

Universidad Autónoma de Baja California Facultad de Ingeniería

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e
Ingeniería



DESARROLLO DE MODELO DE SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO CON PARÁMETROS CONFIGURABLES

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO
EN CIENCIAS presenta:

José Eduardo Robles Miranda
Asesor: Dr. David Isaías Rosas Almeida
Co-asesor: Dr. Raúl Rascón Carmona

Mexicali, Baja California, México, Agosto de 2018

Agradecimientos

Al Dr. David Isaías Rosas Almeida, por su destacada ayuda y dirección en este proyecto de tesis, por impulsar el desarrollo profesional y humano de sus alumnos y su valiosa amistad.

Al Dr. Raúl Rascón Carmona, por compartir su tiempo, experiencia y sus valiosos comentarios.

Al Dr. Alejandro Sebastián Ortiz Pérez, por compartir su tiempo, así como por su valiosa asesoría y colaboración para este proyecto.

A mi familia por apoyarme siempre en todos mis proyectos.

Al programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por las instalaciones y atenciones brindadas.

Al CONACYT por apoyar el desarrollo profesional y tecnológico de los mexicanos.

RESUMEN de la Tesis de **Jose Eduardo Robles Miranda**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México, Agosto de 2018.

DESARROLLO DE MODELO DE SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO CON PARÁMETROS CONFIGURABLES

Resumen aprobado por:

Dr. David Isaías Rosas Almeida
Director de Tesis

En esta memoria de tesis se presenta un modelo de software para simulación de sistemas de túneles de viento, el cual es seccionado en bloques que representan las partes principales de un túnel, dichos bloques pueden ser ordenados y configurados con los parámetros particulares de la sección de un túnel determinado de manera que se puede calcular las principales variables de interés como presión, caudal y velocidad para cada sección, así como obtener un perfil de los coeficientes de pérdida en relación a la velocidad del flujo de entrada, este modelo considera condiciones de flujo totalmente desarrollado lo que permite realizar una evaluación del diseño de un túnel, analizar el comportamiento o implementar simulaciones en tiempo real del sistema, además se presenta una versión del modelo en la que se considera la dinámica del fluido. Se describen las ecuaciones en las que se basan cada bloque de sección, la forma de configurar e interpretar las simulaciones, y se realiza un procedimiento para la implementación de simulaciones en tiempo real con un análisis de la precisión de los resultados.

Palabras clave:

Modelo de software, túnel de viento, simulación en tiempo real.

ABSTRACT of the Thesis presented by **Jose Eduardo Robles Miranda**, in order to obtain the MASTER OF SCIENCES degree. Mexicali, Baja California, México, August 2018.

**DEVELOPMENT OF SOFTWARE MODEL FOR WIND TUNNEL SIMULATION
WITH CONFIGURABLE PARAMETERS**

Approved by:

Dr. David Isaías Rosas Almeida
Thesis Advisor

This memory of thesis presents a software model for wind tunnel simulation, this model is divided by blocks that represent the main parts of a wind tunnel, the blocks can be arrange and configured with the particular section parameters for many tunnel designs, in this way, the variables of interest like pressure, flow rate and velocity for each section can be calculated. Also, a profile for the pressure loss coefficients in relation to the upstream flow velocity of this model can be obtained, this model considers a fully developed flow, which allows evaluating a wind tunnel design, behavior analysis or real time simulations, in addition, a version of the model is presented in which fluid dynamics is considered. The equations for each section block are described, the procedure to configure and interpret the simulations, and a procedure to implement real time simulations is performed with a precision analysis of the results.

Keywords:

Model of software, wind tunnel, real time simulation.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES	4
1.1 Estructura de diseño de un túnel de viento	5
1.1.1 Configuración general de un túnel de viento de circuito abierto	6
1.1.2 Configuración general de un túnel de viento de tipo cerrado	7
1.2 Desempeño de un túnel de viento	8
1.2.1 Simplificaciones en cálculo de desempeño de un túnel de viento	8
1.2.2 Relación de energía.....	9
1.2.3 Pérdida de energía en los componentes del túnel	10
1.2.4 Pérdidas en una sección de área constante	12
1.2.5 Relaciones de presión dinámica y número Reynolds	15
1.2.6 Cálculo del número Mach local	16
2 DESCRIPCIÓN DE SECCIONES Y SUS COEFICIENTES DE PÉRDIDA ...	18
2.1 Fuente de propulsión	18
2.2 Difusor	19
2.3 Sección de prueba.....	21
2.4 Contracción o cono	22

2.5	Acondicionador de flujo	24
2.5.1	Estabilizadores de panal de abeja	24
2.6	Esquinas y aspas de giro	25
2.7	Ventanillas de seguridad	26
2.8	Pérdidas de presión	27
3	REPRODUCCIÓN DE MODELO DE SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO	29
3.1	Descripción del modelo de software	30
3.2	Parámetros generales y de geometría	33
3.3	Velocidades y números Mach	36
3.4	Coefficiente de fricción y número de Reynolds	37
3.5	Coefficiente de pérdida por expansión	39
3.6	Coefficientes de pérdida por sección particular	45
3.6.1	Sección área de pruebas sección constante	45
3.6.2	Sección área de pruebas con expansión	45
3.6.3	Contracción o cono	46
3.6.4	Difusor	46
3.6.5	Malla	46
3.6.6	Contracción en zona de ventilador	48
3.6.7	Estructuras internas (objetos obstructores)	49
3.6.8	Estructuras y soportes del ventilador en ductos anulares	50

3.6.9	Cálculo de presión diferencial en las paredes de los ductos.....	51
4	EJECUCIÓN DEL MODELO DE SOFTWARE.....	52
4.1	Resultados de la reproducción	53
4.1.1	Túnel de viento subsónico 14x9 pies del Instituto de Ciencias de la India.....	53
4.1.2	Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería UABC	54
5	MODELO DE SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN TÚNEL DE VIENTO CON DINÁMICA HIDRÁULICA	60
6	EJECUCIÓN EN TIEMPO REAL DEL MODELO	65
7	CONCLUSIONES.....	76
	REFERENCIAS	79
Apéndice A	COEFICIENTES DE PÉRDIDA DEL TÚNEL DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DE INDIA	81
Apéndice B	COEFICIENTES DE PÉRDIDA TÚNEL DE VIENTO UABC	82
Apéndice C	DIFERENCIAS A DETALLE ENTRE SIMULACIONES DE PASO VARIABLE, FIJO Y TIEMPO REAL	83

Lista de Figuras

Figura 1	Configuración típica de un túnel de viento, a) tipo abierto, b) tipo cerrado.	7
Figura 2	Representación de las líneas de flujo donde el diagrama superior es laminar y el inferior es turbulento.	15
Figura 3	Características geométricas del difusor.	19
Figura 4	Características geométricas de la sección de contracción	22
Figura 5	Tipos de paneles estabilizadores	24
Figura 6	Sección de esquina con aspas estabilizadoras.	26
Figura 7	Coefficiente de pérdida en relación a la velocidad del viento para la sección de prueba.	30
Figura 8	Configuración del bloque de referencia.	31
Figura 9	Representación gráfica del área efectiva en un ducto.	48
Figura 10	Programa para estimar el desempeño de un túnel de viento, basado en la características del túnel de viento del Instituto de Ciencias de la India	57

Figura 11	Túnel de viento 14 x 9 pies, del Instituto de Ciencias de India.	58
Figura 12	Comparación de presiones calculadas sin pérdidas y con pérdidas para cada sección túnel de viento Instituto de Ciencias de India.	58
Figura 13	Túnel de viento subsónico de la Facultad de Ingeniería UABC	59
Figura 14	Comparación de presiones calculadas sin pérdidas y con pérdidas para cada sección túnel de viento Facultad de Ingeniería UABC.....	59
Figura 15	Diagrama a bloques del modelo de un elemento hidráulico en un túnel de viento	63
Figura 16	Comparación de transitorios de presión ambiente a presión en flujo desarrollado en difusor túnel de viento de Instituto de Ciencias de India.....	64
Figura 17	Variación del tamaño de paso de una simulación en tiempo variable utilizando el modelo del túnel de viento.	67
Figura 18	Sobrecarga de ejecución en el tiempo de solución de un modelo en tiempo real.....	68
Figura 19	Comparación de la presión de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	69
Figura 20	Comparación del caudal de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	70
Figura 21	Comparación de la velocidad de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	70

Figura 22	Comparación de la presión de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.	72
Figura 23	Comparación del caudal de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.	72
Figura 24	Comparación de la velocidad de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.	73
Figura 25	Acercamiento de comparación de la presión de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	84
Figura 26	Acercamiento de comparación de la caudal de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	85
Figura 27	Acercamiento de comparación de la velocidad de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.	85
Figura 28	Acercamiento de comparación de la presión de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.	86

Lista de Tablas

Tabla 1	Clasificación de por número Mach para túneles de viento.	5
Tabla 2	Parámetros de configuración para cada sección del túnel de viento.	54
Tabla 3	Resultados obtenidos a partir del modelo de software para cada sección del túnel de viento.	55
Tabla 4	Parámetros de configuración para cada sección del túnel de viento.	56
Tabla 5	Resultados obtenidos a partir del modelo de software para cada sección del túnel de viento	56
Tabla 6	Diferencias en resultados de modelo reproducido y modelo dinámico contra resultados de referencia.	75

Introducción

Desde 1903 cuando los hermanos Wright lograron el primer vuelo en un aeroplano, el desarrollo de vehículos aéreos ha representado un reto en la historia de la ingeniería [1], hasta la actualidad con el desarrollo de aeronaves capaces de sobrepasar la velocidad del sonido, viajar largas distancias con enormes cargas de peso e incluso viajar a el espacio exterior.

El desarrollo este tipo de vehículos no es tarea fácil, es necesario validar los modelos y diseños que se llevan a cabo con diversos métodos antes de poder realizar una prueba de vuelo con la aeronave, esto se debe a que existe una normatividad rigurosa en materia de diseño aeronáutico, ya que la historia de la aviación ha sido marcada por varios tropiezos y diseños que terminaron en tragedias con pérdidas materiales y humanas. Por ello es necesario garantizar la mayor seguridad en la medida posible a la hora de diseñar, construir y probar un vehículo aéreo. Cabe señalar que los procedimientos de seguridad aumentan de manera significativa los costos de desarrollo, por lo que se han implementado diversas tecnologías y técnicas para tratar de minimizar los costos de pruebas.

Uno de los métodos más utilizados para disminuir los costos de pruebas en los diseños aeronáuticos son las simulaciones en software y las pruebas en túnel de viento. La simulación es muy utilizada, debido a que se implementa en software, y solamente se requiere de equipo de cómputo, software especializado y personal capacitado. La principal ventaja de realizar pruebas en este entorno es que permite entender y predecir el comportamiento y desempeño de las aeronaves o de sus componentes sin la necesidad de construir prototipos o de probar su funcionamiento físicamente arriesgando la integridad del mismo, al menos en las primeras etapas del desarrollo, lo que permite que en las eventuales pruebas físicas se obtengan mejores resultados, reduciendo así el costo por tiempos de implementación, cambios en los diseños y permitiendo que el uso de los recursos sea más eficiente [2].

Cuando un componente pasa las verificaciones de diseño y se valida en una simulación, es posible probar el desempeño del componente físicamente, sin embargo, esto no implica que se realicen pruebas de vuelo directamente, ya que aún se corre un alto riesgo de que el prototipo o alguno de sus componentes falle, lo que podría provocar la pérdida total del mismo, por ello antes de llevarlo a una prueba de vuelo se realiza una simulación del vuelo en un túnel de viento que emula las condiciones del entorno físico en el que se encontraría la aeronave en un vuelo real, pero de una manera más segura y controlada [3].

Un túnel de viento es una instalación de ductos por los cuales se hace pasar aire y permite controlar las condiciones ambientales tales como temperatura, presión y velocidad del viento a los valores requeridos para representar un ambiente de vuelo real. Sin embargo, esta clase de equipo requiere una alta inversión para su diseño, construcción, mantenimiento y operación, por lo que es prudente, al igual que en el diseño de aeronaves, implementar modelos de simulación que validen los análisis de diseño del túnel de viento que se pretenda construir.

En este trabajo se presenta un modelo de software que describe el comportamiento de las principales variables de interés en un túnel de viento del tipo abierto, este modelo tiene por objetivo tener una implementación para cualquier modelo de túnel en general mediante parámetros y secciones configurables, así como su ejecución en tiempo real, dicho modelo es implementado en un modelo de software utilizando las diferentes herramientas que ofrece el software Simulink de Matlab. El modelo de software consta de dos partes, la primera de ellas es una reproducción del software presentado en [8], este modelo es estático e ideal, su función es determinar los coeficientes de pérdida de las secciones de un túnel de viento para poder evaluar el desempeño de la instalación, este software implementado originalmente en código Fortran, fue adaptado a código m de Matlab agrupando las funciones que evalúan los parámetros de cada sección en bloques de Simulink que permiten modificar las características físicas del túnel de viento, de cada bloque se obtiene un archivo de datos que relaciona la velocidad de entrada en cada bloque respecto al coeficiente de pérdida calculado para dicha velocidad. La segunda parte del modelo de software consta de bloques que modelan elemen-

tos hidráulicos con área configurable con los que es posible obtener la respuesta dinámica y obtener los parámetros de flujo de masa, presión y velocidad considerando una dinámica ideal sin pérdidas o si se requiere resultados más reales, es posible ingresar los datos de desempeño obtenidos del primer modelo en forma de tablas, lo que da como resultado las presiones reales.

La organización de la tesis es la siguiente. En el capítulo I se presentan las definiciones, tipos y clasificaciones de túneles de viento, las ventajas y desventajas de cada configuración así como las ecuaciones que definen los fenómenos del fluido a través de un sistema de este tipo, también se describen las principales secciones en las que se puede dividir un túnel y las variables de interés. En el capítulo II se describen cada una de las secciones del túnel a mayor detalle así como la forma en que se obtiene el coeficiente de pérdida para cada una. Posteriormente en el capítulo III se encuentra la descripción detallada de la reproducción del modelo de software estático presentado por la NASA para la evaluación de desempeño de túneles de viento, en esta sección se encuentran las descripciones de cada uno de los bloques creados para configurar un modelo de túnel con sus respectivos códigos y descripción de parámetros, en el capítulo IV se encuentra la descripción de como se debe implementar e interpretar el modelo para una simulación y la obtención de perfiles de pérdida que posteriormente son utilizados en el capítulo V donde se detalla una propuesta de modelado para túneles de viento basada en modelos de sistemas hidráulicos, además en el capítulo VI se resume la implementación de un procedimiento para el análisis de modelos que asegura la ejecución en tiempo real, así como la evaluación de la precisión de los resultados obtenidos tomando como referencia datos de una simulación en tiempo variable, que da pie a los parámetros de una simulación en tiempo fijo siendo ésta requisito para una implementación en tiempo real. Finalmente en el capítulo VII se presentan las conclusiones y observaciones de cada uno los temas trabajados en este documento.

Capítulo 1

Antecedentes

Un túnel de viento es una instalación de investigación que consiste en un sistema de ductos por los cuales se hace mover una masa de aire, cuyas características de presión, velocidad y temperatura son predeterminadas a través de la geometría, configuración del túnel así como de la capacidad de la fuente de propulsión para mover la masa de aire. La parte más importante de un túnel de viento es la sección de prueba, en dicha sección se introduce o se extrae aire en los volúmenes necesarios para alcanzar la velocidad de flujo requerida, esto ayuda a los investigadores a estudiar los efectos aerodinámicos del flujo de aire sobre un modelo u objeto de prueba [4].

En un túnel de viento, se puede controlar el flujo que afecta las fuerzas sobre un objeto de prueba bajo condiciones controladas y realizar mediciones de los principales parámetros de desempeño que permiten predecir las fuerzas en un objeto de prueba a escala real. Los túneles de viento son diseñados para un propósito y un rango de velocidad específico, usualmente se les clasifica por tipo de operación, construcción y/o número Mach. La operación de un túnel puede ser continua, es decir, que el flujo se puede mantener de manera ininterrumpida por el tiempo que se requiera, en esta clasificación entran los túneles de circuito cerrado, túnel de plasma y los túneles magneto-hidrodinámicos, en contraste los túneles de operación intermitente solamente puede operarse durante cortos periodos de tiempo, en general esto se debe a que las condiciones de prueba requieren de excesivas cantidades de energía y estas solamente pueden mantenerse por un corto tiempo, en esta clasificación entran los túneles de almacenamiento de vacío, de presión, túnel inyector y de onda expansiva.

La clasificación por construcción engloba todos los túneles en dos tipos, de circuito cerrado y de circuito abierto. Por último, también se les puede clasificar por número Mach [5] como se muestra en la Tabla 1.

Clasificación	Rango número Mach
Túnel subsónico (incompresible)	$0 < M < 0,25$
Túnel subsónico (compresible)	$0,25 < M < 0,8$
Túnel transónico	$0,8 < M < 1,2$
Túnel supersónico	$1,2 < M < 5$
Túnel hipersónico	$5 < M$

Tabla 1. Clasificación de por número Mach para túneles de viento.

Donde M es el número Mach, el cual es un parámetro importante en el análisis de flujo compresible, su nombre es en honor al físico austriaco Ernst Mach (1838-1916) quien fue uno de los pioneros en trabajar con los vuelos supersónicos. Este parámetro representa la velocidad real de un fluido o de un objeto que se mueve en el fluido en reposo V_f en relación a la velocidad del sonido en el mismo fluido V_s en las mismas condiciones, es decir.

$$M = \frac{V_f}{V_s}, \quad (1)$$

donde la velocidad del sonido para un fluido específico se define como

$$V_s = \sqrt{\gamma RT}, \quad (2)$$

como se puede observar, V_s depende de la constante del gas R ($m^2/s^2 \text{ } ^\circ K$), la relación entre las constantes de calor específico γ para un gas ideal, de la temperatura del fluido T ($^\circ K$). Debido a que el número Mach depende de V_s , es posible obtener diferentes valores de Mach con un valor fijo de V_f a diferentes temperaturas [14].

1.1 Estructura de diseño de un túnel de viento

La estructura básica de un túnel de viento se basa en los cinco componentes que se definen a continuación. En general cuentan con un acondicionador de flujo, este es una estructura en forma de panel que corrige las turbulencias en el flujo. A la entrada se cuenta con una sec-

ción de contracción en esta parte del túnel se incrementa la velocidad del flujo añadiendo la menor turbulencia posible. Comúnmente después de la contracción se encuentra el área de prueba, en esta sección es donde se añaden los modelos que van a ser sometidos a experimentación. El difusor es la sección que disminuye la velocidad a la salida de la sección de prueba. Otra sección es la esquina de giro, esta sección tiene por objetivo cambiar la dirección del flujo añadiendo la menor turbulencia posible y por último la fuente de propulsión es el mecanismo encargado de mover la masa de aire por los ductos. En términos generales estas son las secciones que se van a encontrar en un túnel de viento y se describirán a detalle en las siguientes secciones.

El diseño de un túnel depende del propósito de la prueba y de los rangos de velocidad que se pretendan alcanzar, el área transversal de la sección de prueba determina el tamaño de la instalación.

1.1.1 Configuración general de un túnel de viento de circuito abierto

El túnel de viento de tipo abierto, extrae aire del ambiente exterior hacia la cámara de prueba y lo libera de nuevo al exterior, también se le conoce como túnel Eiffel o túnel NPL, en la Figura 1 inciso a) se puede observar el esquema de este tipo de túnel, donde el ventilador o propulsor, sección (1), es quien desplaza el aire, proveniente del difusor, sección (2), donde se disminuye la velocidad de la salida de la sección de prueba, sección (3), a la entrada de esta sección se encuentra la contracción, sección (4), donde se aumenta la velocidad de flujo que proviene del exterior una vez que pasa por la sección de acondicionamiento del flujo, sección (5).

Algunas de las principales ventajas que presenta esta configuración respecto a la cerrada son un menor costo de construcción debido a que se requiere de menos elementos para su construcción, y que el diseño es adecuado para pruebas de propulsión y visualización de humo.

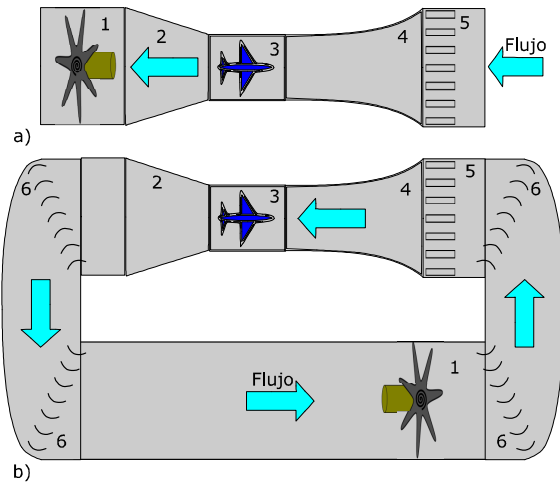


Figura 1. Configuración típica de un túnel de viento, a) tipo abierto, b) tipo cerrado.

Por otro lado, como desventajas es común obtener una baja calidad del flujo en la sección de prueba, es decir, un flujo demasiado turbulento. La instalación debe mantenerse despejada en un área determinada ya que los objetos cercanos a la admisión de aire afectan la simetría del flujo. Los túneles que son ubicados al ambiente en aire libre también son afectados por las condiciones del clima como los vientos fuertes y la humedad.

Además, los costos de operación son más altos en comparación con otras configuraciones, ya que al estar el sistema abierto al ambiente el propulsor requiere de una aceleración continua del flujo a través del túnel, en consecuencia también se produce alto ruido de operación.

Debido al bajo costo de construcción en comparación con otras configuraciones, el túnel de circuito abierto es ideal para actividades académicas y de investigación donde no se requieren largos lapsos de operación.

1.1.2 Configuración general de un túnel de viento de tipo cerrado

En la Figura 1, inciso b) se observa la configuración de un túnel de viento de tipo cerrado. En general el flujo de aire se mantiene recirculando de manera continua dentro del ducto con poco o nulo intercambio con el ambiente exterior. El aire a la salida de la sección de pruebas

es conducido de regreso al propulsor por medio del ducto y una serie de aspas estabilizadoras, sección (6), saliendo del propulsor el aire es conducido al área de contracción, sección (4) y de regreso al área de prueba, sección (3).

Las ventajas que presenta una configuración cerrada respecto a una abierta, es principalmente un flujo de aire con menor turbulencia en el área de prueba, debido a las aspas estabilizadoras en las esquinas de los ductos la calidad del flujo puede ser controlada y es independiente de las condiciones del ambiente exterior, además presenta un bajo costo de operación, ya que, una vez que el aire se pone en circulación el propulsor sólo requiere compensar las pérdidas de energía provocadas por las cargas aerodinámicas, por lo que el propulsor no requiere una aceleración constante del aire, debido a estas características es ideal para pruebas que requieren largos lapsos de tiempo.

Dentro de las desventajas se puede mencionar los altos costos de construcción debido a la necesidad de añadir más secciones de ductos y aspas estabilizadoras. Este diseño no es apropiado para pruebas de propulsión y visualización de humo, ya que de ser así, el túnel debe diseñarse para purgar los productos no deseados que se acumulen. Así como condiciones de temperatura elevada, normalmente se requiere de un sistema de enfriamiento.

1.2 Desempeño de un túnel de viento

1.2.1 Simplificaciones en cálculo de desempeño de un túnel de viento

En un ducto por donde circula un fluido no se tienen las mismas condiciones en todos los puntos del espacio del área transversal, esto se debe a que la velocidad de un fluido en una tubería es cero en la superficie debido a que las capas de fluido más cercanas a la pared del ducto no se deslizan, conforme estas capas se alejan de las paredes se deslizan con mayor facilidad hasta alcanzar una velocidad máxima en el centro del ducto, pero para facilitar el análisis las condiciones del movimiento del flujo en la sección se consideran representadas por el promedio ponderado de los parámetros del área en una sección transversal, por ejem-

plo, considerando la presión estática p (Pa) en la ubicación C , de la sección transversal de área A_c , la presión estática p_c en la ubicación C se representa por su promedio ponderado dado por

$$p_c = \frac{1}{A_c} \int \int_{A_c} p \, dA. \quad (3)$$

Es importante resaltar que considerar el cálculo de manera unidimensional provoca que el resultado del análisis sea menos preciso, pero resulta útil para entender las dinámicas dentro del circuito del túnel de viento, tomando esto en cuenta, el análisis de las ecuaciones representativas del desempeño de un túnel de viento en este capítulo se llevará a cabo en un sentido unidimensional y son tomadas principalmente de [7] y [8].

1.2.2 Relación de energía

La relación de la potencia de flujo en la sección de prueba respecto a las pérdidas a lo largo del túnel es una medida de eficiencia energética, ésta puede ser vista desde diversos enfoques, dependiendo del punto de interés en el flujo de energía del sistema, por ejemplo, podría ser de interés el aprovechamiento de energía, desde que se aplica en forma de potencia eléctrica al motor del propulsor, hasta la potencia obtenida en el torque del eje del motor, o hasta la potencia del flujo en la sección de prueba. Analizando la eficiencia energética del flujo en el túnel como en (4), se toma en cuenta la pérdida de potencia del flujo en el circuito, denotada por P_c

$$E_R = \frac{P_{ts}}{P_c}, \quad (4)$$

donde P_{ts} es la potencia de propulsión del flujo en la sección de prueba en $N \, m/s$, que puede ser expresada en términos de la densidad, área transversal de la sección y la velocidad

del flujo, las variables asociadas a la sección de prueba serán denotadas con el subfijo ts por su nombre en inglés "*test section*"

$$P_{ts} = \frac{1}{2} \dot{m}_{ts} V_{ts}^2 = \frac{1}{2} \rho_{ts} A_{ts} V_{ts}^3, \quad (5)$$

donde \dot{m}_{ts} es el flujo másico en la sección en kg/s , V_{ts} es la velocidad del flujo en m/s , A_{ts} es el área transversal de la sección en m^2 y ρ_{ts} es la densidad del fluido en $N s^2/m^4$.

1.2.3 Pérdida de energía en los componentes del túnel

Cada uno de los componentes del túnel de viento presenta distintas características geométricas y aerodinámicas, que determinan la pérdida de presión para cada sección en particular. Por lo que para poder realizar un análisis de las pérdidas de flujo en el circuito, es necesario seccionar el túnel y evaluar de manera separada cada componente. Los elementos que típicamente se consideran son:

- (1) – Secciones constantes o cilíndricas
 - Esquinas de giro
 - Secciones de expansión o difusores
 - Secciones de contracción o conos
 - Secciones anulares
 - Sección estabilizadora
 - Propulsor

Se considera que existe una pérdida de presión en todos los componentes del sistema a excepción del propulsor, ya que la función de este último es precisamente compensar las pérdidas obtenidas a lo largo del sistema. Aunque en este componente también se tienen pérdidas de energía, ya que ocurre un fenómeno de transformación de energía a calor, que eleva la temperatura del gas, esto se debe a la fricción de las partículas sólidas suspendidas en el gas y la acción viscosa entre el flujo y las superficies sólidas con las que tiene contacto.

La caída de presión total ΔP_l en el sistema de ductos será el aumento de presión demandado al propulsor para mantener un flujo constante. Se considera que la pérdida por sección es la pérdida promedio de la presión total del flujo que atraviesa dicha sección.

Las pérdidas son calculadas de forma adimensional por la relación de pérdida en la sección y la presión dinámica a la entrada de la sección y se expresa por el coeficiente de pérdida K_l , la pérdida para una sección típica local será denotada por el subfijo l .

$$K_l = \frac{\Delta P_l}{\frac{1}{2}\rho_l V_l^2} = \frac{\Delta P_l}{q_l}, \quad (6)$$

donde q_l es la presión dinámica.

La relación de pérdida de energía por unidad de tiempo en una sección ΔE_l , es el producto de la pérdida de presión total por la relación de volumen del flujo a través de la sección.

$$\Delta E_l = A_l V_l \Delta P_l = A_l V_l K_l q_l = K_l \left(\frac{1}{2} \dot{m} V_l^2 \right). \quad (7)$$

Si el coeficiente de pérdida se relaciona con respecto a la presión dinámica en la sección de pruebas q_t entonces se define como

$$K_{lt} = \frac{\Delta P_l}{q_l} \frac{q_l}{q_t} = K_l \frac{q_l}{q_t} \quad (8)$$

El coeficiente de pérdida K_{lt} se basa en la pérdida de presión total, la presión dinámica y la relación entre la tasa de pérdida de energía y la tasa de energía cinética del flujo en la sección de estudio tanto locales como en la sección de prueba. Utilizando la definición de P_{ts} de (5) y la ecuación (7) se obtiene

$$\Delta E_l = K_{lt} \left(\frac{1}{2} \dot{m} V_t^2 \right) = K_{lt} P_{ts}. \quad (9)$$

La relación de pérdida total en el circuito es dada por la suma de todas las pérdidas en cada una de las secciones individuales

$$P_c = \sum_l \Delta E_l = \sum_l K_{lt} P_{ts}. \quad (10)$$

Expresando en términos de coeficientes de pérdida de todas las secciones la relación de pérdida definida en (4) se obtiene

$$E_R = \frac{1}{\sum_l K_{lt}}. \quad (11)$$

1.2.4 Pérdidas en una sección de área constante

Es usual encontrar en la literatura que las pérdidas en un ducto de área constante se expresen como

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f \frac{L}{D_h} \frac{\bar{U}^2}{2}, \quad (12)$$

donde ΔP es diferencia de presión en pascuales, L es la longitud del ducto en metros, D_h es el diámetro hidráulico en metros, \bar{U} es la velocidad media del flujo en m/s, f es el factor de fricción y ρ es la densidad del flujo en $N \text{ s}^2/m^4$.

El diámetro hidráulico relacionado al área se define como

$$D_h \equiv 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}. \quad (13)$$

La relación del factor de fricción respecto al coeficiente de pérdida se puede ver comparando (6) con (12).

$$K_l = f \frac{L}{D_h}. \quad (14)$$

La tensión cortante del flujo con la pared del ducto para una sección de área constante denotada por el subfijo ac , donde la diferencia de presión Δp_{ac} es completamente balanceada por la fricción superficial τ_ω sobre la superficie del ducto es en este caso $L_{ac} \bar{\tau}_\omega C_{ac} = A_{ac} \times \Delta p_{ac}$, donde L_{ac} es la longitud del ducto en metros, C_{ac} es la circunferencia del ducto en metros, $\bar{\tau}_\omega$ es el promedio de la tensión de corte, A_{ac} es el área de la sección en m^2 .

En un ducto circular con un flujo completamente desarrollado de manera que la tensión de corte sea constante

$$\tau_\omega = \frac{1}{4} f \left(\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \right). \quad (15)$$

Las pérdidas de una sección dependen directamente de la forma de la sección transversal, ya que, para formas que no son circulares la tensión de corte variará de manera circunferencial. Aunque en el caso de un túnel de viento no toma mucha importancia, debido a que la gama de formas geométricas transversales para túneles de viento no es muy variada. Por simplicidad la sección transversal se considerará de acuerdo al diámetro hidráulico definido en (13).

Para ductos suaves, con número de Reynolds R_e alto, es posible utilizar la ley universal de Prandtl para calcular el factor de fricción, con solución iterativa, en relación al número Reynolds, la cual está dada por

$$f = \left[2 \log \left(R_e \sqrt{f} \right) - 0,8 \right]^{-2}. \quad (16)$$

Definiendo un valor inicial para $f = 1$ el factor converge a su valor nominal en cuatro o seis iteraciones.

Donde R_e es el número de Reynolds (17), llamado así por Osborne Reynolds (1842-1912) quien popularizó su uso, se define como una relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción o viscosas en un fluido, usualmente en función de los parámetros geométricos y de flujo convenientes. V_{ca} es la velocidad media de la sección, ρ es la densidad local estática y μ es la viscosidad del flujo [6].

$$R_e = \frac{\rho V_{ca} D_h}{\mu}. \quad (17)$$

A números grandes de Reynolds las fuerzas inerciales son grandes en relación a las fuerzas viscosas, en esta condición las fuerzas viscosas no pueden evitar las fluctuaciones rápidas y aleatorias del fluido, determinando una condición de flujo turbulento. Por otro lado, cuando el número es pequeño, indica que las fuerzas viscosas pueden hacer frente a las fluctuaciones y mantienen el fluido en un estado laminar, es decir, que su movimiento es en líneas o láminas con muy poca distorsión, en la figura 2 se puede observar una representación gráfica de dichos flujos, donde la imagen superior representa un flujo laminar y la imagen inferior un flujo turbulento. Los valores de número Reynolds para identificar el régimen de flujo varían en la práctica según el tipo de superficie del ducto, vibraciones y otros factores externos, pero en la mayor parte de la literatura se puede encontrar que para $R_e \lesssim 2000$ el flujo es laminar,

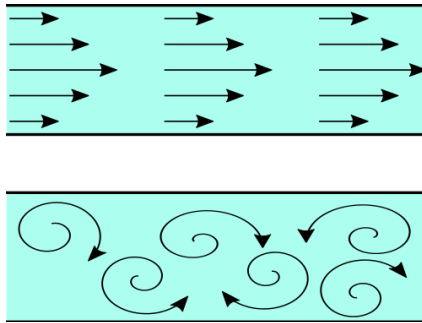


Figura 2. Representación de las líneas de flujo donde el diagrama superior es laminar y el inferior es turbulento.

la transición entre laminar y turbulento se da en $2000 \lesssim Re \lesssim 4000$ y para $Re \gtrsim 4000$ el flujo se considera turbulento [14].

1.2.5 Relaciones de presión dinámica y número Reynolds

La energía requerida para obtener una potencia de propulsión P_t se calcula evaluando las pérdidas de presión mediante el coeficiente K_{lt} para todas las subsecciones del túnel de viento, que pueden ser obtenidas a partir de la relación de la presión dinámica local q_l y la presión dinámica de la sección de prueba q_t como

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t V_l}{A_l V_t}. \quad (18)$$

Si el factor evaluado en (18) se calcula considerando un flujo incompresible, entonces la relación del flujo de masa para cada sección resulta en

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t^2}{A_l^2}.$$

De acuerdo a [8], aplicando la ley de conservación de la masa y considerando la compresibilidad se obtiene

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t M_l}{A_l M_t} \frac{\sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_t^2}}{\sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_l^2}}, \quad (19)$$

donde M_l es el número Mach de la sección bajo análisis y γ es la relación de constantes de calor específico del gas a presión constante contra volumen constante c_p/c_v .

El área A_t y el número Mach M_t de la sección de prueba deben ser conocidos, pero M_l debe ser determinado, es decir, el número Mach de la sección que se está calculando.

1.2.6 Cálculo del número Mach local

El número Mach local es una función del número Mach de la sección de prueba y la relación del área de prueba y el área local.

De acuerdo a [8], la relación del número Mach M con el área A en una sección, se da en términos del área A^* para flujo compresible, donde A^* es el área transversal para el flujo estrangulado.

$$\left(\frac{A}{A^*}\right)^2 = \frac{1}{M^2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}. \quad (20)$$

Si la relación de (20) aplicada a la sección de prueba es aplicada a la sección local se obtiene

$$\frac{A_l}{A_t} = \left(\frac{M_t}{M_l} \right)^2 \left(\frac{1 + \left[\frac{\gamma-1}{2} M_l^2 \right]}{1 + \left[\frac{\gamma-1}{2} M_t^2 \right]} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \quad (21)$$

Para el caso donde el aire es el fluido de trabajo con un coeficiente de calor específico a presión constante es de 1.006 kJ/kgK y para volumen constante de 0.7171 kJ/kgK la relación γ es de 1.4, se obtiene

$$\frac{A_l}{A_t} = \frac{M_t}{M_l} \left(\frac{1 + 0,2M_l^2}{1 + 0,2M_t^2} \right)^3 \quad (22)$$

Teniendo disponible los valores del número Mach para la sección de prueba y las áreas local y de la sección de prueba, se puede obtener el número Mach local M_l despejando de (22) y con un valor inicial de $M_l = 0$ para túneles subsónicos, lo que resulta en una ecuación conveniente para un algoritmo iterativo.

$$M_l = \frac{M_t}{(1 + 0,2M_t^2)^3} \frac{A_t}{A_l} (1 + 0,2M_l^2)^3 \quad (23)$$

Una vez obtenido M_l , se puede sustituir en (19) para obtener la relación de presión dinámica local respecto a la de la sección de prueba.

Capítulo 2

Descripción de secciones y sus coeficientes de pérdida

Al ser el túnel de viento una instalación compuesta por diversas secciones es necesario definir las dimensiones y características de cada sección, de esta manera se puede evaluar de manera individual cada sección ya que en la literatura se puede encontrar que los coeficientes que definen las pérdidas de presión se obtienen de manera diferente para cada tipo de sección en particular, en este capítulo se describirán las secciones de las que se compone un túnel de viento y la forma en que se obtiene los coeficientes de pérdida para cada sección.

2.1 Fuente de propulsión

La fuente de propulsión más común para túneles subsónicos es el ventilador de flujo axial. Por su diseño este tipo de ventiladores produce un giro turbulento en el flujo, que se puede controlar con el uso adecuado de aspas que inducen una pre-rotación contraria a la que produce el ventilador, dicho componente se ilustra en el elemento 1 de la figura 1 [7].

En el caso de los túneles supersónicos, donde se requiere un número Mach $2 < M < 5$ para lograr generar un flujo supersónico, se requiere de una enorme disposición de energía que sería difícil de conseguir con ventiladores axiales ya que tendrían que tener un excesivo desempeño. En su lugar se utiliza el principio de almacenamiento y la operación intermitente, de este modo se requiere disposición de energía en un lapso muy corto de tiempo por lo que no son necesarias fuentes de propulsión potentes. El principio de almacenamiento se basa en dos modos de operación. El primero es utilizando un tanque de almacenamiento de aire a presión que es liberado a través de una válvula hacia la sección de prueba para después ser liberado al ambiente exterior. El segundo modo es utilizando un tanque de alto vacío el

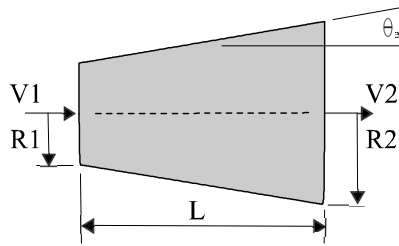


Figura 3. Características geométricas del difusor.

cual succiona aire del ambiente exterior regulando una válvula, este aire se hace pasar por la sección de prueba. También es posible configurar una combinación de estos dos modos.

2.2 Difusor

El difusor (elemento 2, figura 1) desacelera el flujo de alta velocidad proveniente de la sección de prueba, para recuperar la presión estática y reducir la carga aerodinámica para el sistema de propulsión. En concreto, la función del difusor es disminuir la velocidad con la mínima pérdida de energía, ya que, entre menor sea la pérdida de ésta, mayor es la recuperación de presión. Los parámetros principales son equivalentes a un ángulo de expansión cónica y su relación de área. Este componente se ilustra en la Figura 3, donde se muestra un difusor cónico de radio R_1 a la entrada, radio R_2 a la salida, y de longitud L [7].

Esta sección es muy sensible a los errores de diseño, ya que estos pueden causar separaciones intermitentes o estables de flujo, que pueden ser difíciles de ubicar y pueden causar vibraciones, oscilaciones en la carga del propulsor, oscilaciones en las velocidades así como incrementos en las pérdidas en las secciones subsecuentes del túnel. El ángulo cónico se define por R_1 que es la mitad del diámetro hidráulico de la entrada D_1 , R_2 es la mitad del diámetro hidráulico de la salida D_2 y $A_R = A_2/A_1$, entonces el ángulo cónico del difusor está dado por

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R} - 1}{\frac{L}{D_1}}\right). \quad (24)$$

La principal restricción del ángulo del difusor es que sea lo suficientemente pequeño para que la capa límite turbulenta no se separe.

En la sección del difusor ocurren dos fenómenos de pérdida; uno por expansión y otro por fricción superficial. La dinámica del fluido en esta sección es muy compleja y depende en gran medida de los perfiles del flujo de entrada, por lo que para diseños preliminares se realizan suposiciones, una de ellas es que el coeficiente de pérdida K_d puede ser descompuesto en la suma del coeficiente de pérdida por fricción K_f y el coeficiente de pérdida por expansión K_{ex} como

$$K_d = K_f + K_{ex}. \quad (25)$$

De acuerdo a [7], asumiendo que el coeficiente de fricción superficial y la densidad del aire es constante a lo largo de la sección con una evaluación unidimensional resulta en que K_f se relaciona con el área del difusor A_R y el ángulo cónico como

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \frac{f}{8 \sin \theta}. \quad (26)$$

El coeficiente de pérdida por expansión solamente puede ser obtenido a través de datos experimentales debido a que el factor de forma de sección transversal $K_e(\theta)$ es obtenido por medio de la experimentación y depende del ángulo y la forma del difusor, además de $K_e(\theta)$ el coeficiente de pérdida por expansión es función de θ y de la relación de áreas del difusor

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2. \quad (27)$$

Como punto de referencia para $K_e(\theta)$ se puede tomar los datos experimentales publicados en [8], para secciones con formas circulares y cuadradas

$$K_e(\text{circular}) = \begin{cases} 0,1033 - 0,02389\theta & \text{para } 0 < \theta < 1,5^\circ \\ 0,1709 - 0,1170\theta + 0,03260\theta^2 + 0,001078\theta^3 - 0,0009076\theta^4 \\ \quad - 0,00001331\theta^5 + 0,00001345\theta^6 & \text{para } 1,5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -0,09661 + 0,04672\theta & \text{para } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (28)$$

$$K_e(\text{cuadrada}) = \begin{cases} 0,09623 - 0,004152\theta & \text{para } 0 < \theta < 1,5^\circ \\ 0,1222 - 0,04590\theta + 0,02203\theta^2 + 0,003269\theta^3 - 0,0006145\theta^4 \\ \quad - 0,00002800\theta^5 + 0,00002337\theta^6 & \text{para } 1,5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -0,01322 + 0,05866\theta & \text{para } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (29)$$

2.3 Sección de prueba

El tamaño y forma de la sección de prueba, elemento 3 de la Figura 1 se definen de acuerdo a la especificación del propósito principal para el cual es requerido el túnel, incluyendo la velocidad máxima y calidad del flujo. El tamaño de esta sección y la velocidad de operación determinan el tamaño máximo de los modelos que podrán ser probados y el alcance del máximo número de Reynolds.

La forma de la sección transversal depende de la aplicación, por ejemplo, la forma cuadrada es recomendada para aplicaciones de ingeniería civil, en aplicaciones aeronáuticas se recomienda una geometría rectangular [9]. La sección de prueba normalmente se diseña con una sección transversal constante, como consecuencia la capa límite tiende a engrosar, esto provoca una reducción del área efectiva del flujo obtenido de la geometría de la sección, con

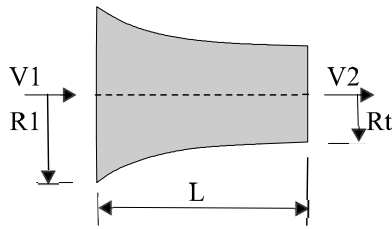


Figura 4. Características geométricas de la sección de contracción

un área constante la velocidad del flujo incrementa y produce una caída en la presión estática produciendo una fuerza de arrastre. Para tratar de mantener una presión constante en la sección se añaden pequeñas estructuras en las esquinas de las paredes para eliminar los ángulos rectos [7].

Al ser una sección de área y geometría constante se produce una divergencia muy pequeña con la finalidad de conseguir una presión estática constante, por lo que el análisis de las pérdidas en esta sección puede considerarse como un ducto de área constante. De manera que la evaluación de los coeficientes de pérdida se puede llevar a cabo a través de las ecuaciones (14) y (16) para un número específico de Reynolds. Examinando (14) se puede observar que las pérdidas de esta sección son directamente proporcionales a su longitud.

2.4 Contracción o cono

El diseño de la sección de contracción, elemento 4 de la Figura 1, es determinante en la calidad de flujo y comúnmente con una geometría curva como se ilustra en la figura 4, ya que en este componente se acelera y se alinea el flujo que llega a la sección de prueba.

La forma y el tamaño influye directamente en los niveles de turbulencia que se dan en la sección de prueba, debido a que en esta sección se extienden los filamentos del vórtice, lo cual reduce las fluctuaciones de turbulencia axiales, pero intensifica las laterales. La longitud de esta sección debe ser lo suficientemente pequeña para minimizar el crecimiento de la capa límite, pero lo suficientemente larga para evitar que se generen grandes gradientes de presión adversa a lo largo de las paredes generados por la curvatura del ducto [10]. Esta

sección a menudo es diseñada con una forma no cónica aun cuando su nombre lo contradice. En el análisis unidimensional del flujo para este segmento usualmente no se considera los principales problemas de diseño. Las ecuaciones de Bernoulli y de conservación de la masa indican una caída continua de la presión a medida que el flujo se desplaza de la entrada a la salida del cono. Definiendo el coeficiente de presión como $C_{pt} = (p - p_t)/(1/2)\rho V_t^2$, entonces la relación unidimensional para el coeficiente de presión es

$$C_{pt} = 1 - \left[\frac{A_t}{A(x)} \right]^2,$$

donde A_t es el área de la sección de prueba y $A(x)$ es el área en función de la coordenada de la corriente.

La estimación del coeficiente de pérdida en este componente supone un análisis complejo debido a su geometría. Sin embargo, es posible realizar un aproximación al cálculo que sea suficiente para las consideraciones de consumo de energía. Las pérdidas en la contracción se calculan considerando únicamente la fricción por lo que el coeficiente de pérdida se puede obtener integrando la función estándar de fricción para ductos

$$\Delta p_f = \int_0^{L_{cn}} f \frac{\rho}{2} \frac{V_{cn}^2}{D_{cn}} dx,$$

donde L_{cn} es la longitud del cono de contracción, $D_{cn} = D_{cn}(x)$ es el diámetro hidráulico local, y V_{cn} es la velocidad media local.

Una aproximación utilizada en [8] para calcular el coeficiente de pérdida en la sección de contracción es proporcionada por [11]

$$K_{cn} = 0,32f \frac{L_{cn}}{D_t}, \quad (30)$$

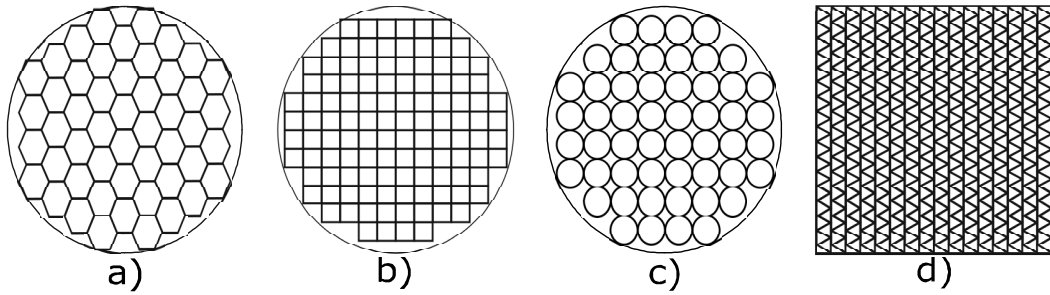


Figura 5. Tipos de paneles estabilizadores

donde D_t es el diámetro de la sección de prueba, ya que comúnmente es donde conecta el final de la contracción.

2.5 Acondicionador de flujo

La sección de acondicionamiento, elemento 5 de la Figura 1, en un túnel de viento es instalada para modificar o mantener en la medida posible la calidad del flujo, es decir, se acondiciona el flujo proveniente del exterior en el caso del túnel abierto, o del sistema de retorno en el caso del túnel cerrado, para obtener un flujo uniformemente espaciado a lo largo de la sección de prueba. Algunos de los arreglos más usados para este fin son los estabilizadores de panal de abeja "*Honeycombs*" que fuerzan a ir en la misma dirección a todas las capas del flujo. En la Figura 5 se muestran algunas de las configuraciones de paneles y ventanillas de turbulencia más comunes, que ayudan a que la mayor parte del flujo se aproxime a una velocidad constante.

2.5.1 Estabilizadores de panal de abeja

Un panel estabilizador de abeja es un dispositivo guía el cual se encuentra conformado por diminutos filamentos o ductos con un arreglo paralelo entre ellos [12]. Los parámetros de diseño de estos paneles son la relación entre la longitud de los filamentos y el diámetro hidráulico para cada ducto y la porosidad o solidez. El coeficiente de pérdida para esta sección se obtiene como

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (31)$$

donde $\lambda_h = 0,375 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0,4} R_{e\Delta}^{-0,1}$ para $R_{e\Delta} \leq 275$ y $\lambda_h = 0,214 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0,4}$ para $R_{e\Delta} > 275$, D_h es el diámetro hidráulico de las celdas, $R_{e\Delta}$ es el número de Reynolds basado en la rugosidad del material de la celda y la velocidad de ingreso del flujo, B_h es el coeficiente de porosidad y L_h es la longitud del panel en la dirección del flujo [7].

2.6 Esquinas y aspas de giro

Estas secciones sólo se incluyen en los diseños de túnel de tipo cerrado, elemento 6 de la figura 1, su función es retornar el flujo de aire que es liberado a la salida del difusor de nuevo hacia el propulsor, estas secciones también se incluyen después del propulsor ya que debido a la configuración de circuito cerrado es necesario añadir cuatro esquinas, la desviación forzada del flujo a través de las esquinas provoca una caída considerable en la presión y crea secciones de alta turbulencia en los giros en la medida del ángulo en el giro, por ello es necesario incluir aspas de giro en cada esquina para tratar de desviar todas las capas del flujo en una misma dirección a la vez que se disminuye los efectos de la turbulencia. La forma de las aspas de giro varían desde sencillas láminas con dobles hasta complicados diseños aerodinámicos. Una esquina sin aspas de giro puede llegar a perder hasta un 100 % la velocidad central del flujo, mientras que incluyendo un diseño cuidadoso de aspas giratorias estas pérdidas pueden mantenerse alrededor de 10 % o menos [7].

El coeficiente de pérdida para una esquina puede considerarse en dos partes, la que se produce por la fricción superficial y la pérdida por la rotación del flujo. La fricción superficial varía respecto al número de Reynolds, una aproximación aceptable para la estimación del coeficiente de pérdida es dada por (32)

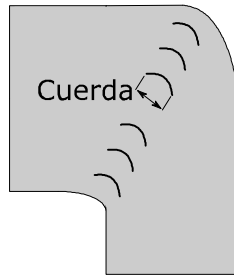


Figura 6. Sección de esquina con aspas estabilizadoras.

$$K_c = 0,10 + \frac{4,55}{(\log_{10} Re_c)^{2,58}}, \quad (32)$$

donde el número de Reynolds depende directamente de la distancia entre los extremos del arco del asa de estabilización, conocido como cuerda figura 6.

2.7 Ventanillas de seguridad

Las ventanillas de seguridad son mallas de alambre que se utilizan para prevenir el ingreso de objetos no deseados a los ductos del túnel que puedan impactar con el propulsor y en general con los componentes del sistema, representan una pérdida significativa cuando se colocan en secciones de alta velocidad del túnel.

En [7] se utiliza una aproximación para el coeficiente de pérdida basado en dos parámetros característicos de las ventanillas la porosidad β_s y el número Reynolds del alambre $Re_w \equiv \rho V d_w / \mu$. Un tercer parámetro es utilizado para diferenciar la rugosidad del alambre de la malla factor de malla K_{mesh} .

El coeficiente de porosidad depende del diámetro del alambre d_w y su separación w_m , entonces la porosidad puede definirse como

$$\beta_s = \left(1 - d_w \left(\frac{1}{w_m}\right)\right)^2. \quad (33)$$

El número Reynolds R_{ew} comúnmente es mucho más bajo en comparación con otros números en el túnel.

El coeficiente de pérdida para una ventanilla puede ser aproximado por

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

donde $\sigma_s = 1 - \beta_s$ siendo este un parámetro de solidez de la malla con un valor típico de 0.5 a 0.8.

Para $0 \leq R_{ew} < 400$,

$$K_{Rn} = \left[0,785 \left(1 - \frac{R_{ew}}{354}\right) + 1,01\right]$$

En general la estimación del coeficiente de pérdida para este componente no es muy exacta, ya que depende fuertemente de la exactitud de los parámetros que se consideran para la malla.

2.8 Pérdidas de presión

Una vez que calculados los coeficientes de pérdida, es posible determinar la pérdida de energía o de presión en todo el sistema o en alguna sección local específica despejando la diferencia de presión de (6)

$$\Delta P_l = \frac{1}{2} \rho_l V_l^2 K_l = K_l q_l.$$

Los valores de presión relativa pueden ser calculadas considerando cero pérdidas mediante

$$P_{out} - P_{in} = \frac{1}{2} \rho (V_{in}^2 - V_{out}^2),$$

o si se requiere una aproximación más realista de las pérdidas se utiliza la ecuación

$$P_{out} - P_{in} = \frac{1}{2} \rho (V_{in}^2 - V_{out}^2) - \Delta P_l.$$

Capítulo 3

Reproducción de modelo de software para simulación de un túnel de viento

La palabra modelo proviene del latín y significa "*molde*" o "*patrón*", en ingeniería un modelo es una representación que describe el comportamiento de un sistema real, y puede ser visto como una réplica o una abstracción del comportamiento de un sistema. Un modelo puede ser de tipo matemático el cual describe las interacciones y propiedades del sistema mediante funciones matemáticas. El desarrollo de un modelo matemático depende de los componentes del sistema, su interacción, las limitaciones y las suposiciones que se consideren, así como del tipo de análisis que es de interés en el estudio, es decir, si se requiere ver el comportamiento en estado estable, los transitorios o ambos. En ocasiones algunos sistemas resultan ser complejos de modelar y requieren ser descritos mediante programas que interconectan subrutinas y tablas descriptivas de manera que resulta complicado representar el sistema como un modelo matemático. Para estos casos donde la descripción del modelo se realiza a través de programas computarizados se utiliza el término *modelo de software* [15].

En este capítulo se describe el modelo de software que se desarrolló tomando como base el trabajo presentado en [8], donde se presenta un modelo de software para la estimación del desempeño de túneles de viento subsónicos desarrollado en Fortran un lenguaje de alto nivel utilizado para aplicaciones científicas y de ingeniería. El modelo contiene algoritmos específicos para la estimación de los coeficientes de pérdida para cada una de las secciones de un túnel de viento basados en las ecuaciones presentadas en la sección anterior, se consideran condiciones de flujo completamente desarrollado, lo que implica que no se observan dinámicas en los parámetros del sistema respecto a cambios en la entrada, sin embargo, este modelo es útil para observar las condiciones en flujo estacionario, así como para determinar el desempeño de las secciones del túnel.

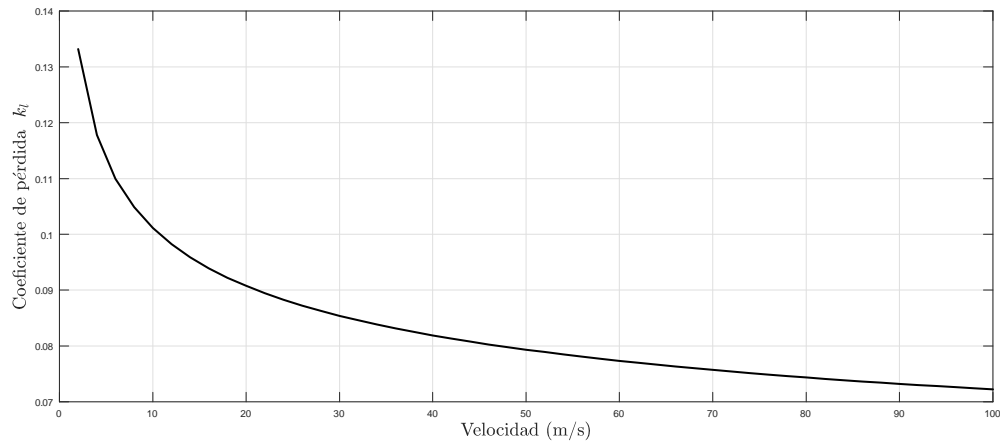


Figura 7. Coeficiente de pérdida en relación a la velocidad del viento para la sección de prueba.

La reproducción del modelo de software se realizó en el entorno de Simulink[®] de Matlab[®], en bloques de código de la clase función m. Cada una de las secciones del túnel se programó en bloques separados. Dichos bloques son configurables y poseen una máscara en donde se ingresan los parámetros que configuran las características de cada sección como dimensiones, características geométricas y datos particulares, de manera que es posible establecer diferentes configuraciones de túneles de viento con la misma gama de bloques.

Apartir de este modelo es posible obtener un perfil de desempeño de cada sección basado en los coeficientes de pérdida con respecto a la velocidad de entrada o flujo de masa en forma de tabla, que pueden ser graficadas, tal como se muestra en la figura 7, la cual ilustra el comportamiento del coeficiente de pérdida k_l para una sección de prueba respecto a la velocidad de flujo en la entrada de la sección.

3.1 Descripción del modelo de software

El modelo considera las pérdidas de presión de manera relativa, es decir, con respecto a una sección de referencia donde se conozcan los parámetros del flujo, esta sección comúnmente es la zona de pruebas, por lo tanto, los coeficientes de pérdida en relación a la sección cono-

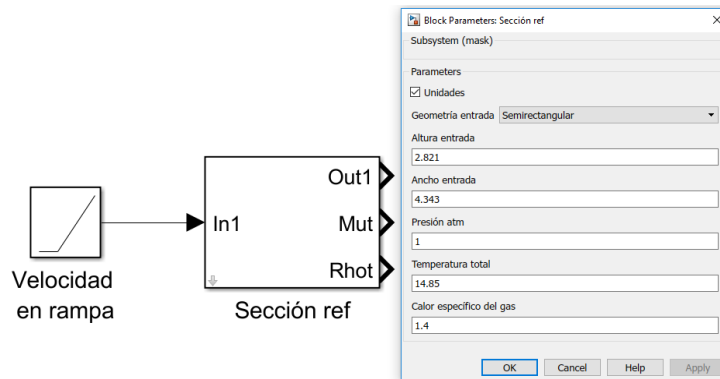


Figura 8. Configuración del bloque de referencia.

cida se suman desde la entrada de flujo hasta la sección del ventilador, de manera opuesta las secciones posteriores al ventilador se restan desde la última sección del túnel hasta el ventilador, de manera que el cálculo depende del flujo de datos en que se disponga el modelo, ya que los parámetros estimados en una sección depende directamente de la sección anterior, por lo que se requiere tener un orden coherente de las secciones cuando se busque estimar presiones considerando pérdidas.

Como se mencionó anteriormente para realizar una simulación en este modelo de software, es necesario tener conocimiento de la velocidad del viento en la zona que se va utilizar como referencia. Además se requiere la presión ambiental, temperatura y características geométricas de la sección de referencia. Estos datos son necesarios para calcular la densidad y viscosidad del aire, así como los números Mach y Reynolds, dichos parámetros de referencia son cálculos en el bloque *sección de referencia* que se muestra en la figura 8 y posteriormente son utilizados por todos los bloques en el modelo a evaluar.

En la máscara se selecciona entre el sistema internacional de unidades o el sistema inglés, de los cuales se toman los parámetros característicos del aire como viscosidad y densidad, además se realizan las conversiones necesarias para la temperatura y presión proporcionadas en la condición de la prueba. De esta manera los parámetros principales como la densidad, número mach, número reynolds y velocidad del sonido no se consideran en condiciones

ambientales o generalizadas, si no que sus valores dependen de las condiciones de presión y temperatura en las que se evalúe la prueba. Entre otros parámetros también se calcula el área de flujo estrangulado A^* como referencia, para el cálculo del número Mach y velocidad local para cada sección, dicha área se calcula en base a (20) donde resolviendo para A^* resulta

$$A^* = M_0 A_0 \left\{ \frac{\gamma + 1}{2 \left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_0^2 \right]} \right\}^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (34)$$

El código para el cálculo de los parámetros de referencia se muestra a continuación.

```
function [Ason,VST,RN0,A0,Mts,MtsQ,G1,MUT,RHOT] = ref_sect(V0,SU, GEO1, ALT1, AN1, P, T, G)
if SU == 1 %Sistema internacional (conversión de unidades)
    MUSTD = 1.7807e-5; % Viscosidad estandar aire (N sec/m^2)
    PT = P*101325; % Presión total del túnel en (N/m^2)
    R = 286.79; % Constante del gas (m^2/sec^2 °K)
    TT = T+273.15; % Temperatura total en °K
    MUT = MUSTD*(TT/288)^0.76; % Viscosidad referencia a temperatura(N sec/m^2)
else %Sistema U.S.
    EMUST = 3.719e-7; % Viscosidad estandar aire (lb sec/ft^2)
    PT = P*2116.217; % Presión total del túnel en (lb/ft^2)
    R = 1715; % Constante del gas (ft^2/sec^2 °R)
    TT = T+459.6; % Temperatura total en °R
    MUT = EMUST*(TT/518.4)^0.76; % Viscosidad referencia a temperatura(lb sec/ft^2)
end
%Parametros dimensionales generales
VST = sqrt(G*R*TT); % Velocidad del sonido, gas inmovil condiciones totales (m/sec),[ft/sec]
RHOT = PT/(R*TT); % Densidad, condiciones totales (N sec^2/m^4),[lb sec^2/ft^4]
% %Numero Mach de la sección de prueba iteraciones de newton
Mts = V0/VST; % Numero mach inicial a la salida de la sección de prueba (test section)
error = 1;
while error > 0.0001
    VS0 = VST/sqrt(1+(G-1)/2*Mts^2); % Velocidad sonido en flujo en movimiento
    Mn = V0/VS0; % Nuevo Mach calculado
    error = abs((Mts-Mn)/Mts); % Error en la solución
    Mts = Mn;
end
% %Parámetros para numero mach
```

```

MtsQ = 1+(G-1)/2*Mts^2;
RHOS0 = RHOT/MtsQ^(1/(G-1)); %Densidad estática al final de la sección de prueba (N sec^2/m^4),[lb sec^2/ft^4]
% %Medidas y parámetros de la sección de prueba
% %Areas y diámetros hidráulicos
if GEO1 == 3 %sección transversal semi circular
    A0 = atan(1)*ALT1^2+ALT1*(AN1-ALT1);
    DH0 = 2*A0/(AN1-ALT1+2*atan(1)*ALT1);
elseif GEO1 == 1 %sección transversal circular
    A0 = pi*(ALT1/2)^2;
else
    A0 = ALT1*AN1; %sección transversal rectangular
    DH0 = 2*A0/(ALT1+AN1); %Diametro hidráulico rectangular
end
%Area transversal para flujo estrangulado, condiciones específicas (m^2),[ft^2]
Ason = Mts*A0*((G+1)/(2*(1+(((G-1)/2)*Mts^2))))^((G+1)/(2*(G-1)));
RN0 = RHOS0*V0*A0/MUT; %Reynold's de la sección de prueba
G1=G;

```

3.2 Parámetros generales y de geometría

Cada bloque que corresponde a una sección tiene parámetros que pueden ser editados en la máscara del bloque, estos parámetros dependen del tipo de sección en particular. La geometría es uno de los parámetros más importantes de cada sección. En los bloques esta configuración se limita a tres formas, rectangular, semirectangular (esquinas ovaladas) y circular, estas formas geométricas abarcan las formas generales utilizadas en el diseño de túneles de viento, este parámetro es denotado en el código por la variable *GEO1* para la geometría de entrada y *GEO2* para la geometría de salida, ambas variables pueden tomar tres valores diferentes 1, 2 y 3 que se interpretan como forma circular, rectangular y semirectangular respectivamente, los datos de área de entrada y salida son denotados por las variables *A1* y *A2*, que utilizan los datos de altura (variables *ALT1* y *ALT2*) y ancho (variables *DAN1* y *DAN2*) que se ingresan en la máscara de cada bloque. Para el caso de un ducto semicircular en [8] se utiliza una aproximación asumiendo una geometría rectangular con esquinas curvas, multiplicada por $\arctan(1)$ como factor correspondiente al área de las esquinas curvas.

Los diámetros hidráulicos se denotan en el código por las variables $DH1$ y $DH2$ para la entrada y salida respectivamente, para el caso de ducto circular el cálculo se realiza utilizando (13), en el caso de geometría rectangular se tiene que

$$D_h = 2 \frac{A}{(Al + An)},$$

donde Al es la altura y An es el ancho, para ductos semicirculares el cálculo del diámetro corresponde a

$$D_h = 2 \frac{A}{An - Al + \frac{\pi Al}{2}}.$$

En los casos donde las áreas de entrada y salida son diferentes también se calcula el ángulo de divergencia θ_d de acuerdo a (24) y se denota por la variable $TH2$.

En esta sección de código también se estima el volumen interior de la sección, debido a que la geometría puede ser semicircular o es diferente en la entrada o salida de la sección el cálculo del volumen se realiza considerando un cuerpo con forma de pirámide truncada mediante

$$vol = \frac{L}{3} \left(A1 + A2 + \sqrt{A1 * A2} \right),$$

donde vol es el volumen en metros cúbicos y L es la longitud de la sección, por último, para esta sección, la relación de áreas (variable AR), se calcula considerando

$$AR = \frac{A_{\text{máx}}}{A_{\text{mín}}},$$

por lo que dicha variable no puede ser menor a uno. El código general utilizado para esta sección se muestra a continuación.

```
function [A1,DH1,A2,DH2,AR,TH2,V1,V2,AMACH1,AMACH2,K1,Klt] = fnc(ASON,VS,RN0,A0,M0,M0Q,G, GEO1, GEO2, ALT1, DAN1, L, DAN2,
ALT2)
%Cálculo de areas y diametros hidráulicos
if GEO1 == 1 %Circular
    A1 = pi*(DAN1/2)^2;
    DH1 = A1/DAN1/atan(1);
end
if GEO1 == 2 %Rectangular
    A1 = ALT1*DAN1;
    DH1 = 2*A1/(ALT1+DAN1);
end
if GEO1 == 3 %Semicircular
    A1 = atan(1)*ALT1^2+ALT1*(DAN1-ALT1);
    DH1 = 2*A1/(DAN1-ALT1+2*atan(1)*ALT1);
end
%Cálculo de geometrías a la salida
if GEO2 == 1 %Circular
    A2 = pi*(DAN2/2)^2;
    DH2 = DAN2;
end
if GEO2 == 2 %Rectangular
    A2 = ALT2*DAN2;
    DH2 = 2*A2/(ALT2+DAN2);
end
if GEO2 == 3 %Semicircular
    A2 = atan(1)*ALT2^2+ALT2*(DAN2-ALT2);
    DH2 = 2*A2/(DAN2-ALT2+2*atan(1)*ALT2);
end
% Volumen aproximado
vol = L/3*(A1+A2 + sqrt(A1*A2));
if vol <= 0
    vol = 0.0001;
end
%Relación de areas
AR = A2/A1;
if AR < 1
    AR = A1/A2;
end
% Angulo de divergencia
```

TH2 = atan((sqrt(A2)-sqrt(A1))/(sqrt(4*atan(1))*L))*90/atan(1);

3.3 Velocidades y números Mach

Las velocidades y los números mach de la sección bajo análisis, son calculados mediante la función *speed(A, ASON, VS)*, que se encuentra integrada en todos los bloques, esta función requiere en los datos de entrada el área de la sección a calcular (variable *A*), el área de flujo estrangulado de la sección de referencia (variable *ASON*) y la velocidad del sonido (variable *VS*). Como salida se obtiene un vector que contiene en la primera posición el número Mach (variable *MACH*) y en la segunda posición la velocidad del flujo (variable *V*). El cálculo del número Mach se lleva a cabo mediante iteraciones de Newton, basadas en la ecuación (23), en el cálculo de la iteración la variable *MT* es el valor inicial del número Mach, *MN* es el valor calculado, y la variable *ERROR* determina el error mínimo requerido para el resultado de la iteración, una vez que se obtiene el número Mach, se calcula la velocidad del sonido local denotada por la variable *ASL*, de esta manera, sustituyendo en la ecuación (1), es posible obtener la velocidad local del flujo. El código utilizado para esta función se muestra a continuación.

```
function [MACH,V] = speed (A,ASON,VS)
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% Función para estimar número Mach y velocidad local
% [AMACH,V] = speed (A, ASON, VS)
% VS=VELOCIDAD DEL SONIDO
% ASON=AREA TRANSVERSAL PARA FLUJO SÓNICO
% A=AREA LOCAL
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
%Iteraciones de Newton para número Mach
G = 1.4;
MT = 0;
MN = 1;
error = 1;
while error > 0.0001
    MN = MT-(ASON/A*(2/(G+1))^(G+1)/2/(G-1))*(1+(G-1)/2*MT^2)^(G+1)/2/(G-1)-MT)/(ASON/A*MT*(2/(G+1))^(3-G)/2/(G-1))*...
    ...*(1+(G-1)/2*MT^2)^(3-G)/2/(G-1)-1);
    error = abs ((MN-MT)/MN); % Cálculo del error
```

```

MT = MN;
end
MACH = MN;
% %Velocidad local del flujo
ASL = VS/sqrt(1+(G-1)/2*MACH^2);
V = MACH*ASL;

```

3.4 Coeficiente de fricción y número de Reynolds

El coeficiente de fricción y el número de Reynolds se calculan mediante la función *friictn(Dh, A, AMACH, RN0)*, que se encuentra integrada en el código de cada bloque, para realizar el cálculo requiere como datos de entrada, el diámetro hidráulico de la sección a calcular, denotado por la variable *Dh*, el área local (variable *A*), el número Mach local (variable *AMACH*) y el número de Reynolds de la sección de referencia (variable *RN0*). En este caso el número local de Reynolds se calcula en base al número de Reynolds de la sección de referencia y en base a las condiciones locales,

$$RN = RN0 \frac{A_0}{A} \left[1 + \left(\frac{\lambda - 1}{2} M^2 \right) \right]^{0,76}.$$

Una vez que se obtiene el número local de Reynolds, existen tres condiciones para calcular el coeficiente de fricción, para un régimen laminar, es decir con $RN < 2000$, el coeficiente de fricción se estima mediante

$$f = \frac{64}{RN},$$

en el régimen de transición con $2000 > RN < 4000$, el coeficiente será

$$f = \frac{0,3164}{RN^{0,25}},$$

por último, para el régimen turbulento, el coeficiente se obtiene mediante iteraciones de Newton de (16), con un valor inicial de para $f = 0,005$, denotado por la variable *SLAMT*, el cálculo es sumado en la variable *SLAMN*, la variable *error* determina el error mínimo requerido para obtener el resultado final a través de la variable *f*. La función arroja un vector de dos posiciones, la primer posición es el número de Reynolds y la segunda es el coeficiente de fricción, el código utilizado en esta función se muestra a continuación.

```
function [RN,f] = frictn(Dh,A,AMACH,RN0)
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% Función para estimar coeficiente de fricción y número reynold's
% [RN,f] = frictn(Dh,A,AMACH,RN0)
% RN0=NÚMERO REYNOLD'S DE REFERENCIA
% AMACH=NÚMERO MACH LOCAL
% A=AREA LOCAL
% Dh=DIAMETRO HIDRÁULICO LOCAL
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
G = 1.4;
%Reynolds number
RN = RN0*Dh/A*(1+(((G-1)/(2))*AMACH^2))^0.76; %Número de Reynold
if RN >= 4e3
    error = 1;
    SLAMT = 0.005;
    SLAMN = 0;
    while error > 0.0001
        SLAMN = SLAMT+((1/(log10(SLAMT*RN^2)-.8))^2-SLAMT)/...
        (2*log10(exp(1))/(SLAMT*(log10(SLAMT*RN^2)-.8)^3)+1);
        error = abs((SLAMN-SLAMT)/SLAMN);
        SLAMT = SLAMN;
    end
    f = SLAMN;
else % % RN<4000
    f = 0.3164/RN^0.25;
    if RN < 2000
        f = 64/RN;
    end
end
```

end

3.5 Coeficiente de pérdida por expansión

Las secciones que tienen áreas de entrada y salida de diferente proporción, tienen un ángulo de divergencia θ_d , tales como los difusores, conos o contracciones y algunas secciones de prueba. En estas secciones la pérdida de presión incluyen la pérdida por expansión de sus dimensiones de entrada y salida, para tal efecto, se calcula el coeficiente de pérdida por expansión k_{exp} . No existe un método único para realizar el cálculo de dicho coeficiente, debido a la complejidad del fenómeno, sin embargo, en [8] se tienen una serie de funciones obtenidas experimentalmente, que permiten obtener un ajuste o estimación de acuerdo al ángulo de divergencia, geometría de entrada y salida, así como de sus dimensiones.

En función del ángulo de divergencia, se utilizan diferentes funciones de ajuste para calcular el coeficiente de pérdida por expansión cónica denotado por la variable KC , coeficiente de pérdida por expansión cuadrada en tres dimensiones, denotado por la variable KCD , y coeficiente de pérdida por expansión rectangular en dos dimensiones, denotado por la variable $K2DR$, a continuación se muestran las diferentes fórmulas de ajuste en función del ángulo θ_d (variable th).

Para $\theta_d < 3$

$$\begin{aligned} KC &= 0,1033395 - 0,0119465th, \\ KCD &= 0,0962274 - 0,207582 \times 10^{-2}th, \\ K2DR &= 0,1 - 0,533333 \times 10^{-2}th. \end{aligned}$$

Para $3 \leq \theta_d < 9$

$$\begin{aligned}
KC &= 0,170925 - 0,0584932th + 0,814936 \times 10^{-2}th^2 + 0,134777 \times 10^{-3}th^{-3} \\
&\quad - 0,567258 \times 10^{-4}th^4 - 0,415879 \times 10^{-6}th^5 + 0,210219 \times 10^{-6}th^6, \\
KCD &= 0,122156 - 0,0229480th + 0,550704 \times 10^{-2}th^2 - 0,408644 \times 10^{-3}th^{-3} \\
&\quad - 0,384056 \times 10^{-4}th^4 - 0,874969 \times 10^{-5}th^5 + 0,365217 \times 10^{-6}th^6, \\
K2DR &= 0,323334 - 0,0582939th - 0,0497151th^2 + 0,0199093th^3 \\
&\quad - 0,198630 \times 10^{-2}th^4 + 0,206857 \times 10^{-4}th^5 + 0,381387 \times 10^{-5}th^6.
\end{aligned}$$

Para $9 \leq \theta_d \leq 10$

$$\begin{aligned}
KC &= 0,170925 - 0,0584932th + 0,814936 \times 10^{-2}th^2 + 0,134777 \times 10^{-3}th^{-3} \\
&\quad - 0,567258 \times 10^{-4}th^4 - 0,415879 \times 10^{-6}th^5 + 0,210219 \times 10^{-6}th^6, \\
KCD &= 0,122156 - 0,0229480th + 0,550704 \times 10^{-2}th^2 - 0,408644 \times 10^{-3}th^{-3} \\
&\quad - 0,384056 \times 10^{-4}th^4 - 0,874969 \times 10^{-5}th^5 + 0,365217 \times 10^{-6}th^6, \\
K2DR &= 0,0572853 - 0,0121832th + 0,0708483th^2.
\end{aligned}$$

Para $\theta_d > 10$

$$\begin{aligned}
KC &= -0,0966135 + 0,02336135th, \\
KCD &= -0,1321685 + 0,0293315th, \\
K2DR &= -1,36146 + 0,198646th.
\end{aligned}$$

Estas funciones solamente son válidas para calcular los coeficientes de pérdida en la entrada o salida del ducto, pero debido a que generalmente existen cambios de geometría a lo

largo del ducto, es necesario calcular el coeficiente de pérdida por expansión para el ducto en función de la combinación de las geometrías de entrada y salida. Por ejemplo, para calcular el coeficiente de un ducto con una entrada circular y una salida cuadrada, el coeficiente se denota por la variable $KCSAV$ y para calcularlo se realiza un promedio de los coeficientes correspondientes a estas geometrías,

$$KCSAV = \frac{KC + KCD}{2},$$

en el caso donde ambos lados son circulares, el coeficiente es denotado por la variable $K2DC$ y se determina mediante,

$$K2DC = \frac{(K2DR)(KC)}{KCD},$$

cuando ambos lados son semicirculares, el coeficiente representado por la variable $K2DCS$ se calcula como un promedio del caso anterior junto con el caso rectangular, es decir,

$$K2DCS = \frac{K2DR + K2DC}{2}.$$

El coeficiente de pérdida por expansión total para el ducto se calcula en relación al coeficiente de pérdida en tres dimensiones $KBASE$, el coeficiente adicional KAD que representa la pérdida por expansión asimétrica. Por último, también se considera la relación de expansión entre la altura y el ancho del ducto SLR . El coeficiente de pérdida por expansión total está dado por

$$KEXP = KBASE + (1 - SLR)(KAD - KBASE).$$

En el caso cuando ambos extremos del ducto son circulares $SLR = 1$, $KBASE = KC$, y $KAD = K2DC$. Cuando alguna o ambas terminales no son circulares, dichas igualdades cambian, en un caso donde la diferencia entre las alturas y la diferencia entre los anchos o diámetros es igual a cero y una de las terminales es circular el coeficiente $SLR = 1$, $KBASE = KCSAV$ y $KAD = K2DCS$, cuando ambas terminales son rectangulares $KBASE = KCD$ y $KAD = K2DR$, y por último cuando ambas son semicirculares $KBASE = KC$, y $KAD = K2DC$.

En los casos donde la diferencia entre las alturas y la diferencia entre los anchos o diámetros es diferente de cero, el coeficiente de relación entre las alturas y anchos del ducto se calcula como

$$SLR = \frac{ALT2 - ALT1}{DAN2 - DAN1},$$

si esta relación es mayor a uno entonces el coeficiente será el inverso, cuando la diferencias entre las alturas es menor a cero o entre los anchos o diámetros es menor a cero, entonces $SLR = 0$, el código reproducido para el cálculo de la pérdida por expansión se muestra a continuación.

```
% %Funciones de pérdida ajustada a una curva
function KEXP = KEXPD(th,GEO1,GEO2,ALT1,ALT2,DAN1,DAN2)
%Pérdida por expansión para difusor cónico (circular)
KC = 0.170925-(0.0584932*th)+(0.814936e-2*th^2)+(0.134777e-3*th^3)-(0.567258e-4*th^4)-(0.415879e-6*th^5)+(0.210219e-6*th^6);
%Pérdida por expansión tridimensional para difusor cuadrado
KCD = 0.122156-(0.0229480*th)+(0.550704e-2*th^2)-(0.408644e-3*th^3)-(0.384056e-4*th^4)+(0.874969e-5*th^5)-(0.365217e-6*th^6);
%Pérdida por expansión bidimensional para difusor rectangular
K2DR = 0.323334-(0.0582939*th)-(0.0497151*th^2)+(0.0199093*th^3)-(0.198630e-2*th^4)+(0.206857e-4*th^5)+(0.381387e-5*th^6);
if th < 3
    KC = 0.1033395-(0.0119465*th);
    KCD = 0.0962274-(0.207582e-2*th);
    K2DR = 0.1-(0.5333333e-2*th);
end
if th >= 9
    K2DR = 0.0572853-(0.0121832*th)+(0.0708483*th^2);
end
```

```

if th > 10
    KC = -0.0966135+(0.02336135*th);
    KCD = -0.1321685+(0.0293315*th);
    K2DR = -1.36146+(0.198646*th);
end
KCSAV = (KC+KCD)/2; % Kexp 3D, lados circular y cuadrada
K2DC = K2DR*KC/KCD; % Kexp 2D,ambos lados circulares
K2DCS = (K2DR+K2DC)/2; % Kexp 2D,semicircular
KBASE = 1;
KAD = 1;
if GEO1 ~= 1 || GEO2 ~= 1 % %Alguna terminal es circular
    if GEO1 ~= 1 || GEO2 == 1 % %Primera terminal circular o segunda rectangular
        if (GEO2 ~= 1) % %Segunda terminal circular
            if (ALT2-ALT1) == (DAN2-DAN1)
                SLR = 1; %Relación de expansión de altura con anchura
                KBASE = KCSAV; % Kexp base unicamente para 3D
                KAD = K2DCS; % Kexp adicional por expansión asimétrica
            if GEO1 == 2 && GEO2 == 2
                KBASE = KCD;
                KAD = K2DR;
            elseif GEO1 == 3 && GEO2 == 3
                KBASE = KC;
                KAD = K2DC;
            end
        end
    else
        if (ALT2-ALT1) > 0 && (DAN2-DAN1) > 0
            SLR = (ALT2-ALT1)/(DAN2-DAN1);
            if SLR > 1
                SLR = 1/SLR;
            end
            KBASE = KCSAV;
            KAD = K2DCS;
            if GEO1 == 2 && GEO2 == 2
                KBASE = KCD;
                KAD = K2DR;
            elseif GEO1 == 3 && GEO2 == 3
                KBASE = KC;
                KAD = K2DC;
            end
        end
    else
        SLR = 0;
        KBASE = KCSAV;
        KAD = K2DCS;
        if GEO1 == 2 && GEO2 == 2

```

```

        KBASE = KCD;
        KAD = K2DR;
    elseif GEO1 == 3 && GEO2 == 3
        KBASE = KC;
        KAD = K2DC;
    end
end
end
else
    SLR = 1;
    if GEO1 == 2
        KBASE = KCSAV;
        KAD = K2DCS;
    elseif GEO1 == 3
        KBASE = KC;
        KAD = K2DC;
    end
end
end
else %%Segunda terminal circular
    if (ALT2-DAN1) > 0 && (DAN2-DAN1) > 0
        SLR = (ALT2-DAN1)/(DAN2-DAN1);
        if SLR > 1
            SLR = 1/SLR;
        end
        if GEO2 == 2
            KBASE = KCSAV;
            KAD = K2DCS;
        elseif GEO2 == 3
            KBASE = KC;
            KAD = K2DC;
        end
    end
else
    SLR = 0;
    if GEO2 == 2
        KBASE = KCSAV;
        KAD = K2DCS;
    elseif GEO2 == 3
        KBASE = KC;
        KAD = K2DC;
    end
end
end
else %% Ambas terminales circulares
    SLR = 1;

```

```

KBASE = KC;
KAD = K2DC;
end
KEXP = KBASE+(1-SLR)*(KAD-KBASE); %Coeficiente de pérdida por expansión total

```

3.6 Coeficientes de pérdida por sección particular

Los coeficientes de pérdida, se calculan de manera particular para cada sección. A diferencia de las funciones descritas anteriormente, esta parte de los bloques es diferente para cada sección, en algunos casos se obtiene una estimación mediante ecuaciones hidráulicas, y en otros casos debido a la complejidad de modelado se utilizan aproximaciones empíricas o experimentales.

3.6.1 Sección área de pruebas sección constante

El coeficiente de pérdida para una sección constante es directamente la ecuación (14) de pérdida por fricción, la ecuación representada en código se presenta a continuación.

```

%Pérdida local
K1 = SLMDA1*L/DH1;

```

3.6.2 Sección área de pruebas con expansión

En ocasiones las secciones de prueba no son constantes, ya que pueden tener ligeras expansiones, en estos casos el coeficiente de pérdida se calcula dos veces, la primera considerando la sección como un difusor mediante la ecuación (25), la segunda como sección constante. Si el primer cálculo es mayor al segundo se toma éste como el coeficiente, en caso contrario se considera el segundo resultado, es decir, como sección constante. A continuación se presentan el código de las ecuaciones implementadas.

```

%Pérdida local
K1 = (EKEXP+SLMDA1/(8*sin(TH))*(AR+1)/(AR-1))*((AR-1)/AR)^2;
if K1 < (SLMDA1*L/DH1)
    K1 = SLMDA1*L/DH1;

```

end

3.6.3 Contracción o cono

El coeficiente de pérdida para la sección de contracción es directamente la ecuación (30), la ecuación representada en código se presenta a continuación.

%Pérdida local

KI = 0.32*SLMDA2*L/DH2;

3.6.4 Difusor

La sección de difusor, al igual que la sección de prueba con expansión, primero se calcula para un caso con expansión, si este es menor a un caso considerando la sección constante, entonces se toma el resultado como una sección constante. A continuación se presenta las ecuaciones implementadas en código.

%Pérdida local

KI = (EKEXP+SLMDA1/(8*sin(TH))*(AR+1)/(AR-1))*((AR-1)/AR)^2;

if KI < (SLMDA1*L/DH1)

 KI = SLMDA1*L/DH1;

end

3.6.5 Malla

La malla de protección tiene un coeficiente de pérdida que puede ser expresado en un factor de sensibilidad de número de Reynolds,

Para $0 \leq RN \leq 400$

$$K_l = \frac{78,5 \left(1 - \frac{RN}{354}\right)}{100} + 1,01,$$

para $RN > 400$

$$K_l \equiv 1.$$

Aunque en los casos donde el coeficiente de pérdida para la malla variable k_{mall} , es conocido, o proporcionado en las especificaciones de fabricante es posible determinar la pérdida en función de la porosidad β de la malla (variable *poros*) por medio de,

$$K_l = k_{mall} \left(\frac{1 - \beta}{100} \right) + \left(\frac{100}{\beta - 1} \right)^2$$

$$RN = \frac{V_1 D_{mall}}{\nu}$$

Donde D_{mall} es el diámetro de los hilos de la malla y ν es la viscosidad cinemática del gas en m^2/sec , denotada por la variable *ENU*, esta última se calcula como la relación entre viscosidad del flujo μ en $N \text{ sec}/m^2$ (variable *EMU*) y la densidad estática local ρ en $N \text{ sec}^2/m^4$ (variable *RHOS*), tanto μ como ρ son calculadas en base a las condiciones locales del número Mach, así como de la viscosidad μ_t y densidad ρ_t de la sección de referencia para condiciones de flujo constante (variables *EMUT* y *RHOT* respectivamente), la reproducción del código para la implementación de las ecuaciones se muestra a continuación.

```

RHOS = RHOT/(1+(G-1)/2*AMACH1^2)^(1/(G-1));
EMU = MUT/(1+(G-1)/2*AMACH1^2)^0.76;
ENU = EMU/RHOS;
RN = V1*DMALL/ENU;
%Pérdida local
KI = KMALL*(1-POROS/100)+(100/POROS-1)^2;
if RN < 400 && KI < KI*(78.5^(1-RN/354)/100+1.01)
    KI = KI*(78.5^(1-RN/354)/100+1.01);
end

```

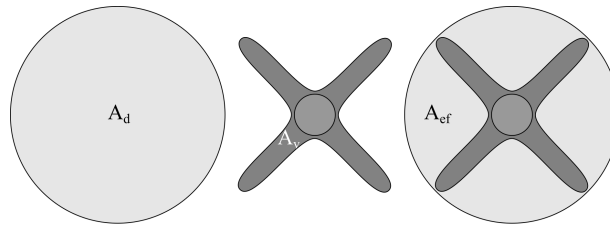


Figura 9. Representación gráfica del área efectiva en un ducto.

3.6.6 Contracción en zona de ventilador

El coeficiente de pérdida de contracción en la zona del ventilador se calcula de la misma forma que en una contracción normal, la diferencia radica en las consideraciones de cálculo para los diámetros hidráulicos y el área, esto debido a que en esta sección dentro del ducto se encuentra el cuerpo del ventilador, además se puede dividir en varios ductos internos o pueden existir algunas otras estructuras, todos estos objetos ocupan un área que tiene que ser restada al área del ducto principal para establecer una área efectiva A_{ef} tal como se ilustra en la Figura 9, es decir, al área del ducto A_d se le resta el área A_v que ocupa el cuerpo del ventilador.

En este bloque y en todas las secciones que componen la zona del ventilador se considera la cantidad de ductos en los que se divide la sección, este dato se ingresa en la máscara del bloque y es denotado por la variable N_{DUCT} , el diámetro hidráulico se ve modificado por el diámetro que ocupa el ventilador siendo éste la diferencia entre el diámetro del ducto y el del ventilador. El área efectiva para la estimación de la velocidad de salida también es afectada por dichos objetos y se puede obtener una estimación mediante

$$A = N_{duct} \left(\frac{\pi D_{fan}^2 - D_{ven}^2}{4} \right) \left(\frac{1 - bloq}{100} \right),$$

donde $bloq$ es el porcentaje de área bloqueada por los diversos objetos en la sección local respecto al área del ducto principal, el código para estos cálculos se muestra a continuación.

```

% %Modificaciones a la geometria por ductos multiples
if NDUCT < 1e-6
    NDUCT = 1;
end
AI1 = A1;
A1 = AI1*NDUCT;
%Geometria de la sección del propulsor
DFAN = DAN2;
DH2 = DFAN-DVEN; %Diametro hidráulico efectivo
A2 = (pi*((DFAN^2)-(DVEN^2))/4)*NDUCT*(1-BLOQ/100); %Area efectiva
AI1 = A1/NDUCT;
AI2 = A2/NDUCT;
AR = A2/A1; %Relación de areas
if AR < 1
    AR = A1/A2;
end
%Cálculo de fricción y velocidades entrada y salida
[AMACH1,V1] = speed(A1,ASON,VS);
[RN1,SLMDA1] = frictn(DH1,A1,AMACH1,RN0);
[AMACH2,V2] = speed(A2,ASON,VS);
% Angulo equivalente de divergencia
TH2 = atan((sqrt(AI2)-sqrt(AI1))/(sqrt(4*atan(1))*L))*90/atan(1);
KI = 0.32*SLMDA1*L/DH2; %Pérdida local

```

3.6.7 Estructuras internas (objetos obstructores)

Cualquier estructura u objeto que se encuentre dentro de los ductos del sistema en contacto con el flujo de aire representa una obstrucción y tiene que ser considerado en el cálculo de pérdida de presión, en este caso las secciones que contengan algún tipo de soporte estructural o para instrumentación deben de incluir este bloque para tomar en cuenta la pérdida causada por la estructura, el coeficiente de pérdida considera cuatro factores, uno de ellos es el factor de obstrucción de flujo ε denotado por la variable *EPS* que puede ser agregada de manera opcional en la máscara del bloque, en la variable *ROBS* se ingresa la relación entre el área de flujo local y el área de flujo de arrastre provocada por el objeto, por último la variable *CD* es el coeficiente de arrastre de la obstrucción, el código para calcular el coeficiente de pérdida local en estructuras se presenta a continuación.

```

%factor de obstrucción de los objetos

```

```

eps = 1+(EPS/100);
if NOBJ < 1e-6 %Cantidad de objetos mayor a cero
    NOBJ = 1;
end
Kl = CD*ROBS*eps*NOBJ; %Pérdida local

```

3.6.8 Estructuras y soportes del ventilador en ductos anulares

En los casos donde las estructuras son los soportes del ventilador y se encuentran en ductos anulares, las pérdidas en estas secciones dentro de la zona del ventilador se toman en cuenta las mismas consideraciones que en la sección anterior de *estructuras internas* respecto a los objetos de obstrucción y división de ductos, a diferencia que en este caso el coeficiente se compone de la suma de la pérdida provocada por la fricción y/o expansión del ducto con la pérdida provocada por la obstrucción de las estructuras del ventilador, el código para calcular el coeficiente de pérdida local en estructuras anulares se presenta a continuación.

```

%Pérdida por expansión
EKEXP = KEXPD(TH2,GEO1,GEO2,ALT1,ALT2,DAN1,DAN2);
eps = 1+(EPS/100);
if NOBJ < 1e-6
    NOBJ = 1;
end
%Pérdida por fricción
EKD = SLMDA1*L/DH1;
if (A2/A1-1) > 1e-6
    EKD = (EKEXP+SLMDA1/(8*sin(TH))*(AR+1)/(AR-1))*((AR-1)/AR)^2;
end
if EKD < (SLMDA1*L/DH1)
    EKD = SLMDA1*L/DH1;
end
%Coeficiente de pérdida total de presión local por punta del propulsor
EKSTRT = CD*ROBS*eps*NOBJ;
Kl = EKD+EKSTRT; %Pérdida local

```

3.6.9 Cálculo de presión diferencial en las paredes de los ductos

Para determinar la presión en cada sección se utiliza como referencia el coeficiente de pérdida K_{lt} correlacionado a la sección de referencia comúnmente la sección de pruebas. Para ello es necesario realizar una sumatoria consecutiva de los coeficientes de cada sección, esto lleva a cabo en la variable SK que suma el dato de la sumatoria anterior en Kin y añade el coeficiente de la sección actual, la presión se determina con referencia a la presión ambiental exterior y la presión interna estática, de acuerdo a [8] la presión diferencial en la pared de los ductos puede ser determinada mediante

$$\Delta Pw_i = P_{amb} - \left\{ \frac{Pt - q_0 \sum_{j=1}^i K_{ltj}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} M_i^2\right)\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \right\}, \quad (35)$$

donde q_0 es la presión dinámica de la sección de referencia, para calcularla se utiliza el número Mach y la velocidad de sonido de la sección de referencia (variables $M0$ y VS), P_{amb} es la presión ambiental, Pt es la presión total del túnel en flujo desarrollado, en los casos donde no se cuenta con este dato se utiliza la presión ambiental, el número Mach utilizado es el de la salida de la sección, la presión ideal sin consideración de pérdidas se obtiene en la variable $Pout$, la estimación de presión con pérdidas se obtiene en la variable PDW , a continuación se muestra el extracto de código.

```
SK = Kin+Klt;
Pamb=101325;
VST=VS/sqrt(1+(G-1)/2*M0^2);
V0 = M0*VST;
Pout=Pamb-((Pamb-((RHOT*V0^2)/2)*0)/(1+(G-1)/2*AMACH2^2)^(G/(G-1)));
PDW=Pamb-((Pamb-((RHOT*V0^2)/2)*SK)/(1+(G-1)/2*AMACH2^2)^(G/(G-1)));
```

Capítulo 4

Ejecución del modelo de software

Para la ejecución del modelo es necesario contar con el bloque *Sección de referencia*, este bloque determina los datos de entrada para todos los demás bloques del sistema, a partir de ahí se requiere un orden sucesivo de los bloques, ya que se realiza una sumatoria del coeficiente de pérdida correlacionado al bloque *Sección de referencia* de manera consecutiva para determinar las presiones en cada sección, por ejemplo, en la figura 10 se muestra la configuración para el túnel de viento del Instituto de Ciencias de la India, al inicio del programa se encuentra el bloque de *sección de referencia* con una entrada constante de velocidad, el dato de salida que se ingresa a los demás bloques se compone por las 10 variables descritas en el código del bloque en capítulo anterior, el orden particular en que se disponen depende de la ubicación del ventilador, en este caso los bloques de la sección de abajo se consideran los coeficientes positivos y se suman desde la sección de entrada de aire hasta la última sección antes del ventilador, es decir, desde las mallas hasta el difusor, los bloques de la sección de arriba corresponden a las secciones posteriores, la diferencia en este caso es que los coeficientes de pérdida se consideran negativos y se suman desde la salida del aire hasta la última sección correspondiente al ventilador.

Para configurar una prueba en el programa es necesario definir la función de entrada del sistema, esta puede ser de cualquier tipo, excepto señales negativas, ya que los algoritmos no pueden resolver este tipo de señal. El comportamiento que se obtiene no contiene dinámicas de flujo ya que es una representación que considera condiciones de flujo estable. Los coeficientes de pérdida son un dato de salida en cada bloque y permiten obtener el desempeño del túnel que se encuentre en evaluación, además permite obtener las tablas de desempeño del coeficiente pérdida en relación a la velocidad de flujo, para esto es necesario realizar la simulación con una señal tipo rampa en la entrada, con pendiente igual a uno, de manera que el tiempo de simulación sea igual a la velocidad máxima deseada que se desee evaluar, al ter-

minar la ejecución, el programa crea un archivo en el espacio de trabajo de Matlab del tipo series de tiempo por cada bloque de sección que se encuentre en el sistema, dichos archivos contienen la información de la curva de desempeño para cada sección, que posteriormente pueden ser implementados en una simulación donde se consideren las pérdidas de presión en función de la dinámica del flujo.

4.1 Resultados de la reproducción

4.1.1 Túnel de viento subsónico 14x9 pies del Instituto de Ciencias de la India

Retomando el ejemplo del túnel de viento subsónico del tipo abierto del Instituto de Ciencias de la India Figura 11 presentado en [8], se realizó una prueba para un caso con velocidad de 93.323 m/sec en la sección de prueba con presión total de 1 atm, además de parámetros específicos para cada sección enlistados en la Tabla 2, donde D_{ct} es la cantidad de ductos en los que se divide la sección a evaluar, Obj_{duct} es la cantidad de objetos de obstrucción que pueden contener los ductos, R_{Aobs} es la relación de área de arrastre de la obstrucción del flujo respecto al área local, D_{ven} es el diámetro del ventilador, D_{mall} es el diámetro de los filamentos de la malla de protección, $\%_{Bloq}$ porcentaje de área local que bloquea el flujo en caso de existir un objeto de obstrucción, ϕ es el ángulo de giro de la sección de esquina, C_a es el coeficiente de arrastre de la obstrucción del flujo.

Los resultados obtenidos en la nueva versión del programa no difieren significativamente de los resultados originales, salvo en pequeñas cifras que se deben a los métodos de solución utilizados por el entorno de simulación, en la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos en cada sección donde A_1 y A_2 son el área de entrada y salida respectivamente, R_a es la relación de entre áreas, V_1 y V_2 son velocidad de la entrada y la salida en m/s, M_1 , M_2 son los números Mach, K_l es el coeficiente de pérdida local de la sección, P_{id1} , P_{id2} son las presiones sin pérdidas, ΔP es la pérdida de presión en relación al coeficiente K_l y P_{re1} , P_{re2} son las presiones considerando las pérdidas. En la Figura 12 se ilustra la diferencia de presiones en

#	Sección	D_{ct}	Obj_{duct}	R_{Aobs}	D_{ven}	D_{mall}	$\%_{Bloq}$	ϕ	C_a
1	Malla1					0.0005	84.12		
2	Malla2					0.0005	84.12		
3	Malla3					0.0005	84.12		
4	Malla4					0.0005	84.12		
5	Malla5					0.0005	84.12		
6	Contracción1								
7	Contracción2								
8	Sección prueba								
9	Difusor1								
10	Contracción vent	2	2	0.2369	1.463		2.186		
11	Estructuras vent	2	2		1.463		2.186		0.01
12	Cuerpo vent	2	0		1.463		0		
13	Expansión 90°	2							
14	Esquina simple							50.0	
15	Cinética salida								

Tabla 2. Parámetros de configuración para cada sección del túnel de viento.

la pared del ducto sin pérdidas P_{dwi} y con pérdidas P_{dwr} para cada sección del túnel, como se puede observar en algunas secciones las pérdidas son notablemente mayores. Las tablas de K_l respecto al flujo másico para cada sección se pueden encontrar en el apéndice A.

4.1.2 Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería UABC

En el caso del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California que se muestra en la figura 13, se trata de un túnel subsónico de la marca TecQuipment, modelo AF100, con una velocidad máxima de 40 m/s en la zona de pruebas, es un sistema con una longitud menor a cuatro metros una sección de pruebas de 0.625 X 0.625 metros, esta instalación se puede dividir en 9 secciones que se enlistan en la Tabla 4 con sus respectivos parámetros.

Los resultados obtenidos a partir del modelo de software para este caso, se enlistan en la Tabla 5 para cada sección, así como en la figura 14 se puede apreciar de manera visual la diferencia de presión en la pared del ducto sin pérdidas P_{dwi} y con pérdidas P_{dwr} , donde las

#	A	R_a	V	M	K_l	K_{lt}	$\sum K_{lt}$	P_{id}	P_{re}	ΔP
1-5	148.62	1	6.563	0.019						
	148.62		6.563	0.019	0.2562	0.000124	0.0062	24.42	61.65	-37.23
6	148.62	8.17	6.563	0.019						
	18.19		54.298	0.160	0.0094	0.003074	0.0093	1796.95	1848.76	-51.81
7	18.19	1.72	54.298	0.160						
	10.54		96.320	0.285	0.0036	0.003574	0.0128	5577.43	5646.49	-69.06
8	10.54	1.07	96.320	0.285						
	11.33		89.105	0.263	0.0124	0.01241	0.0252	4787.10	4924.02	-136.92
9	11.33	3.66	89.105	0.263						
	41.53		23.541	0.069	0.0726	0.06247	0.0877	339.52	837.03	-497.51
10	41.53	1.28	23.541	0.069						
	32.51		30.116	0.088	0.0024	0.00024	-0.0501	555.23	266.64	288.59
11	32.51	1	30.116	0.088						
	32.51		30.116	0.088	0.0063	0.00063	-0.0503	555.23	270.24	284.99
12	34.00	1.62	28.789	0.084						
	55.29		17.664	0.052	0.1338	0.01240	-0.0379	191.26	-24.32	215.58
13	55.29	1.09	17.664	0.052						
	60.52		16.134	0.047	0.0075	0.00026	-0.0377	159.57	-54.59	214.16
14	60.52	1.21	16.134	0.047						
	73.24		13.326	0.039	0.6089	0.01777	-0.0199	108.89	-4.37	113.26
15	73.24	1	13.326	0.039						
					1.0004	0.01992	0	108.89	108.89	0

Tabla 3. Resultados obtenidos a partir del modelo de software para cada sección del túnel de viento.

diferencias más significativas en cuestión de pérdidas de presión se dan a partir de la entrada del difusor hasta la salida del túnel, las tablas de K_l respecto al flujo másico para cada sección se pueden encontrar en el apéndice B.

#	Sección	D_{ct}	Obj_{duct}	R_{Aobs}	D_{ven}	D_{mall}	$\%_{Bloq}$	ϕ	C_a
1	Contracción								
2	Sección prueba								
3	Malla 1					0.00079375	76.59		
4	Difusor								
5	Estructuras vent	1	1	0.4	0.210		2.2358		0.3267
6	Cuerpo vent	1		0.4	0.210		0		
7	Ducto constante								
8	Malla 2					0.003	78.44		
9	Cinética salida								

Tabla 4. Parámetros de configuración para cada sección del túnel de viento.

#	A	R_a	V	M	K_l	K_{lt}	$\sum K_{lt}$	P_{id}	P_{re}
1	0.81000	8.707	4.563	0.01342					
	0.09302		40.00	0.11780	0.01151	0.01151	0.01151	978.0	989.20
2	0.09302	1	40.00	0.11780					
	0.09302		40.00	0.11780	0.02461	0.02461	0.03612	978.0	1013.12
3	0.09302	1	40.00	0.11780					
	0.09302		40.00	0.11780	0.3978	0.39780	0.4339	978.0	1399.71
4	0.90302	2.327	40.00	0.11780					
	0.21650		17.09	0.05028	0.04233	0.04233	0.4762	179.10	645.60
5	0.17780	1	20.83	0.06127					
	0.17780		20.83	0.06127	0.1434	0.03908	-0.257	265.80	14.26
6	0.17780	1.218	20.83	0.06127					
	0.21650		17.09	0.05028	0.01282	0.00333	-0.236	179.10	-69.38
7	0.21650	1	17.09	0.05028					
	0.2165		17.09	0.05028	0.02474	0.00454	-0.2491	179.10	-64.93
8	0.2165	1	17.09	0.05028					
	0.2165		17.09	0.05028	0.3558	0.06534	-0.1837	179.10	-0.9262
9	0.2165	1	17.09	0.05028					
	0.2165		17.09	0.05028	1.001	0.1837	0	179.10	179.07

Tabla 5. Resultados obtenidos a partir del modelo de software para cada sección del túnel de viento

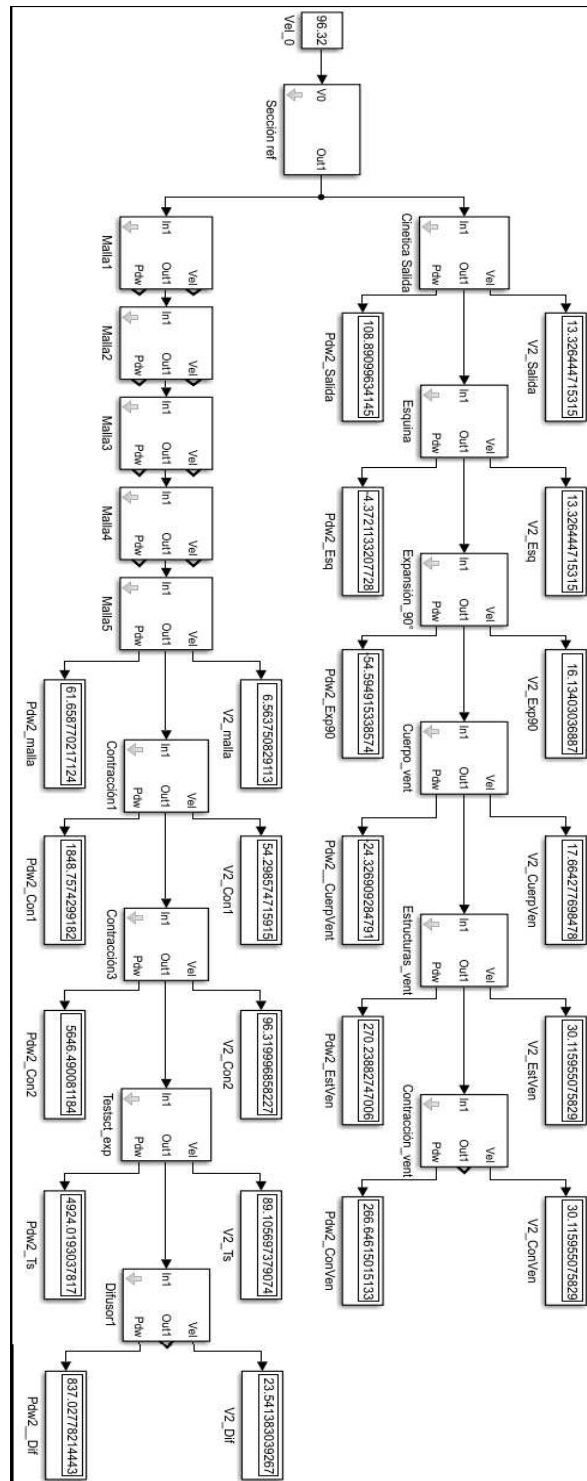


Figura 10. Programa para estimar el desempeño de un túnel de viento, basado en la características del túnel de viento del Instituto de Ciencias de la India

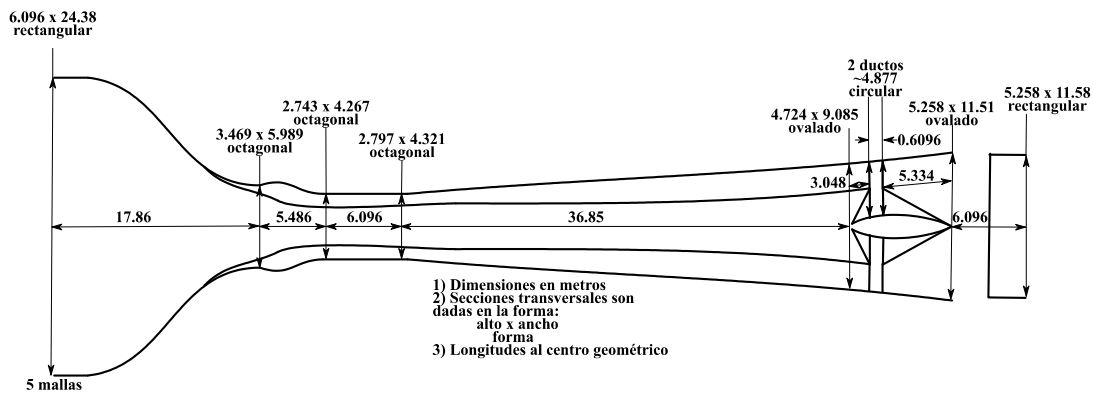


Figura 11. Túnel de viento 14 x 9 pies, del Instituto de Ciencias de India.

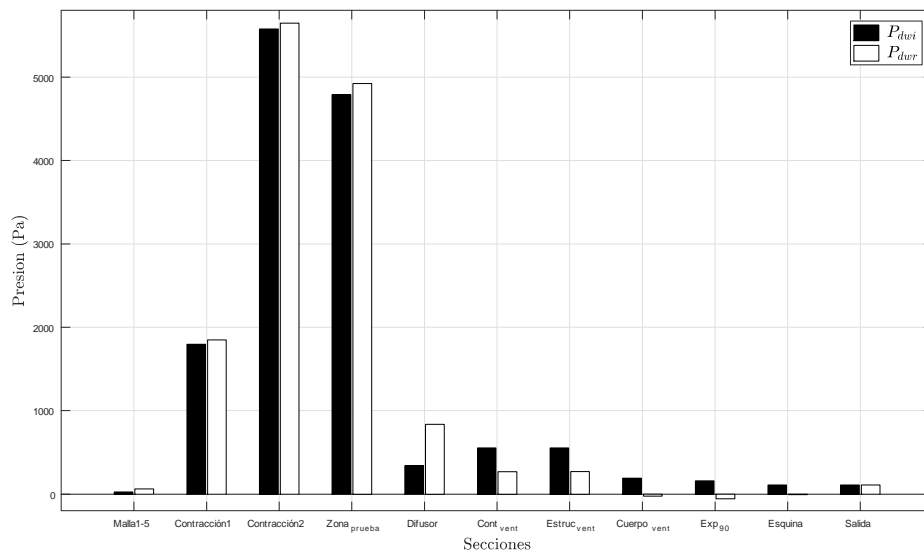


Figura 12. Comparación de presiones calculadas sin pérdidas y con pérdidas para cada sección túnel de viento Instituto de Ciencias de India.

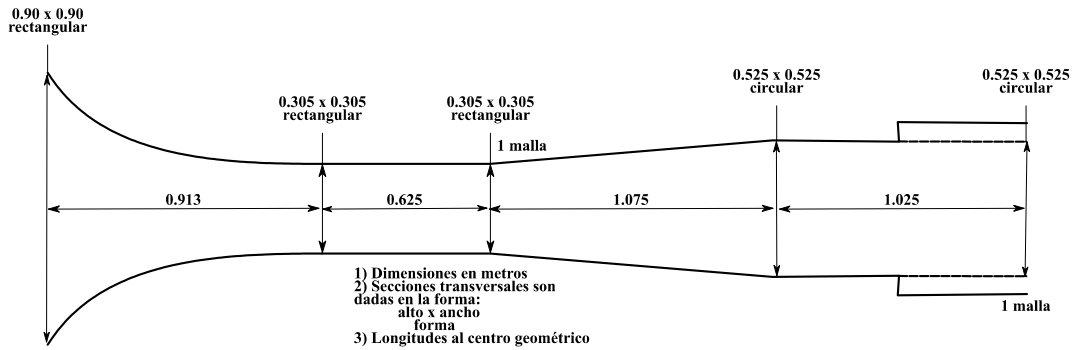


Figura 13. Túnel de viento subsónico de la Facultad de Ingeniería UABC

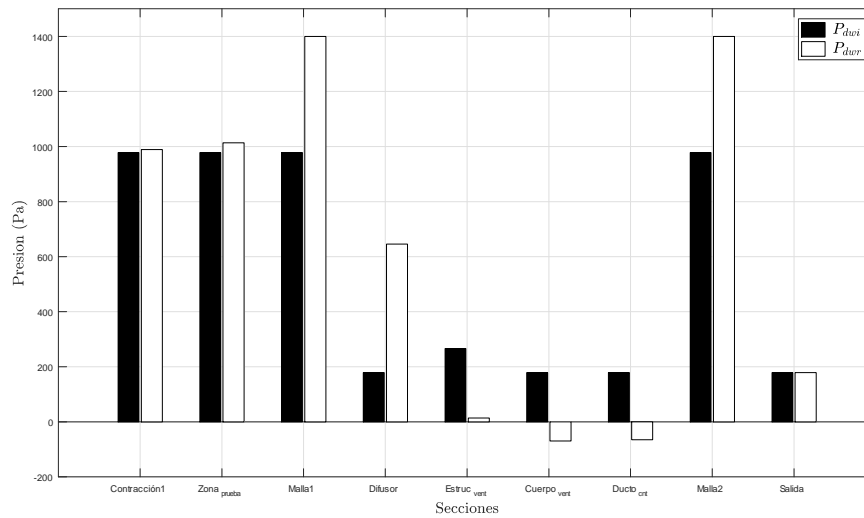


Figura 14. Comparación de presiones calculadas sin pérdidas y con pérdidas para cada sección túnel de viento Facultad de Ingeniería UABC.

Capítulo 5

Modelo de software para la evaluación del desempeño de un túnel de viento con dinámica hidráulica

Como se mencionó anteriormente el modelo desarrollado en [8] considera condiciones de flujo totalmente desarrollado, por lo que, si se requiere resultados de simulación más realistas en donde se pueda observar la transición de un estado a otro del flujo es necesario añadir la dinámica en el modelo, así como los coeficientes de pérdida estimados, además añadiendo el objetivo de ejecución en tiempo real es necesario simplificar en la medida posible la complejidad del modelo. Para tal efecto se siguió la metodología de modelado hidráulico presentado en [13], donde se presentan algunos modelos de sistemas hidráulicos, en los cuales se propone que la pérdida de presión p_{loss} en un modelo de simulación se puede considerar de tres formas distintas, una de ellas es considerar el coeficiente de pérdida como cero, otra es considerar el coeficiente como una constante calculándolo en base a la geometría la viscosidad y flujo nominal, o por último puede ser considerada variable en función del flujo y la viscosidad del fluido,

$$p_{loss} = (\mu, Q, Geo).$$

A la entrada del sistema se utiliza el desplazamiento $Q_p(t)$ de una bomba hidráulica, dicho desplazamiento es dado en unidades de masa por tiempo. Para obtener la dinámica de presión y velocidad, en cada uno de los elementos del circuito se realiza un balance del flujo másico, integrando las diferencias entre el flujo de entrada y el de salida de cada elemento. Basándose en la ley de la conservación de la masa, se sabe que la masa que ingresa al sistema de ductos

en un sistema hidráulico es la misma que sale, de tal manera que se aplica la misma condición en las diferencias de flujos que es igual a cero,

$$Q_p(t) - Q_1(t) - \dots - Q_n(t) = 0, \quad (36)$$

la fuerza requerida para que este flujo se mantenga a través de un cambio de área resulta en el cambio de presión en dicha sección,

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} = \frac{\beta}{V_i} (Q_{in} - Q_{out}); P_{out}(0) = P_{amb}, \quad (37)$$

donde β es el módulo de Bulks del fluido a presión ambiente y temperatura constante en Pascales, V_i es el volumen de la sección en m^3 .

Para el cálculo del flujo de salida de un elemento se utilizan las ecuaciones de Bernoulli,

$$P_{out} + \frac{\rho V^2}{2} = Constante = P_{in}. \quad (38)$$

Donde al despejar la velocidad se tiene

$$V = \sqrt{\left(\frac{2(P_{in} - P_{out})}{\rho}\right)}, \quad (39)$$

y sustituyendo en la ecuación de flujo másico tenemos que

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho V A \\ \dot{m} &= \rho \sqrt{\left(\frac{2(P_{in} - P_{out})}{\rho}\right)} A\end{aligned}\quad (40)$$

para dejar la velocidad en términos del flujo se reescribe

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A}.$$

Tomando en cuenta la analogía entre un sistema hidráulico y un túnel de viento, donde el fluido hidráulico en este caso es el aire, la bomba es el ventilador y las secciones del túnel son representadas por cambios de áreas, cada sección del túnel de viento es representada como un elemento hidráulico que se gobierna por las ecuaciones (36) hasta (40).

Para añadir las pérdidas de presión se puede utilizar un valor constante para el coeficiente k_l o la tabla de datos que se genera con el modelo de software del capítulo anterior, la caída de presión debido a la pérdida se obtiene

$$P_{loss} = k_l \frac{\rho V_{in}^2}{2},$$

de esta manera la presión de salida se calcula como

$$P_{out_loss} = P_{out} + \frac{\rho (V_{in}^2 - V_{out}^2)}{2} - P_{loss},$$

El cálculo de de estas variables se programó en un bloque *función m* donde el flujo es denotado por la variable Q , las velocidades de entrada y salida por las variables $V1$ y $V2$ respec-

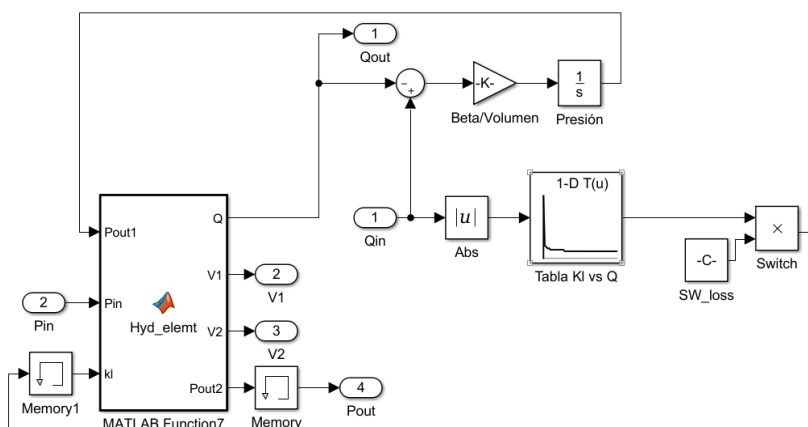


Figura 15. Modelo a bloques del elemento hidráulico implementado para el modelo de un túnel de viento

tivamente, la caída de presión debido a pérdidas mediante la variable $lossP$ y finalmente la presión de salida por $Pout2$, el código utilizado para estos cálculos se muestra a continuación.

```
function [Q,V1,V2,Pout2] = Hyd_elemt(Pout1,Pin,kl,rho, A1, A2)
DP = Pin-Pout1; %Diferencia de presión [Pascuales N/m^2] a la entrada
Q = rho*(sqrt(2*(abs(DP)/rho)))*A1*-sign(DP); %Flujo másico [kg/s]
V1 = Q/(rho*A1); %Velocidad del flujo [m/s] a la entrada
V2 = Q/(rho*A2); %Velocidad del flujo [m/s] a la salida
lossP = kl*(rho*V1^2)/2; %Caída de presión respecto a kl
Pout2 = Pin + (rho*(V1^2-V2^2)/2) - lossP; %Presión [Pascuales N/m^2] a la salida
```

El modelo de una sección del túnel de viento queda conformado como se ilustra en el diagrama a bloques de la figura 15, donde el bloque *lookup-table* contiene la tabla de los coeficientes de pérdida k_l respecto al flujo de entrada de la sección a la que corresponde el bloque, la constante SW_loss es un factor de multiplicación que habilita la consideración de pérdidas de presión. Como se puede observar el modelo requiere de dos entradas, la presión y flujo a la entrada de la sección, los parámetros de salida son el flujo, presión y velocidades del flujo.

En este caso el orden que se requiere en los bloques si corresponde al orden de la instalación física, ya que los datos son secuenciales y las presiones y flujos dependen directamente del bloque consecutivo. Los parámetros que se requieren en la máscara del bloque son el área

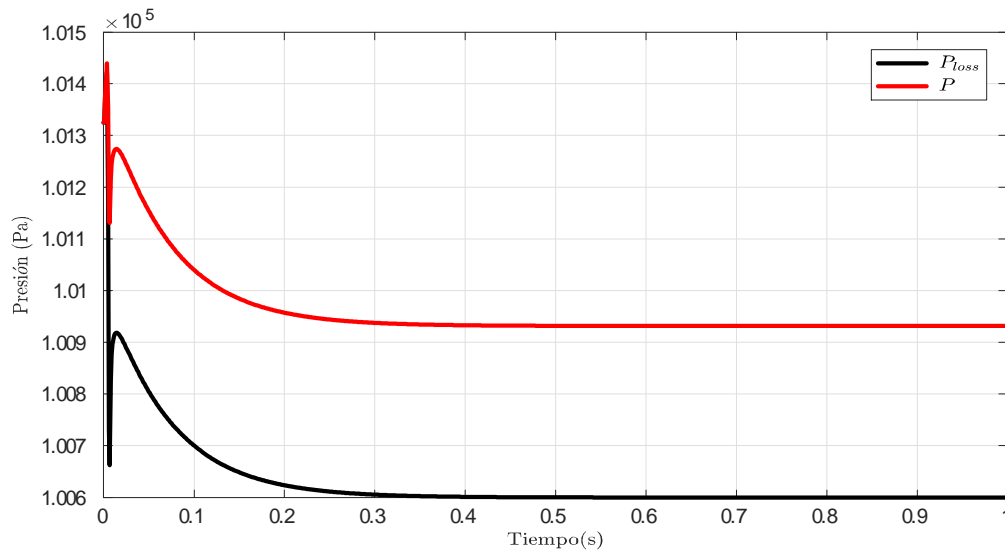


Figura 16. Comparación de transitorios de presión ambiente a presión en flujo desarrollado en difusor túnel de viento de Instituto de Ciencias de India.

de entrada y de salida, densidad y módulo Bulks del fluido, presión inicial y el volumen de la sección. Además se pueden ingresar las tablas de desempeño respecto al coeficiente k_l y seleccionar en cada bloque si se consideran las pérdidas en el modelo o no, en la figura 16 se observa el comportamiento transitorio desde la presión ambiente hasta la presión en flujo desarrollado de la sección del difusor, además se observa la diferencia entre el comportamiento de la presión P_{loss} considerando las pérdidas y la presión P despreciando las pérdidas.

Capítulo 6

Ejecución en tiempo real del modelo

Configurar un modelo matemático para simulación en una plataforma de tiempo real puede ser complicado, ya que, el tiempo de solución debe ser lo suficientemente menor al tiempo de ejecución de la simulación para permitir que se realicen las tareas necesarias del sistema para interactuar con el entorno de pruebas, por ejemplo, la lectura y escritura de señales en los puertos de la tarjeta de adquisición de datos, además se requiere que el tiempo de ejecución sea siempre el mismo, es decir que el tiempo de paso del solver debe ser fijo. Las simulaciones en software usualmente utilizan un solver de paso variable, este tipo de solver disminuye el tiempo de los pasos de ejecución para obtener resultados más precisos ante eventos ocurridos durante la simulación que complican la solución de las ecuaciones y aumentan el costo computacional, si bien esto resulta en una mayor precisión en el resultado, al procesador se le demanda un tiempo mayor para resolver las ecuaciones, como resultado se obtienen simulaciones precisas pero lentas, además de que no se asegura que el tiempo de ejecución sea el mismo en todo momento, por ello no es posible realizar una simulación en tiempo real con un solver de paso variable. Debido a esto, la configuración de un modelo para ejecución en tiempo real se torna un reto, que consiste en encontrar la combinación exacta entre el tiempo de paso, la complejidad del modelo a ejecutar y la precisión de los resultados.

Una vez seleccionado el solver, se procede a determinar el tiempo del paso, incrementar el tiempo de paso deja espacio en la línea de tiempo para realizar cálculos, pero disminuye la precisión de los resultados, disminuir demasiado el tiempo de paso podría hacer que el modelo no pueda ser ejecutado en tiempo real, por lo que es necesario realizar una serie de iteraciones para encontrar la combinación más efectiva para los propósitos de la simulación. Sí no es posible encontrar una combinación apropiada, es posible que el modelo produzca efectos que el solver de paso fijo no puede resolver en tiempo real. Los efectos pueden ser comportamientos no deseados en la simulación como cambios abruptos, divergencias,

sobrecargas en la ejecución, etc. También es posible que parte del sistema modelado requiere de constantes tiempo demasiado pequeñas, por lo que será necesario identificar estos efectos y modificarlos para permitir la ejecución en tiempo real.

J. W. Steve Miller recomienda un procedimiento en [16] para lograr la ejecución de modelos en tiempo real, se hace mención a que dicho procedimiento fue validado con 20 modelos de sistemas hidráulicos, eléctricos, mecánicos, neumáticos y térmicos, incluyendo elementos lineales y no lineales, el procedimiento cuenta con seis pasos principales.

Paso 1: Obtener un conjunto de resultados que converjan con un solver de paso variable.

Para asegurar la precisión de los resultados obtenidos con el solver de paso fijo, se requiere de un conjunto de resultados previos como referencia. Estos pueden ser obtenidos simulando el modelo con un solver de paso variable y disminuyendo las tolerancias de error.

Paso 2: Analizar el tiempo del paso durante la simulación para determinar si es suficientemente pequeño para ejecutar el modelo en tiempo real.

Una manera de lograr esto es graficando la variable del tiempo de la simulación *tout*, esta variable guarda el valor del tiempo de paso a lo largo de la simulación en paso variable, de esta manera es posible observar cuál es el tiempo mínimo requerido para ejecutar la simulación y en que instantes se requiere. De manera que este procedimiento también ayuda a identificar los momentos de la simulación en los que el solver requiere disminuir el paso, lo que indica en que momentos de la simulación el modelo provoca efectos que demandan mayor costo computacional para resolver las ecuaciones.

Las siguientes líneas de código de Matlab sirven para graficar dichos tiempos de paso de una simulación.

```
semilogy(tout(1:end-1),diff(tout),'-*');  
title('Step Size vs. Simulation Time','FontSize',14,'FontWeight','bold');  
xlabel('Simulation Time (s)','FontSize',12);
```

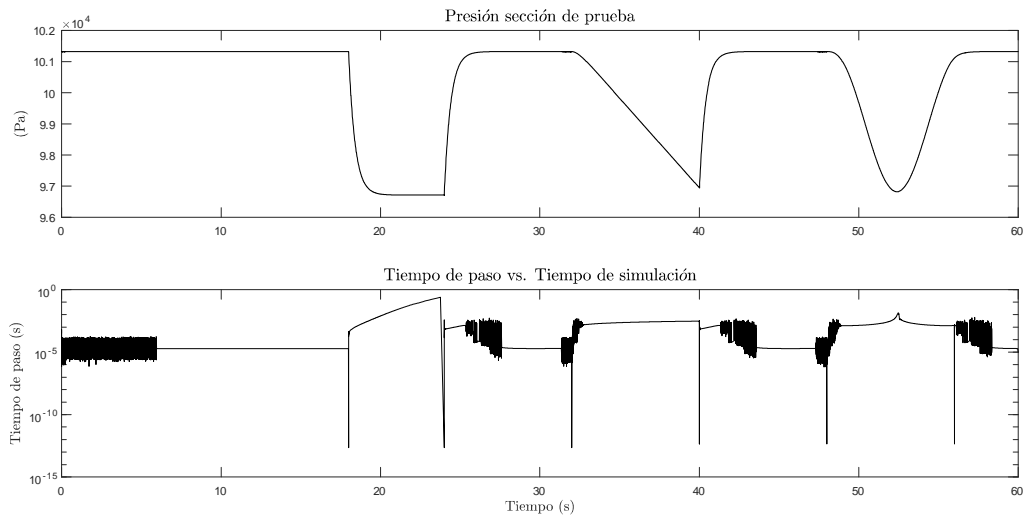


Figura 17. Variación del tamaño de paso de una simulación en tiempo variable utilizando el modelo del túnel de viento.

```
ylabel('Step Size (s)', 'FontSize', 12);
```

Para efectos de análisis se realizó una simulación en tiempo variable del modelo del túnel de viento del Instituto de India con una serie de cambios de presión en forma de escalón, rampa y senoidal, dichos cambios de presión se aplicaron con un pico máximo de 680.55 pascuales al bloque del ventilador, obteniendo el desempeño de solución que se muestra en la figura 17, donde se puede observar la variación del tiempo de paso que el solver determina para encontrar una solución que se ajusta a la tolerancia de error relativo de 0.0001 con el solver *ode23t*. Obsérvese que en los instantes donde se dan los cambios, el tiempo de paso se reduce abruptamente tratando de hacer frente al cambio y mantener el error dentro del margen, pero aun así el tamaño del paso se recupera rápidamente lo que indica que son situaciones que el solver puede solucionar a bajo costo. También se puede hacer la observación de que el tamaño de paso que predomina a lo largo de la simulación ronda alrededor de 1×10^{-5} y 1×10^{-2} segundos y tal como se mencionó anteriormente, esto es un indicativo de cual es tamaño de paso que se tiene que elegir para mantener la precisión requerida al momento de pasar un solver de paso fijo.

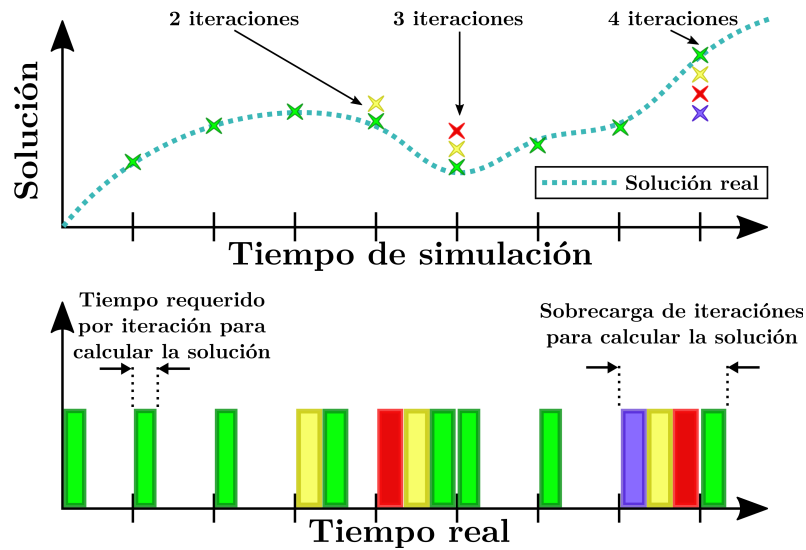


Figura 18. Sobrecarga de ejecución en el tiempo de solución de un modelo en tiempo real.

Paso 3: Simular el modelo en paso fijo, con costo computacional fijo y comparar los resultados obtenidos con los resultados de referencia.

Las iteraciones deben ser configuradas como fijas, en caso contrario al ejecutar en tiempo real, es probable que ocurra una sobrecarga en la simulación, ya que, el algoritmo se configura en paso fijo y cada iteración que utiliza el solver para calcular la solución del sistema de ecuaciones requiere de cierto tiempo, que es tomado del tiempo de paso, al realizar demasiadas iteraciones la suma de tiempo utilizado para esta tarea sobrecargará el proceso y no permitirá que las demás tareas se ejecuten en el tiempo necesario y el código compilado en Simulink detendrá la simulación por sobrecarga de tareas en la ejecución, este caso se ilustra en la figura 18.

Para poder configurar el paso de la simulación en modo fijo es necesario de igual manera elegir un solver de tiempo fijo, este tipo de solvers se separa además en implícitos y explícitos, en los casos donde el modelo presente problemas de rigidez, es decir, que solver es demasiado lento para encontrar la solución o se observan oscilaciones rápidas donde debería haber señales constantes es recomendable utilizar un solver implícito como el *ode14x*, en los casos donde el modelo no presenta ningún problema de este tipo se recomienda uti-

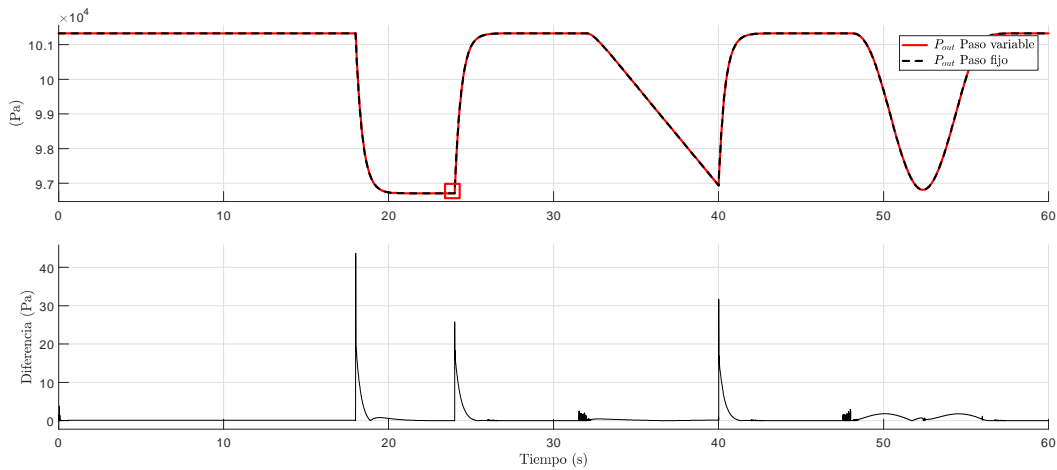


Figura 19. Comparación de la presión de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

lizar un solver explícito como el *ode1*, *ode2*, *ode3*, *ode4*, *ode5*, *ode6* u *ode8*. En las figuras 19, 20 y 21 se observa la presión, el caudal y la velocidad respectivamente del aire en la sección de pruebas en comparación de una simulación de paso variable y de paso fijo, las diferencias entre las simulaciones se muestra en la segunda gráfica de cada figura, para efectos de esta implementación las diferencias entre ambas se encuentra dentro de un margen aceptable, en el apéndice C se encuentra un acercamiento de las señales de la sección con recuadro rojo, donde se puede apreciar con mayor detalle las diferencias en los resultados de una implementación en paso variable y en paso fijo.

Paso 4: Encontrar la combinación del tiempo de paso y la cantidad de iteraciones no lineales, donde el tiempo de paso es suficientemente pequeño para obtener los mismos resultados que las simulaciones de referencia y lo suficientemente grande para evitar una sobrecarga en la ejecución.

En este punto se comienza una iteración para encontrar la combinación ideal del solver, tiempo de paso y cantidad de iteraciones computacionales. Ya que si los resultados de la simulación no coinciden con los de referencia es necesario incrementar las iteraciones o disminuir el tiempo de paso, en caso de que los resultados coincidan con los de referencia es

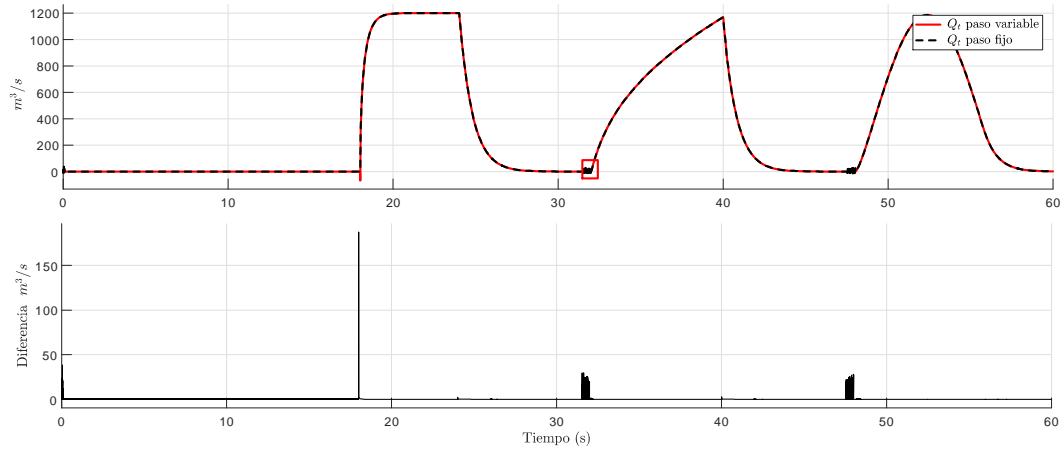


Figura 20. Comparación del caudal de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

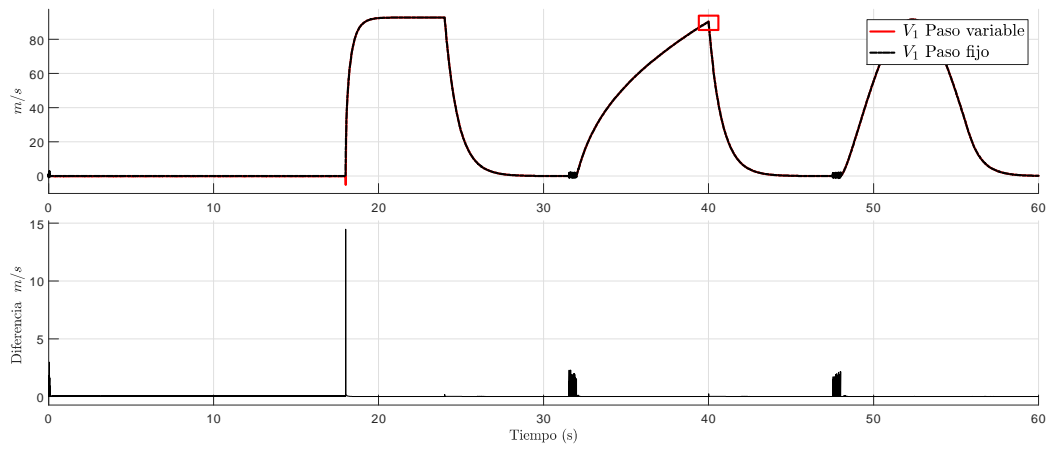


Figura 21. Comparación de la velocidad de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

necesario poner atención a la velocidad de la simulación, si ésta es lenta, tal vez sea necesario disminuir las iteraciones de computo y/o incrementar el tiempo de paso.

En este caso debido a la naturaleza del modelo se optó por utilizar el solver *ode14x*, con una cantidad limitada de 3 iteraciones y un tiempo de paso de 1×10^{-3} segundos, ya que en las primeras pruebas se intentó utilizar un paso más pequeño pero el modelo se sobrecargaba de iteraciones.

Paso 5: Usar el solver, tiempo de paso y cantidad de iteraciones no lineales determinadas, compilar y simular en una plataforma de tiempo real, para comprobar que la simulación es ejecutable en tiempo real.

Después de realizar las iteraciones y ajustes pertinentes para obtener la precisión deseada en la ejecución en tiempo real se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 22, 23 y 24 donde se muestran de igual manera la presión, caudal y velocidad de la sección de pruebas, realizando una comparación de los resultados en tiempo real contra los resultados en paso fijo, obsérvese que en este caso la diferencia es más notable, este se debe a que no se utilizó el menor tiempo de paso determinado en los análisis anteriores ya que debido a la complejidad del modelo no permitía su ejecución en tiempo real, por lo que se ajustó a un tiempo mayor pero dentro del rango para mantener una precisión de los resultados cercana a la obtenida en paso variable. En el apéndice C se muestra un acercamiento al recuadro rojo de la figura donde se muestra a mayor detalle la diferencia de los resultados en la ejecución en paso fijo y tiempo real.

Paso 6: Si la simulación no se ejecuta en tiempo real en la plataforma seleccionada, será necesario determinar la causa y encontrar una solución apropiada.

Una causa probable de que la simulación no se ejecute es que el modelo no sea ejecutable en tiempo real, debido a que el tiempo de solución que requiere es mayor que el tiempo de paso de ejecución fijado, el tiempo de solución se ve afectado por el tamaño del modelo, la complejidad del sistema de ecuaciones y por la velocidad de la plataforma en la que se ejecu-

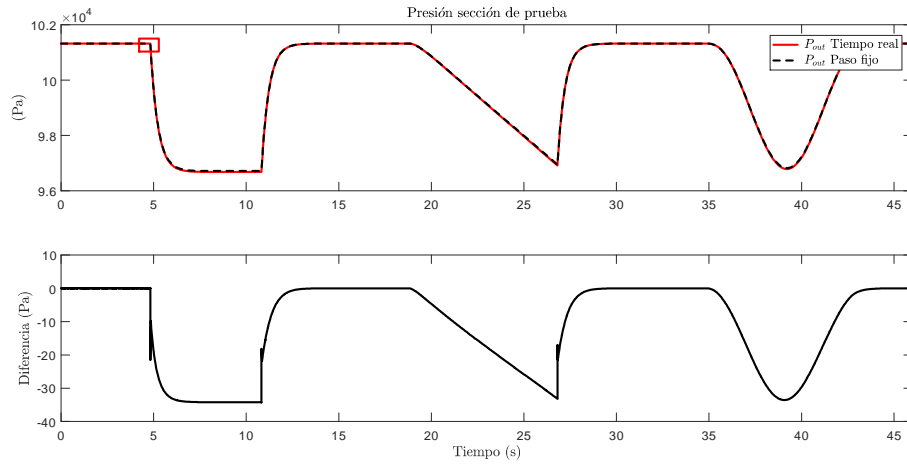


Figura 22. Comparación de la presión de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.

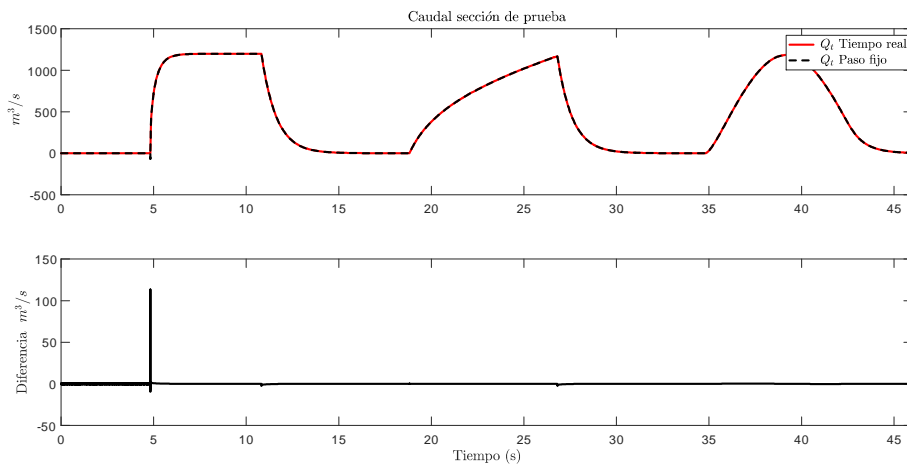


Figura 23. Comparación del caudal de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.

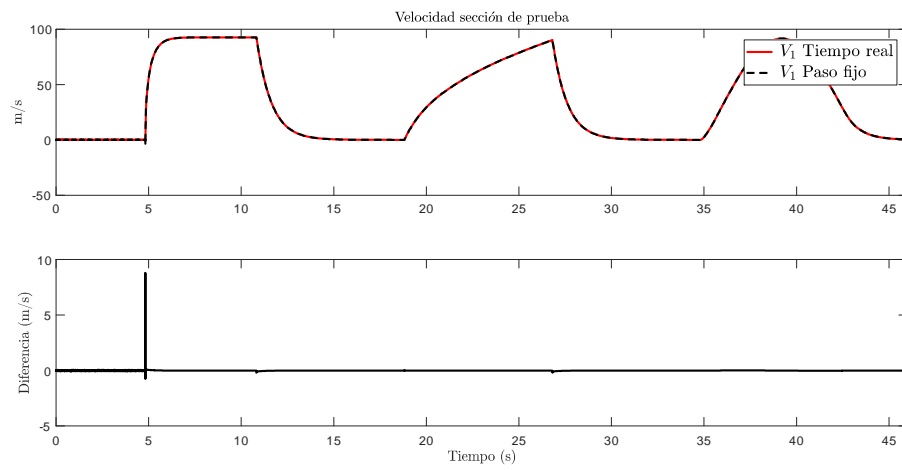


Figura 24. Comparación de la velocidad de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.

ta. Por ello es necesario regresar al paso 2 y reajustar el tiempo de paso o la cantidad de iteraciones, si no se encuentra una combinación adecuada es posible que sea necesario cambiar elementos del modelo que crean situaciones que elevan el costo computacional en la simulación, este tipo de situaciones pueden ocurrir, cuando se presentan cambios numéricos muy grandes y abruptos. Del mismo modo, otro factor que puede complicar la implementación en tiempo real son elementos del modelo con dinámicas muy rápidas que requieran constantes de tiempo muy pequeñas, que el solver no puede alcanzar a resolver con precisión, este tipo de casos pueden ocurrir por ejemplo, en modelos hidráulicos con volúmenes de compresibilidad muy pequeños, sistemas mecánicos con resortes muy rígidos y poco amortiguamiento, entre otros.

En este caso durante las primeras pruebas no fue posible ejecutar el modelo en tiempo real, al realizar las iteraciones y los análisis del tiempo de paso se encontraron deficiencias en el modelo que complicaban la solución y demandaban demasiado costo computacional, se realizaron cambios en los bloques de las secciones que no contaban con volumen como las mallas de protección y la expansión de 90° , ya que estos casos debido a que tienen un volumen nulo de compresibilidad las dinámicas eran demasiado rápidas, sin embargo no era necesario calcular nuevas presiones, ya que al no contar con volumen, la presión a la salida es la misma que a la entrada y sólo es cuestión de añadir la pérdida calculada, realizando estos cambios se pudo implementar la ejecución en tiempo real del modelo.

Los resultados numéricos acerca del comportamiento de las variables del modelo además de ser comparadas mediante el comportamiento de las señales en las gráficas también son comparadas en el estado estable del experimento donde se alcanzan las mismas condiciones de velocidad de entrada al sistema, en la Tabla 6 donde se muestran las variables de velocidad en cada sección y se observa el error porcentual $\%E_{V_r}$ entre la velocidad del modelo original V_o obtenida de [8] y las velocidades V_r del modelo reproducido así como el error porcentual $\%E_{V_d}$ respecto a la velocidad del modelo dinámico V_d .

#	Sección	V_o	V_r	V_d	$\%E_{V_r}$	$\%E_{V_d}$
1	Malla1	6.6	6.563	6.581	0.560	0.287
2	Malla2	6.6	6.563	6.581	0.560	0.287
3	Malla3	6.6	6.563	6.581	0.560	0.287
4	Malla4	6.6	6.563	6.581	0.560	0.287
5	Malla5	6.6	6.563	6.581	0.560	0.287
6	Contracción1	54.3	54.298	53.769	0.003	0.977
7	Contracción2	96.3	96.320	92.795	0.020	3.639
8	Sección prueba	89.1	89.105	86.325	0.005	3.114
9	Difusor1	23.5	23.541	23.550	0.174	0.212
10	Contracción vent	30.1	30.116	30.085	0.053	0.049
11	Estructuras vent	30.1	30.116	30.085	0.053	0.049
12	Cuerpo vent	17.7	17.664	17.689	0.203	0.062
13	Expansión 90°	16.1	16.134	16.161	0.211	0.378
14	Esquina simple	13.3	13.326	13.354	0.195	0.406
15	Cinética salida	13.3	13.326	13.354	0.195	0.406

Tabla 6. Diferencias en resultados de modelo reproducido y modelo dinámico contra resultados de referencia.

Capítulo 7

Conclusiones

El modelado de sistemas de túneles de viento es un tema complejo de abordar si se requiere una amplia precisión y realismo, debido a la naturaleza de los fenómenos que presenta el comportamiento de los fluidos en la secciones del túnel que no son constantes se puede tornar complejo de modelar, hay que tomar en cuenta que la complejidad de los modelos siempre va de la mano con la precisión que se requiere de los resultados, de la cantidad de variables que se requieren calcular y por supuesto de la naturaleza del modelo en sí. En esta memoria de tesis se ha presentado el estudio, elaboración e implementación de un modelo de software para un sistema de túnel de viento de secciones y parámetros configurables.

Los métodos de modelado para estos sistemas en general se basan en la mecánica hidráulica y se les considera a las secciones del túnel como secciones de tubos de un sistema hidráulico como tal, considerando las pérdidas de las secciones como constantes generalizadas para cada tipo de sección, esto permite tener una idea del comportamiento del sistema, aunque en la práctica dichas estimaciones se pueden quedar lejos del comportamiento real ya que las pérdidas de presión son función del caudal, geometría, dimensiones entre otros factores. En el capítulo III se abordó un modelo de software basado en las ecuaciones de Bernoulli, la conservación de la masa y datos de desempeño obtenidos de manera empírica que complementan la precisión del comportamiento del modelo. Este modelo es una reestructuración de una versión original de un software para estimación de desempeño de túneles de viento elaborado por la NASA originalmente implementado en código fortran, donde se tiene que configurar la ejecución para ingresar la estructura del túnel y sus parámetros para realizar el cálculo a una velocidad dada. La reestructuración permitió la implementación en el entorno de Simulink de Matlab separando cada una de las principales secciones en bloques que representan su modelo particular, con el cálculo de las principales variables, así como de las pérdidas. De esta manera es posible configurar de una manera gráfica los parámetros de la

estructura para un túnel dado, configurar una prueba donde la velocidad de entrada puede ser variable y obtener un perfil de las pérdidas para cada sección, lo que permite ya sea realizar una evaluación del diseño del túnel, realizar análisis del comportamiento, he incluso implementar simulaciones en tiempo real de la instalación si los resultados del modelo son de utilidad para este fin. Cabe señalar que en este modelo se considera un flujo totalmente desarrollado por lo que se desprecian los transitorios de las señales.

En el capítulo IV se abordó el procedimiento para configurar y ejecutar el modelo de un túnel de viento, en esta sección del documento se describió una de las funciones más interesantes que es como obtener los perfiles de pérdidas para cada sección en formato de tablas que posteriormente son utilizadas en el capítulo V donde se presenta un modelo basado en las ecuaciones de Bernoulli, conservación de la masa y balance de flujos en donde se añade la dinámica del fluido al considerar la compresibilidad y el volumen de las secciones, sin embargo, al implementar estas consideraciones en este nuevo modelo se eleva el costo computacional para resolver las ecuaciones, complicando añadir un cálculo en paralelo de los coeficientes de pérdida de ahí la utilidad del primer modelo estático de calcular tablas de pérdida, al ingresar las pérdidas en formato de tablas no es necesario realizar un cálculo, si no simplemente tomarlo de la tabla generada, de esta manera se agrega una dinámica más realista del sistema sin elevar el costo computacional que comprometería la ejecución en tiempo real. En el capítulo VI, se presentó el análisis llevado a cabo para obtener resultados de referencia que permiten verificar la precisión del modelo en tiempo real en esta parte. Finalmente se logra encontrar una configuración que permite la ejecución en tiempo real de un modelo de túnel pero no se limita a dicho modelo ya que al referirse a que el modelo es configurable se pueden encontrar que no todos los modelos que se configuren de túneles de viento serán ejecutables en tiempo real, o no en todos se dificultará encontrar una configuración ejecutable, esto dependerá del tamaño del modelo, la complejidad que represente para los solvers ya sea debido a las características del túnel o al tipo de prueba que se lleve a cabo, en resumen se tiene que evitar secciones del túnel con bajo volumen así como situaciones de cambios abruptos en las entradas del modelo, por ejemplo utilizando filtros que suavicen en-

tradas tipo escalón, al final de este capítulo se presenta una tabla comparativa, donde se parte de las diferencias entre la variable de velocidad de los modelos desarrollados en relación con los datos de referencia, donde se puede observar que el primer modelo donde se consideran condiciones de flujo desarrollado es el que presenta menor magnitud en el error con un valor máximo de 0.56 % de error porcentual en la sección de mallas de protección, mientras que en el caso del modelo dinámico el valor máximo del error porcentual fue de 3.639 % a la salida de la sección de contracción que para efectos prácticos puede considerarse como un error bajo.

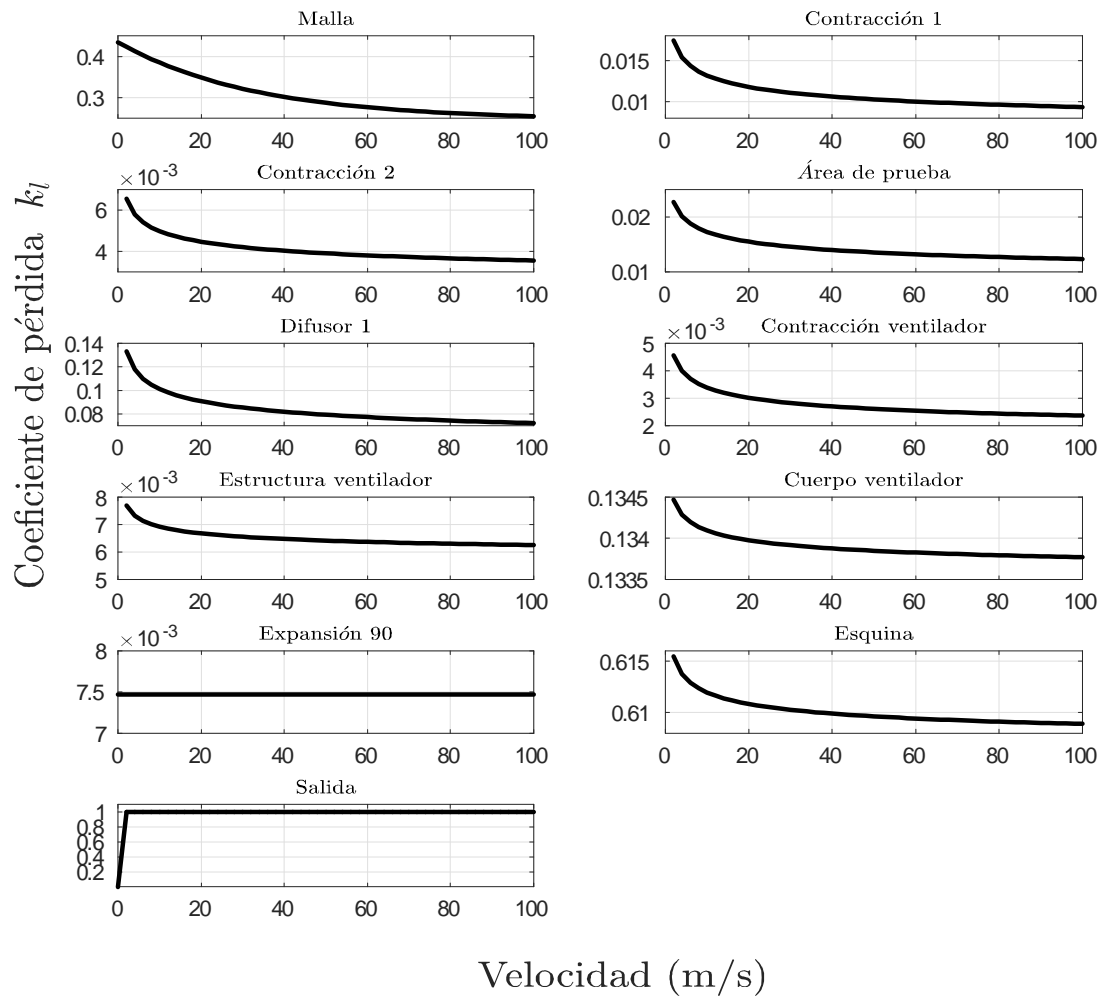
Referencias

- [1] Benson, T. (12 de Junio de 2014). www.grc.nasa.gov. Recuperado el 30 de Abril de 2016, de <https://www.grc.nasa.gov/www/Wright/airplane/powered.html>.
- [2] Chaturvedi, D. (2009). *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Arkadiy Turevskiy, S. G. (2007). *Accelerating Flight Vehicle Design*. MathWorks.
- [4] Fan, Z. (2010). Measurement of Aerodynamic Forces and Moments in Wind Tunnels. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*
- [5] Egon, K. (2005). *Fluid Mechanics With Problems and Solutions, and an Aerodynamic Laboratory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [6] Shames, I. H. (1995). *Mecánica de fluidos*, 3ra ed, McGraw-Hill.
- [7] Barlow, J.B., Rae, W.H. Jr. and Pope, A. (1999) *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd edn, John Wiley and Sons, New York
- [8] Eckert, W. T., Mort, K. W., & Jope, J. (1976). *Aerodynamic design guidelines and computer program for estimation of subsonic wind tunnel performance*.
- [9] N. Ahmed, (2013). *Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel, Wind Tunnel Designs and their Diverse Engineering Applications*.
- [10] Louis, C., Chris, B., Jose, M., (2010). *Fundamentals of Wind-Tunnel Design*. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*
- [11] Wattendorf, Frank L. (1938). *Factors Influencing the Energy Ratio of Return Flow Wind Tunnels*. Fifth International Congress for Applied Mechanics, Cambridge.
- [12] Prandtl, L., (1933). *Attaining A Steady Stream in Wind Tunnels*, NACA TM 726.
- [13] Sabri, C., (2015). *Mechatronics with experiments*, 2da ed, John Wiley & Sons.
- [14] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Sknarina, S. F. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones (Vol. 1)*. McGraw-Hill.

- [15] Ljung, L., (1999). System Identification: Theory for the User, 2da ed, Prentice Hall PTR.
- [16] J. W. Steve Miller, (2016), Real-Time Simulation of Physical Systems Using Simscape.

Apéndice A

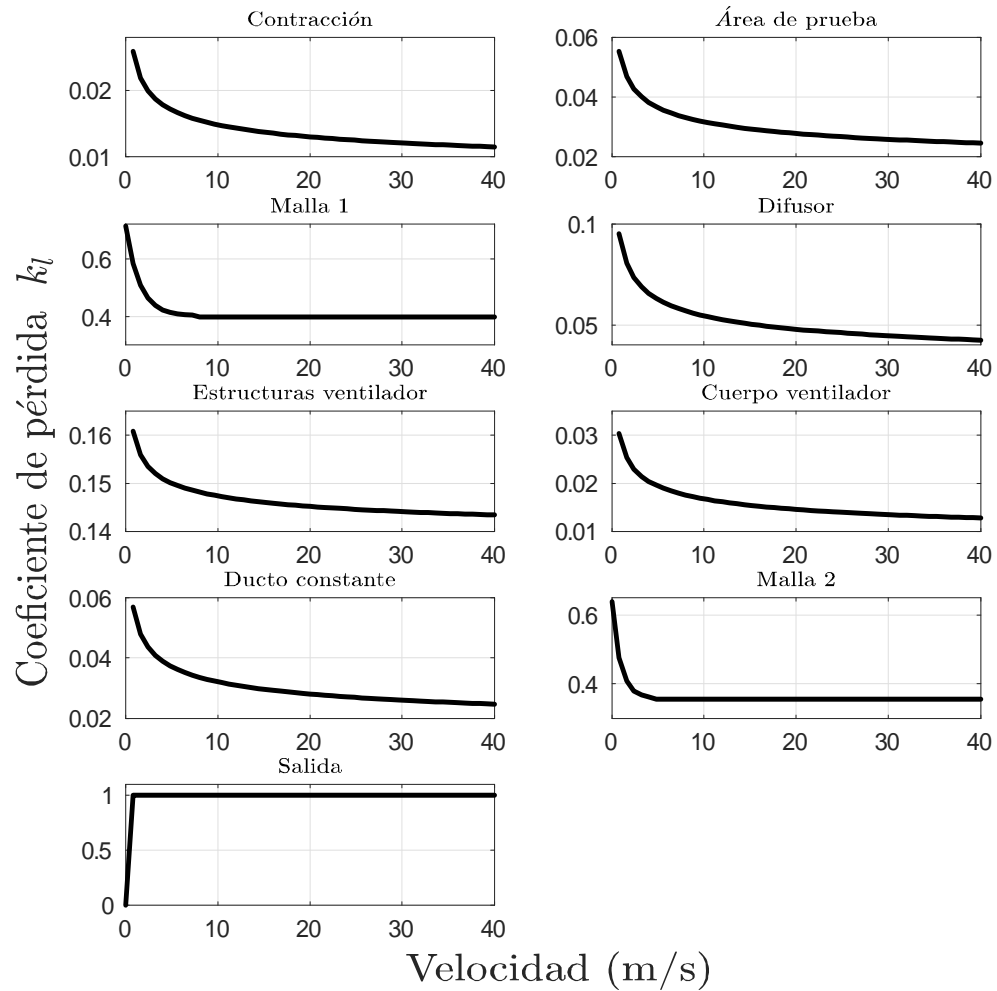
Coeficientes de pérdida del túnel del Instituto de Ciencias de India



Gráficas de coeficientes de pérdida en relación a la velocidad del flujo para cada sección del túnel de viento de Instituto de Ciencias de India.

Apéndice B

Coeficientes de pérdida túnel de viento UABC



Gráficas de coeficientes de pérdida en relación a la velocidad del flujo para cada sección del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería UABC

Apéndice C

Diferencias a detalle entre simulaciones de paso variable, fijo y tiempo real

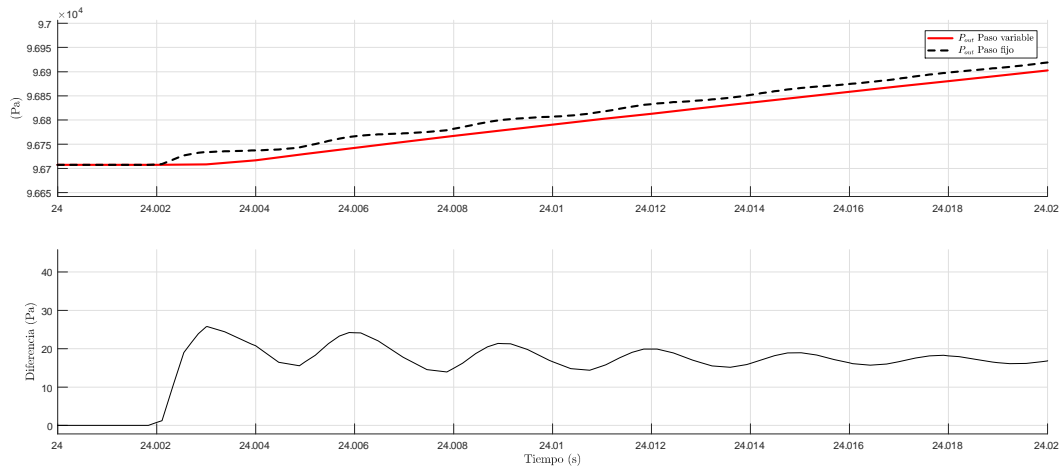


Figura 25. Acercamiento de comparación de la presión de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

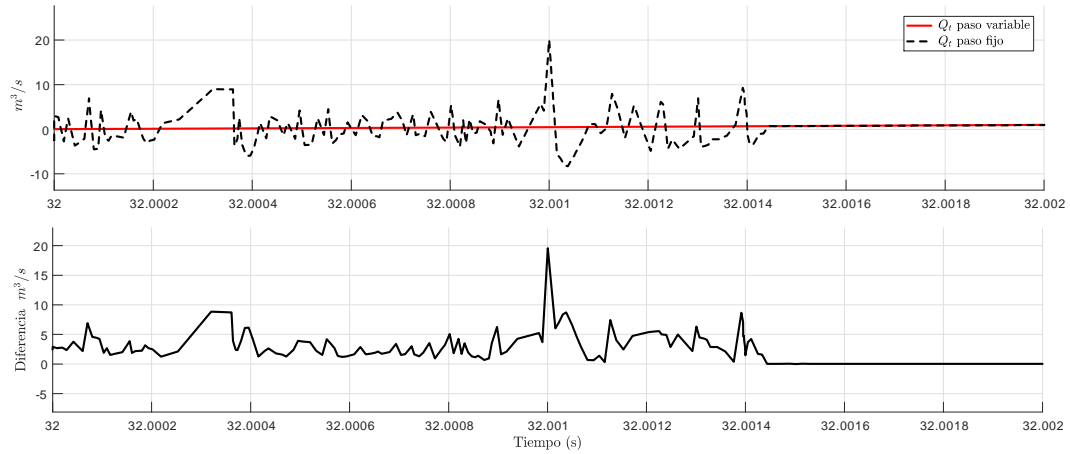


Figura 26. Acercamiento de comparación de la caudal de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

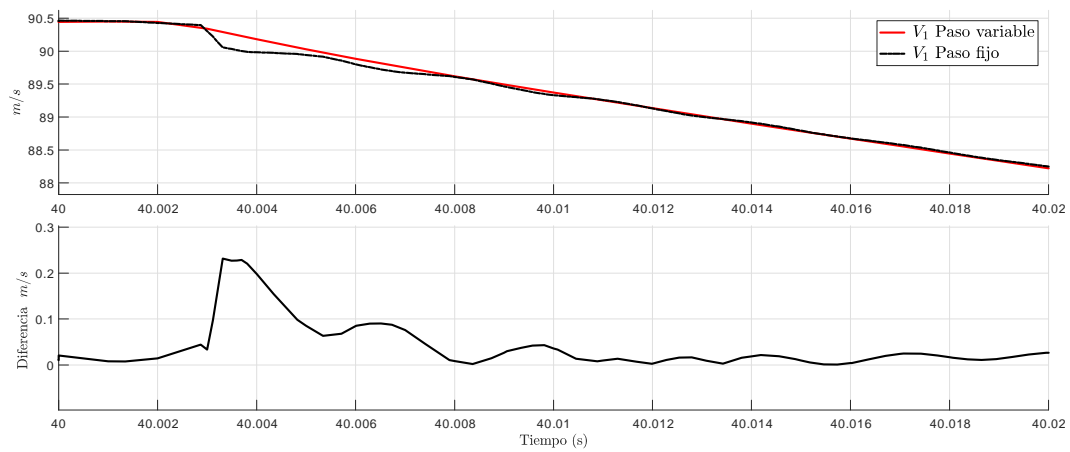


Figura 27. Acercamiento de comparación de la velocidad de la sección de prueba en paso variable y paso fijo.

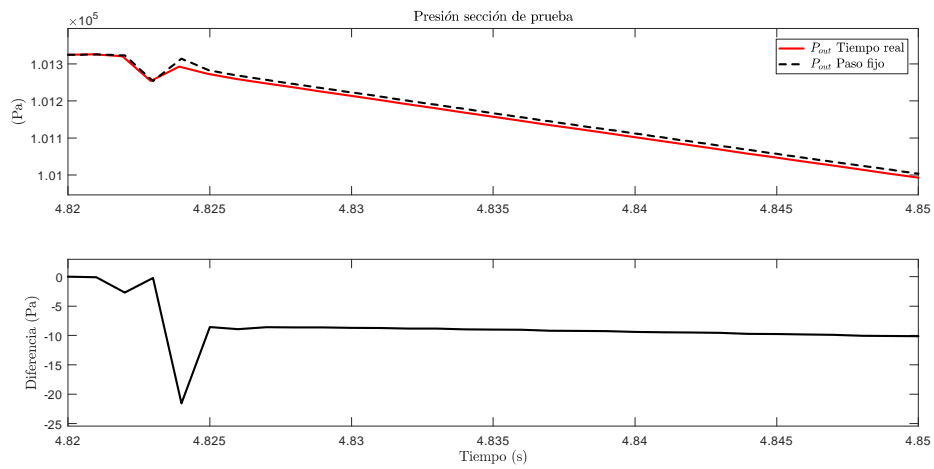


Figura 28. Acercamiento de comparación de la presión de la sección de prueba en tiempo real y paso fijo.