ANSYS Simplorer

Se construyen modelos con el fin de ayudar a diseñar sistemas. Un sistema es una entidad que interactúa con otras entidades, incluyendo hardware, software, seres humanos y el mundo físico. El enfoque del diseño para los modelos de sistemas compuestos de un modelo controlador y un modelo de una planta, se le llama co-modelos o modelos acoplados. La interacción entre estos modelos se logra mediante la ejecución de ellos al mismo tiempo y permite que la información sea compartida entre ellos, a esto se le nombra co-simulación.

En una co-simulación, existe una variable que comparten y además tienen acceso a ella ambos modelos. A estas variables de diseño se les conoce como parámetros de diseño compartido (Fitzgerald, et al., 2014).

Un evento es una acción que se inicia en un modelo y conduce a una acción en otro modelo. Estos eventos pueden ser programados para aparecer en un momento determinado de tiempo o pueden ocurrir en respuesta a un cambio en los estados de eventos de sistemas, los eventos del sistema se describen con el cambio en el valor local del modelo de control durante una co-simulación activando la acción del modelo planta (Fitzgerald, et al., 2014).

Las variables compartidas, eventos y parámetros de diseño definen la comunicación entre los modelos (control o planta). Entonces, para cada variable compartida solo un modelo puede tener acceso a controlarla. En los sistemas de control, existen las variables controladas y las variables monitoreadas (Fitzgerald, et al., 2014).

La simulación de un co-modelo se llama co-simulación. En el transcurso de una co-simulación, el simulador del control y de la planta son responsables de los resultados de sus modelos. La coordinación y el control de la co-simulación general es responsabilidad de un software de co-simulación que monitorea el progreso del tiempo y la propagación de información entre los modelos de control y planta. ANSYS Simplorer actúa como un software de este tipo.

Como ya se mencionó en la Sección 3.3, se decidió utilizar ANSYS porque es una herramienta en la cual se puede simular cualquier tipo de proceso físico, químico o biológico. Para el caso de la presente tesis se realiza una co-simulación donde se analiza el comportamiento del viento dentro del túnel diseñado en el ANSYS Fluent (ver Sección 3), y el control de la generación del viento y turbulencias se realiza en ANSYS Simplorer.

ANSYS Simplorer es un software de simulación de sistemas de diferentes dominios, que se utiliza para el diseño, modelado, análisis y optimación de sistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos, térmicos, hidráulicos, de mecánica de fluidos y electromagnético.

También puede interactuar en forma dinámica con otras aplicaciones tales como ANSYS Maxwell, ANSYS Fluent, etc... y con aplicaciones de terceros, como MATLAB-Simulink y Mathcad. Con respecto al post-procesamiento, se pueden organizar los resultados, así como transferir los datos de simulación y las presentaciones de resultados a otras aplicaciones de software. Cabe destacar que Simplorer permite automatizar tareas de simulación complejas y repetitivas con una interfaz de secuencias de comandos.

Para estudiar el comportamiento del sistema descrito en esta tesis, se requiere una co-simulación, la cual combina la dinámica de la generación de viento y turbulencias (Fluent) y su control con las ecuaciones que describen el modelo de los generadores de aire, el convertidor de CA-CD y el puente H (Simplorer) para mantener la velocidad de estos generadores.

La implementación del co-modelo que se realiza en Simplorer se presenta en la Figura 4.8.

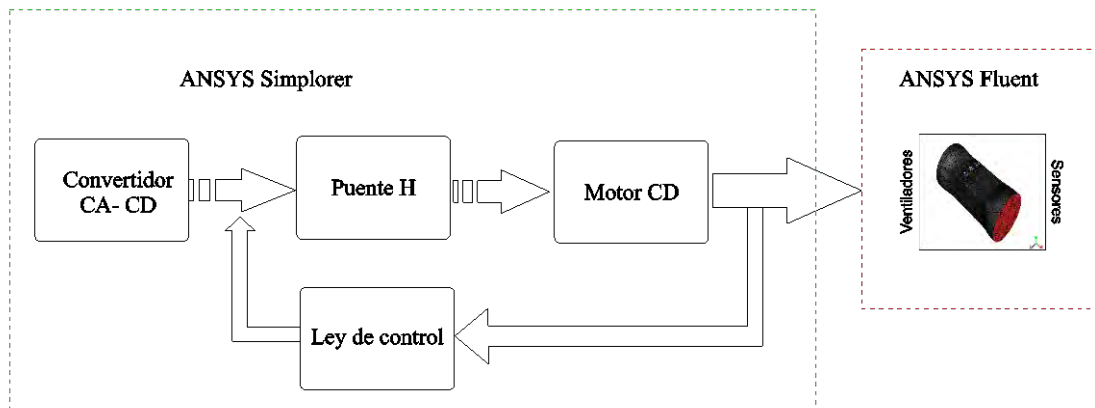


Figura 4.8 Esquema a bloques de co-simulación realizado en Simplorer.

La Figura 4.8 muestra un diagrama a bloques de la implementación de la co-simulación en Simplorer, donde interactúan los software de ANSYS: Fluent (planta) y Simplorer (Ley de control). Simplorer representa la salida de una serie de datos que son el resultado de la co-simulación. La variable compartida es la velocidad del viento, la cual es monitoreada en Fluent y controlada por Simplorer. Fluent tiene objetos (sensores) que monitorean la variable de la velocidad del viento.

En el Capítulo 3, se mostró la implementación en Fluent del túnel de viento con generación de viento y turbulencias, ahora en esta Sección se muestra la implementación de la ley de control en Simplorer así como la co-simulación en el mismo.

4.4.1 Adaptación del modelo

Para realizar la co-simulación es necesario hacer una adaptación al modelo para incluir los sensores dentro del túnel de viento en relación a la Figura 3.49, en donde se hace una división virtual de la cámara de pruebas, para así lograr monitorear la velocidad del viento en distintos puntos dentro de la cámara de pruebas, como se muestra en la Figura 4.9.

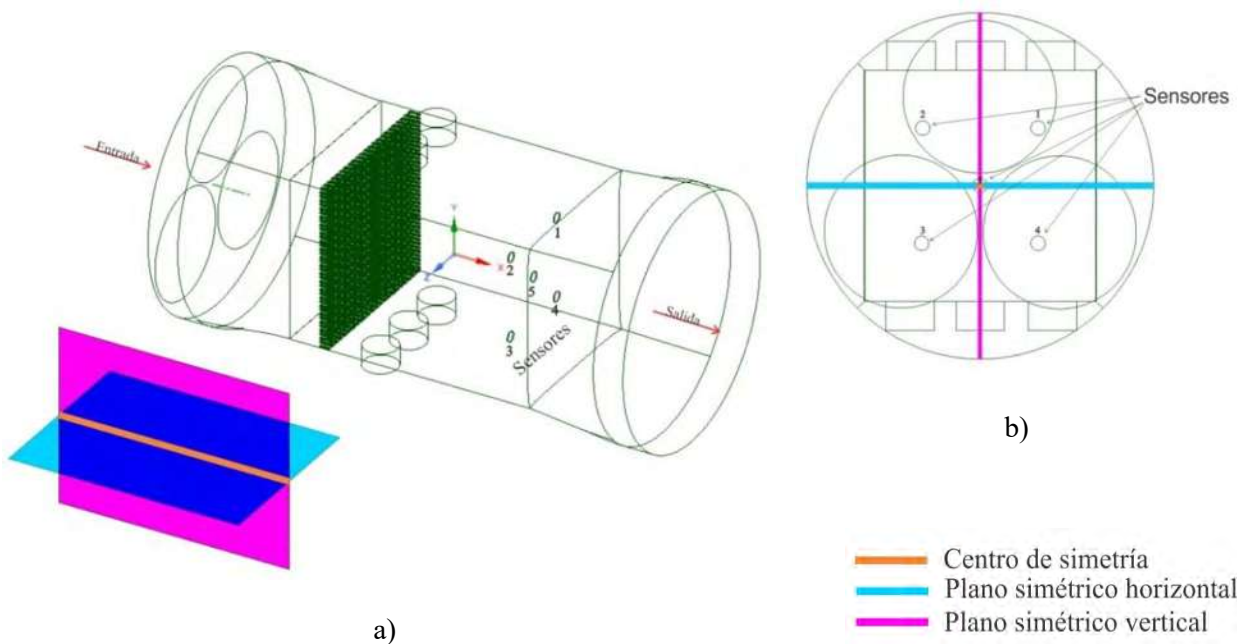


Figura 4.9 Adaptación del modelo con sensores. a) Vista isométrica, b) Vista desde la salida del túnel.

La Figura 4.9 muestra la colocación de los sensores en la cámara de pruebas, los cuales cubren los planos simétricos (sensores 1, 2, 3 y 4), así como el centro de simetría (sensor 5). En la Figura 4.9a se presenta la vista isométrica donde también se muestran los planos simétricos y en la Figura 4.9b se ilustra la vista a la salida del túnel. Adicionalmente, agrupando los sensores 2 y 3 con los sensores 1 y 4 hacen referencia al plano simétrico vertical (plano Y); por otra parte, si se agrupan los sensores 1 y 2 con los sensores 3 y 4 hacen referencia al plano simétrico horizontal (plano Z).

Para el modelo del motor y control, se consideran los parámetros mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros para modelo en Simplorer.

| Ventiladores principales | | Ventiladores cámara de pruebas | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Modelo | Control | Modelo | Control |
| $R_a = 1.2 \Omega$ | $k_p = 6.347$ | $R_a = 1.2 \Omega$ | $k_p = 17.7936$ |
| $L_a = 9.5 \text{ mH}$ | $k_i = 2.267$ | $L_a = 3.5 \text{ mH}$ | $k_i = 6.3548$ |
| $k_b = 0.544 \text{ Wb}$ | $\tilde{A} = 0.11029$ | $k_b = 0.244 \text{ Wb}$ | $\tilde{A} = 0.03934$ |
| $J = 0.05 \text{ kg.m}^2$ | $\tilde{B} = 1.3932$ | $J = 0.008 \text{ kg.m}^2$ | $\tilde{B} = 1.3520$ |

La co-simulación en el programa Simplorer se realiza tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Inicia la co-simulación, con todos los ventiladores de entrada al túnel de viento encendidos por 1 segundo a una velocidad de viento de 20 m/s.
- Se quedan activados los ventiladores de entrada, que se requieran para realizar la combinación correspondiente a la misma velocidad hasta que finalice el tiempo de simulación.
- Los ventiladores de la cámara de pruebas necesarios para realizar la combinación en curso, se activan a los 2 segundos para alterar el comportamiento de flujo del viento.

En las siguientes subsecciones se muestran los resultados de la co-simulación de los dos casos de estudio, analizados en el Apartado 3.6.

4.4.2 Co-simulación Caso 1: combinaciones 1_1_1 y 2_4_4

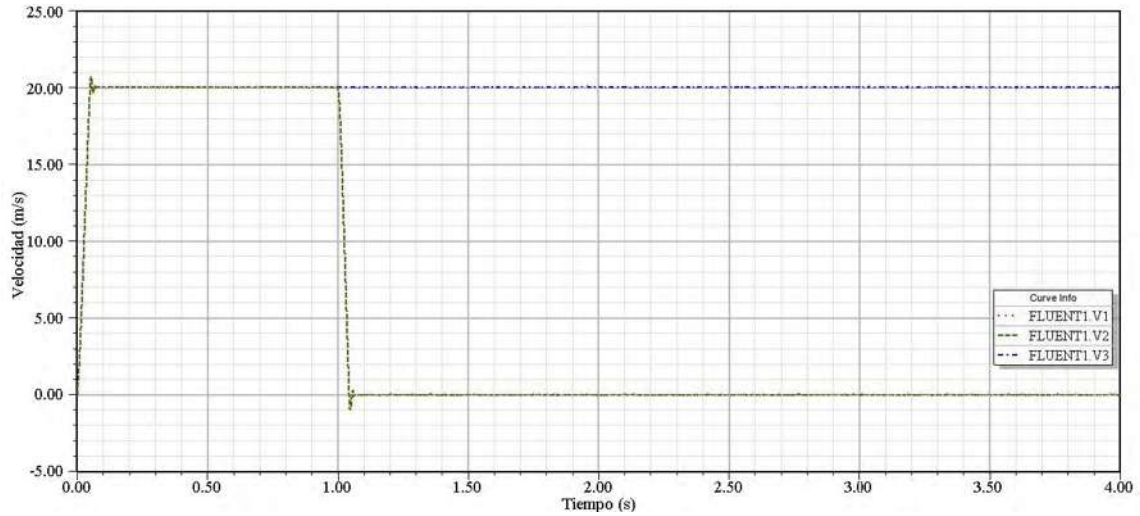
Se realiza la co-simulación, para verificar el comportamiento de la ley de control propuesta, así como demostrar la simetría que existe en las combinaciones del caso 1 (ver Sección 3.6.2), esto considerando el esquema a bloques de la Figura 4.8.

4.4.2.1 Combinación 1_1_1

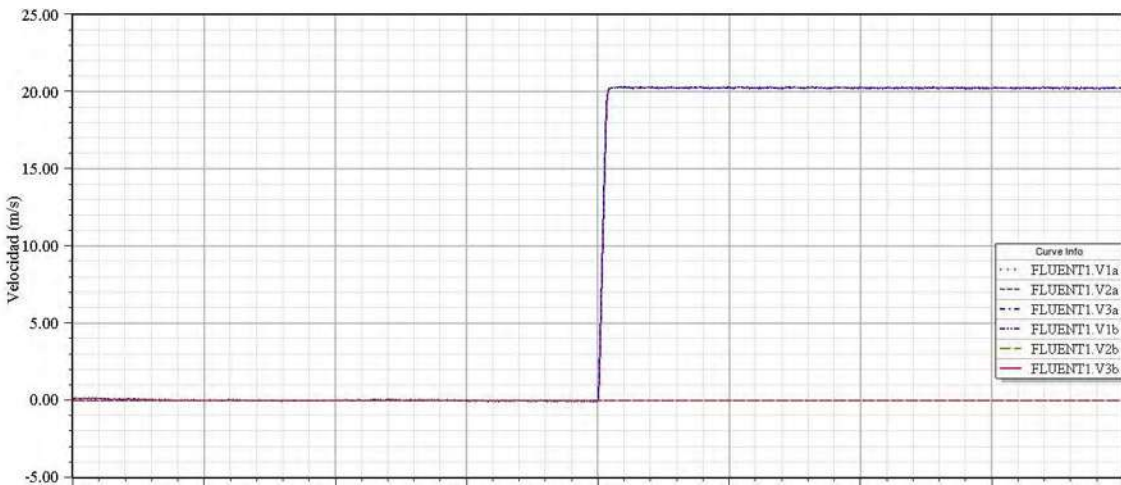
La Figura 4.10 muestra los resultados de la co-simulación (utilizando el programa ANSYS Simplorer) de la combinación de ventiladores activados 1_1_1. Para realizar la simulación se activan los tres ventiladores de entrada al túnel de viento con una velocidad del viento a 20 m/s, después de un segundo se apagan los ventiladores in_1 e in_2 (ver Figura 4.10a). En la Figura 4.10b también puede apreciarse que se activan los ventiladores a_3 y b_3 de la cámara de pruebas a una velocidad de 20 m/s en el instante de 2 segundos. La Figura 4.10c ilustra el comportamiento de los sensores ubicados en la cámara de pruebas, donde se aprecia que en dos segundos comienza a alterarse el comportamiento del flujo de viento. Asimismo, debido a la configuración de ventiladores encendidos, el sensor que describirá mejor el comportamiento del viento es el sensor 4 (ver Figura 4.9) detectando una velocidad máxima de 19 m/s aproximadamente. Adicionalmente el sensor 3 es el que captara la menor velocidad del viento alrededor de 3 m/s.

También, como ya se mencionó en el Apartado 3.6.2, por la posición de los sensores en la Figura 4.10c se observa que se genera un desorden de flujo en el plano vertical (detectado por los sensores 1 y 4) con escasez de flujo en la parte inferior del túnel del lado izquierdo (sensor 3), observando de frente al túnel (plano X +). Como el flujo está orientado en la parte inferior derecha (plano Y -) del túnel, se tendrá mayor concentración de flujo centrado en la parte lateral derecha (plano Z -) medido por los sensores 1 y 4.

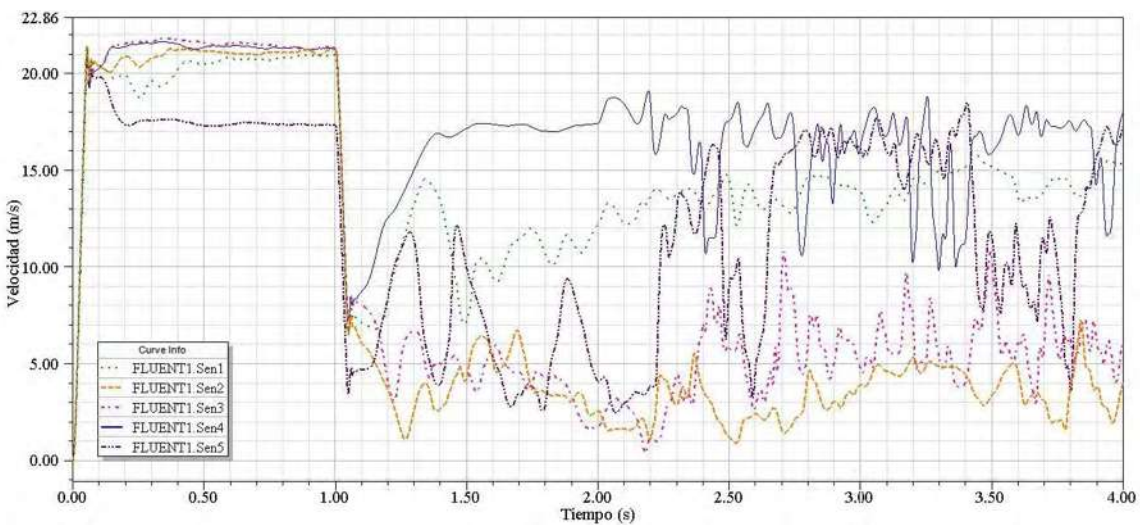
Observando los resultados obtenidos en la Figura 4.10c, se aprecia que después del segundo 2, los valores de la velocidad del viento en todos los sensores varían de una manera más abrupta, en relación a sus magnitudes. Esto considerando los valores que se tienen entre el instante de 1 a 2 segundos, modificándose los valores promedio que presenta cada uno de los sensores.



a)



b)



c)

Figura 4.10 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 1_1_1 (FLUENT1), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores.

4.4.2.2 Combinación 2_4_4

En la Figura 4.11 se presentan los resultados de la combinación de ventiladores activados 2_4_4. La Figura 4.11a muestra la activación de todos los ventiladores de entrada en un principio, al primer segundo solo queda activado el ventilador in_2 . La activación de los ventiladores a_1 y b_1 de la cámara de pruebas se realiza a partir de dos segundos, lo cual se aprecia en la Figura 4.11b. El comportamiento de los sensores ubicados en la cámara de pruebas (ver Figura 4.11c) muestra que para esta combinación el sensor que mejor describe el comportamiento del viento es el sensor 3, el cual detecta una velocidad máxima de alrededor de 19 m/s, así como, el sensor 4 que mide la menor velocidad del viento (aproximadamente de 3 m/s).

La Figura 4.11c, muestra que por la posición de los sensores se genera la perturbación del flujo en el plano vertical (sensores 2 y 3), y con escasez de flujo en la parte inferior del túnel del lado derecho (sensor 4). Entonces, como la orientación del flujo es hacia la parte inferior izquierda de la cámara de pruebas (plano Y $-$), tendrá mayor concentración de flujo centrado en la parte lateral izquierda (plano Z $+$) medido por los sensores 2 y 3.

Al igual que en la combinación 1_1_1, se observa que los resultados obtenidos en la Figura 4.11c, después del segundo 2, los valores de la velocidad del viento en todos los sensores varían de una manera más abrupta, en relación a sus magnitudes. Lo anterior, considerando los valores que se tienen de 1 a 2 segundos, modificándose los valores promedio que presenta cada uno de los sensores.

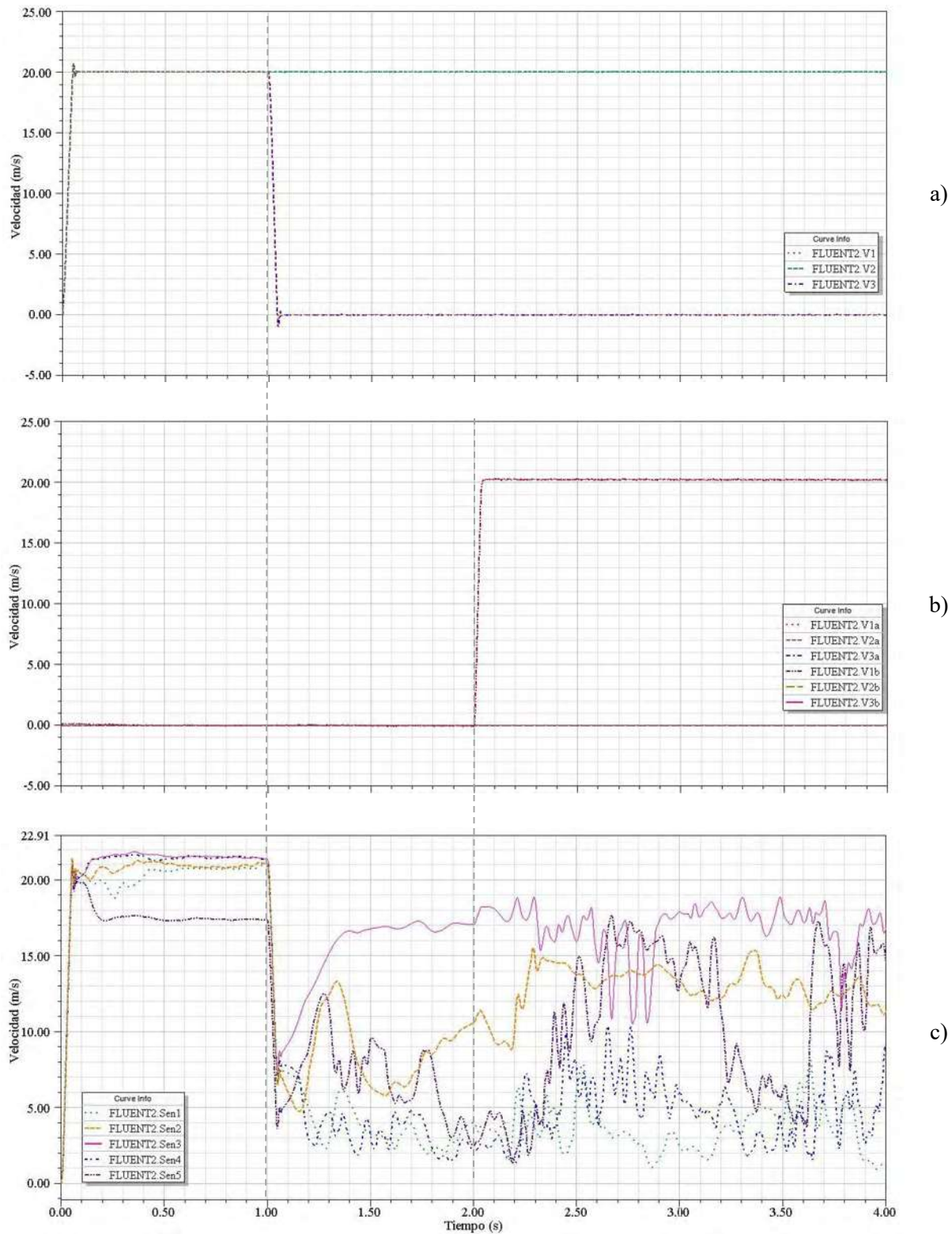


Figura 4.11 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de combinación 2 4 4 (FLUENT2), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores.

4.4.2.3 Comparación de resultados caso de estudio 1

La Figura 4.13 y la Figura 4.13 comparan el comportamiento del sensor 4 (combinación 1_1_1) y el sensor 3 (combinación 2_4_4), con el cual se verifica la simetría existente entre estas combinaciones. En la Figura 4.13 se muestra la respuesta de los sensores que se encuentran colocados en posiciones simétricas para ambos casos, cuando el flujo es laminar, es decir, sin alterar la capa de cortadura en la cámara de pruebas. Además, se observa un comportamiento similar en ambos sensores, con variaciones en el orden de ± 0.11 m/s.

Por otra parte, al encender los ventiladores de la cámara de pruebas correspondientes a ambas combinaciones a partir de los 2 segundos (ver Figura 4.13), se aprecia que el comportamiento de los sensores cambia bruscamente, teniendo cambios de velocidad entre 8 y 18 m/s en el sensor 3 y para el sensor 4 los cambios de velocidad entre 10 y 18 m/s.

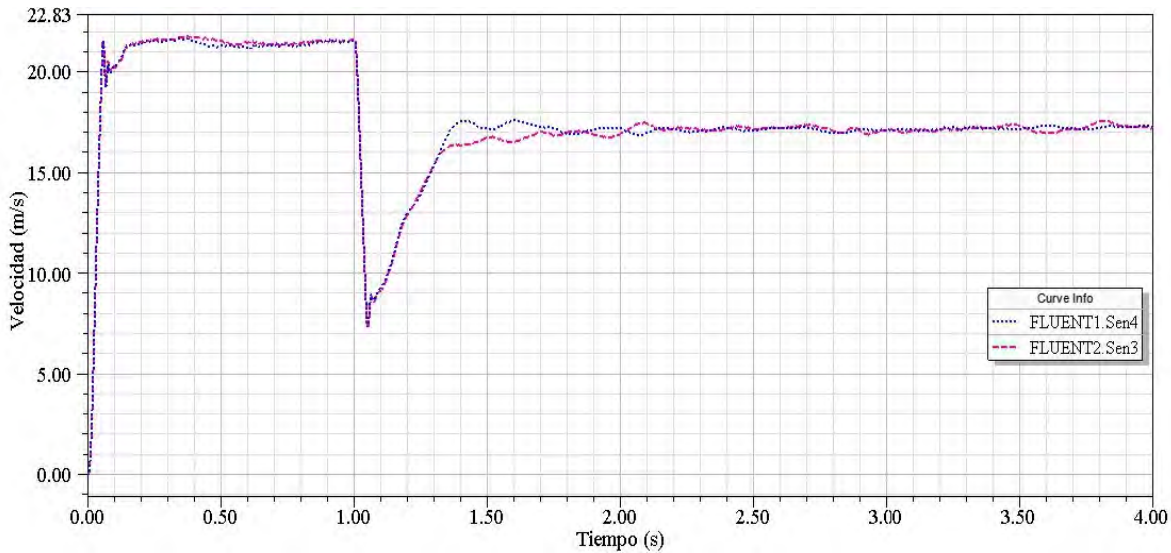


Figura 4.12 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 1, sin perturbación de capa de cortadura.

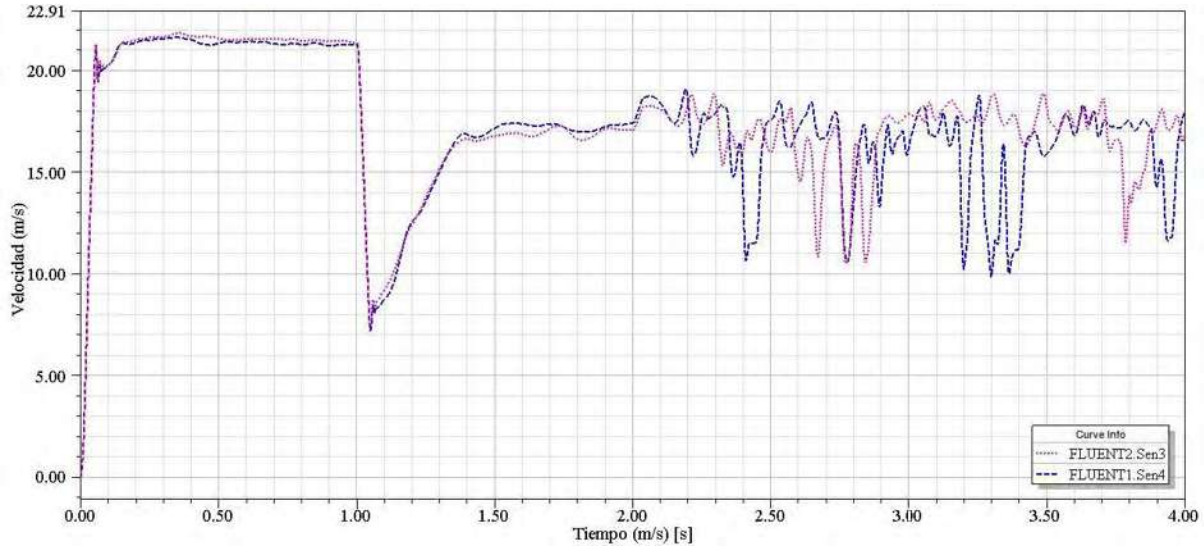


Figura 4.13 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 1, con perturbación de capa de cortadura.

La diferencia de la velocidad del flujo de viento que existen en la Figura 4.13 (sensor 4 combinación 1_1_1 y sensor 3 combinación 2_4_4), se debe a que al crear la malla se tiene que 3.7% de elementos son asimétricos (18,648 elementos), es decir, que los elementos son diferentes con respecto a los elementos originales. Lo anterior se puede interpretar al relacionar ambas combinaciones con el concepto de simetría, donde los elementos asimétricos de la malla para cada combinación quedarían en el lado opuesto y por tanto, pueden estar ubicados en el camino del flujo, haciendo presentes las diferencias.

Si bien, se tienen diferencias en cuanto a los resultados obtenidos debido a la asimetría en la malla del modelo, es importante mencionar que la turbulencia es generada dentro de la zona que se tenía contemplada para cada una de las dos combinaciones. Lo anterior permite de cierta manera controlar la región en la cual se generara la turbulencia cuando un modelo a escala sea colocado en la cámara de pruebas.

Con los resultados de la comparación queda comprobada la simetría del caso 1, el cual genera una turbulencia orientada hacia la parte inferior de la cámara de pruebas (ver plano Y-), y con un comportamiento de flujo lateral centrado (ver plano Z). Para generar una perturbación con flujo lateral centrado izquierdo (2_4_4) o derecho (1_1_1) y orientado hacia la parte inferior de la cámara de pruebas del túnel de viento utilizaremos el caso 1.

Finalmente, con los resultados obtenidos de la simulación de este caso, se comprueba que la ley de control deducida en la Sección 4.3, realiza la función para la cual fue diseñada.

4.4.3 Co-simulación Caso 12: combinaciones 7_3_3 y 7_6_6

De la misma forma en cómo se realiza la co-simulación del caso de estudio anterior, en esta Sección se considera ahora las combinaciones del caso 12 presentado en la Sección 3.6.3.

Los resultados de la co-simulación del caso 12 se presentan en la Figura 4.14 (combinación 7_3_3) y en la Figura 4.15 (combinación 7_6_6). La co-simulación se realiza en las mismas condiciones que el caso 1.

4.4.3.1 Combinación 7_3_3

La Figura 4.14a muestra cómo se mantienen todos los ventiladores de entrada en 20 m/s. La Figura 4.14b ilustra la activación de a_2 , a_3 , b_2 y b_3 (ventiladores cámara de pruebas) a los dos segundos a una velocidad de 20 m/s. En la Figura 4.14c se aprecia la respuesta de los sensores, donde se observan cambios repentinos en la velocidad monitoreada entre 21 y 30 m/s a partir de los 2 segundos. Asimismo, por la configuración de ventiladores encendidos, los sensores que describirán mejor la conducta del viento son los sensores 1 y 4 (ver Figura 4.9) midiendo una velocidad alrededor de 27 m/s con una variación entre estos sensores de ± 0.5 m/s.

Adicionalmente, la Figura 4.14c presenta simetría horizontal, si se comparan los sensores 1 y 2 con los sensores 3 y 4. Entonces, para generar una turbulencia que tenga el mismo comportamiento del viento en la parte superior e inferior de la cámara de pruebas y un comportamiento de flujo lateral derecho centrado (plano Z +) se utiliza la combinación 7_3_3. Cabe mencionar que del lado donde el ventilador no está encendido, se presenta la mayor velocidad de hasta 30 m/s medida por los sensores 2 y 3, esto debido a que no se altera la capa de cortadura.

Se observa también en la Figura 4.14c, que el sensor 5 muestra una velocidad constante alrededor de 24 m/s con variaciones de ± 0.05 m/s. Lo anterior es porque es el sensor del centro de simetría y es donde menos perturbaciones del viento se detectan, esta peculiaridad se presenta en esta combinación debido a que se encuentran encendidos los tres ventiladores a la entrada del túnel y se tendrá uniformidad de viento en la cámara de pruebas antes del segundo 2 (ver Figura 3.43a).

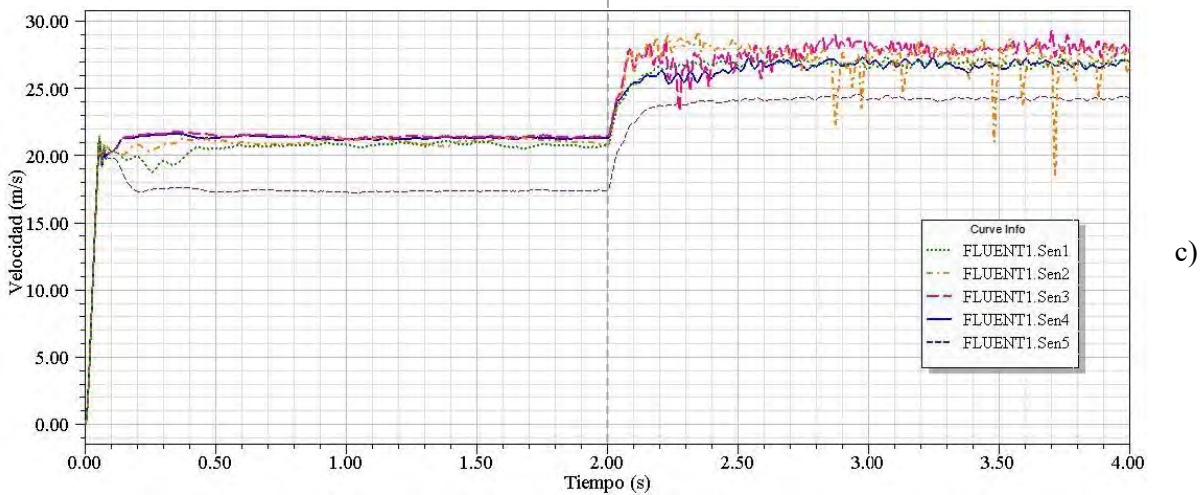
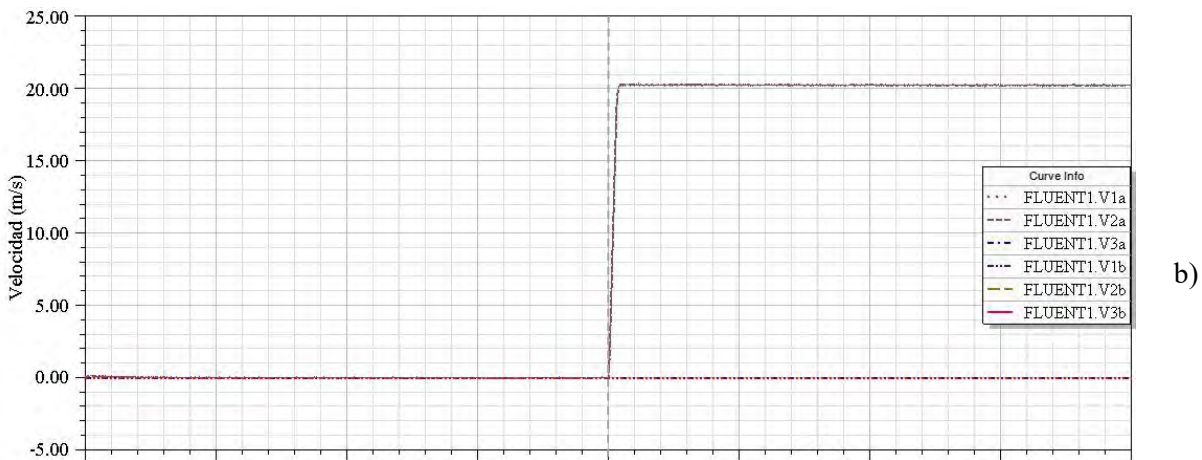
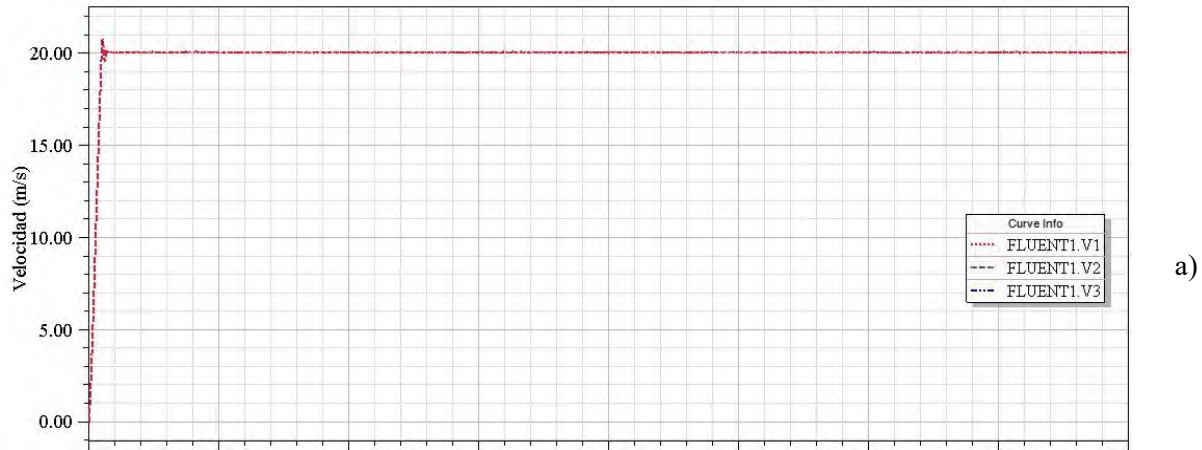


Figura 4.14 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 7_3_3 (FLUENT1), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores.

4.4.3.2 Combinación 7_6_6

En la Figura 4.15a se muestra cómo todos los ventiladores de entrada se mantienen en 20 m/s. La activación de a_1, a_2, b_1 y b_2 a los dos segundos a una velocidad también de 20 m/s se muestra en la Figura 4.15b. Se observa en la Figura 4.15c la respuesta de los sensores, donde se aprecia que a partir de 2s se presentan los cambios repentinos en la velocidad monitoreada, dichos cambios se encuentran entre 20.5 y 29.5 m/s en general. Además, debido a la configuración de ventiladores encendidos, los sensores que describen mejor la conducta del viento son los sensores 2 y 3 (ver Figura 4.9), midiendo una velocidad más uniforme de 26 m/s con variaciones de hasta ± 1 m/s entre sensores.

Por otra parte, la Figura 4.15c muestra simetría horizontal si se comparan los sensores 1 y 2 con los sensores 3 y 4; así para generar un comportamiento igual del viento en la parte superior e inferior y un comportamiento del flujo lateral izquierdo centrado (plano Z –) se utiliza la combinación 7_6_6. Es importante señalar que del lado donde el ventilador no está encendido, se presenta la mayor velocidad (de hasta 29.5 m/s) medida por los sensores 1 y 4, lo que significa que no se altera la capa de cortadura.

Adicionalmente, la Figura 4.15c muestra al sensor 5 con una velocidad constante alrededor de 24 m/s con variaciones de ± 0.5 m/s. Lo anterior sucede porque se encuentran encendidos los tres ventiladores de entrada, es decir, tenemos uniformidad de viento antes de comenzar a alterar su comportamiento (ver Figura 3.43a).

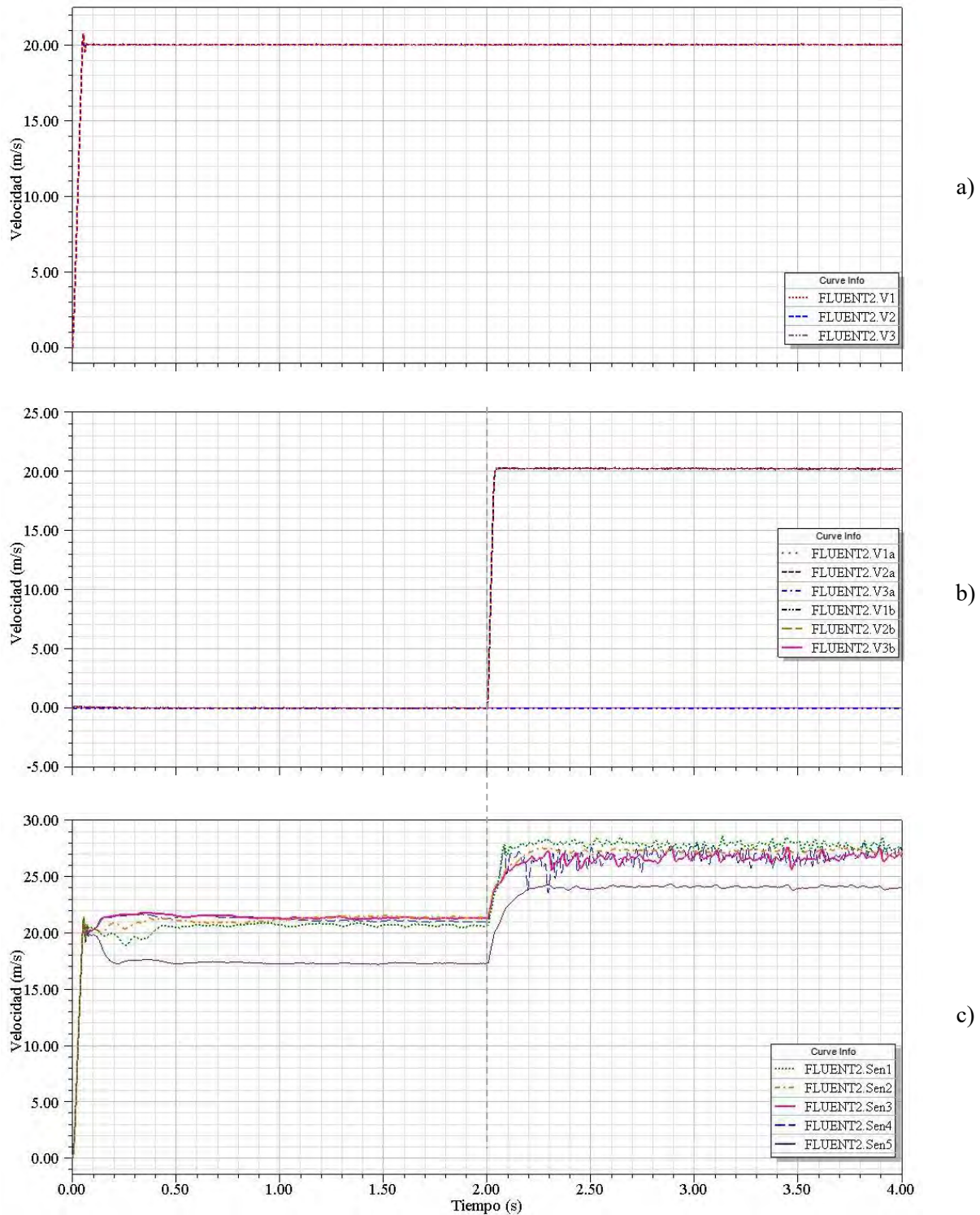


Figura 4.15 Respuestas de la co-simulación y control del modelo de la combinación 7_6_6 (FLUENT2), a) Ventiladores de entrada, b) Ventiladores cámara de pruebas, c) Sensores.

Una vez mencionadas las características de cada una de las combinaciones simétricas para el caso 12, se presentan los resultados de la comparación de ambas combinaciones.

4.4.3.3 Comparación de resultados para el caso de estudio 2

La Figura 4.16 y la Figura 4.17 muestran la respuesta de la co-simulación donde se verifica la simetría vertical del caso 12 así como la ley de control propuesta. En la Figura 4.16, se muestra el comportamiento de los sensores sin generar turbulencia en la cámara de pruebas, se observa que se mantienen estables o constantes con una variación de alrededor de ± 0.1 m/s.

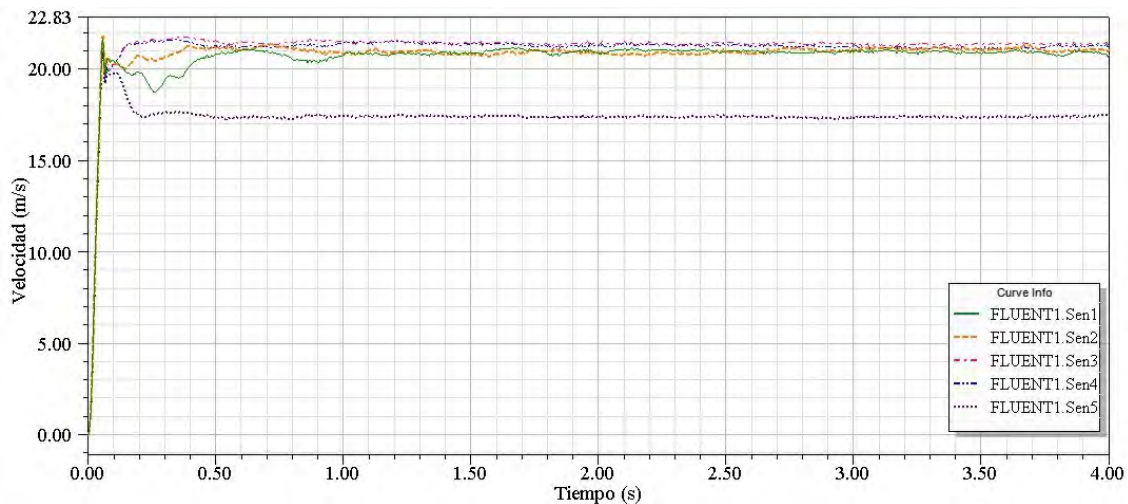
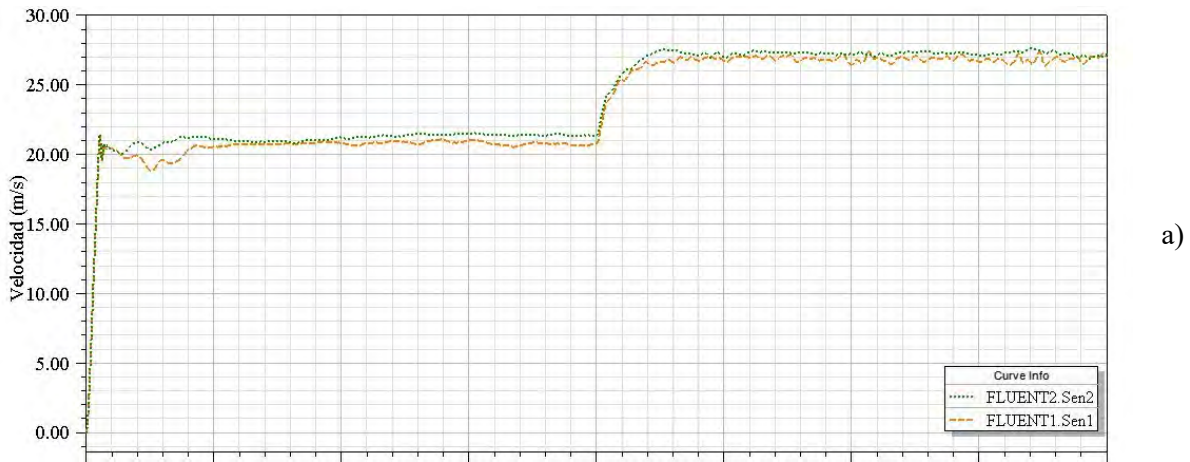


Figura 4.16 Respuestas de la co-simulación y control del modelo para verificar simetría Caso 12, sin perturbación de capa de cortadura.

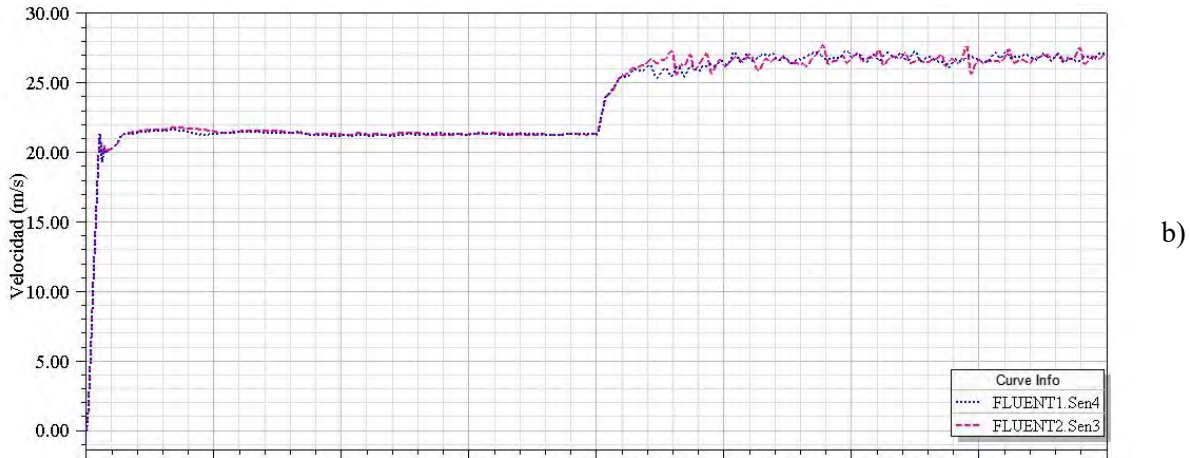
La Figura 4.17a, muestra la respuesta del sensor 1 (combinación 7_3_3) junto con la respuesta del sensor 2 (combinación 7_6_6), observándose que ambas velocidades de viento son similares y solamente tienen una variación de ± 0.5 m/s. Cabe destacar que estos sensores se comparan porque su posición es simétrica.

Otra combinación de sensores que mantienen una simetría, son: los sensores 4 y 3 de la combinación 7_3_3 y 7_6_6, respectivamente. La Figura 4.17b muestra la medición de estos sensores, observándose que ambas respuestas son similares, teniendo una variación alrededor de ± 1.15 m/s con picos de velocidad donde el mayor llega hasta 11 m/s. Lo anterior es debido a la misma turbulencia generada.

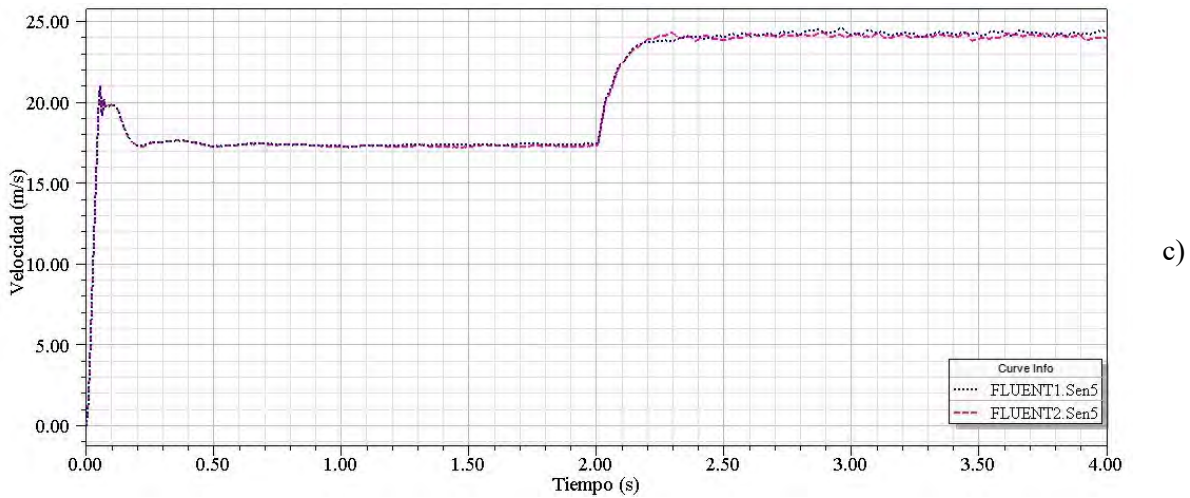
En la Figura 4.17c, se aprecia una velocidad constante del sensor 5 de 24 m/s con variaciones de ± 0.05 m/s entre una combinación y otra.



a)



b)



c)

Figura 4.17 Simetría vertical Caso 12. a) Comparación de sensor 1 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 2 (7_6_6, FLUENT2), b) Comparación de sensor 4 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 3 (7_6_6, FLUENT2) y c) Comparación de sensor 5 ambas combinaciones.

Con la Figura 4.17a y la Figura 4.17b, se verifica la simetría vertical del caso 12, la cual genera un comportamiento de flujo lateral centrado derecho (7_3_3) o izquierdo (7_6_6) dependiendo de la combinación utilizada.

Para verificar la simetría horizontal se presenta la Figura 4.18. En la Figura 4.18a se muestra la respuesta del sensor 1 de la combinación 7_3_3 con su sensor simétrico de la combinación 7_6_6 (sensor 3), donde se observa que ambas velocidades son similares en cuanto a su comportamiento, se tiene una velocidad de alrededor de 26.5 m/s con variaciones de ± 1 m/s. La Figura 4.18b muestra el sensor 2 de la combinación 7_3_3 con el sensor 4 de la combinación 7_6_6, donde el comportamiento de la velocidad del viento es equivalente con 28 m/s y 27 m/s, respectivamente.

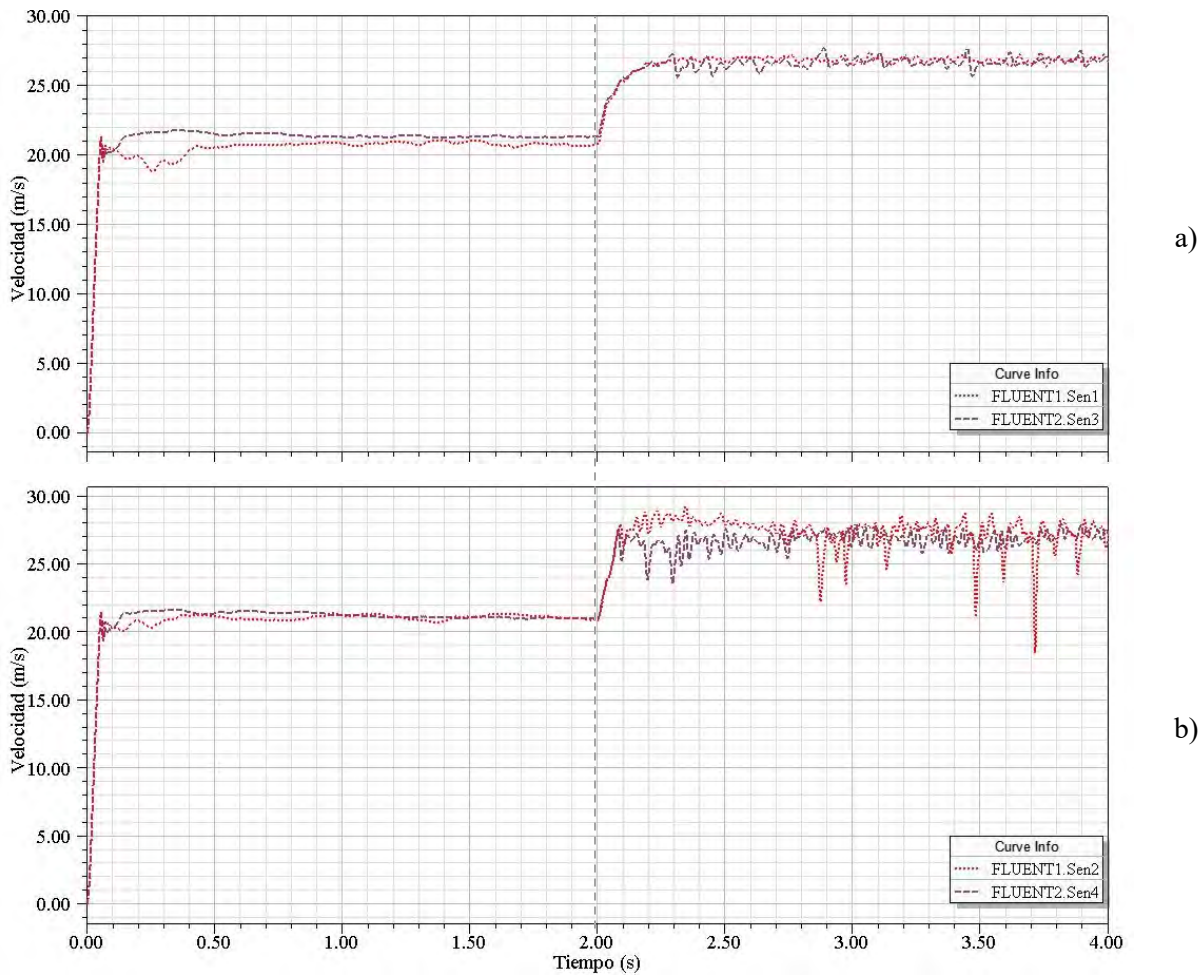


Figura 4.18 Simetría horizontal Caso 12. a) Comparación sensor 1 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 3 (7_6_6, FLUENT2). b) Comparación sensor 2 (7_3_3, FLUENT1) y sensor 4 (7_6_6, FLUENT2).

La diferencia del flujo de viento que existe en el Caso 12 (ver Figura 4.17 y Figura 4.18), es debido a que se realizó la co-simulación con una malla que contiene 18,648 elementos asimétricos y al relacionar

las combinaciones con el concepto de simetría, estos elementos pueden estar en el camino del flujo y por tanto estas diferencias se presentan.

Es importante mencionar, que aunque existan diferencias en cuanto a los resultados obtenidos (elementos asimétricos), la turbulencia se genera dentro de la zona que se tenía prevista para cada una de las combinaciones; esto permite controlar la región en la cual se generara la turbulencia cuando un modelo a escala sea colocado en la cámara de pruebas.

Con los resultados de la comparación de la Figura 4.17 y la Figura 4.18 queda comprobada la simetría vertical y horizontal del caso 12, el cual genera una turbulencia igual en la parte superior e inferior del túnel y un comportamiento lateral centrado derecho (plano Z+) combinación 7_3_3 o izquierdo (plano Z -) combinación 7_6_6.

Finalmente, con los resultados obtenidos de la simulación de este caso, se comprueba que la ley de control deducida en la Sección 4.3, realiza la función para la cual fue diseñada.

4.5 Conclusiones

En éste Capítulo, se mostraron las etapas para realizar el control de la generación de viento y turbulencias las cuales son:

- Un convertidor de CA- CD debido al uso de motores de CD para los ventiladores.
- Un puente H, para acelerar o frenar el motor controlando el giro del motor.

Se obtuvo el modelo matemático de los ventiladores (motor de CD), para aplicar la inversión del modelo y así obtener la función de transferencia y su control.

Se comprobó la simetría de los casos 1 y 12 mostrados en el Capítulo 3 aplicando la ley de control propuesta en este Capítulo. Lo anterior fue realizado por medio de una co-simulación utilizando el ANSYS Simpler (control) y ANSYS Fluent (Túnel de viento).

La co-simulación Simpler-Fluent presentada en este Capítulo, es un método de acoplamiento (Control – Flujo) que no ha sido reportado hasta el momento en la literatura.

Con la comprobación de la simetría y el tipo de turbulencia generada en los casos 1 y 12 con la ley de control, es posible extender los resultados para generar y controlar los 48 tipos de turbulencia

mostrados en esta tesis, las cuales están agrupadas en 24 tipos de turbulencias (casos) gracias a la utilización del concepto de simetría.

Además, se observó que el hecho de tener una malla con elementos asimétricos provoca que existan diferencias entre las combinaciones de los casos simétricos, por lo que se hace necesario el crear una malla con el menor número de elementos asimétricos lo cual no se realizó por el tipo de licencia con la que cuenta el software ANSYS.

La malla que se utiliza para la co-simulación tiene el 3.7% de elementos asimétricos, lo que ocasiona que existan algunas diferencias que no afectan significativamente en el resultado, ya que la turbulencia es generada dentro de la zona contemplada para cada uno de los casos.

Es importante resaltar que para realizar el monitoreo de la alteración en el comportamiento del viento, se colocaron cuatro sensores de acuerdo a los planos de simetría y un sensor en el centro de simetría.

Capítulo 5

5 Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

La presente tesis se realizó con el objetivo de generar y controlar turbulencias en un túnel de viento para fines de diseño, análisis y experimentación de turbinas eólicas.

Se mostró el diseño del túnel de viento, en el cual se presentaron los diferentes componentes del túnel de viento, asimismo, se realizaron los cálculos matemáticos necesarios para la justificación de cada uno de ellos.

El túnel de viento diseñado corresponde a un túnel de viento de circuito abierto, el cual cuenta con las características necesarias para incluir en su cámara de pruebas modelos a escala de aerogeneradores. Por esta razón el primer componente a diseñar fue la cámara de pruebas.

Se utiliza el software ANSYS Fluent para simular el túnel de viento, el cual permite analizar el comportamiento del flujo de viento en su recorrido por la cámara de pruebas. Este software resuelve el comportamiento del aire o viento por medio de volúmenes finitos por lo que se perfecciona al tener una malla de buena calidad, lo cual es vital para obtener buenos resultados. La calidad de la malla se mide con la herramienta de asimetría (Skewness), que indica si existen cambios en los elementos con respecto a los elementos originales.

Para la generación de las turbulencias en la cámara de pruebas del túnel de viento se utiliza el concepto de turbulencias mecánicas, las cuales son originadas por el paso del aire sobre edificios, arboles, colinas o por la diferencia de la velocidad del viento o dirección. En la presente investigación se optó por generar las turbulencias a partir de dos velocidades de la misma intensidad, pero con dirección opuesta alterando la capa de cortadura. Cabe señalar que es la más factible de utilizar para la propuesta del control.

Después de analizar las diferentes configuraciones propuestas se concluye que la más viable es la de tres ventiladores a la entrada del túnel de viento, debido a que el viento se presenta uniforme en toda la cámara de pruebas, y así se tiene la posibilidad de afectar diferentes zonas en los modelos a escala de los aerogeneradores.

Para concluir la etapa de generación de turbulencias, se realizaron 48 combinaciones de ventiladores encendidos para generar el viento y las turbulencias. Se observó que hay combinaciones que si se coloca un espejo entre ellas se reflejan, estos casos se agruparon introduciendo el concepto de simetría reflectiva y con ello dos planos de simetría (vertical y horizontal), en total se analizaron 24 casos que concuerdan con este concepto. De los diferentes casos, solamente se presentaron los casos 1 y 12 (como casos de estudio), en donde el comportamiento del viento es muy diferente así como su velocidad. Estos dos casos de estudio fueron presentados y analizados a detalle.

En lo que se refiere al control de la turbulencia generada, se utilizaron motores de corriente directa para los ventiladores, así como un puente H para acelerar o frenar el motor por medio de su giro. A continuación se obtuvo el modelo de los ventiladores en lazo abierto, enseguida se cerró el lazo, con lo cual se obtuvo la función de transferencia para describir al sistema.

Para finalizar con la ley de control propuesta, se comprobó la simetría de los casos 1 y 12 mostrados en el Capítulo 3, realizando una co-simulación en ANSYS Simplorer (control) y ANSYS Fluent (Túnel de viento). Además, con la propuesta del control de las turbulencias se puede utilizar cualquier otro caso diferente a los dos casos de estudio mostrado, con el objetivo de generar la turbulencia en la zona que se desea.

Es importante mencionar que en la literatura no se encontró registro de túneles de viento que permitan el control y generación de turbulencias en la cámara de pruebas. Además, tampoco se encontró registro del uso del concepto de la co-simulación (Simplorer- Fluent) presentado en la presente tesis.

En los resultados presentados en los casos de estudio, se observó que tener una malla con elementos asimétricos provoca que existan diferencias entre las combinaciones de los casos simétricos, por lo que se hace necesario la creación de una malla con el menor número de elementos asimétricos, lo cual no se realizó por el tipo de licencia con la que cuenta el software ANSYS.

La malla que se utiliza para la co-simulación tiene el 3.7% de elementos asimétricos, lo que ocasiona que existan algunas diferencias que no afectan significativamente en el resultado.

Para realizar el monitoreo del comportamiento del viento, se colocaron cuatro sensores de acuerdo a los planos de simetría y un sensor en el centro de simetría.

5.2 Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se propone adquirir una licencia profesional del software ANSYS para no tener la limitante de 512,000 elementos admitidos en el mallado del modelo, con el objetivo de crear una malla que tenga mayor número de elementos y disminuir al mínimo posible el porcentaje de elementos asimétricos para realizar nuevamente la co-simulación, con lo que se comprobaría que las variaciones que hay entre las combinaciones de los casos son menores. Esto debido a que, en el modelo del túnel de viento se podría configurar el tamaño mínimo y máximo de los elementos que conforman la malla (entre más pequeños sean los elementos mejor calidad en la malla), es decir, tener una transformación efectiva del modelo del túnel a malla (volúmenes finitos).

Como se presentan 24 casos simétricos de zonas en donde se genera la turbulencia, se hace necesaria la creación de una interface que permita seleccionar la zona deseada, y dependiendo de esto elija la combinación de ventiladores necesaria para su generación.

Se hace necesario implementar lo descrito en esta tesis en el túnel de viento que se encuentra en el laboratorio de modelado del Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH. Hay que destacar que los componentes principales de este túnel fueron realizados con el diseño expuesto en el Capítulo 2. Sin embargo, el trabajo futuro consistiría en elaborar las modificaciones mostradas en el Capítulo 3 para analizar y generar los tipos de turbulencias presentados. Asimismo, instrumentar el túnel de viento con los sensores necesarios colocados en los planos simétricos, para medir los cambios en la velocidad del viento.

Realizar el análisis de sensibilidad del control para evaluar los efectos de las variaciones de los parámetros del sistema y de las perturbaciones sobre las señales de salida, entrada y del error, considerando en modelo del túnel de viento generado en Fluent.

Aprovechar las características de ANSYS Fluent para poder utilizar el procesamiento en paralelo en la co-simulación, con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo, y hacer uso de unidades de procesamiento gráfico (GPU) para mejorar el rendimiento computacional.

V. Bibliografía

Ackermann, T., 2005. *Wind Power in Power Systems*. s.l.:John Wiley & Sons.

Aguilar, J. A., Orozco, P., Ochoa, J. J. & Barcena, A., 2010. *Desarrollo y Construcción de un Túnel de Viento Subsónico para Modelos a Escala*, Morelia, Michoacán: s.n.

Altaeros, e., 2014. *ALTAEROS energies*. [En línea] Available at: <http://www.altaaerosenergies.com/> [Último acceso: 18 mayo 2015].

Anderson, W. & Bonhus, D. L., 1994. *An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids*. s.l.:Computers Fluids.

ANSYS, 2010. *Introduction to ANSYS FLUENT*. s.l.:s.n.

Barlow, J. B., Pope, A. & Rae, W., 1999. *Low Speed Wind Tunnel Testing*. s.l.:John Wiley & Sons, Inc..

Barth, T. J. & Jespersen, D., 1989. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. *Aerospace Sciences Meeting*, Volumen 27, p. 13p.

Caro Rincón, F., Fernández López, S., Lora Ibarra, D. & Ruiz Sánchez, J., 2012. *Diseño de un túnel de viento subsónico para hélices de máximo 30 pulgadas. (Tesis de maestría)*. Bogota, Colombia.: Universidad de Buenaventura, Departamento de Aeronáutica..

Chang, C.-H. & Meroney, R. N., 2003. The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, pp. 1039- 1050.

Cook, N. J., 1978. Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2(4), pp. 311-321.

Derek, A. P., 1968. Induction Motor Speed Control by Stator Voltage Control. *IEEE*, pp. 585- 590.

Douglas, B. & M., M. E., 2011. *Renewables 2011 Global Status Report*. En: Paris, France: Sunna Research and World watch Institute, pp. 1-117.

Fitzgerald, J., Larsen, P. G. & Verhoef, M., 2014. *Collaborative Design for Embedded Systems*. New York: Springer.

Fox, R. & McDonald, A. T., 2006. *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. s.l.:McGraw-Hill.

Garduño, R., Rodríguez, A. & Sánchez, M., 2012. Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores. *Divulgación, Boletín IIE*, abril- junio. pp. 47- 55.

Ghani, A., Aroussi, A. & Rice, E., 2001. Simulation of road vehicle natural environment in a climatic wind tunnel. *Simulation Practice and Theory* 8, pp. 359- 375.

Ghobadian, A. & Vasquez, S. A., 2007. A General Purpose Implicit Coupled Algorithm for the Solution of Eulerian Multiphase Transport Equation. *International Conference on Multiphase Flow*.

Girbau, J., 1993. *Geometria diferencial i relativitat*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.

Goldenberg, J., 2006. *The promise of clean energy, Energy Policy*. s.l.:s.n.

González, Q., Urcuhuaranga, E. & Chiroque, B., 2014. Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de Investigación de Física*, 18 Junio, 17(141701601), p. 12.

GWEC, 2013. Global wind Statistics 2012. En: s.l.:Global Wind Energy Council.

Hasen, A. G., 1971. *Mecánica de Fluidos*. s.l.:Limusa.

Howell, R., Qin, N., Edwards, J. & Durrani, N., 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, pp. 412- 422.

Idel'chik, I. E., 1960. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Moscú: U.S. Atomic Energy Commission.

ITER, 2011. *Instituto Tecnológico y de Energías Renovables S.A.*. [En línea] Available at: <http://www.iter.es/index.php/mod.pags/mem.detalle/idpag.101/idmenu.1091/chk.04442b7e1cc70f1f9cb0ef904936b626.html>

Kosow, I. L., 1993. *Máquinas eléctricas y transformadores*. México: Pearson Educación.

Lafrit, 2005. Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics with FLUENT.

Lipo, T. A., 1971. THE ANALYSIS OF INDUCTION MOTORS WITH VOLTAGE CONTROL BY SYMMETRICALLY TRIGGERED THYRISTORS. *IEEE*, pp. 515-525.

Mataix, C., 1982. *Mecánica de fluidos y máquina hidráulicas*. 2da. ed. s.l.:Harla.

Meroney, R. N., Leitl, B. M., Rafailidis, S. & Schatzmann, M., 1999. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 81, pp. 333-345.

Meseguer, J., Sanz, J. L., Ortega, F. & Chiappe, L., Julio-Agosto 2008. Control de capa límite en el vuelo a bajos números de Reynolds. *Ingeniería aeronáutica y astronáutica*, pp. 15-24.

Mileaf, H., 2001. *Electricidad*. México: Limusa.

Mohr, P. J. & Taylor, B. N., 2000. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998. *Reviews of Modern Physics*, 01 april, Volumen 72, p. 351.

Mott, R. L., 2006. *Mecánica de fluidos*. 6 ed. s.l.:Pearson Educación México.

Nagarkar, D. N. & J., K. Z., 2013. *Wind Power Plant Using Magnetic Levitation Wind Turbine*. s.l.:International Journal of Engineering and Innovative Technology.

Pradhan, B. K., 2011. *Computational fluid dynamics analysis of flow through high speed turbine used FLUENT*. s.l.:s.n.

Rashid, M. H., 1995. *Electrónica de potencia*. México: Pearson educación.

Sánchez, R., Dauphin-Tanguy, G., Guillaud, X. & Colas, F., 2010. Bond graph based control of a three phase inverter with LC filter connection to passive and active loads. *Simulation Modelling Practice and Theory*, October, Volumen 18, pp. 1185-1198.

Schlichting, H., 1972. *Teoría de Capa Límite*. Bilbao: Urmo.

Sendiña Nadal, I. & Pérez Muñuzuri, V., 2006. *Fundamentos de Meteorología*. Compostela, España: Universidad de Santiago de Compostela.

Serway, R., 1996. *Física Tomo II*. s.l.:McGraw Hill.

Streeter, V. L., 1992. *Mecánica de los fluidos*. 4ta ed. México, D.F.: McGraw-Hill.

Sumner, J., Sibuet Watters, C. & Masson, C., 2010. CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel. *Energies 3*, pp. 989-1013.

Wald, R. M., 1984. *General Relativity*. s.l.:Chigaco University Press.

Apéndices

Apéndice A

A. Mecánica de fluidos

A.1 Introducción

En este apéndice se describe la teoría fundamental en la que se basa el funcionamiento del túnel de viento para aplicarla en el diseño, desarrollo y construcción del mismo.

A.2 Mecánica de Fluidos

Para la construcción del túnel de viento es importante tener en cuenta la mecánica de fluidos, debido a que existen factores de dicha teoría, que necesitan ser adaptados para el diseño del túnel de viento.

La mecánica de fluidos, es una rama de la ciencia que estudia los fluidos incompresibles en reposo o en movimiento. Un fluido es una sustancia que se deforma de manera continua cuando se ejerce un esfuerzo cortante de cualquier magnitud y comprende a los líquidos y a los gases (Streeter, 1992).

La mecánica de fluidos es importante y existen muchas aplicaciones, por ejemplo, explica por qué los aviones tienen una forma aerodinámica y superficies lisas logrando así vuelos perfectos. En el diseño

de túneles de viento, la aerodinámica forma un papel fundamental para lograr una representación apegada a la realidad del comportamiento del viento.

Para el túnel de viento los conceptos que afectan directamente su construcción son: el número de Reynolds, número Mach, y la teoría de capa límite. La estructura del túnel de viento (diseño aerodinámico) se puede calcular a partir de la relación entre los coeficientes de sustentación y de arrastre, para los cuales es necesario realizar la medición de las fuerzas de sustentación y arrastre.

Los gases como el aire, oxígeno, poseen espacios moleculares muy grandes comparados con la estructura molecular de un sólido; los gases se deforman y comprimen fácilmente por las fuerzas intermoleculares que son muy pequeñas. En cambio los líquidos se comprimen muy poco.

A.3 Propiedades de los fluidos

El **peso específico** se define como la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia y se denota con la letra griega γ (gamma), y su Ecuación es:

$$\gamma = w/V \quad (\text{A.1})$$

donde V es el volumen de una sustancia con peso w . Las unidades del peso específico son N/m^3 en el sistema internacional SI.

La relación entre la densidad y el peso específico, se deduce de $w = mg$ y $\rho = m/V$ y es:

$$\gamma = \rho g \quad (\text{A.2})$$

donde g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).

El **volumen específico**, es el volumen ocupado por la unidad de masa y es el inverso de la densidad.

$$V = 1/\rho \quad (\text{A.3})$$

La **Compresibilidad** en los líquidos sucede cuando se produce un cambio de presión grande o muy rápido, por lo que el fluido puede cambiar de volumen y densidad. La fórmula (A.4) se utiliza para calcular el módulo de elasticidad volumétrico.

$$E_V = \frac{dp}{dV/V} \quad (\text{A.4})$$

donde dp - variación de presión, dV - variación de volumen, V - volumen

La **viscosidad** (n), es el movimiento molecular dentro del fluido. Esta propiedad describe la “fluidez” de un fluido. Las moléculas se desplazan a una velocidad alta y chocan con las moléculas de una velocidad menor y viceversa, este proceso permite trasladar el movimiento de una región del fluido a otra. La temperatura del medio afecta los movimientos moleculares por lo que el valor real de la viscosidad depende del fluido y de la temperatura. La viscosidad de un gas aumenta con la temperatura; mientras que un líquido disminuye.

La **viscosidad cinemática** (μ), es la propiedad del fluido mediante el cual este ofrece resistencia al esfuerzo cortante. La deformación en los fluidos aumenta bajo la acción de un esfuerzo cortante por pequeño que este sea; y se define como la fuerza para desplazar una capa de una sustancia sobre otra capa de la misma (Streeter, 1992).

La relación entre la viscosidad (n) y viscosidad cinemática (μ) es:

$$\mu = n/\rho \quad (\text{A.5})$$

donde ρ es la densidad del fluido.

Los fluidos con viscosidad baja fluyen con mayor facilidad que los fluidos con viscosidad alta. Por ejemplo si calentamos un fluido con viscosidad alta como el aceite, su viscosidad disminuye y por lo tanto fluye con más facilidad. En cambio, si reducimos su temperatura la viscosidad aumenta y el aceite fluye más despacio. Con esto observamos que el tipo de flujo también depende de la viscosidad del fluido, es decir es más probable que el flujo de fluidos de viscosidad baja, como el agua, sea turbulento (Mott, 2006).

A.4 El flujo de los fluidos y la Ecuación de Bernoulli

La cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo puede expresarse por medio de tres términos distintos:

- Flujo volumétrico (Q): es el volumen de fluido que circula en una Sección por unidad de tiempo.
- Flujo en peso (W): es el peso del fluido que circula en una Sección por unidad de tiempo.
- Flujo másico (M): es la masa del fluido que circula en una Sección por unidad de tiempo.

En la Tabla A.1, se muestra cómo se pueden calcular estos flujos:

Tabla A.1 Flujos.

| Símbolo | Nombre | Definición | Unidades |
|---------|-------------------|----------------------------|----------|
| Q | Flujo volumétrico | $Q = Av$ | m^3/s |
| W | Flujo en peso | $W = \gamma Q = \gamma Av$ | N/s |
| M | Flujo másico | $M = \rho Q = \rho Av$ | Kg/s |

donde A es el área de la Sección transversal, v es la velocidad promedio del flujo, γ es el peso específico del fluido y ρ es la densidad del fluido (Mott, 2006).

Por ejemplo, si un gas circula por el interior de un tubo recto, mantiene una trayectoria paralela a las paredes del tubo. La velocidad es mayor cuando las partículas se encuentran más cerca del centro del tubo. Cuando un tubo cambia de diámetro, se vuelve angosto, el gas circula a mayor velocidad y se origina el efecto Venturi.

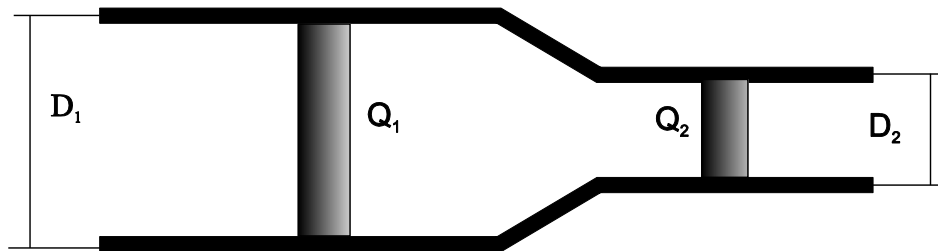


Figura A.1 Cambio de Sección circular.

En la Figura A.1 se muestra gráficamente cómo influye el cambio de diámetro del tubo en la velocidad del gas. El caudal Q_1 es el de un cilindro con el diámetro de la base igual a D_1 y el caudal Q_2 , tiene un diámetro D_2 .

A.5 Ecuación de continuidad para cualquier fluido

Del principio de continuidad depende el método para el cálculo de la velocidad en un sistema de ductos cerrados. Se muestra en la Figura A.2, un conducto por donde circula un fluido con flujo volumétrico constante de la Sección 1 a la Sección 2. Esto se conoce como flujo estable y se define como la cantidad de fluido que circula a través de cualquier Sección en cierta cantidad de tiempo; es constante siempre y cuando no se agregue, retire o almacene el fluido. Entonces la masa del fluido que circula por la Sección 2 en cierto tiempo debe ser semejante a lo que circula por la Sección 1 y se expresa como:

$$M_1 = M_2$$
$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (\text{A.6})$$

La Ecuación (A.6) es válida para todos los fluidos (gases o líquidos) y se utiliza para relacionar la densidad del fluido (ρ), el área (A) y la velocidad del flujo (v) en dos secciones del sistema en donde existe un flujo estable.

Si el fluido en el tubo de la Figura A.2 es un líquido incomprensible, entonces los términos ρ_1 y ρ_2 de la Ecuación (A.6) son iguales:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (\text{A.7})$$
$$Q_1 = Q_2$$

La Ecuación (A.7) es de continuidad, e indica que para un flujo estable el flujo volumétrico es el mismo en cualquier Sección. Puede ser utilizada también para gases a velocidad baja (menor a 100m/s), con mínimo margen de error (Mott, 2006), la cual es usada para encontrar velocidad de un área a otra o encontrar la relación de áreas con las velocidades.

El área para una Sección circular es:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Por lo que la relación para encontrar la velocidad se obtiene sustituyendo el área en la Ecuación (A.7):

$$\frac{\pi D_1^2}{4} v_1 = \frac{\pi D_2^2}{4} v_2$$

$$D_1^2 v_1 = D_2^2 v_2$$

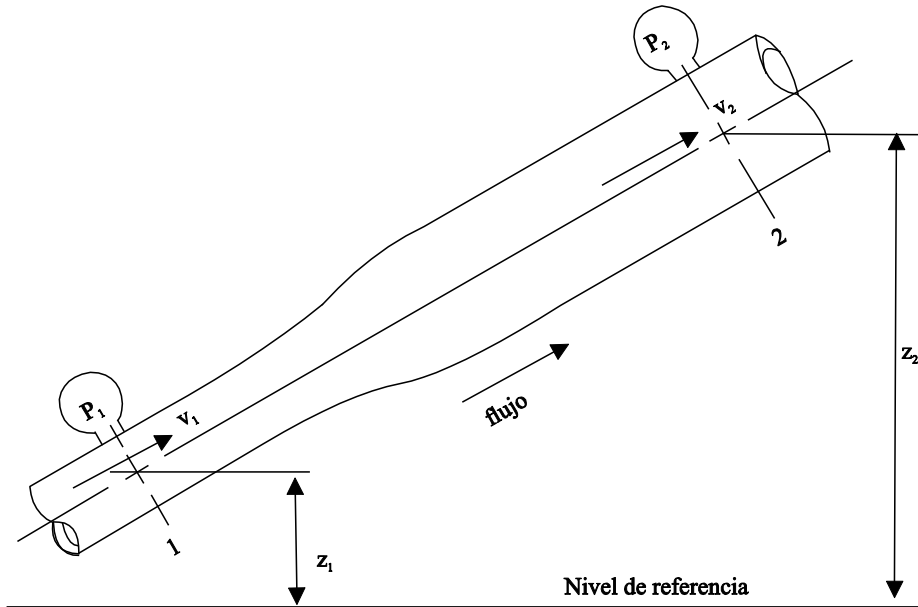


Figura A.2 Sistema de distribución de un fluido en el que hay variaciones de velocidad, presión y elevación.

A.6 Conservación de la energía- Ecuación de Bernoulli

Cuando se requiere hacer el análisis de una tubería como la que se muestra en la Figura A.3, es necesario tomar en cuenta toda la energía dentro del sistema. Recordando que en física, la ley de la conservación de la energía dice que: la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma de una forma en otra.

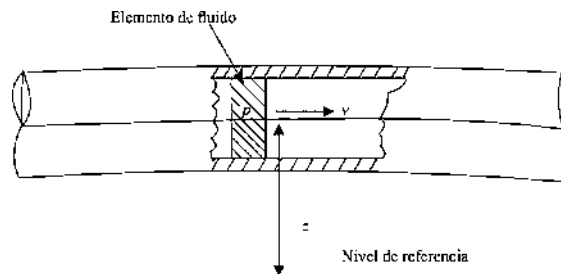


Figura A.3 Elemento de fluido en una tubería.

Suponga un elemento de fluido dentro de una tubería en un sistema de flujo como el que se muestra en la Figura A.3, el cual se localiza a cierta elevación z , tiene velocidad v y presión p . Para hacer este análisis, el elemento de fluido tiene tres formas de energía:

1. Energía potencial (E_P), causada por su elevación. La energía potencial del elemento en relación con un nivel de referencia es:

$$E_P = wz \tag{A.8}$$

donde w es el peso del elemento.

2. Energía cinética (E_C), ocasionada por su velocidad y se calcula a partir de:

$$E_C = wv^2 / 2g \tag{A.9}$$

3. Energía de flujo (E_F), también llamada energía de presión o trabajo de flujo. Definida como la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento del fluido a través de cierta Sección contra la presión p . Se calcula por medio de:

$$E_F = wp/\gamma \tag{A.10}$$

La Ecuación (A.10) se obtiene analizando la Figura A.4, en donde la fuerza sobre el elemento es $F = pA$; donde p es la presión en la Sección y A es el área de ésta. El fluido cuando se mueve a través de la Sección l es igual a la longitud del elemento, entonces el trabajo de flujo es:

$$\text{Trabajo} = pAl = pV = pw/\gamma$$

donde V es el volumen del elemento. El peso del elemento es:

$$w = \gamma V$$

siendo γ el peso específico del fluido. Entonces el volumen del elemento es:

$$V = w/\gamma$$

de aquí se obtiene la Ecuación (A.10)

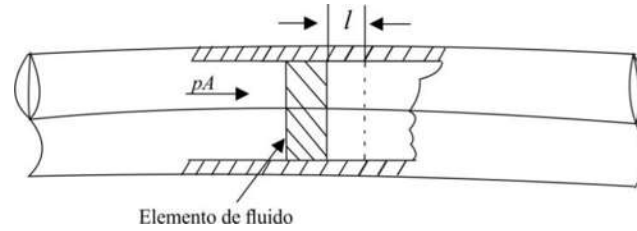


Figura A.4 Energía de flujo.

Por lo tanto la cantidad total de energía que posee el elemento de fluido es:

$$E = E_P + E_c + E_F$$

$$E = wz + wv^2/g + wp/\gamma$$

Si se analiza el esquema de la Figura A.5, en donde se mueve el elemento del fluido de la Sección 1 a la Sección 2, por lo que la p , v y z son diferentes. Por lo tanto, la energía total en la Sección 1 es:

$$E_1 = wz_1 + \frac{wv_1^2}{g} + \frac{wp_1}{\gamma}$$

Y la energía total en la Sección 2 está dada por:

$$E_2 = wz_2 + \frac{wv_2^2}{g} + \frac{wp_2}{\gamma}$$

Entonces por el principio de conservación de la energía, mientras no existan pérdidas o energía que se agregue se tiene:

$$E_1 = E_2$$

$$wz_1 + \frac{wv_1^2}{g} + \frac{wp_1}{\gamma} = wz_2 + \frac{wv_2^2}{g} + \frac{wp_2}{\gamma}$$

Reduciendo la Ecuación queda:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{g} + \frac{p_2}{\gamma} \tag{A.11}$$

La Ecuación (A.11) es conocida como la Ecuación de Bernoulli (Mott, 2006).

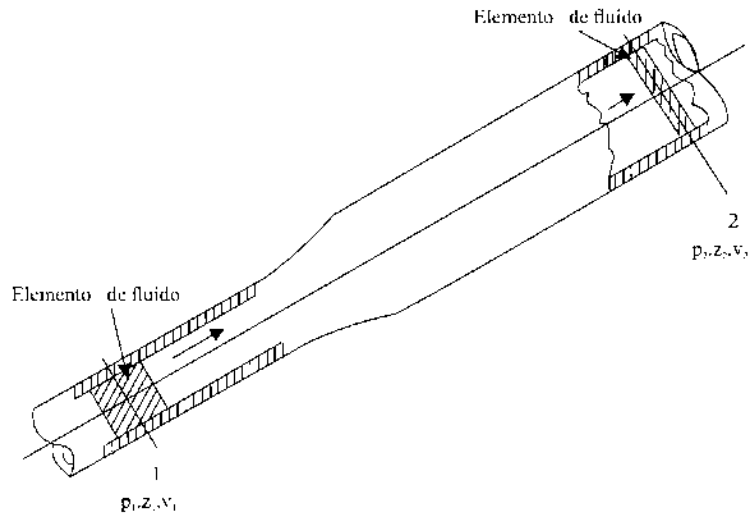


Figura A.5 Elementos de fluido utilizados en la Ecuación de Bernoulli.

A.6.1 Interpretación de la Ecuación de Bernoulli

Cada término de la Ecuación de Bernoulli es una forma de la energía que posee el fluido por unidad de peso que se mueve en el sistema. La unidad resultante de la Ecuación de Bernoulli (Ecuación (A.11)) es el metro (m), el cual se interpreta como una altura. Así, para el análisis del flujo de fluidos es común expresar los términos como una altura sobre un nivel de referencia, es decir:

$\frac{p}{\gamma}$ es la carga de presión

z es la carga de elevación

$\frac{v^2}{2g}$ es la carga de la velocidad

La suma de estos tres términos se llama carga total.

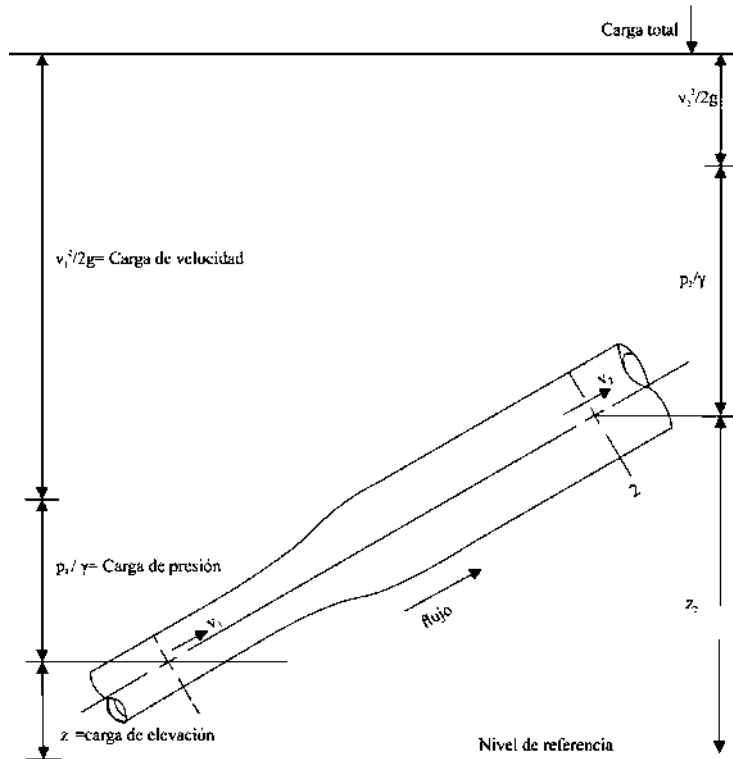


Figura A.6 Carga total.

Se muestra en la Figura A.6, como cada término de la Ecuación de Bernoulli representa una altura y la relación entre los tres tipos de energía. Esta Ecuación se utiliza para calcular los valores de carga de presión, carga de elevación y cambio de la carga de velocidad, conforme circula el fluido a través del sistema.

Observando la Figura A.6, se puede deducir que la carga de velocidad en la Sección 2 es menor que en la Sección 1. Lo cual se demuestra con la Ecuación de continuidad (Ecuación (A.7)):

$$v_2 = v_1(A_1/A_2)$$

Como $A_1 < A_2$, v_2 debe ser menor que v_1 y como la velocidad se encuentra elevada al cuadrado en el término de la carga de la velocidad, $v_2^2/2g$ es mucho menor que $v_1^2/2g$. En conclusión, cuando crece el tamaño de la Sección, la carga de presión se incrementa debido a que la carga de la velocidad disminuye. Sin embargo el cambio real, también se ve afectado por el cambio en la carga de elevación.

La Ecuación de Bernoulli toma en cuenta los cambios en la carga de elevación, carga de presión y carga de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no hay pérdidas o adiciones de energía entre los dos puntos, por lo que la carga total permanece constante.

Es importante que al escribir la Ecuación de Bernoulli se utilicen en los dos puntos de referencia la misma presión, ya sea como presión absoluta o como presión manométrica. Es conveniente utilizar la presión manométrica, debido a que algunas partes del fluido expuestas a la atmósfera tendrán una presión manométrica igual a cero. Además de que la mayoría de los medidores de presión miden con respecto a la presión atmosférica local (Mott, 2006).

A.6.2 Pérdidas de energía por fricción y coeficiente de resistencia

Las pérdidas y ganancias de energía en un sistema se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que pasa por él. También conocido como carga. Las cargas para pérdidas y ganancias son:

- h_A = Energía que se agrega al fluido por un dispositivo mecánico (como una bomba) se le puede denominar carga total sobre el elemento (la bomba).
- h_R = Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico (como un motor de fluido).
- h_L = Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías o pérdidas menores por válvulas y otros accesorios.

La energía térmica que se transfiere hacia el fluido o fuera de él, se omite porque es mínima para este tipo de problemas.

La magnitud de las pérdidas de energía por fricción del fluido, las válvulas y accesorios, es directamente proporcional a la carga de velocidad del fluido:

$$h_L = K(v^2/2g) \tag{A.12}$$

donde K es el coeficiente de resistencia, v es la velocidad promedio del flujo donde ocurre la pérdida menor (Mott, 2006). El coeficiente de resistencia es adimensional y su magnitud depende de la geometría del dispositivo que ocasiona la pérdida. Algunas geometrías son mostradas en la Figura A.7, y se explican a continuación:

- **Expansión súbita (Figura A.7a):** Se da cuando un fluido pasa de una tubería pequeña a otra más grande, su velocidad se reduce rápidamente provocando turbulencia y a su vez genera pérdida de energía. La turbulencia y la pérdida de energía dependen de la razón de tamaños de las dos tuberías.
- **Pérdida en la salida (Figura A.7b):** Cuando el fluido pasa de una tubería a un depósito grande, su velocidad disminuye casi hasta cero. El valor de $K = 1$ sin importar la forma de la salida del tubo que conecta al depósito.
- **Expansión gradual (Figura A.7c):** Cuando la transición de una tubería menor a una mayor no es tan repentina, obteniendo una expansión gradual y menos pérdidas de energía. La magnitud K depende de la relación de diámetros D_2/D_1 como del ángulo del cono θ .
- **Contracción súbita (Figura A.7d):** Sucede cuando pasa de una tubería grande a otra más pequeña. El coeficiente de resistencia K depende de la relación de los diámetros D_1/D_2 y de la velocidad de flujo v_2 . Las trayectorias del flujo cuando se acercan a la contracción adoptan una forma curva en donde la Sección transversal mínima efectiva del flujo es menor que la tubería más pequeña, a esta área mínima se llama vena contracta. Después de la vena contracta el flujo desacelera y se expande de nuevo para llenar la tubería.
- **Contracción gradual (Figura A.7e):** la pérdida de energía puede disminuir significativamente en una contracción gradual. La contracción se forma por una Sección cónica entre los dos diámetros con bordes afilados en las uniones y se llama ángulo del cono μ . El coeficiente de resistencia depende de la relación de los diámetros D_1/D_2 y del ángulo del cono (ver Apéndice B)
- **Contracción gradual con un extremo redondeado en el diámetro pequeño (Figura A.7f):** si se redondea el extremo de la transición cónica para que se ajuste al tubo más pequeño, se disminuye el coeficiente de resistencia K . Si el extremo se redondea a razón de $0.05(D_2)$ disminuye significativamente K .

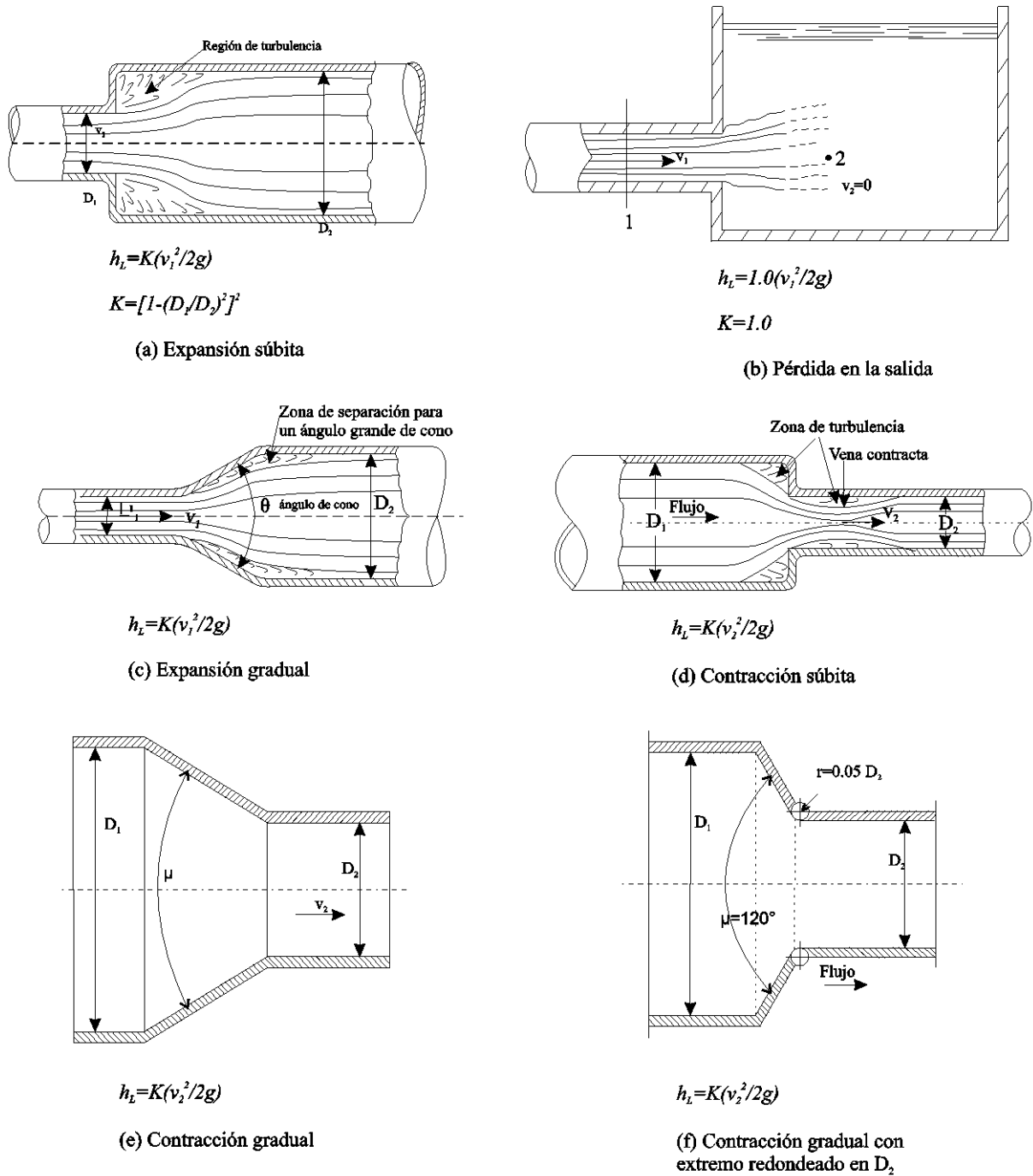


Figura A.7 Pérdidas menores, a) Expansión súbita, b) Pérdida de la salida, c) Expansión gradual, d) Contracción súbita, e) Contracción gradual y f) Contracción gradual con extremo redondeado.

A.7 Flujo laminar, flujo turbulento, número de Reynolds y radio hidráulico.

A.7.1 Flujo laminar

Se llama flujo laminar o corriente laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado (ver Figura A.8), de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin mezclarse entre sí. Se dice que este flujo es aerodinámico, es decir cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente (Mataix, 1982).

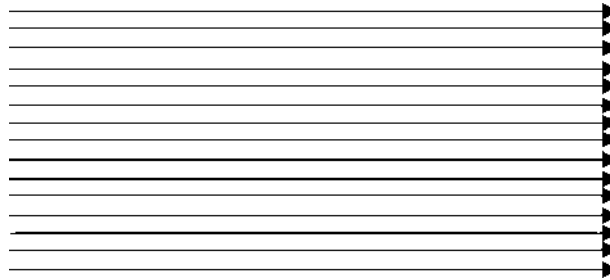


Figura A.8 Flujo laminar.

La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media. La velocidad toma la forma de una parábola (ver Figura A.9), donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es cero en la pared de la tubería.

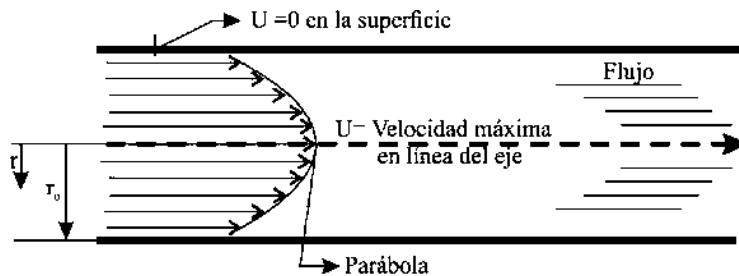


Figura A.9 Análisis de la velocidad en un tubo con flujo laminar.

La Ecuación que define la velocidad local en cualquier punto dentro de la trayectoria del flujo laminar es la siguiente:

$$U = 2v \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \tag{A.13}$$

donde U es la velocidad local en un radio r , el radio máximo con r_o y la velocidad promedio con v .

A.7.2 Flujo turbulento

Se llama flujo turbulento, al tipo de movimiento de un fluido que se da en forma caótica, es decir las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos, por lo que la trayectoria se puede predecir hasta una cierta escala (a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible).

Cuando las velocidades de flujo son habitualmente muy altas o en fluidos en que las fuerzas viscosas son muy pequeñas sucede el flujo turbulento (ver Figura A.10). La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se muevan a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en un conducto rugoso (Mataix, 1982).

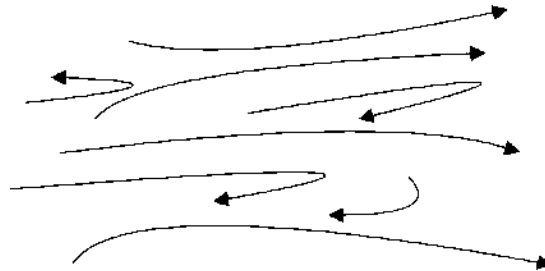


Figura A.10 Flujo turbulento.

Cuando el flujo cambia de laminar a turbulento se llama zona de transición. Las velocidades mayores producen más oscilaciones hasta que el flujo se vuelve turbulento eventualmente.

Algunas razones importantes para crear el flujo turbulento son:

- Favorecer la mezcla de dos o más fluidos.
- Acelerar reacciones químicas.
- Incrementar la transferencia de calor hacia dentro o fuera del fluido.

La velocidad en el flujo turbulento es muy diferente a la distribución parabólica del flujo laminar. La Figura A.11 muestra el flujo turbulento en una tubería.

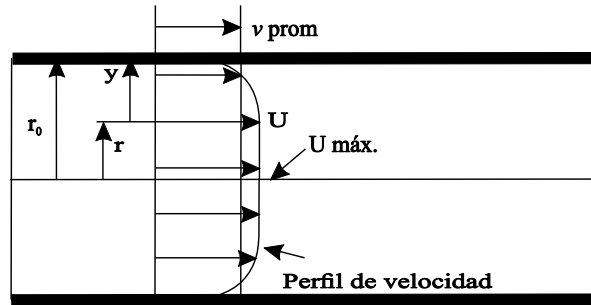


Figura A.11 Análisis de la velocidad en un tubo con flujo turbulento.

La máxima velocidad ocurre en el centro de la tubería. La velocidad cerca de la pared del tubo cambia con rapidez desde cero en la pared a una distribución casi uniforme en toda la Sección transversal. La forma real de la velocidad varía con el factor de fricción f , y este a su vez cambia con el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

$$U = v \left[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left(1 - \frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (\text{A.14})$$

Si $y = r_0 - r$, entonces la Ecuación (A.14) queda:

$$U = v \left[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left(\frac{y}{r_0} \right) \right]$$

Cuando $r = 0$ ocurre la velocidad máxima y su valor se calcula a partir de:

$$U = v(1 + 1.43\sqrt{f})$$

A.7.2.1 Clasificación de las turbulencias

Con base en la meteorología, la clasificación de las turbulencias es la siguiente:

- a) Turbulencias mecánicas, también llamada turbulencia de rozamiento. Esta turbulencia se origina por el paso del aire sobre edificios, arboles, colinas, etc. (ver Figura A.12), también se puede generar por la diferencia en la velocidad del viento o en su dirección entre dos puntos, a este fenómeno se le conoce como cizalladura.

Cuando un fluido circula en las proximidades de una superficie límite estacionaria, la velocidad, que es nula en contacto con la superficie, crece progresivamente al atravesar la capa límite creando un movimiento inestable (Sendiña Nadal & Pérez Muñuzuri, 2006).

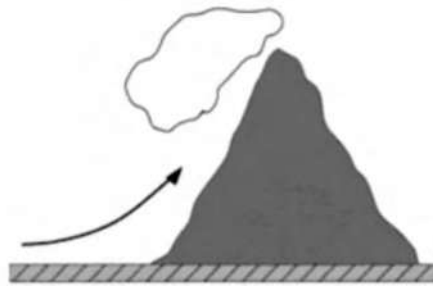


Figura A.12 Turbulencia Mecánica.

- b) Turbulencias convectivas: Originadas por transportar el calor por medio del movimiento de un fluido (ver Figura A.13), ya sea por efecto del calentamiento en superficie debido a la insolación del suelo o también, por el paso de una masa de aire relativamente fría sobre una superficie terrestre u oceánica más caliente. Al aumentar la temperatura en las capas bajas, aumenta el gradiente vertical de temperatura y como consecuencia se genera la turbulencia (Sendiña Nadal & Pérez Muñuzuri, 2006).

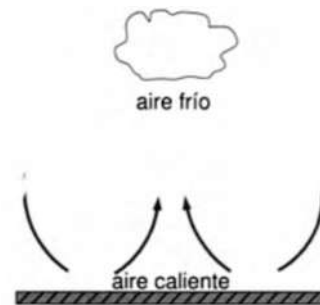


Figura A.13 Turbulencia convectiva.

A.7.3 Número de Reynolds.

El comportamiento de un fluido en relación a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Como no siempre se puede observar lo anterior, existe una manera de predecir de que tipo será el flujo, y para calcularlo depende de cuatro variables: la densidad del fluido (ρ), la viscosidad dinámica (n), el diámetro del tubo (D) y la velocidad promedio del flujo (v). Este cálculo se conoce como el número adimensional de Reynolds que para secciones transversales circulares llenas su definición básica es:

$$N_R = \frac{vD\rho}{n} = \frac{vD}{\mu} \quad (\text{A.15})$$

La Ecuación (A.15) es equivalente debido a que la viscosidad cinemática es $\mu = n/\rho$.

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la segunda ley de Newton $F = ma$ y la fuerza viscosa se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área (Mott, 2006).

También puede considerarse el número de Reynolds, como la relación de una tensión de corte (τ_t) debida a la turbulencia con una tensión de corte (τ_v) debida a la viscosidad.

$$\tau_t = \rho u'v \quad (\text{A.16})$$

$$\tau_v = \frac{\mu u'}{L} \quad (\text{A.17})$$

u' = Variación de la velocidad en la distancia L . Entonces:

$$\frac{\tau_t}{\tau_v} = \frac{vL\rho}{\mu} \quad (\text{A.18})$$

La Ecuación (A.20), tiene la forma de un número de Reynolds. (Streeter, 1992)

Cuando el número de Reynolds es grande, se debe a flujos a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja, es decir que tienden a ser turbulentos. Por otra parte, cuando los fluidos con viscosidad alta y/o que se mueven a bajas velocidades, tendrán número de Reynolds bajos y se comportan en forma laminar.

Cuando se tiene un $N_R < 2000$ ocurre un flujo laminar y un flujo turbulento se da si $N_R > 4000$. El número de Reynolds representa lo efectos de la viscosidad relativa (μ) en relación con la inercia del fluido. La región de transición se da entre $2000 < N_R < 4000$, aquí el tipo de flujo es imposible de determinar. Como se observa en la Figura A.14, se grafican algunos valores de D/ε , donde se pueden hacer las siguientes observaciones: (Mott, 2006)

- Un número de Reynolds dado, aumenta la rugosidad relativa D/ε y el factor de fricción f disminuye.
- La rugosidad relativa D/ε y el factor de fricción f disminuye con el aumento del número de Reynolds hasta que llega a la zona de turbulencia completa.
- En turbulencia completa, el número de Reynolds no tiene ningún efecto sobre el factor de fricción.
- Si se incrementa la rugosidad relativa D/ε , también crece el número de Reynolds donde comienza la zona de turbulencia completa.

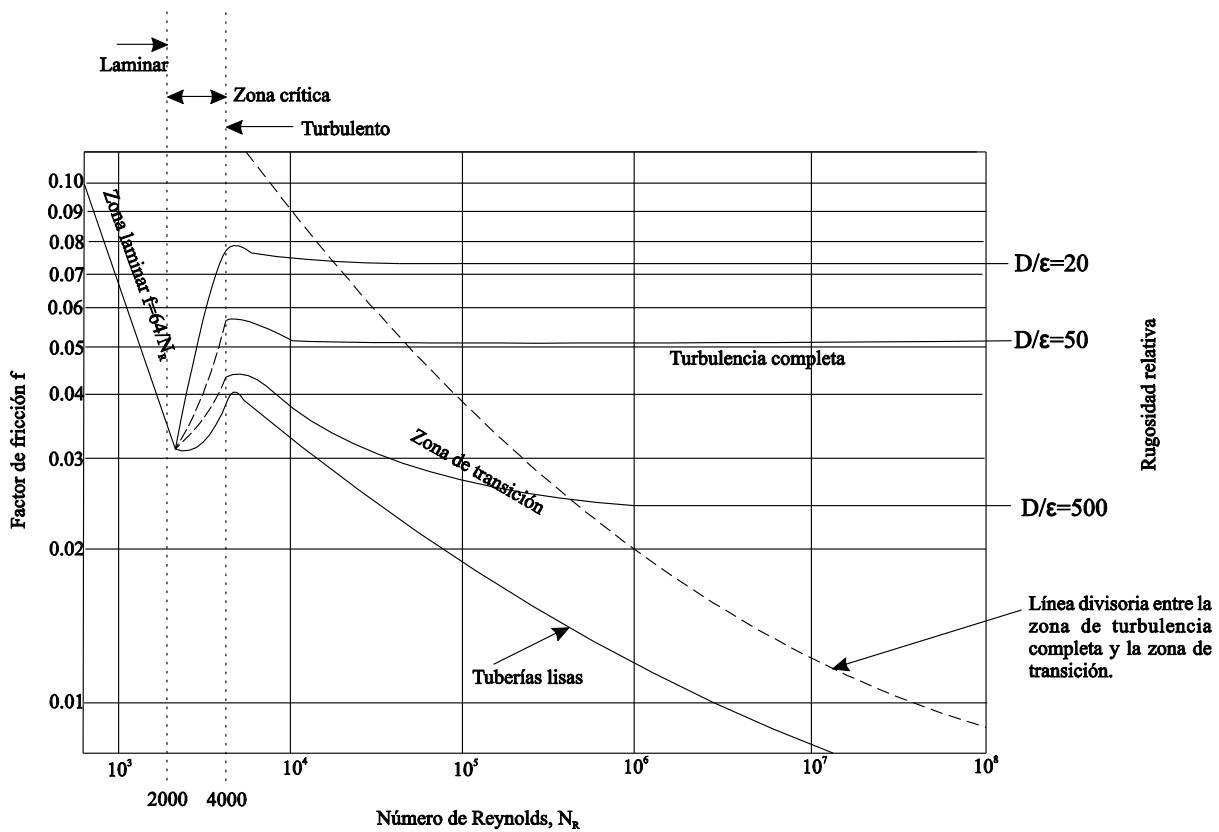


Figura A.14 Diagrama de Moody (Mott, 2006).

El diagrama de Moody (ver Figura A.14) se usa para determinar el valor del factor de fricción para el flujo turbulento.

Para determinar el factor de fricción de manera analítica, para el flujo laminar se tiene:

$$f = 64/N_R \quad (\text{A.19})$$

Cuando $2000 < N_R < 4000$, el flujo está en la zona crítica y es imposible de predecir el valor de f .

Para calcular el factor de fricción para el flujo turbulento es:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (\text{A.20})$$

Por otro lado, la única variación cuando se calcula el número de Reynolds en secciones transversales no circulares es la sustitución del diámetro por cuatro veces el radio hidráulico ($4R_h$), por lo que la Ecuación (A.15) queda:

$$N_R = \frac{v(4R_h)\rho}{n} = \frac{v(4R_h)}{\mu} \quad (\text{A.21})$$

El número de Reynolds, se utiliza para estudiar la similitud dinámica de los flujos sobre un cuerpo y sus modelos a escala. Cuando el número de Reynolds es igual en puntos similares del modelo a escala y el cuerpo real o prototipo; la similitud mecánica es exitosa.

Una función iterativa propuesta por Karman- Prandtl cuando el número de Reynolds es mayor a 100,000 es:

$$f = \left[2 \text{Log}_{10}(N_R \sqrt{f}) - 0.8 \right]^{-2} \quad (\text{A.22})$$

A.7.4 Radio hidráulico

El radio hidráulico es la dimensión característica para secciones transversales no circulares, y está definida como la relación del área transversal neta de una corriente al perímetro mojado de la Sección:

$$R_h = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} = \frac{A}{PM} \quad (\text{A.23})$$

la unidad del R_h es el metro para el sistema internacional de unidades.

Para obtener el radio hidráulico, el área (A) transversal debe realizarse a partir de la geometría de la Sección. El perímetro mojado (PM), es la suma de la longitud de las fronteras sólidas de la Sección que entra en contacto con el fluido. En la Figura A.15 se dan las expresiones para encontrar el área y el perímetro mojado para las secciones ilustradas. La línea punteada indica el perímetro mojado.

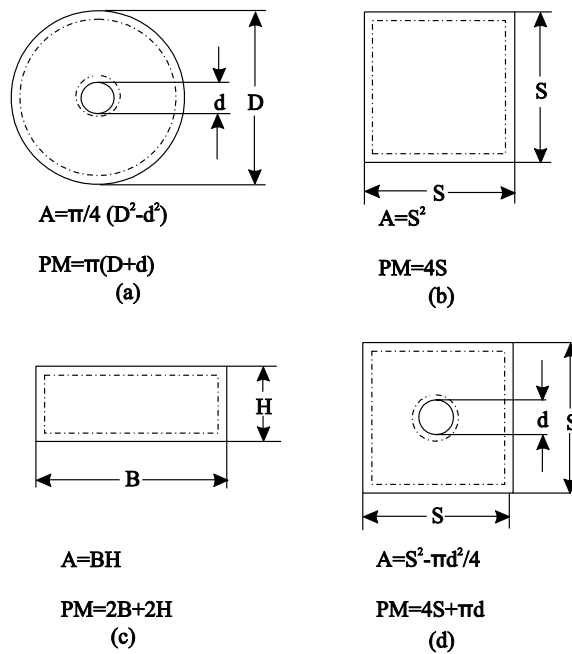


Figura A.15 Secciones transversales cerradas que no son circulares, a) Círculo perforado circularmente en el centro, b) Cuadrado, c) Rectángulo y d) Cuadrado perforado circularmente en el centro.

A la pérdida por fricción, si la geometría es representada por el radio hidráulico en lugar del diámetro de la tubería, se conoce como la Ecuación de Darcy:

$$h_L = f \frac{L}{4R_h} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{A.24})$$

donde ε es la rugosidad, y la rugosidad relativa se convierte en $4R/\varepsilon$, y el factor de fricción f se encuentra con el Diagrama de Moody (Figura A.14).

A.8 Efecto Venturi

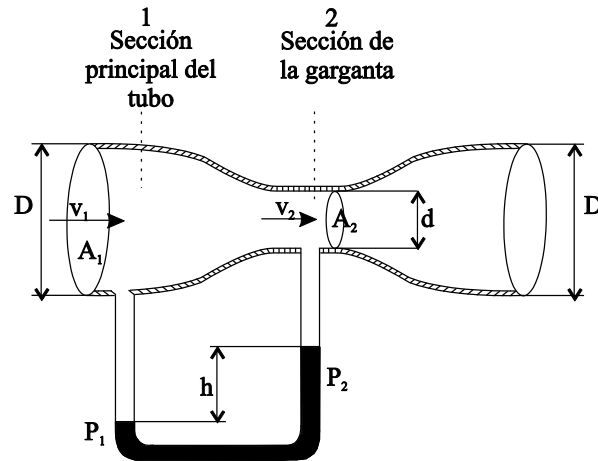


Figura A.16 Tubo Venturi Herschel.

En la Figura A.16, el flujo a la entrada de la tubería principal en la Sección 1 se hace acelerar a través de una Sección estrecha llamada garganta, donde la presión del fluido disminuye. En seguida, el flujo se expande a través de una parte divergente que alcanza el mismo diámetro de la tubería principal. La caída de presión en la garganta se puede calcular con $P_1 - P_2$.

Si el caudal de un fluido es constante pero la Sección disminuye, la velocidad aumenta. Por el principio de conservación de la energía, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye.

La relación para el flujo volumétrico es obtenida con la Ecuación de la energía y la de continuidad. Se toman como puntos de referencia la Figura A.16 para escribir las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1}{\rho} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\rho} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Entonces, la velocidad de flujo en la Sección 1 está dada por:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\left[\frac{(P_1-P_2)}{\rho} + (z_1-z_2) - h_L\right]}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \quad (\text{A.25})$$

A la Ecuación (A.25), se le pueden hacer dos simplificaciones. Si el tubo Venturi se instala en posición horizontal, la diferencia de elevación es cero y h_L es la pérdida de energía del fluido cuando pasa de la Sección 1 a la 2, se puede eliminar este término y agregar un coeficiente de descarga C que representa la relación de la velocidad real de energía a través del tubo Venturi a la velocidad ideal para un tubo Venturi sin pérdida de energía, por lo que C siempre será menor que 1.0.

$$v_1 = C \sqrt{\frac{2g\left(\frac{P_1-P_2}{\rho}\right)}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \quad (\text{A.26})$$

Entonces el flujo volumétrico se calcula:

$$Q = CA_1 \sqrt{\frac{2g\left(\frac{P_1-P_2}{\rho}\right)}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \quad (\text{A.27})$$

El tubo que se ilustra en la Figura A.16, está diseñado para minimizar las pérdidas de energía con el empleo de una contracción lisa y gradual en la garganta y una expansión lisa y gradual después de esta (Mataix, 1982).

A.9 Fuerza de arrastre y de sustentación

A.9.1 Fuerza de arrastre

Es la fuerza sobre un cuerpo ocasionado por el fluido que opone resistencia en la dirección del movimiento del cuerpo. La aplicación más importante que requiere el estudio del arrastre, es en el campo del transporte. La resistencia al viento es la expresión más usada para describir los efectos de arrastre sobre aeronaves, automóviles, camiones y trenes.

La fuerza de arrastre debe contrarrestarse con una fuerza de propulsión en la dirección opuesta, con el fin de mantener o incrementar la velocidad del objeto (Streeter, 1992).

La fuerza de arrastre (F_D) se representa:

$$F_D = C_D \left(\frac{1}{2} \rho v^2 A \right) \quad (\text{A.28})$$

dónde:

- C_D es el coeficiente de arrastre, el cual es un número adimensional y depende de la forma del cuerpo y su orientación con respecto a la corriente del fluido.
- ρ es la densidad del fluido.
- v es la velocidad de la corriente libre del fluido en relación con el cuerpo.
- A área característica del cuerpo (área proyectada que es la superficie transversal máxima del cuerpo).
- $\frac{\rho v^2}{2}$ es la presión dinámica, la fuerza de arrastre F_D es proporcional a la presión dinámica.

En la Figura A.17, se muestra lo que afecta la presión dinámica sobre el arrastre. Las líneas de corriente muestran la trayectoria del fluido conforme este se acerca y fluye alrededor de la esfera. En el punto s la corriente de fluido está estancada. La relación entre la presión p_s y la presión de corriente no perturbada en p_1 se encuentra por medio de la Ecuación de Bernoulli:

$$p_s = p_1 + \gamma \frac{v_1^2}{2g} = p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \quad (\text{A.29})$$

Debido a que la densidad es $\rho = \gamma/g$.

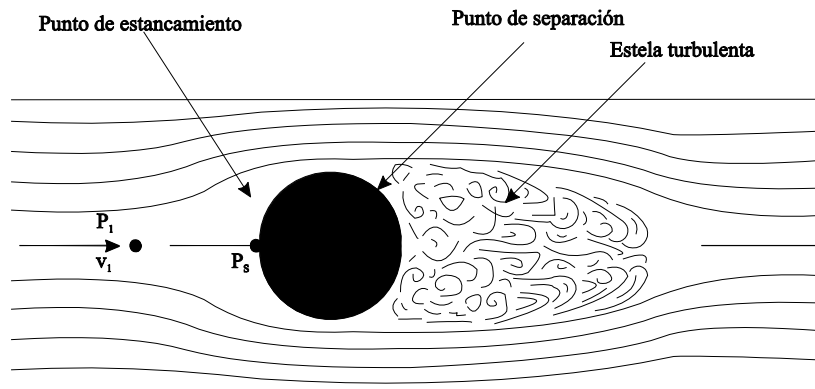


Figura A.17 Esfera en una corriente de fluido

La magnitud de la fuerza no solo depende de la presión de estancamiento, sino también de la presión del lado trasero del cuerpo. Como es muy difícil predecir la variación real de la presión del lado de atrás del cuerpo, se utiliza el coeficiente de arrastre. (Streeter, 1992)

El arrastre total del cuerpo se debe al arrastre de presión y al arrastre de fricción.

$$F_D = F_{D,presión} + F_{D,fricción} = C_{D,presión} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 A \right) + C_{D,fricción} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 A \right) \quad (A.30)$$

$$C_D = C_{D,presión} + C_{D,fricción} \quad (A.31)$$

A.9.1.1 Arrastre de presión

La fuerza de arrastre de presión es originada por los disturbios de la corriente de flujo conforme pasa el cuerpo, lo que crea una estela turbulenta. Las características de los disturbios dependen de la forma del cuerpo, del número de Reynolds del flujo y de la rugosidad de la superficie. La presión en la estela es mucho más baja que en el punto de estancamiento (P_s), creando una fuerza neta que actúa en dirección opuesta al movimiento. La cantidad del arrastre de presión depende de la forma del cuerpo, entonces para reducir el arrastre lo más recomendable es hacer el cuerpo más aerodinámico.

La fuerza de arrastre de presión se calcula con la Ecuación (A.28), donde A se toma como la máxima área de Sección transversal del cuerpo, perpendicular al flujo.

La magnitud del coeficiente de arrastre para el arrastre de presión depende de factores como la forma del cuerpo, el número de Reynolds del flujo, la rugosidad de la superficie y de la influencia de otros cuerpos o superficies cercanas.

Para esferas y cilindros el número de Reynolds se calcula con la Ecuación (A.15), considerando la diferencia que D es el diámetro del cuerpo.

Para el cálculo del número de Reynolds para las formas de la Figura A.18, se utiliza la longitud del cuerpo paralelo al flujo (L), de la siguiente manera:

$$N_R = \frac{vL}{\nu} \quad (A.32)$$

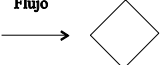

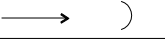

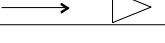
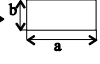



| Forma del objeto | Orientación | | C_D |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|
| Cilindro cuadrado | Flujo  | | 1.60 |
| Cilindros semitubulares |  | | 1.12 |
| |  | | 1.30 |
| Cilindros triangulares |  | | 1.05 |
| |  | | 1.85 |
| Placa rectangular |  | a/b | |
| | | 1 | 1.16 |
| | | 8 | 1.23 |
| | | 25 | 1.57 |
| | | ... | ... |
| ∞ | 2.00 | | |
| Discos en tándem L= espaciamento d= diámetro |  | L/d | |
| | | 1 | 0.93 |
| | | 1.5 | 0.78 |
| | | 2 | 1.04 |
| 3 | 1.52 | | |
| Disco circular |  | | 1.11 |
| Cilindro |  | L/d | |
| | | 1 | 0.91 |
| | | 2 | 0.85 |
| | | 4 | 0.87 |
| 7 | 0.99 | | |

Figura A.18. Coeficientes de arrastre comunes.

A.9.1.2 Arrastre de fricción

El arrastre debido a fricción es la componente de la fuerza de fricción en la dirección del flujo, y por lo tanto depende de la orientación del cuerpo así como de la magnitud de la tensión de corte τ_v . El arrastre debido a fricción es cero para una superficie plana perpendicular al flujo, y máximo para una superficie plana paralela al flujo, ya que el arrastre debido a la fricción en este caso es igual a la fuerza de fricción total de la superficie.

Este arrastre depende en mayor parte de la viscosidad, y aumenta con viscosidad creciente. El número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. En consecuencia, la contribución del arrastre debido a la fricción al arrastre total para cuerpos romos es menor a números de Reynolds grandes y puede ser despreciable conforme sea más grande. El arrastre en estos casos es debido principalmente a arrastre por presión.

Asimismo, también es proporcional al área superficial. Por lo tanto, los cuerpos con área superficial muy grande experimentan un arrastre debido a fricción mayor. Los aviones comerciales, por ejemplo, para ahorrar combustible reducen su área superficial total, y por lo tanto su arrastre.

El coeficiente de arrastre debido a la fricción es independiente de la rugosidad de la superficie en flujo laminar, pero influye considerablemente la rugosidad en flujo turbulento, debido a los elementos de rugosidad superficiales que sobresalen de la capa límite (Aguilar, et al., 2010).

Cuando se estudia el arrastre que tienen los cuerpos a través del aire, se puede utilizar la Ecuación (A.28). Es necesario conocer la densidad del aire, considerando que las propiedades del aire cambian con la temperatura, si aumenta la altura sobre el nivel del mar la densidad disminuye, etc. Por otro lado, la potencia que se requiere para vencer el arrastre es:

$$P_D = F_D v \tag{A.33}$$

donde la potencia es la rapidez de ejecución de un trabajo (Mott, 2006).

A.9.2 Fuerza de sustentación

Es una fuerza provocada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo. El estudio más trascendente está en el diseño y análisis de las alas de las aeronaves. La forma geométrica de la aeronave hace que genere una fuerza de sustentación cuando el aire pasa sobre y bajo el.

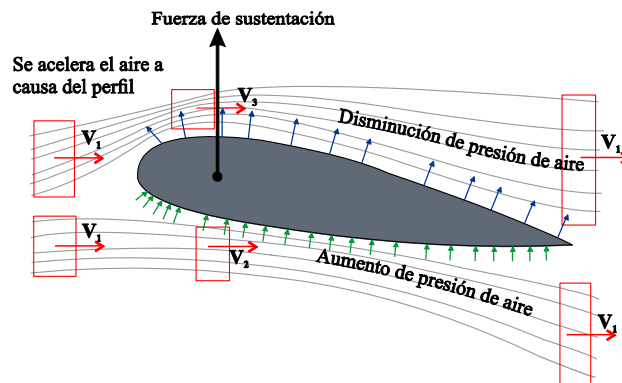


Figura A.19 Fuerza de sustentación

Algunas observaciones de la Figura A.19 son:

- Si aumenta la velocidad disminuye la presión y viceversa.
- Al haber menor presión arriba que abajo se genera la sustentación.
- Así es como actúan las alas de un avión.

La fuerza de sustentación en función del coeficiente de sustentación es:

$$F_L = C_L \left(\frac{1}{2} \rho v^2 A \right) \tag{A.34}$$

donde:

v = Es la velocidad de la corriente libre del fluido con respecto al cuerpo.

A = Es el producto de la extensión por la longitud de la cuerda ($A = bc$). Figura A.20

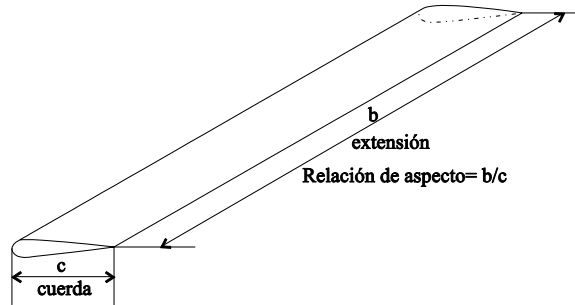


Figura A.20 Extensión y cuerda de un aeroplano.

El coeficiente de sustentación principalmente es función de la forma del cuerpo y del ángulo de ataque, otros factores que afectan la sustentación son: el número de Reynolds, la rugosidad de la superficie, la turbulencia de la corriente de aire, la relación de la velocidad de corriente del fluido a la velocidad del sonido y la relación de aspecto.

El ángulo de ataque es un ángulo que forma la línea de cuerda del objeto con la dirección de la velocidad del fluido, una manera de cambiar las características de sustentación es modificando el ángulo de ataque del aire. Como se muestra en la Figura A.21:

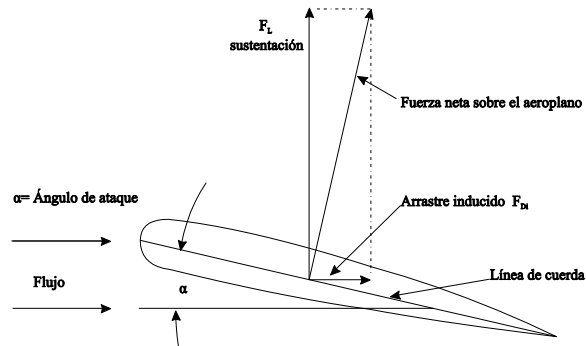


Figura A.21 Arrastre inducido

El arrastre inducido se expresa como:

$$F_{Di} = C_{Di} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 A \right) \quad (A.35)$$

Siendo el arrastre total:

$$F_D = F_{D,presión} + F_{D,fricción} + F_{D,inducido} \quad (A.36)$$

A.10 Capa límite

Se denomina capa límite a la distancia que existe entre la superficie del perfil y el punto donde la velocidad es la de corriente libre. La capa molecular de aire en íntimo contacto con la superficie permanece adherida a esta, después existe un desplazamiento entre las diferentes capas, que conforme están a más distancia de la superficie, tienen una velocidad mayor hasta un punto en el que la velocidad de la capa de aire correspondiente es la de la corriente libre. El espesor de la capa límite es la distancia del punto de velocidad cero, a otro donde la velocidad es el 99% de la corriente libre. Ver Figura A.22

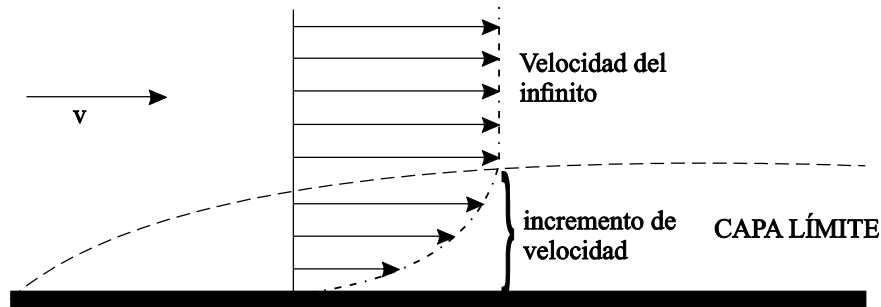


Figura A.22 Comportamiento de la velocidad bajo el efecto de la capa límite.

La capa límite es laminar, conforme el aire se va moviendo alejándose de la zona de llegada, las fuerzas de rozamiento disipan cada vez más la energía del flujo de aire como se observa en la Figura A.23, haciendo que el espesor de la capa límite aumente paulatinamente, hasta que a una cierta distancia de la zona de llegada, la capa límite empieza a sufrir unas perturbaciones de tipo ondulatorio, que acarrearán un aumento de espesor de la capa límite, y una destrucción del flujo laminar que existía, pasando a ser flujo turbulento (Schlichting, 1972).



Figura A.23 Capa límite laminar y turbulenta.

La capa límite tiene una propiedad fundamental, es que a través de ella se transmite la presión que existe en la corriente libre de aire hasta la pared, esto permite la medida de la velocidad, ya que se puede medir la presión estática.

A.11 Número de Mach

El número de Mach es la relación de la velocidad real de flujo a la velocidad del sonido en el medio donde se mueve el objeto, es un número adimensional. Para casos de flujo de aire, se determina con (Mott, 2006):

$$N_M = \frac{v}{c} \quad (\text{A.37})$$

Donde c es la velocidad del sonido en el aire a 0°C es 331.5 m/s , por cada grado Celsius que sube la temperatura, la velocidad del sonido aumenta en 0.6 m/s . Así para cualquier velocidad de flujo menor a ésta, tendremos un flujo subsónico (Fox & McDonald, 2006).

El número de mach nos permite expresar la velocidad de un objeto con respecto a la velocidad del sonido, considerando que la velocidad del sonido cambia dependiendo de las condiciones de la atmósfera, a mayor altura sobre el nivel del mar o menor temperatura de la atmósfera, menor es la velocidad del sonido. Por ejemplo, si conocemos el número de Mach, no es necesario saber la velocidad del sonido para saber si un avión que vuela a una velocidad dada la ha superado.

La importancia del número de Mach en la mecánica de fluidos es que compara la velocidad del objeto con la velocidad del sonido, la cual coincide con la velocidad máxima de las perturbaciones mecánicas en el fluido. Entonces el número Mach es también (Hasen, 1971):

$$N_M = \frac{\textit{fuerzas inerciales}}{\textit{fuerzas elásticas}}$$

Apéndice B

B. Cálculo de pérdidas menores de energía por fricción, contracción gradual

Para obtener el valor del coeficiente de resistencia contra la relación de diámetros para distintos valores del ángulo de cono, se muestran los datos de la Figura B.1

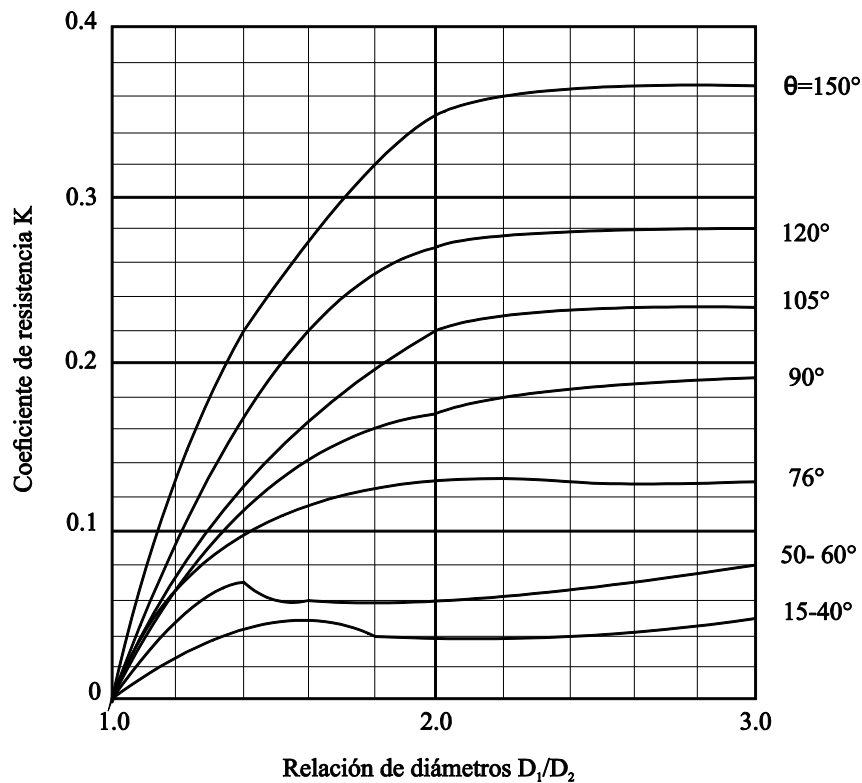


Figura B.1 Coeficiente de resistencia- contracción gradual con $\theta \geq 15^\circ$ (Idel'chik, 1960).

La pérdida de energía se calcula con la Ecuación (A.12), donde el coeficiente de resistencia se basa en la carga de velocidad en un tubo más pequeño después de la contracción. Estos datos son válidos para números de Reynolds mayores que 100,000. En la Figura B.1 se observa que para ángulos entre 15 y 40°, $K = 0.05$ o menos, un valor pequeño. Para ángulos de hasta 60°, K es menor que 0.08 (Streeter, 1992).

Mientras el ángulo del cono de contracción disminuye a menos de 15° , el coeficiente de resistencia se incrementa (Figura B.2) debido a que se toman en cuenta los datos tanto de la turbulencia local que ocasiona la separación del flujo como los de la fricción con el tubo. Para ángulos de conos más pequeños, la transición entre los dos diámetros es muy larga, lo que aumenta las pérdidas por fricción (Streeter, 1992).

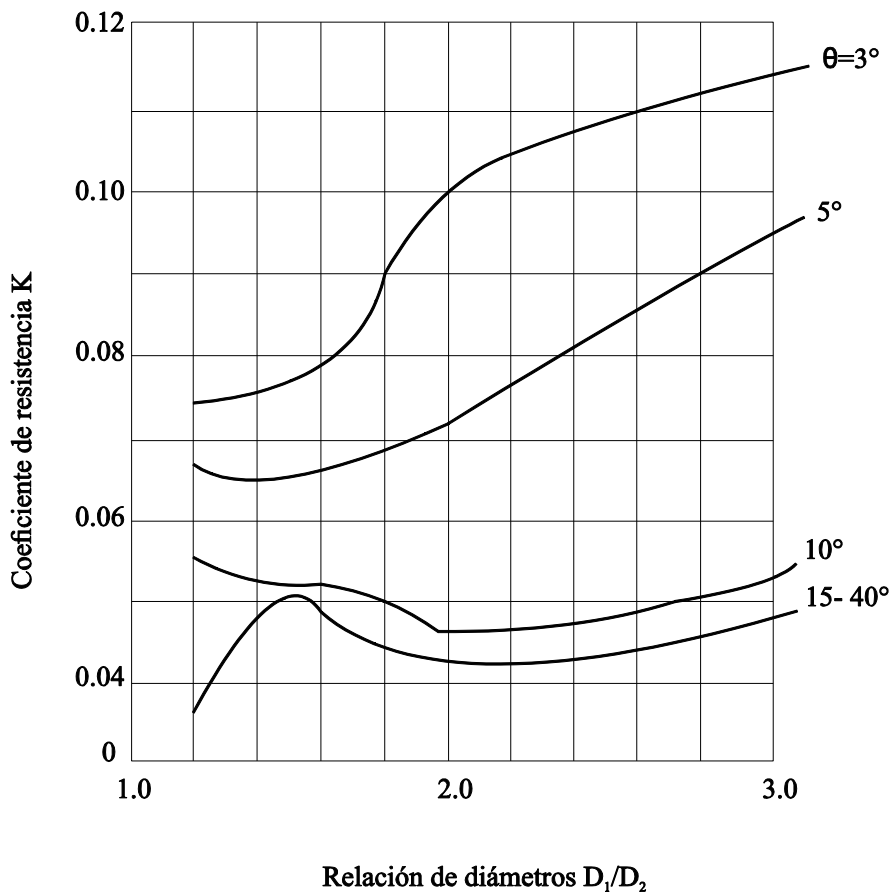


Figura B.2 Coeficiente resistencia- contracción gradual con $\theta < 15^\circ$ (Idel'chik, 1960).

Entonces, si se redondea el extremo de la transición cónica para que se ajuste al tubo más pequeño, disminuye el coeficiente de resistencia y se abaten los valores mostrados en la Figura B.1. Por ejemplo, en la Figura A.7.e se muestra una contracción gradual con extremo redondeado de 120° y $D_1/D_2 = 2.0$, entonces el coeficiente de resistencia disminuye de $K = 0.27$ a 0.10 aproximadamente. Lo anterior se logra con una relación de sólo $0.05(D_2)$, donde D_2 es el diámetro del tubo más chico (Streeter, 1992).

Apéndice C

C. Simetría

La simetría es un rasgo característico de formas geométricas, sistemas, ecuaciones y otros objetos físicos, o entidades abstractas, relacionada con su invarianza bajo ciertas transformaciones, movimientos o intercambios (Wald, 1984). Por ejemplo, bajo un conjunto de transformaciones se considera invariante, si la imagen transformada del objeto es indistinguible de la forma original.

La simetría es una particularidad muy importante para varias ciencias, tales como la física, la química, la biología y la geometría. En este Apartado se describirá la simetría geométrica.

C.1 Simetría geométrica

La simetría geométrica representa las transformaciones en objetos físicos, elementos geométricos o figuras en relación a un eje, foco o plano (Wald, 1984). Esta simetría puede ser del tipo esférica, axial, especular o reflectiva, traslacional, antitraslacional, rotorreflexión, helicoidal, entre otros. Algunos de estos tipos se describen a continuación:

- **Simetría esférica**, este tipo de simetría nos relaciona a un punto central, es decir, un sistema físico o geométrico tiene simetría esférica cuando todos los puntos a una cierta distancia del punto central son equivalentes (Girbau, 1993).

Un ejemplo de la simetría esférica es muestra en la Figura C.1.

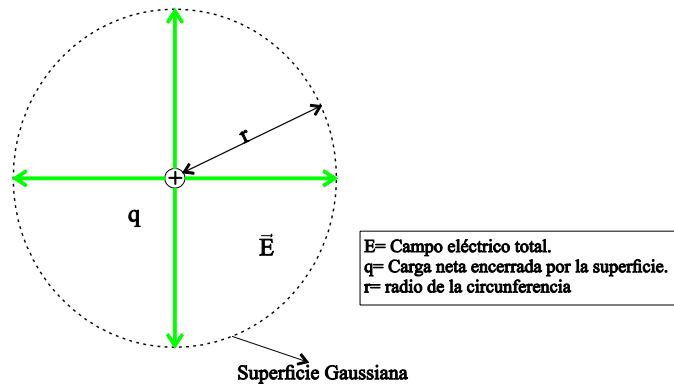


Figura C.1 Superficie esférica Gaussiana alrededor de una carga puntual (Serway, 1996).

- **Simetría axial** también llamada cilíndrica o radial, es la simetría alrededor de un eje de simetría axial, esto significa que todos los semiplanos tomados a partir de éste presentan idénticas características. (ver Figura C.2)

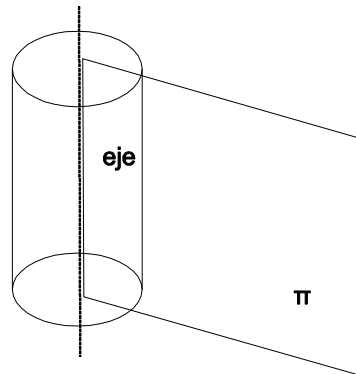


Figura C.2 Simetría axial respecto a un eje, en todos los semiplanos π , como el de la figura es idéntica.

En la simetría axial se produce el mismo fenómeno que se da al reflejar cualquier objeto en un espejo (ver Figura C.3).

El eje de simetría axial es una línea de referencia imaginaria tal que al rotar alrededor de ella una figura geométrica (ver Figura C.6.a), la figura resulta visualmente inalterada, es decir, si la forma se doblara por la mitad sobre el eje, las dos mitades serían iguales (Wald, 1984).

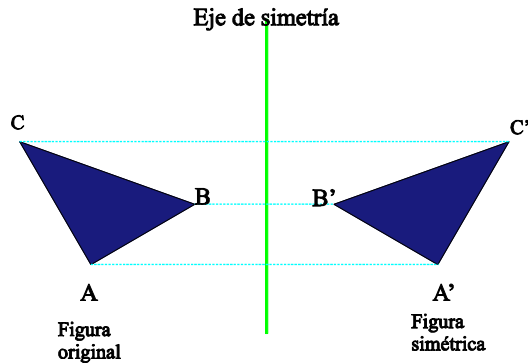


Figura C.3 Simetría axial de un triángulo.

En la Figura C.3 los puntos pertenecientes a la figura simétrica se les llama puntos homólogos, es decir, A' es homólogo de A , B' es homólogo de B y C' es homólogo de C . Asimismo, se observa que las distancias entre los puntos de la figura original al eje de simetría son iguales que las distancias entre los puntos de la figura simétrica al eje de simetría (Girbau, 1993).

Cabe mencionar que la simetría axial no solo se presenta entre un objeto y su reflexión, ya que existen muchas figuras que mediante una línea pueden dividirse en dos secciones que son simétricas con respecto a esta (ver Figura C.4 y Figura C.5). Un objeto tiene uno o más ejes de simetría, todos los polígonos regulares tienen tantos ejes de simetría como lados, un cuadrado por ejemplo, tiene cuatro ejes de simetría, debido a que hay cuatro diferentes formas de doblarlo y que sus bordes coincidan. Como se ilustra en la Figura C.4 (Girbau, 1993).

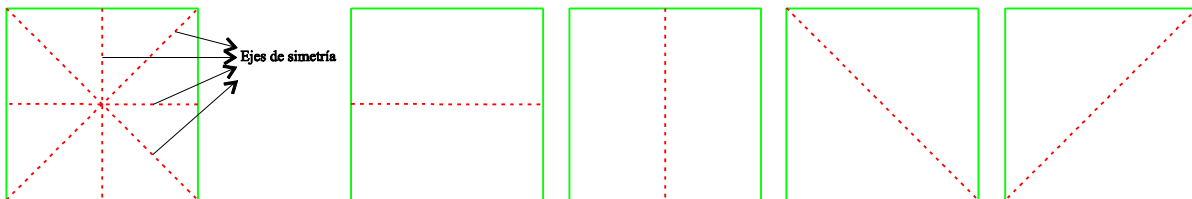


Figura C.4 Ejes de simetría de un cuadrado.

La Figura C.5 presenta algunos ejemplos de la simetría axial.

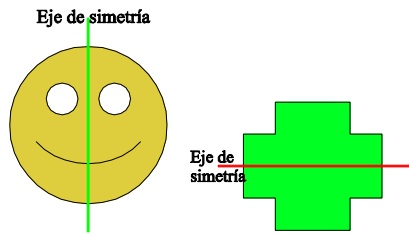


Figura C.5 Ejemplos de simetría axial.

- **Simetría especular o reflectiva**, es una transformación respecto de un plano de simetría, en la que cada punto de una figura se asocia a otro punto llamado imagen, que cumple con las siguientes condiciones (Wald, 1984):

- c. La distancia de un punto y su imagen al plano de simetría es la misma.
- d. El segmento que une un punto con su imagen, es perpendicular al plano de simetría.

El plano de simetría son superficies planas que dividen el objeto en dos mitades exactamente iguales (ver Figura C.6.b). Y el centro de simetría son puntos imaginarios situados en el interior del objeto, en donde pasan los principales ejes y planos de simetría (Girbau, 1993).

La Figura C.6 ilustra la diferencia entre eje de simetría axial y plano simétrico.

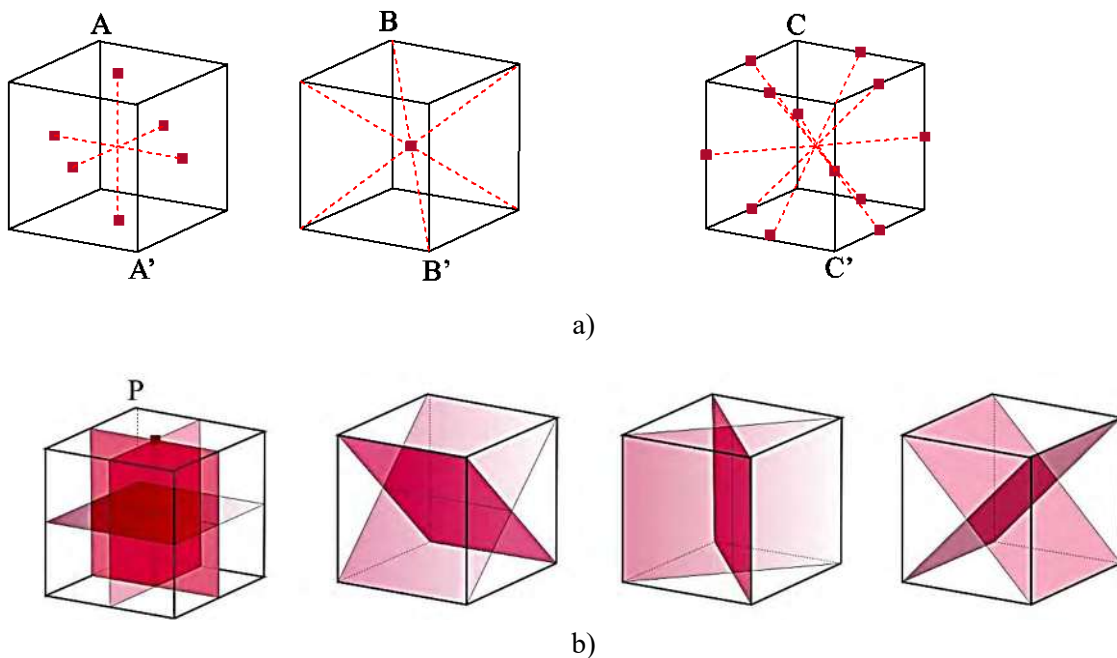
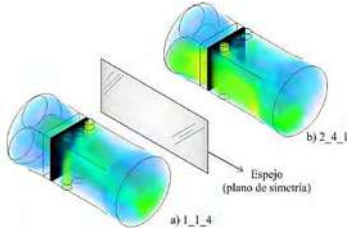
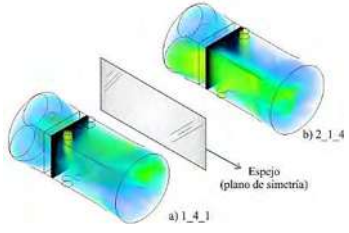
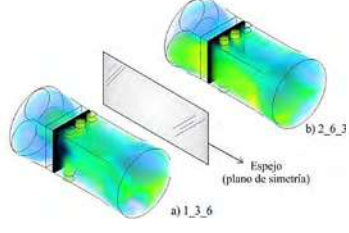


Figura C.6 a) Ejes de simetría, b) Planos de simetría.

Apéndice D

D. Casos de análisis de generación de turbulencias.

En el presente apéndice se expone el complemento de los casos analizados en la Sección 3.6, en donde existe simetría.

| Caso | Combinaciones simétricas | | Simetría | | Velocidad en cámara de pruebas (m/s) | | Plano de simetría |
|------|--------------------------|-------|------------|----------|--------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | Horizontal | Vertical | Min | Máx | |
| 13 | 1_1_4 | 2_4_1 | ● | ● | 15 | 22.5 |  |
| 14 | 1_4_1 | 2_1_4 | ● | ● | 15 | 22.5 |  |
| 15 | 1_3_6 | 2_6_3 | ● | ● | 15 | 25 |  |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|---|----|----|--|
| 16 | 1_6_3 | 2_3_6 | ● | ● | 15 | 25 | |
| 17 | 3_1_4 | 3_4_1 | ● | ● | 17 | 25 | |
| 18 | 3_3_6 | 3_6_3 | ● | ● | 17 | 27 | |
| 19 | 4_3_6 | 4_6_3 | ● | ● | 15 | 25 | |
| 20 | 5_1_4 | 6_4_1 | ● | ● | 17 | 25 | |
| 21 | 5_4_1 | 6_1_4 | ● | ● | 17 | 25 | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|---|----|----|--|
| 22 | 5_3_6 | 6_6_3 | ● | ● | 15 | 25 | |
| 23 | 5_6_3 | 6_3_6 | ● | ● | 17 | 25 | |
| 24 | 7_1_4 | 7_4_1 | ● | ● | 17 | 28 | |