



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE TRANSPORTE TURBULENTO EN LA INTERACCIÓN
DE DOS JETS CALENTADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

ANDREA COTTE HIDALGO NÚÑEZ

PROFESOR GUÍA:
JUAN CARLOS ELICER CORTÉS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO HERNÁNDEZ PELLICER
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
POR: ANDREA COTTE HIDALGO NÚÑEZ
FECHA: 18/11/2015
PROFESOR GUÍA: Sr. JUAN CARLOS ELICER C.

ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE TRANSPORTE TURBULENTO EN LA INTERACCIÓN DE DOS JETS CALENTADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS

El presente trabajo de título corresponde al análisis de la influencia de los términos de transporte de calor y momentum turbulentos, de las ecuaciones de Navier – Stokes y del calor, en el confinamiento de una fuente de calor, que pudieran originar fugas de calor y gases en el uso de cortinas de aire con configuración Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF) como método de confinamiento al interior de túneles viales.

Se estudiaron dos casos, considerando una cortina de aire DJ – DF cuyo jet caliente está siempre en contacto con la zona confinada. Uno de ellos consiste en el uso del jet caliente con la mayor velocidad inicial de la configuración, y otro en que el jet frío posee la máxima velocidad inicial. Se realizó un estudio del campo, perfil y evolución en las zonas de capas de mezcla y línea central de la cortina, de los siguientes términos: esfuerzo de Reynolds, transportes axial y transversal de calor turbulentos, y sus derivadas parciales, las cuales evidencian su contribución en el incremento de flujo de momentum medio y de calor del flujo medio debido a fluctuaciones turbulentas. Dichos términos turbulentos fueron calculados con el método de diferencias finitas de orden $O(h^4)$, utilizando datos numéricos extraídos de una simulación previa, que utilizó el modelo LES en ANSYS Fluent. Los esquemas “*forward*”, “*backward*” y central fueron aplicados en puntos extremos y central del dominio, respectivamente.

Los resultados evidenciaron la existencia de un traspaso transversal de momentum y calor en niveles de la cortina de aire ubicados entre $x/H=0.4$ y 0.7 , para ambos casos estudiados, siendo mayor en el del jet caliente más veloz. Esto, debido a peaks negativos en gráficos de evolución del transporte transversal de calor en capas de mezcla, que justificarían el intercambio de momentum y calor debido a fluctuaciones de las partículas fluidas. El rango de niveles mencionado coincide con la zona en donde ambos jets de la cortina se unifican para formar uno nuevo, con distintas características a los dos iniciales. La interacción entre ambos jets con distintas características termodinámicas disminuye la capacidad de confinamiento de la configuración propuesta. El análisis de transporte axial de calor muestra una inversión en el flujo de calor axial a partir de $x/H=0.6$ para el caso 1. Se concluye que la configuración que utiliza el jet frío de mayor velocidad inicial funciona un 60% mejor como barrera confinatoria respecto al caso del jet caliente más veloz. Se sugiere estudiar la influencia de los términos turbulentos en cortinas de aire inclinadas y analizar el paso de las partículas fluidas de manera de concluir sobre la naturaleza de los procesos de transporte de momentum responsables del esfuerzo de Reynolds.

Dedicatoria

Si bien pudiera sonar egocéntrico lo escrito a continuación, dedico este trabajo de titulación a mí misma como enseñanza y muestra de que siendo tolerante, perseverante y enfrentando y superando miedos e inseguridades se puede alcanzar cualquier meta, a pesar de lo difícil y lejana que parezca.

Pudiste. Terminaste. Ya eres una Ingeniera Civil Mecánica. Acéptalo, disfrútalo y emprende nuevos y fascinantes caminos con esta herramienta que forjaste con tanto, tanto esfuerzo.

Agradecimientos

Quisiera agradecer al Profesor Juan Carlos Elicer Cortés por brindarme su ayuda y apoyo contantemente, antes y durante la elaboración de este trabajo de titulación. Muchas gracias por su muy buena disposición a discutir y responder dudas, a resolver problemas de diversa índole que surgieron durante este proceso, entregando su conocimiento, experiencia, buen humor y cariño. Muchas gracias por darme la oportunidad de realizar este estudio; por confiar en mí y en mis capacidades y, definitivamente, por exigir lo mejor de mí.

Agradezco también a los miembros de la comisión, Profesores Rodrigo Hernández Pellicer y Álvaro Valencia Musalem, y al Profesor Roberto Corvalán P., por su orientación y apoyo en momentos de dificultad presentados durante este trabajo.

A las bibliotecarias de Biblioteca Central y de Geofísica, agradezco por ayudarme y perdonar atrasos en libros que necesité para el estudio sobre turbulencia. Muchas gracias por su amabilidad.

A mis amigos de distintos Departamentos en la Facultad: Maite Gonzáles Mendoza, por ser un ejemplo de fortaleza; Boris Romero Quezada, Samuel Madariaga Román, Felipe Ardila García, Alicia Zúñiga Jaramillo, Francisco García Cárdenas, Eduardo Loyola Avilés, Mauricio Gutiérrez Martínez, Lenin Arancibia Guevara, Diego Fuentealba Arias, Waldo Gálvez Verdugo, Daniel Martínez Contreras, por su eterna alegría, por los buenos e inolvidables momentos vividos y por el apoyo brindado en momentos difíciles.

A mis compañeros en Departamento de Ingeniería Mecánica, por su simpatía y compañerismo. En especial a Basilio Tamburrino Cabrera y Daniel Quintana Troncoso, por esas grandiosas conversaciones sobre la vida.

Gracias a Carmen Leyton Naín y Javiera Rodríguez Aranda por sus más de 10 años de incondicional amistad. Ambas son un ejemplo a seguir para mí.

Quisiera expresar mi profunda gratitud a mis maravillosos padres y hermano, Antonio Hidalgo Ramírez Isabel Núñez Farfán y Rodolfo Hidalgo Núñez. Agradezco mucho pertenecer a esta hermosa familia y me enorgullece ser parte de ella. Muchísimas gracias por su apoyo incondicional, pues fue un pilar fundamental para mí durante todos estos años. Gracias por recordarme lo valiosa y capaz que soy. Fueron, son y serán todo para mí.

Finalmente, quisiera agradecer a mi compañero, Francisco Seguel Plaza, por su enorme paciencia y comprensión dada en estos últimos años; por su constante apoyo y confianza en mis habilidades; por alentarme a continuar cada vez que dudé de seguir; y por los momentos de alegría que hemos compartidos.

A todos y cada uno de ellos, muchísimas gracias.

Tabla de contenido

RESUMEN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 Alcances	3
2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 Turbulencia.....	4
2.1.1 Mecánica de la turbulencia.....	6
2.1.2 Estructuras vorticiales	9
2.1.3 Modelos de turbulencia	10
2.2 Mecanismos de transporte turbulento	13
2.2.1 Transporte molecular y convectivo de momentum.....	13
2.2.2 Transporte turbulento de cantidad de movimiento	17
2.2.3 Transporte turbulento de calor	22
2.3 Jet plano en impacto.....	24
2.3.1 Parámetros geométricos y cinemáticos	25
2.3.2 Zonas de un jet en impacto.....	26
2.3.3 Semi-ancho y Leyes de similitud	27
2.3.4 Capas de mezcla (<i>Mixing Layer</i>) y Línea central de la cortina o “ <i>centerline</i> ”	29
2.3.5 Configuración Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF).....	30
2.4 Antecedentes de la simulación base.....	31
2.4.1 Mallado de la zona de interés	32
2.4.2 Condiciones iniciales	34

2.4.3	Condiciones de borde.....	34
2.4.4	Procedimiento seguido en la simulación	34
2.4.5	Información disponible a partir de la simulación	35
2.4.6	Casos de estudio.....	36
3	METODOLOGÍA.....	37
4	DESARROLLO	39
4.1	Análisis de los datos extraídos	39
4.2	Modelo Numérico para el cálculo de términos turbulentos.....	44
4.3	Método de obtención de capas de mezcla, sus rangos, línea “centerline” y de las constantes de adimensionalización	47
4.3.1	Obtención de capas de mezcla	47
4.3.2	Obtención del rango para capas de mezcla.....	49
4.3.3	Obtención de línea central de la cortina	50
4.3.4	Obtención de constantes de adimensionalización, $U_{m\acute{a}x}(x/H)$ y $\Delta T_{m\acute{a}x}(x/H)$	51
5	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1	Campos medios de velocidades axial, transversal y de temperatura	53
5.2	Variables adimensionalizadas	59
5.3	Transporte de momentum	65
5.3.1	Campo y perfil del esfuerzo de Reynolds.....	65
5.3.2	Evolución del transporte de momentum axial y transversal, en las capas de mezcla y línea central de la cortina.....	73
5.4	Transporte transversal de calor turbulento	84
5.4.1	Flujo transversal de calor turbulento	84
5.4.2	Evolución del transporte transversal de calor turbulento en capas de mezcla y en línea central de la cortina de aire	86
5.5	Transporte axial de calor turbulento	91
5.5.1	Flujo axial de calor turbulento	91
5.5.2	Evolución del transporte axial de calor turbulento en capas de mezcla y en línea central de la cortina de aire	93
5.6	Flujo de calor total axial y transversal.....	96
5.6.1	Flujo de calor transversal total	96
5.6.1	Flujo de calor transversal total	101

5.7	Influencia del transporte de calor turbulento en la tasa de calor del flujo medio	105
5.7.1	Contribución transversal	106
5.7.2	Contribución axial.....	108
5.7.3	Contribución total	110
6	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	113
	BIBLIOGRAFÍA	116
	ANEXOS.....	120
	Anexo A: Tabla comparativa sobre modelos de turbulencia	120
	Anexo B: Evolución de términos turbulentos adimensionalizados en las capas de mezcla y en la línea centerline.....	122
	Anexo C: Código numérico de cálculo.....	126
	C1: Método 1 de refinamiento de malla, utilizando “resample”. Función Afinar.m	126
	C2: Método 2 de refinamiento de malla, utilizando “interp2”. Función Afinaq.m.....	129
	C3: Archivo de extracción y ordenamiento de datos. Ejemplo aplicado para extracción de velocidad axial media – Caso 1	131
	C4: Función “Derivada.m”	144
	C5: Archivo para cálculo de capa de mezcla, sus rangos y línea entre jets	146

Índice de tablas

Tabla 2.1: Resumen de tensores.	17
Tabla 2.2: Condiciones iniciales utilizadas en la simulación base. Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 2.3: Casos de estudio	36
Tabla 5.1: Traspaso de calor desde zona confinada hacia zona protegida, para ambos casos. Fuente: Elaboración propia.....	98
Tabla A.1: Comparación de modelos de turbulencia aplicados para problemas de jets incidentes	121

Índice de figuras

Figura 2.1: Cascada de energía y diferentes escalas presentes en un flujo turbulento. Fuente: Elaboración propia a partir de [14]	7
Figura 2.2: Rangos de escala de energía propuestos por Kolmogorov. Fuente: Elaboración propia en base a [13]	8
Figura 2.3: Inestabilidades de Kelvin-Helmholtz: (a) Generación de los vórtices de KH, (b) Estructuras KH. Fuente: [13]	9
Figura 2.4: Inestabilidades contra-rotacionales tipo Görtler. Fuente: [13]	10
Figura 2.5: Diferencia entre velocidad filtrada u_i y velocidad instantánea u_x . Fuente: [24]	11
Figura 2.6: Generación de un perfil de velocidad por el movimiento de la placa inferior en un conjunto de dos placas paralelas inicialmente en reposo, separadas por una distancia Y constante. Fuente: [27].	14
Figura 2.7: Fuerzas de presión y viscosas actuando sobre planos en el fluido perpendicular a las tres coordenadas del sistema. Fuente: [27]	15
Figura 2.8: Flujos de momentum convectivo a través de planos perpendiculares a los sistemas coordinados. Fuente: [27]	16
Figura 2.9: Ejemplo de un perfil de un jet plano turbulento en impacto. Fuente: [34]	25
Figura 2.10: Perfil axial de velocidades a la salida de la boquilla. Fuente: [13]	26
Figura 2.11: Zonas de un jet turbulento plano en impacto. Fuente: Modificación a partir de [38]	27
Figura 2.12: Representación del semi-ancho en un jet turbulento. Fuente: [39]	28
Figura 2.13: Perfiles de velocidad: a) Sin normalizar, b) Normalizados. Fuente: [35]	29
Figura 2.14: Ejemplo de capa de mezcla o <i>mixing layer</i> plana. Fuente: Elaboración propia en base a [35]	30
Figura 2.15: Perfil de velocidad superpuesto a un campo de temperaturas en un jet. Ejemplo de formación de un único jet a partir de dos jets con diferentes características iniciales. En el caso mostrado, se observan dos jets iniciales con igual velocidad y distintas temperaturas. Fuente: [42]	31
Figura 2.16: Esquema referencial de la geometría representativa de la instalación experimental. Las dimensiones están en función de la altura H . Fuente: Elaboración propia en base a [13]	32
Figura 2.17: Mallado de la zona de estudio. Las medidas mostradas están en milímetros. Fuente: Elaboración propia	33
Figura 2.18: Dirección de ejes coordinados en la geometría utilizada para la cortina de aire en 3 dimensiones, mostrada en color gris. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]	33
Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología seguida para la elaboración del presente trabajo	38

Figura 4.1: Malla computacional extraída de la simulación previa. Ambos ejes se muestran adimensionalizados: el eje transversal y , por el ancho de la boquilla de la cortina $2e$ y el eje axial x , por el largo del túnel H	39
Figura 4.2: Derivada del esfuerzo de Reynolds respecto al eje y , calculando la derivada con datos extraídos directamente de la simulación, no suavizados – Caso 2	40
Figura 4.3: Derivada del esfuerzo de Reynolds respecto al eje transversal y , luego de utilizar el promedio entre los valores de los nodos comunes de las zonas en contacto – Caso 2.....	41
Figura 4.4: Comparación de aplicación de “resample” e “interp2” en el cálculo de la derivada del esfuerzo de Reynolds respecto a la coordenada transversal y para niveles $x/H=0.5$ y 0.6 – Caso 2.....	42
Figura 4.5: Malla final post-interpolación, cuyas distancias horizontal y vertical entre cada nodo son 0.25 [mm] y 0.5 [mm], respectivamente. Ambos ejes se muestran adimensionalizados: el eje transversal y , por el ancho de la boquilla de la cortina $2e$ y el eje axial x , por el largo del túnel H	43
Figura 4.6: Comparación entre los métodos de diferencias finitas de orden $O(h^2)$ y $O(h^4)$, en 3 niveles de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, para el caso 2.....	46
Figura 4.7: Método de cálculo de semiancho para situación 1 en que ambos jets están separados, la cual ocurre en niveles ubicados antes de la zona de transición de cada cortina de aire. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 4.8: Método de cálculo de semiancho para situación 2 en que solo existe un jet único post-unificación de los jets iniciales. Ésta corresponde a los niveles a partir la zona desarrollada de la cortina de aire aguar abajo. Fuente: Elaboración propia	48
Figura 4.9: Perfiles de velocidad para ciertos niveles de las cortinas de aire de ambos casos de estudio. ..	49
Figura 4.10: Situaciones observadas en el perfil de velocidad axial media, para el análisis de rango de capa de mezcla. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 4.11: Capas de mezcla y sus rangos encontrados para el caso 2. Se muestra la versión previa a la definitiva encontrada, en la que se observa el resultado numérico real luego de aplicar el criterio de “influencia del jet de menor velocidad sobre el de mayor velocidad”	51
Figura 4.12: Perfil de temperatura media de la cortina de aire, a partir del cual se encuentra la constante local de adimensionalización $\Delta T_{m\acute{a}x}(x/H)$. Fuente: Elaboración propia	52
Figura 5.1: Campos de velocidad axial media, u , para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)	53
Figura 5.2: Campo de velocidad axial media, u , con capas de mezcla incorporadas – Caso 1	54
Figura 5.3: Campo de velocidad axial media, u , con capas de mezcla incorporadas – Caso 2.....	54
Figura 5.4: Capas de mezcla y línea central entre jets para el caso 1. En la figura izquierda se muestra el caso numérico real y en la figura derecha, el caso adaptado	55

Figura 5.5: Capas de mezcla y línea central entre jets para el caso 1. En la figura izquierda se muestra el caso numérico real y en la figura derecha, el caso adaptado	55
Figura 5.6: Rangos encontrados para la posición de las capas de mezcla – Caso 1	57
Figura 5.7: Rangos encontrados para la posición de las capas de mezcla – Caso 2	57
Figura 5.8: Campos de velocidad transversal media \mathbf{v} , para los casos 1 (figura izquierda) y 2 (figura derecha)	58
Figura 5.9: Campos de temperatura media, \mathbf{T} , para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)	59
Figura 5.10: Perfil centrado de velocidad axial media adimensionalizada por $U_{m\acute{a}x}$	60
Figura 5.11: Perfil centrado de velocidad transversal media adimensionalizada por $U_{m\acute{a}x}$	60
Figura 5.12: Perfil centrado de la temperatura media adimensionalizada por $\Delta T_{m\acute{a}x}$	61
Figura 5.13: Evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal (figuras lateral izquierda y derecha, respectivamente) a lo largo de las capas de mezcla fría y caliente, y de la línea central de la cortina, para ambos casos de estudio (figuras superiores e inferiores, respectivamente).....	63
Figura 5.14: Evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal (figuras lateral izquierda y derecha, respectivamente) adimensionalizadas por $U_{m\acute{a}x}(x/H)$, a lo largo de las capas de mezcla fría y caliente, y de la línea central de la cortina, para ambos casos de estudio (figuras superiores e inferiores, respectivamente).....	64
Figura 5.15: Campo del esfuerzo de Reynolds, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)	66
Figura 5.16: Campo del esfuerzo de Reynolds, detallado en las zonas de capas de mezcla - Caso 1	67
Figura 5.17: Campo del esfuerzo de Reynolds, detallado en las zonas de capas de mezcla - Caso 2	67
Figura 5.18: Perfil de esfuerzo de Reynolds, $\rho \mathbf{u}'\mathbf{v}'$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 1	68
Figura 5.19: Perfil centrado del esfuerzo de Reynolds, $\rho \mathbf{u}'\mathbf{v}'$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 1	69
Figura 5.20: Perfil de esfuerzo de Reynolds, $\rho \mathbf{u}'\mathbf{v}'$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 2	69
Figura 5.21: Perfil centrado del esfuerzo de Reynolds, $\rho \mathbf{u}'\mathbf{v}'$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 2.....	70
Figura 5.22: Evolución del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 1	72
Figura 5.23: Evolución del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 2.....	72
Figura 5.24: Perfil de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \mathbf{u}'\mathbf{v}')/\partial x$ – Caso 1	74

Figura 5.25: Perfil centrado de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial x$ – Caso 1	74
Figura 5.26: Perfil de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial x$ - Caso 2.....	75
Figura 5.27: Perfil centrado de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial x$ - Caso 2	75
Figura 5.28: Evolución de la derivada axial negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1	76
Figura 5.29: Evolución de la derivada axial negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 2.....	76
Figura 5.30: Perfil de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial y$ - Caso 1	79
Figura 5.31: Perfil centrado de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial y$ - Caso 1	79
Figura 5.32: Perfil de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho u'v')/\partial y$ - Caso 2	80
Figura 5.33: Evolución de la derivada transversal negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1	83
Figura 5.34: Evolución de la derivada transversal negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 2.	83
Figura 5.35: Campo del flujo transversal de calor turbulento, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)	85
Figura 5.36: Campo del flujo transversal de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina - Caso 1.....	85
Figura 5.37: Campo del flujo transversal de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina - Caso 2.....	86
Figura 5.38: Perfiles del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 1	87
Figura 5.39: Perfiles centrados del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 1	87
Figura 5.40: Perfiles del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 2.....	88
Figura 5.41: Perfiles centrados del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 2	88
Figura 5.42: Evolución del flujo transversal de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1	89
Figura 5.43: Evolución del flujo transversal de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 2	90
Figura 5.44: Campo de flujo axial de calor turbulento, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)	91
Figura 5.45: Campo del flujo axial de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina – Caso 1....	92

Figura 5.46: Campo del flujo axial de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina – Caso 2....	92
Figura 5.47: Perfil del flujo axial de calor, $\rho C_p u' T'$ - Caso 1.....	93
Figura 5.48: Perfil centrado del flujo axial de calor, $\rho C_p u' T'$ - Caso 1	94
Figura 5.49: Perfil del flujo axial de calor, $\rho C_p u' T'$ - Caso 2.....	94
Figura 5.50: Evolución del flujo axial de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Casos 1 y 2	95
Figura 5.51: Evolución del flujo molecular transversal para los casos 1 y 2, a lo largo de las capas de mezcla y línea central de la cortina	97
Figura 5.52: Flujos de calor transversal molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 1	99
Figura 5.53: Flujos de calor transversal molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 2.....	100
Figura 5.54: Flujos transversales netos de calor para ambos casos estudiados. Caso 1, figura izquierda. Caso 2, figura derecha	101
Figura 5.55: Evolución del flujo molecular axial para los casos 1 y 2, a lo largo de las capas de mezcla y línea central de la cortina	101
Figura 5.56: Flujos de calor axial molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 1	103
Figura 5.57: Flujos de calor axial molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso.....	104
Figura 5.58: Flujos axiales netos de calor para ambos casos estudiados. Caso 1, figura izquierda. Caso 2, figura derecha	105
Figura 5.59: Perfil de derivada transversal del flujo transversal de calor turbulento, $-\partial(\rho v' T')/\partial y$ - Caso 1.....	106
Figura 5.60: Perfil de derivada transversal del flujo transversal de calor turbulento, $-\partial(\rho v' T')/\partial y$ - Caso 2.....	107
Figura 5.61: Derivada transversal del transporte transversal de calor turbulento en las líneas de capa de mezcla y en la línea media de la cortina – Caso 1.....	107
Figura 5.62: Perfil de derivada transversal del flujo axial de calor turbulento, $-\partial(\rho u' T')/\partial x$ - Caso 1	108
Figura 5.63: Perfil de derivada transversal del flujo axial de calor turbulento, $-\partial(\rho u' T')/\partial x$ - Caso 1	109

Figura 5.64: Evolución de la derivada del flujo axial de calor turbulento, en capas de mezcla y línea central de la cortina, para Caso 1 (figura izquierda) y Caso (figura derecha).....	110
Figura 5.65: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la capa de mezcla del jet caliente (lado confinado). Se muestra también la tasa total de contribución de calor, por parte del término molecular y del turbulento - Casos 1 y 2	111
Figura 5.66: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la línea central de la cortina. Se muestra también la tasa total de contribución de calor- Casos 1 y 2	111
Figura 5.67: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la capa de mezcla del jet frío (lado protegido). Se muestra también la tasa total de contribución de calor, por parte del término molecular y del turbulento - Casos 1 y 2	112
Figura B.1: Evolución del esfuerzo de Reynolds adimensionalizado en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1	122
Figura B.2: Evolución del esfuerzo de Reynolds adimensionalizado en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2	123
Figura B.3: Evolución del transporte axial de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1.....	123
Figura B.4: Evolución del transporte axial de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2.....	124
Figura B.5: Evolución del transporte transversal de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1.....	124
Figura B.6: Evolución del transporte transversal de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2.....	125

1 Introducción

Las cortinas de aire son dispositivos de separación basados en la descarga de una corriente o *jet* plano de aire a gran velocidad, que puede tener o no diferentes características a las del medio donde es inmerso. Son utilizadas para aislar, uno del otro, dos volúmenes con características climáticas diferentes para mejorar el confort y la eficiencia energética [1], entre otros usos. Funcionan como barrera contra el calor, humedad, olores, insectos, escalares activos (temperatura) y/o transferencias de masa (humo, polvo) entre las áreas separadas, permitiendo el tránsito de personas, vehículos, materiales y objetos. Se utilizan comúnmente en recintos que poseen solo una puerta de entrada/salida, como tiendas, centros comerciales, cámaras de refrigeración, salas limpias (*clean rooms*), entre otros [2] [3]. Existen distintas configuraciones para las cortinas: con uno o dos jets; con iguales o distintas velocidades y/o temperaturas iniciales. Se denomina configuración Doble jet - Doble Flujo, o DJ – DF, al uso de dos jets con distintas temperatura y velocidad iniciales. En la cortina de aire, producto de su constante interacción con medios de distintas características termodinámicas a las de ella (temperatura, velocidad, densidad), se producen “esfuerzos de corte” que generan estructuras vorticiales; originando, así, turbulencia. La turbulencia favorece la transferencia de calor y masa, fenómeno que pareciera acentuarse en la configuración DJ - DF.

Se ha propuesto como método de aislación para disminuir o detener la propagación de humo y calor en caso de incendios dentro de lugares confinados, como es el caso de túneles viales. Sin embargo, el número de estudios relacionados con este tema es limitado [4][5], junto con los artículos que buscan determinar la configuración óptima para generar un dispositivo de confinamiento [6].

Gupta [6] encontró, en estudios experimentales, que las cortinas Doble Jet con recirculación poseen buenas eficiencias de confinamiento. Para continuar en la línea de investigación y corroborar que el dispositivo de confinamiento con configuración DJ – DF es eficaz ante la aislación de escalares activos como la temperatura, Gonzáles [7] realizó su trabajo de título sobre el diseño y construcción de una instalación experimental a escala de un dispositivo de confinamiento. Paralelamente, Fernández [8] elaboró un estudio numérico de la instalación en dos dimensiones, utilizando un modelo turbulento $k - \varepsilon$. En él verificó que la configuración DJ - DF resulta ser eficaz en el confinamiento de temperatura y reconoció que, para niveles menores a $x/H=0.5$, los jets doble poseen un claro efecto de prevención de fugas de calor a través de la cortina. También, concluyó que la ubicación de la fuente térmica dentro de la zona confinada no afecta de gran manera a la zona protegida.

Posteriormente, Demarco [9] realizó estudios numéricos del dispositivo utilizando un modelo RSM. En él concluyó que las cortinas poseen un comportamiento esencialmente bidimensional.

Rivera [2], en un análisis numérico referente a la transferencia de calor a través de una cortina de aire, por medio de un modelo LES (Large Eddy Simulation), concluyó que la mayor transferencia de calor a través de una cortina sucede en la dirección transversal a la dirección de propagación de la misma. Lecaros [10], en una modelación computacional utilizando el código FDS, identificó niveles en donde dos jets de una cortina con configuración DJ - DF se unifican para conformar un nuevo jet con características diferentes a las de los dos iniciales. Seguidamente, Rojas [11] realizó un estudio numérico utilizando también el código FDS. En él corroboró la efectividad de las cortinas DJ-DF como sistema de confinamiento, concluyendo que para bajas velocidades de los jets de la cortina, la configuración más eficiente, en cuanto a confinamiento, es la que posee el jet con recirculación más rápido. Finalmente, Schneider [12] realizó un estudio experimental en base a una instalación perteneciente al Laboratorio de Estudios Fluidodinámicos LEF de la Universidad de Chile en su trabajo de tesis. De forma simultánea, Castro [13] realizó una modelación 3D, utilizando un modelo LES, sobre la instalación utilizada por Schneider. Ambos estudiaron los mismos casos de cortinas de aire con configuración DJ -DF, variando la fuente de calor. Castro, observó un traspaso axial y transversal de calor y masa a través de mecanismos turbulentos, tanto entre el entorno y la cortina, como entre los mismos jets que la componen. Observó que el mayor traspaso turbulento de calor y masa ocurre en los sectores medios de la cortina. Concluyó que la configuración DJ - DF con el jet rápido ubicado contiguo a la zona protegida, entrega el confinamiento más efectivo dentro de las alternativas estudiadas.

El presente tema de memoria pretende, entonces, continuar con esta línea de investigación, basándose en datos numéricos obtenidos a partir de una modelación previa en 3D, hecha en ANSYS FLUENT, sobre cortinas de aire en configuración DJ-DF, en el marco de una Tesis de Magíster de J. Castro [13].

1.1 Objetivos

A continuación, se detallan el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo de memoria.

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general es analizar la influencia de los términos turbulentos de transporte de calor y masa en el confinamiento de una fuente de calor, que pudieran originar fugas de calor y gases en el uso de cortinas de aire DJ-DF.

1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Analizar los datos numéricos obtenidos de una simulación numérica 3D, previamente realizada en el software ANSYS Fluent, sobre el comportamiento de cortinas de aire doble jet-doble flujo.
- Obtener numéricamente los términos de transporte turbulento de las ecuaciones de Navier-Stokes y del calor.
- Estudiar la interpretación física de los términos turbulentos y su influencia en el transporte de momentum y calor, de manera de determinar posibles zonas donde pudiera haber fugas de calor desde la zona confinada hacia la protegida.

1.2 Alcances

El trabajo de memoria consiste solo en el cálculo numérico de los términos turbulentos de las ecuaciones de Navier-Stokes y del calor, en base a datos numéricos obtenidos a partir de una simulación existente. Como términos turbulentos, se consideran los esfuerzos y flujos de calor de Reynolds y sus derivadas parciales. Se estudian 2 casos de la configuración doble jet-doble flujo: uno en que el jet frío posee la velocidad mayor y otro en que el jet caliente posee la mayor velocidad.

2 Antecedentes

En este capítulo se exponen los aspectos teóricos necesarios para comprender el presente trabajo de título, los cuales son la base para realizar el análisis de los resultados obtenidos. En primer lugar, se presenta una leve descripción sobre turbulencia, en donde se detalla su influencia en la transferencia de calor, momentum y masa. Luego, se muestran los diferentes modelos numéricos utilizados para estudiarla y, finalmente, se describe la configuración estudiada en el presente trabajo.

2.1 Turbulencia

A lo largo del tiempo, para los investigadores ha sido difícil dar una definición precisa sobre qué es la turbulencia. Sin embargo, algunos han hecho un esfuerzo por encontrar alguna. Davidson [14] interpreta un vórtice turbulento como una burbuja de vorticidad que es estirada y torcida por un campo de velocidad, el cual, a su vez, es dictado por distribuciones de vorticidad instantáneas. Los vórtices evolucionan e interactúan por el campo de velocidades que ellos mismos inducen. Corrsin (1961)[15] define la turbulencia como una “distribución espacial completa de vorticidad, la cual se advecciona a sí misma caóticamente. El campo de vorticidad generado es aleatorio en el espacio y el tiempo, y exhibe un amplia y continua distribución de escalas de tiempo y longitud”. A pesar de los intentos, aún no se ha llegado a una definición final, pero sí todos reconocen las mismas características de un flujo turbulento, las que son conocidas con más detalle [16]. Éstas se muestran a continuación.

a) Irregularidad

Una característica es la irregularidad, o aleatoriedad, de todo el flujo turbulento. Esto hace que un acercamiento determinístico hacia los problemas turbulentos sea imposible. Por esta razón, se utilizan métodos estadísticos.

b) Difusividad

La difusividad de la turbulencia causa el mezclado rápido y el aumento en las tasa de momentum, calor y transferencia de masa. Si un patrón de flujo parece aleatorio pero no exhibe una propagación de fluctuaciones de velocidad a través de los alrededores del fluido, de seguro no es turbulento.

c) Grandes números de Reynolds

Los flujos turbulentos siempre ocurren a grandes número de Reynolds¹. Frecuentemente, se generan como una inestabilidad de un flujo laminar si es que su número de Reynolds se torna más

¹ El número de Reynolds Re es el parámetro adimensional que caracteriza al flujo y representa la interacción entre las fuerzas inerciales y viscosas sobre un flujo. A altos números de Reynolds se genera turbulencia.

grande. Las inestabilidades están relacionadas con interacciones de términos viscosos e inerciales no lineales en las ecuaciones de movimiento.

d) Fluctuaciones de velocidad en 3-dimensiones

La turbulencia es rotacional y tridimensional. Se caracteriza por tener altos niveles de vorticidades fluctuantes. El movimiento aleatorio de dichas vorticidades fluctuantes no podrían mantenerse a sí mismas si es que las fluctuaciones de velocidad fueran bidimensionales, pues un importante mecanismo de mantenimiento de vorticidad, conocido como “estiramiento de vórtices” (*vortex stretching*, en inglés) está ausente en un flujo en 2-D.

e) Disipación

Los flujos turbulentos son siempre disipativos. Los esfuerzos de corte viscosos efectúan trabajo de deformación, los cuales aumentan la energía interna del fluido a expensas de la energía cinética de la turbulencia. La turbulencia necesita un continuo suministro de energía para contrarrestar dichas pérdidas viscosas. Si esto último no sucediera, la turbulencia decaería rápidamente.

f) Continuidad

La turbulencia es un fenómeno continuo gobernado por ecuaciones de fluidodinámica. Incluso las escalas más pequeñas que ocurren en un flujo turbulento son más grandes que cualquier escala molecular.

g) Los flujos turbulentos son flujos

La turbulencia no es una característica de los fluidos, sino del flujo. Muchas de las dinámicas de la turbulencia son idénticas en todos los fluidos, independientemente de si son líquidos o gaseosos, mientras el número de Reynolds sea lo suficientemente grande. Las características principales de los flujos turbulentos no son controladas por propiedades moleculares del fluido en donde existe turbulencia.

Así, el flujo turbulento se caracteriza por un movimiento caótico en donde las partículas se mueven desordenadamente, generando altos niveles de vorticidad y disipación de energía cinética. Debido al alto grado de desorden y a los movimientos irregulares en el flujo, se produce un aumento en el intercambio de masa, cantidad de movimiento y energía entre sus capas fluidas [11].

El estudio de la turbulencia se restringe a los llamados “fluidos de corte”, en los cuales las velocidades relativas son producidas por esfuerzos de corte en lugar de ser producidas por la acción de la presión [17]. Esto, debido a que solo en ese tipo de fluidos los movimientos turbulentos aumentan y se sostienen en sí mismos.

Al aplicar esos esfuerzos tangenciales (cortantes) a fluidos que tienen fricción interna, se crean movimientos de corte alineados con dichos esfuerzos y conforme a la forma de los bordes del

fluido. Dentro de ese campo de flujo, aparecen distintos tipos de movimientos secundarios. Los regulares, producto de los gradientes de presión resultantes de la curvatura del flujo medio, que dependen de la forma de los bordes; y los irregulares, llamados turbulentos, que son los más comunes, pero con un origen menos evidente. Su aparición no depende de la forma de los bordes, sino de algún mecanismo que ocurre dentro del flujo mismo y que generan movimientos en direcciones distintas a las de los cortes.

2.1.1 Mecánica de la turbulencia

Los movimientos turbulentos comienzan por un quiebre del flujo laminar en regiones localizadas, las que ocurren producto de inestabilidades en el flujo bajo la acción de perturbaciones. Se requieren quiebres repetidos para mantener un abastecimiento continuo de turbulencia, y la inestabilidad del flujo laminar es una parte esencial de este proceso [17].

La turbulencia se sostiene cuando es conveccionada aguas abajo y seguida de otro movimiento turbulento aguas arriba, el cual es más vigoroso que el que le antecede. Cuando la turbulencia ya presente puede reforzarse a sí misma para mantener la acción de amortiguación de la viscosidad, no necesita de inestabilidades para mantenerse. Desde el momento en que el movimiento turbulento produce esfuerzos de fricción, sobre el cual el flujo medio actúa, el mecanismo existe mientras los movimientos turbulentos capturen energía cinética del flujo medio. Por lo tanto, la turbulencia ya existente se refuerza a sí misma y puede contrarrestar la acción amortiguadora de la viscosidad. En resumen, la turbulencia cuenta con un mecanismo de sostenimiento en sí misma, el cual le permite equilibrar las pérdidas y ganancias por convección y difusión (las generadas por amortiguamiento viscoso) y seguir en estado estacionario.

A pesar de que la energización de la turbulencia es expresable en términos de esfuerzo de corte, también son requeridas gradientes de presión turbulenta que deben incrementar a partir de las interacciones ocurridas dentro del flujo mismo.

2.1.1.1 Escalas de movimiento y Cascada de energía

En un flujo turbulento, se observan distintas escalas de movimiento (estructuras o vórtices de diferentes tamaños). Las escalas de movimientos más grandes son del tamaño del campo del flujo medio. Luego, se encuentran los movimientos turbulentos en los que existe una mezcla de vórtices superpuestos, que poseen varios rangos de tamaño, los cuales van desde los que poseen uno similar al del flujo medio, hasta las llamadas “microescalas”. Todos los movimientos turbulentos son agentes responsables del esfuerzo de corte en presencia del flujo medio, y, por consiguiente, todos extraen energía desde éste para sostenerse a sí mismos. Sin embargo, estas acciones disminuyen con el decrecimiento de las escalas- del tamaño de los torbellinos-, por lo que se asume que la energía entra a la turbulencia por los vórtices de gran tamaño. Correspondientemente, la acción amortiguadora de la viscosidad es despreciable en el flujo medio y, por consiguiente, en los vórtices

de gran escala. No obstante, comienza a aumentar progresivamente con la disminución del tamaño de los torbellinos, hasta volverse dominante en las escalas de los más pequeños. Así, el efecto de la viscosidad es despreciado en las grandes escalas de movimiento, mientras se tengan mayores números de Reynolds.

Por tanto, existe una sucesión de transferencia de energía desde los torbellinos más grandes hacia los más pequeños, llamada “cascada de energía”. Ésta ingresa desde el flujo medio hacia los vórtices grandes y se disipa por medio de los vórtices pequeños. De esta manera, la energía se transfiere desde las grandes escalas de movimiento hasta las más pequeñas, en otras palabras, desde los torbellinos o *eddies* más grandes hacia los más pequeños. Esto continúa mientras los vórtices de menor tamaño no sean lo suficientemente pequeños como para producir disipación de energía bajo la acción de la viscosidad. Un ejemplo del proceso descrito se muestra en la Figura 2.1.

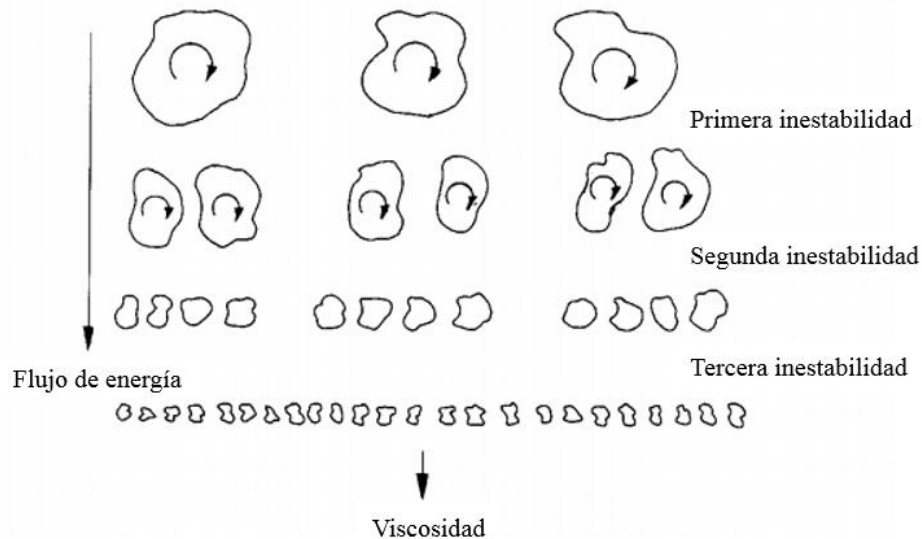


Figura 2.1: Cascada de energía y diferentes escalas presentes en un flujo turbulento. Fuente: Elaboración propia a partir de [14]

2.1.1.2 Escalas de Kolmogorov

Las escalas de tamaño más pequeñas, a las cuales se disipa energía, se les llaman “microescalas de Kolmogorov”. Esto, debido a que el fenómeno descrito previamente fue identificado por Richardson y cuantificado por Kolmogorov [18], quien reconoció distintos rangos de escalas de magnitud de movimiento, basándose en los siguientes supuestos:

- **Isotropía local:** para número de Reynolds lo suficientemente altos, los movimientos de las pequeñas escalas turbulentas son estadísticamente isotrópicas².

² Isotropía: que sus propiedades no dependen de una dirección específica. En un flujo turbulento, se cumple que las fluctuaciones de velocidad de las tres direcciones del plano 3D son iguales [15].

- **Primera hipótesis de similitud:** en todos los flujos turbulentos con un número de Reynolds lo suficientemente alto, las escalas de movimiento pequeñas ($l < l_{EI}$, Figura 2.2) tienen una forma universal que está determinada únicamente por la viscosidad cinemática ν y la tasa de disipación ε .
- **Segunda hipótesis de similitud:** en todos los flujos turbulentos con un número de Reynolds lo suficientemente alto, las escalas de movimiento en el rango $l_{EI} > l > l_{DI}$ de la Figura 2.2, tienen una forma universal que está determinada únicamente por la tasa de disipación ε , independientes de la viscosidad cinemática ν .

Kolmogorov propuso la existencia de tres rangos de escalas [19]:

- 1) *Rango de contención de energía*, en el que se encuentran los principales y más grandes vórtices, que son los que contienen la energía directamente aportada por el mecanismo de producción
- 2) *Sub-rango inercial*, en donde el proceso de cascada es independiente de la viscosidad molecular y de la energía contenida en los torbellinos (la energía se transfiere hacia los vórtices más pequeños sin disiparse)
- 3) *Rango disipativo*, en el que los efectos viscosos comienzan a ser importantes y la energía comienza a ser disipada.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema gráfico de las escalas propuestas por Kolmogorov [18]. En la imagen, L corresponde a la escala del flujo; l_0 , a una posición a mayor escala de los vórtices; l_{EI} , al límite entre el rango de contención de energía y el sub-rango inercial; l_{DI} , al límite entre el rango disipativo y el sub-rango inercial; y η , a la escala de tamaño más pequeña de los torbellinos disipativos.

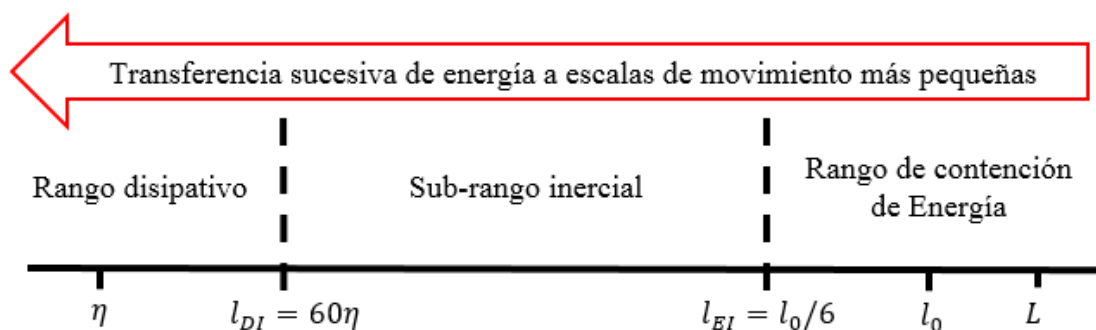


Figura 2.2: Rangos de escala de energía propuestos por Kolmogorov. Fuente: Elaboración propia en base a [13]

2.1.2 Estructuras vorticiales

A continuación se detalla una leve descripción de las estructuras vorticiales de importancia para este estudio, que son: las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz y las estructuras contra-rotatorias tipo Görtler.

2.1.2.1 Inestabilidades de Kelvin Helmholtz

Este tipo de estructuras son vórtices obtenidos como resultado de esfuerzos de corte entre dos fluidos, cuando hay suficiente diferencia de velocidad a través de la interfaz entre los fluidos; estos últimos pueden ser de igual o distinta naturaleza. Cuando la capa de uno de los fluidos tenga un radio de curvatura distinto de cero, el otro fluido tenderá a generar una ligera fuerza centrífuga que produce, a su vez, un cambio de presión que amplifica el radio de curvatura. En la Figura 2.3 se observa el proceso de generación de vórtices de Kelvin-Helmholtz (KH) (lado izquierdo de la figura) y, además, un ejemplo de las estructuras formadas (lado derecho de la figura).

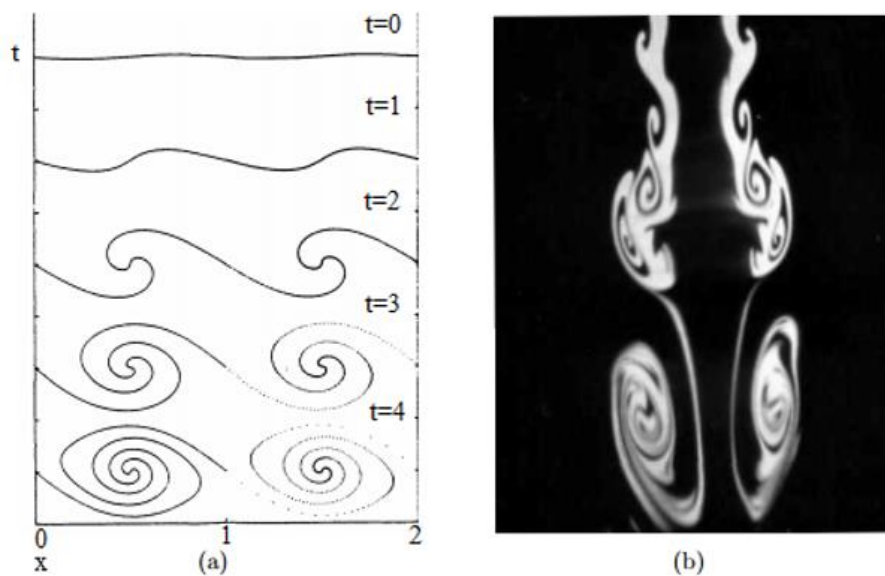


Figura 2.3: Inestabilidades de Kelvin-Helmholtz: (a) Generación de los vórtices de KH, (b) Estructuras KH. Fuente: [13]

2.1.2.2 Inestabilidades contra-rotatorias tipo Görtler

Son estructuras elongadas que se orientan en la dirección del flujo y que se presentan en pares con sentidos contrarios de rotación. Este tipo de inestabilidades aparecen en la interacción de un fluido con una pared cuando, mediante la acción de una fuerza centrífuga, se crea una variación de presión a través de la capa límite, produciendo una inestabilidad centrífuga y, como consecuencia, la formación de este tipo de vórtices. En la Figura 2.4 se puede observar un ejemplo de dichas inestabilidades.

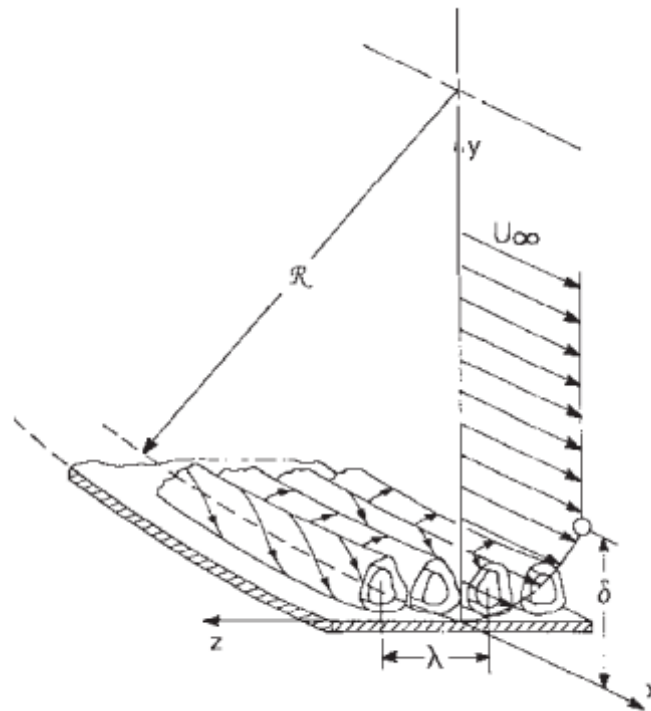


Figura 2.4: Inestabilidades contra-rotacionales tipo Görtler. Fuente: [13]

2.1.3 Modelos de turbulencia

Debido a la existencia de términos no lineales en las ecuaciones que describen a un flujo turbulento (mostradas más adelante), éstas últimas solo se pueden resolver numéricamente. Para ello, existen diversos tipos de modelamiento, dentro de los cuales se mencionan los 3 principales: DNS, RMS y LES. En el Anexo A se muestra una tabla comparativa entre diferentes modelos numéricos utilizados en CFD para la resolución de problemas de jets incidentes.

El DNS (*Direct Numerical Simulation*) consiste en la simulación de un flujo turbulento completamente desarrollado. Es decir, son calculados todos los vórtices, desde los de gran tamaño (grandes escalas), hasta los de menor tamaño (escalas más pequeñas) [14]. El modelo DNS resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sin modelos de clausura [20]. Sin embargo, necesita un costo computacional demasiado alto, siendo aplicable solo para problemas simples de bajos números de Reynolds. De ahí, surgen otros dos métodos alternativos que reducen un poco el costo computacional, ya sea promediando variables o filtrando ecuaciones. Ambos modelos introducen términos adicionales en las ecuaciones de balance que requieren ser modelados para poder lograr un sistema cerrado.

El modelo de ecuaciones de Reynolds promediadas, o RMS por sus siglas en inglés (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), representa las ecuaciones de transporte solo para cantidades medias del flujo, siendo modeladas todas las escalas de la turbulencia [21]. Presenta ventajas tanto para flujos medios estacionarios como para transientes, pues, en el primer caso, no habrían derivadas temporales que dificulten el cálculo; mientras que en el segundo caso, el paso de tiempo utilizado estaría determinado por la inestabilidad global del flujo medio en vez que de su turbulencia [9]. Por esto, se caracteriza por poseer robustez, economía y precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos [20] [22]. Este modelo, es utilizado por diversos modelos de turbulencia, tales como Spalart-Allmaras, $k - \varepsilon$ y sus variantes, $k - \omega$ y sus variantes, y el modelo RSM.

El modelo LES (*Large Eddy Simulation* o Simulación de Grandes Vórtices), simula o resuelve directamente los vórtices de gran tamaño (grandes escalas) de un flujo turbulento, mientras que los pequeños son modelados, utilizando ecuaciones que han sido previamente filtradas [9]. Es un modelo con una demanda computacional menor a la de DNS, pero mayor a los modelos que utilizan las ecuaciones RANS, pues posibilita el usar mallas mucho más gruesas y pasos de tiempo más largos que en DNS, pero más finas que las utilizadas en los modelos basados en las ecuaciones RANS [23]. Sin embargo, requiere de un tiempo suficientemente largo para obtener resultados estables del flujo modelado, por lo que necesita computación de alto rendimiento [13]. En la Figura 2.5 se puede observar un ejemplo de la diferencia entre una variable filtrada y sin filtro.

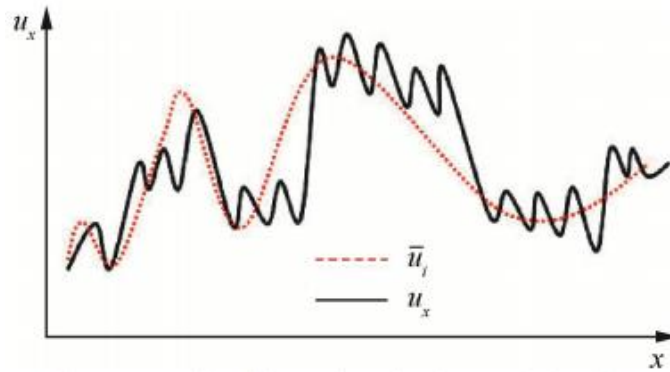


Figura 2.5: Diferencia entre velocidad filtrada \bar{u}_i y velocidad instantánea u_x . Fuente: [24]

El proceso de filtrado es similar a la descomposición de Reynolds mostrada en la ecuación (2.19), pero cada término tiene un significado diferente a los descritos en dicha ecuación. Así, en la ecuación (2.1), el término $\bar{u}_i(\vec{x}, t)$ corresponde a la velocidad filtrada con filtros pasa-baja en la dirección i , es decir, representa el movimiento de los vórtices de gran tamaño (grandes escalas calculadas directamente); mientras que el término $u_i'(\vec{x}, t)$ representa la velocidad filtrada, es decir, el movimiento de los torbellinos de menor tamaño (escalas pequeñas modeladas). Esto mismo se aplica para descomponer tanto la temperatura como la presión.

$$u_i(\vec{x}, t) = \bar{u}_i(\vec{x}, t) + u_i'(\vec{x}, t) \quad (2.1)$$

Así, aplicando el proceso de filtrado a las ecuaciones de Navier-Stokes y a la ecuación de energía, se obtienen las ecuaciones (2.2) y (2.3), respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{SGS,ij} \right] \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{\rho C} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \overline{u'_i T'} \right) \quad (2.3)$$

El último término de la ecuación (2.2), $\tau_{SGS,ij}$, se denomina “esfuerzo de escala de Subgrilla” (SGS) y representa la interacción entre los vórtices simulados con los modelados [25] [26]. Su ecuación es mostrada en (2.4), pero se modela bajo la ecuación (2.5), en la cual el término ν_{SGS} corresponde a la viscosidad de escala de subgrilla, la cual se obtiene empíricamente.

$$\tau_{SGS,ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.4)$$

$$\tau_{SGS,ij} = -\nu_{SGS} \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

Si se escribe el campo de velocidad como una combinación del campo filtrado y el campo de escala de subgrilla, el esfuerzo SGS se puede descomponer en tres términos, mostrados en (2.6).

$$\tau_{SGS,ij} = (\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) + (\overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{\bar{u}_j u'_i}) + \overline{u'_i u'_j} \quad (2.6)$$

Los tres términos de la ecuación (2.6) representan físicamente lo siguiente:

- El primer término, $(\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$, que puede ser computado explícitamente del campo de velocidad filtrado, \bar{u} , representa la interacción de dos escalas de vorticidad resueltas para producir pequeñas escalas de turbulencia. Es llamado el término de *Leonard*, o término *outscatter*.
- El segundo término, $(\overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{\bar{u}_j u'_i})$, representa la interacción entre las escalas resueltas de vorticidad y las pequeñas. Es llamado *cross term* y puede transferir energía en cualquier dirección, pero, en el promedio, la transferencia de energía es desde las escalas grandes a las pequeñas.
- El tercer término, $\overline{u'_i u'_j}$, representa la interacción entre dos escalas pequeñas para producir una escala grande de vorticidad. Es llamado término real de escala de subgrilla (*true subgrid scale term*) o *bakscatter term*, debido a que produce transferencia de energía desde escalas pequeñas a las grandes.

Por otro lado, el flujo turbulento de calor, $\overline{u'_i T'}$, que aparece en la ecuación (2.3) es modelado según la ecuación (2.7), denominado ley de gradiente. En ésta última Pr_T es el número de Prandtl turbulento y ν_T , la viscosidad turbulenta. Prandtl asimila el transporte turbulento a uno laminar por medio de una constante de proporcionalidad llamada viscosidad turbulenta.

$$\overline{u'_i T'} = -\frac{\nu_T}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

2.2 Mecanismos de transporte turbulento

En un flujo turbulento se transfiere calor, momentum y partículas, extrayendo energía de flujo medio.

Para entender los mecanismos turbulentos de transporte es necesario entender primero los mecanismos de transporte en un flujo cualquiera. Por ello, se resumen brevemente los mecanismos de transporte de momentum y de calor en un flujo cualquiera, para luego aclarar el significado del transporte turbulento.

2.2.1 Transporte molecular y convectivo de momentum

Existen dos mecanismos de transporte: el molecular (viscoso) y el convectivo (inercial) [27], los cuales son explicados a continuación.

2.2.1.1 Transporte molecular (mecanismo viscoso de transporte)

Se considera el caso de dos placas paralelas, inicialmente en reposo, separadas por una distancia constante Y , como se muestra en la Figura 2.6. La placa inferior comienza a moverse a una velocidad constante V en la dirección positiva del eje \hat{x} , mientras que la superior queda fija.

Cuando se alcanza el estado final estacionario, es necesario una fuerza F (por unidad de área A) para mantener el movimiento de la placa inferior, la cual es de la forma mostrada en la ecuación (2.8). En ella, μ corresponde a la viscosidad.

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (2.8)$$

El término F/A se puede reemplazar por el símbolo τ_{yx} correspondiente a una fuerza en la dirección \hat{x} sobre un área perpendicular a la dirección \hat{y} (es decir, es una fuerza ejercida por el fluido desde una posición de menor y a una de mayor y). Reemplazando V/Y por $-dv_x/dy$, la ecuación (2.8) se convierte en la mostrada en (2.9).

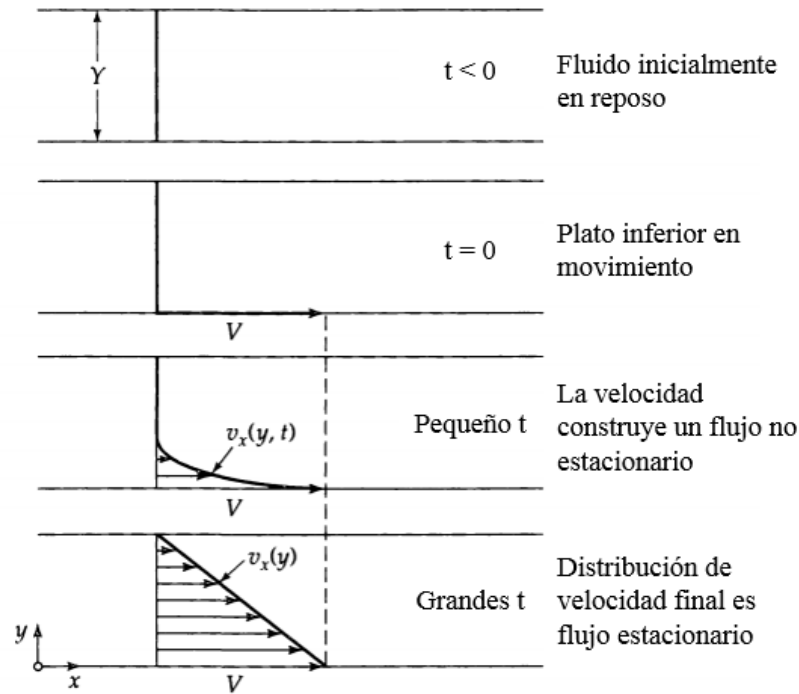


Figura 2.6: Generación de un perfil de velocidad por el movimiento de la placa inferior en un conjunto de dos placas paralelas inicialmente en reposo, separadas por una distancia Y constante. Fuente: [27]

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2.9)$$

Esta última representa la fuerza de corte por unidad de área proporcional a un gradiente negativo de velocidad, y es llamada “Ley de viscosidad de Newton”. El signo negativo indica la convención de que el esfuerzo es positivo para un movimiento que va desde una región de mayor velocidad a una de menor velocidad.

Viéndolo desde otro punto de vista, en zonas cercanas a la placa en movimiento en $y=0$ el fluido adquiere una cierta cantidad de movimiento- x (momentum en la dirección \hat{x}). Ese fluido imparte un momentum a las capas de fluido adyacentes a él, causándole un movimiento remanente en la dirección \hat{x} . Entonces, se transfiere momentum- x a través del fluido en la dirección positiva de \hat{y} . Así, τ_{yx} puede ser interpretado como un flujo (flujo por unidad de área) de momentum- x en la dirección positiva de \hat{y} . En resumen, el momentum se dirige en la dirección desde donde hay altas velocidades hacia regiones de bajas velocidades- tal como sucede con los flujos de calor desde regiones de alta temperatura a las de baja temperatura. El gradiente de velocidad, entonces, puede ser pensado como una “fuerza motriz” causada por un transporte de momentum.

Al generalizar la situación anterior para cualquier diferencial de fluido tridimensional, se observan dos contribuciones a la fuerza: las asociadas a la presión y otras asociadas a fuerzas viscosas, como se muestra en la Figura 2.7.

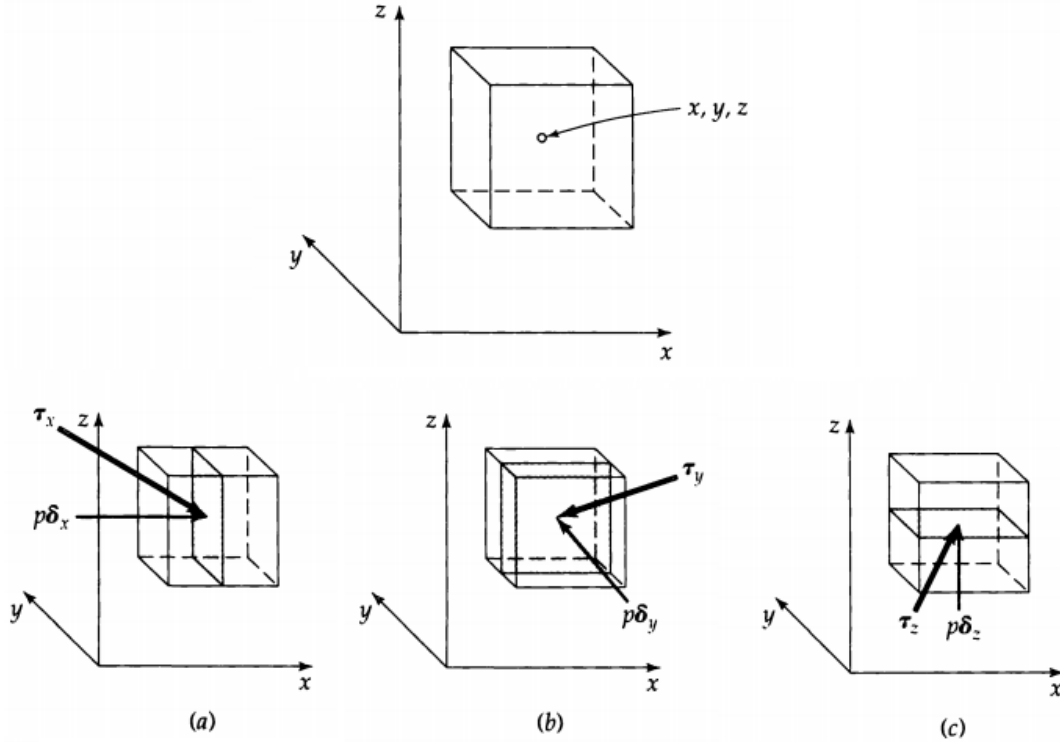


Figura 2.7: Fuerzas de presión y viscosas actuando sobre planos en el fluido perpendicular a las tres coordenadas del sistema. Fuente: [27]

Por lo tanto, conviene considerar ambas fuerzas en un solo término, como se muestra en (2.10), en donde i y j representan las coordenadas x , y o z .

$$\pi_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.10)$$

El término de presión $p\delta_{ij}$ está multiplicado por δ_{ij} , el cual corresponde al “delta de Kronecher” y es igual a 1 cuando $i=j$ e igual a 0 en caso contrario.

Por lo tanto, el esfuerzo π_{ij} puede ser interpretado de dos formas:

- 1) $\pi_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij}$ = fuerza en la dirección j sobre una unidad de área perpendicular a la dirección i , lo que es entendido como “un fluido, en una región de menor x , ejerce una fuerza sobre un fluido de mayor x ”.
- 2) $\pi_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij}$ = flujo de momentum en j , en la dirección positiva de la dirección i , desde una región de menor x a una de mayor x ”.

Esta última interpretación es la más utilizada en este trabajo.

2.2.1.2 Transporte convectivo

El transporte de momentum molecular depende de la viscosidad de fluido, la cual surge desde una consideración de movimientos aleatorios de las moléculas del fluido, respecto al flujo principal. Pero, adicionalmente, el momentum puede ser transportado por el flujo medio. Este proceso es llamado “transporte convectivo”.

Para entender su comportamiento, se utiliza el esquema de la Figura 2.8. En él se muestran flujos de momentum actuando en superficies perpendiculares a un cubo diferencial, el cual posee una velocidad \mathbf{v} en su centro.

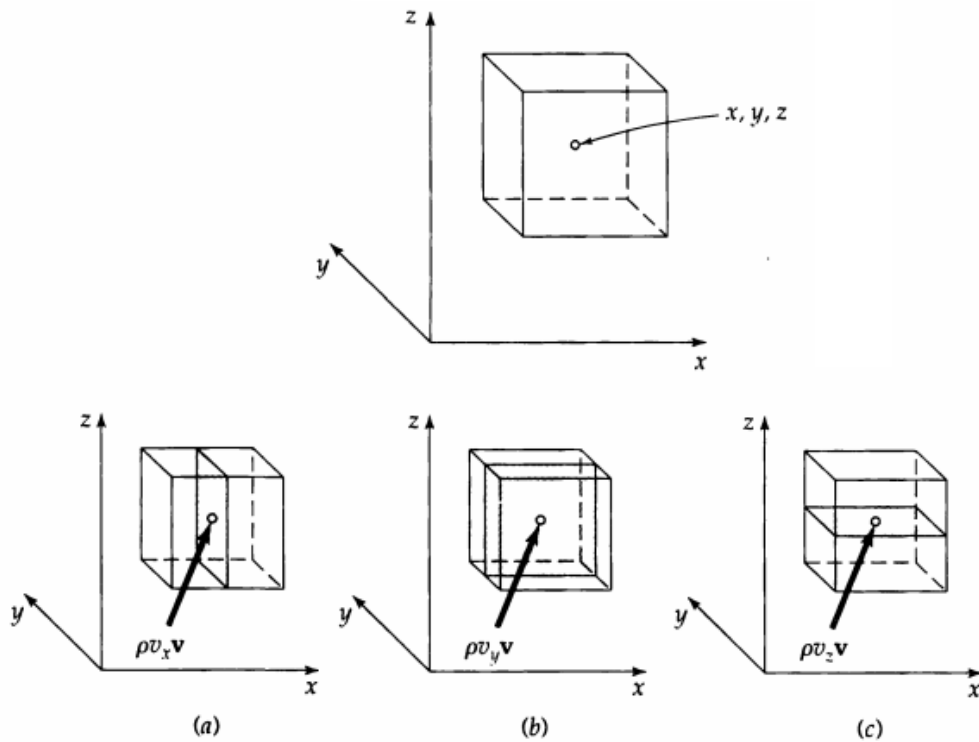


Figura 2.8: Flujos de momentum convectivo a través de planos perpendiculares a los sistemas coordenados. Fuente: [27]

La tasa de flujo de volumen, para el caso (a) de la Figura 2.8 es v_x . Este fluido conlleva un momentum $\rho \mathbf{v}$ por unidad de volumen. Por lo tanto, el flujo de momentum a través del área perpendicular a \hat{x} es $v_x \rho \mathbf{v}$, el cual es desde una región de menor x a una de mayor x . Similarmente, en las otras direcciones se tiene: $v_y \rho \mathbf{v}$, para (b), y $v_z \rho \mathbf{v}$, para (c).

Generalizando, se tiene que la cantidad $\rho v_x v_y$ es un flujo convectivo de momentum- y a través de una superficie perpendicular a la dirección \hat{x} . Éste es comparable con esfuerzo τ_{xy} observado en

la sección 2.2.1.1 anterior. Se tiene entonces el tensor (de segundo orden) de flujo convectivo de momentum, $\rho \mathbf{v}\mathbf{v}$. La convención de signos para el caso convectivo es la misma que la expuesta en el caso viscoso.

Es conveniente expresar el flujo combinado de momentum, el cual está compuesto por la suma entre el flujo molecular π y el convectivo $\rho \mathbf{v}\mathbf{v}$, como se muestra en (2.11) expresado en forma tensorial, o en (2.12) de forma indicial.

$$\phi = \pi + \rho \mathbf{v}\mathbf{v} = p\delta + \tau + \rho \mathbf{v}\mathbf{v} \quad (2.11)$$

$$\phi_{ij} = \pi_{ij} + (\rho \mathbf{v}\mathbf{v})_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij} + \rho v_i v_j \quad (2.12)$$

Así, el término ϕ_{ij} representa el flujo combinado de momentum-j a través de una superficie perpendicular a la dirección \hat{x} por mecanismos moleculares y convectivos.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los tensores mencionados hasta ahora.

Tabla 2.1: Resumen de tensores.

Símbolo	Significado
$\rho \mathbf{v}\mathbf{v}$	Tensor de flujo de momentum convectivo
τ	Tensor de flujo de momentum viscoso
$\pi = p\delta + \tau$	Tensor de flujo de momentum molecular
$\phi = \pi + \rho \mathbf{v}\mathbf{v}$	Tensor de flujo de momentum combinado

Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Transporte turbulento de cantidad de movimiento

Debido a que la turbulencia consiste en fluctuaciones de velocidad aleatorias, debe ser tratada con métodos estadísticos. El análisis estadístico no debe ser sofisticado, basta con considerar una descomposición de todas las cantidades en un valor medio y fluctuaciones. Antes de ello, se presenta la ecuación en un fluido incompresible para un instante cualquiera.

2.2.2.1 Ecuación de movimiento

La ecuación de movimiento surge a partir de un balance de momentum sobre un elemento diferencial de volumen, de manera similar a la mostrada en el transporte de momentum convectivo en un flujo laminar, de la sección 2.2.1.2 anterior. Considerando a ϕ como el tensor de momentum combinado, visto anteriormente, la ecuación diferencial de conservación momentum queda como la mostrada en (2.13).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{v} = -[\nabla \cdot \phi] + \rho \mathbf{g} \quad (2.13)$$

Descomponiendo el tensor de momentum combinado ϕ según la ecuación (2.12), la ecuación (2.13) queda como en (2.14).

$$\begin{array}{ccccccc} \frac{\partial}{\partial t} \rho v & = & -[\nabla \cdot \rho v v] & -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] & + \rho g & & (2.14) \\ (1) & & (2) & (3) & (4) & & \end{array}$$

Tasa de incremento de momentum por unidad de volumen	Tasa de adición de momentum por convección por unidad de volumen	Tasa de adición de momentum por transporte molecular por unidad de volumen	Fuerza externa sobre el fluido por unidad de volumen
--	--	--	--

Considerando el término (2) de la ecuación (2.14) como una aceleración convectiva, puede pasar al lado derecho de la igualdad para conformar, junto con el término (1), la derivada material o substancial mostrada en (2.15).

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right] \quad (2.15)$$

Así, la ecuación de balance de momentum (2.14) quedaría como la mostrada en (2.16).

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (2.16)$$

Considerando una “presión modificada” definida por $P = p + \rho gh$, la ecuación (2.14) queda como en (2.17).

$$\begin{array}{ccccccc} \rho \frac{Dv}{Dt} & = & -\nabla P & -[\nabla \cdot \tau] & & & (2.17) \\ (1) & & (2) & (3) & & & \end{array}$$

Tasa de incremento de momentum por unidad de volumen	Tasa de adición de momentum por transporte molecular por unidad de volumen	Tasa de adición de momentum por transporte viscoso por unidad de volumen
--	--	--

2.2.2.2 Descomposición de Reynolds

La ecuación (2.17), para un flujo estacionario, puede ser escrita tensorialmente como en (2.18).

$$u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

Para trabajar con flujos turbulentos en estado estacionario es conveniente expresar las magnitudes del flujo en términos de la descomposición de Reynolds, mostrada en la ecuación (2.19). En ella, $\phi(\vec{x}, t)$ representa una magnitud instantánea cualquiera, $\bar{\phi}(\vec{x})$ es la media temporal de la magnitud, y $\phi'(\vec{x}, t)$ es la fluctuación de dicha magnitud cualquiera.

$$\phi(\vec{x}, t) = \bar{\phi}(\vec{x}) + \phi'(\vec{x}, t) \quad (2.19)$$

Así, aplicando esta descomposición a las variables de velocidad, temperatura y presión, se obtienen las ecuaciones (2.20), (2.21), (2.22) y (2.23), las cuales representan la descomposición del campo instantáneo en un campo medio más un campo fluctuante.

$$\text{Velocidad axial, } u: \quad u = \bar{u} + u' \quad (2.20)$$

$$\text{Velocidad transversal, } v: \quad v = \bar{v} + v' \quad (2.21)$$

$$\text{Temperatura, } T: \quad T = \bar{T} + T' \quad (2.22)$$

$$\text{Presión, } p: \quad p = \bar{p} + p' \quad (2.23)$$

Introduciendo los cambios de variables anteriores se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes y del calor Reynolds promediadas (RANS, según su sigla en inglés), cuyos términos turbulentos son los estudiados en este trabajo de titulación. Aplicando la descomposición de Reynolds tanto a la velocidad como a la presión, se obtiene la ecuación (2.24), la cual es casi idéntica a la ecuación (2.18) a excepción del último término del lado derecho de la igualdad, $\overline{\rho u'_i u'_j}$.

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

(1)

(2)

(3)

(4)

Tasa de incremento de momentum del flujo medio por unidad de volumen

Tasa de adición de momentum del flujo medio por convección por unidad de volumen

Tasa de adición de momentum del flujo medio por transporte molecular por unidad de volumen

Tasa de adición de momentum del flujo medio debido a fluctuaciones turbulentas

A este último término se le llama tensor de esfuerzos de Reynolds, cuyos componentes se muestran en la ecuación (2.25). Los términos de la diagonal del tensor representan los esfuerzos normales, mientras que el resto son esfuerzos de corte. Los términos $\overline{u'v'}$ y $\overline{v'u'}$ son iguales entre sí, así como también $\overline{v'w'}$ con $\overline{w'v'}$ y $\overline{u'w'}$ con $\overline{w'u'}$.

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

En las ecuaciones (2.26) y (2.27) se muestran las componentes en 2-D de la ecuación (2.24) para las coordenadas \hat{x} e \hat{y} , respectivamente, donde μ representa la viscosidad dinámica del flujo.

$$\hat{x}: \quad \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{\rho u'^2}}{\partial x^2} + \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial y^2} \right) \quad (2.26)$$

$$\hat{y}: \quad \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{\rho v'u'}}{\partial y^2} + \frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial x^2} \right) \quad (2.27)$$

2.2.2.3 Interpretación física del esfuerzo de Reynolds

La expresión $\rho \overline{u'_i u'_j}$ dentro de la derivada del término (4), en la ecuación (2.24) se le puede llamar τ'_{ij} , poniendo la comilla para diferenciarlo del esfuerzo viscoso e indicar que depende de las fluctuaciones.

Agrupando los términos viscoso y turbulento de la ecuación (2.24), se obtiene la ecuación (2.28), en donde $\overline{\tau}_{ij}$ representa el esfuerzo viscoso para el flujo medio.

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau}_{ij} + \tau'_{ij}) \quad (2.28)$$

El término dentro del paréntesis se puede escribir de la forma (2.29), en donde τ_{ij} representa el esfuerzo cortante total actuando sobre el flujo medio [28].

$$\tau_{ij} = \overline{\tau}_{ij} + \tau'_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.29)$$

Como se dijo antes, el movimiento aleatorio de moléculas originan transferencia neta de momentum entre dos capas adyacentes de fluido [28]. Si los movimientos moleculares al azar originan una transferencia de momentum, es razonable pensar que fluctuaciones a gran escala también pueden generar transferencia neta de momento.

Existe una relación entre flujo macroscópico (grandes escalas) de momentum, fluctuaciones turbulentas y esfuerzos de corte. Considerando el término $\overline{\rho u'_i u'_j}$, se ha observado que la presencia de las fluctuaciones turbulentas contribuyen a un flujo medio de momento-j en la dirección \hat{i} , por unidad de área. El signo del término indica si dicho flujo sigue el sentido positivo o negativo de la dirección del campo de momentum que genera el flujo. La analogía más cercana entre intercambio molecular de momento en el flujo laminar y el intercambio de momento en el flujo turbulento sugiere que se tome el término $\overline{\rho u'_i u'_j}$ como un esfuerzo cortante “aparente”.

Se puede considerar, entonces, al esfuerzo de Reynolds como un nuevo esfuerzo “aparente” sobre una partícula de fluido, producto de la turbulencia, que contribuye al esfuerzo cortante total. Se le llama “aparente” debido a que no es un esfuerzo, sino más bien un flujo de momentum medio que contribuye o no al flujo medio, causado por fluctuaciones turbulentas [14]. Sin embargo, sus efectos son capturados satisfactoriamente al pretender que es un esfuerzo. El término $\overline{\rho u'_i u'_j}$ representa un flujo de momentum convectivo en la dirección \hat{j} , dirigido hacia la dirección \hat{i} por un traspaso convectivo (similar al transporte de momentum convectivo descrito para el caso laminar en la sección 2.2.1.2). Si es positivo, se mueve en el sentido positivo de \hat{i} ; en caso contrario, se mueve en sentido negativo a la dirección del momento en \hat{i} . Físicamente, la correlación del esfuerzo de Reynolds representa el valor medio del transporte de momentum medio debido a un campo de velocidades fluctuantes, por unidad de área.

Entonces, en la ecuación (2.24) del balance de momentum medio, la divergencia del término denominado “esfuerzo de Reynolds” (término (4)) se asocia a una tasa de transferencia convectiva de momentum debido a movimientos aleatorios de paquetes fluidos macroscópicos (*eddies* o torbellinos). Para un valor negativo de la divergencia del esfuerzo de Reynolds, la tasa de incremento de momentum medio (del flujo medio) disminuye debido a un aumento en el transporte convectivo turbulento, por un traspaso de momentum desde el flujo medio al turbulento. En caso contrario, para un valor positivo de la divergencia del esfuerzo, aumenta la tasa de momentum medio debido a una contribución por parte del momentum generado por el flujo turbulento [29].

El mecanismo de transporte de momentum planteado anteriormente fue propuesto por Prandtl, asumiendo que el momentum es acarreado desde un punto a otro debido a desplazamientos aleatorios de partículas, sin ser modificado. No obstante, Bernard [30] plantea que el punto de vista desde la ley de gradiente es inherentemente insuficiente, puesto que es contradictorio que el momentum se transporte sin sufrir cambio alguno. Es por ello que se han planteado otras formas de interpretar el mecanismo que explica la existencia del esfuerzo de Reynolds, los cuales utilizan aproximaciones no locales para el transporte de desplazamientos que dependen de distribuciones del gradiente de velocidad media. Un segundo mecanismo de transporte consiste en que las partículas fluidas experimentan aceleraciones y desaceleraciones sistemáticas [31]. Esto genera reducciones en el esfuerzo de Reynolds debido a las desaceleraciones/aceleraciones sufridas en los cambios de dirección en movimientos espiralados. Ambos mecanismos de transporte, el de

desplazamiento de partículas y el de aceleraciones/desaceleraciones, están asociados con la dinámica de estructuras vorticiales en una región de pared. Bernard [32] ha demostrado el potencial para explicar la física del esfuerzo de Reynolds, la cual puede venir desde el análisis del paso de partículas en un flujo turbulento mediante una descomposición Lagrangiana.

2.2.3 Transporte turbulento de calor

Para calcular el campo de temperaturas en un fluido incompresible cualquiera, se utiliza la ecuación de energía mostrada en (2.30). En ella, C_p corresponde al calor específico a presión constante; ϕ_v se muestra en (2.31) y corresponde al término de disipación viscosa; Q_r es el calor recibido por radiación, por unidad de volumen y tiempo; y Q_q representa el calor que aparece al interior del fluido, debido a una transformación química por unidad de volumen y tiempo.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \phi_v + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q_r + Q_q \quad (2.30)$$

$$\phi_v = \sum \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2.31)$$

Al observar la ecuación (2.30) sin los términos de disipación viscosa, radiación y de generación interna de calor, se obtiene una ecuación similar a la de transporte de un escalar variable debido a un flujo de momentum, mostrada en (2.32).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2.32)$$

En la ecuación (2.32), ϕ corresponde a cualquier escalar pasivo, como la temperatura, especies químicas o contaminantes, en un flujo con D como su coeficiente de difusión apropiado.

Similarmente, la ecuación (2.32) se muestra en (2.33) luego de descomponer la variable ϕ en sus componentes media y fluctuante.

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} - \overline{\phi' u_i'} \right) \quad (2.33)$$

El término $\overline{\phi' u_i'}$ representa el transporte del escalar ϕ en la dirección del flujo de momentum ρu_i debido a la existencia de fluctuaciones en el flujo [29].

Considerando ϕ como la temperatura y aplicándole la descomposición de Reynolds, mostrada en (2.22), asumiendo la no generación de calor interno, y considerando un flujo estacionario, se obtiene la ecuación (2.34), cuyo término ϕ_v se muestra en (2.35).

$$\rho C_p u_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \underbrace{\varphi_v}_{(1)} + \underbrace{Q_r}_{(3)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right)}_{(4)} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \rho C_p \overline{u_i' T'}}_{(5)} \quad (2.34)$$

$$\varphi_v = \sum \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 + \sum \mu \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2.35)$$

El significado de cada término de la ecuación (2.33) se muestra a continuación:

- | | | |
|-----|--|--|
| (1) | $\rho C_p u_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}$ | : Tasa de incremento de calor por convección por unidad de volumen |
| (2) | φ_v | : Tasa de adición de calor por disipación viscosa por unidad de volumen |
| (3) | Q_r | : Tasa de adición de calor por radiación por unidad de volumen |
| (4) | $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right)$ | : Tasa de adición de calor por conducción por unidad de volumen |
| (5) | $-\frac{\partial \rho C_p \overline{u_i' T'}}{\partial x_i}$ | : Tasa de adición de calor por fluctuaciones turbulentas por unidad de volumen |

Nuevamente, la ecuación (2.34) difiere de la ecuación mostrada en (2.30) debido al término (5) de (2.34). Este término se denomina flujo de calor turbulento o de Reynolds y se puede escribir como (2.36).

$$Q_i' = \rho C_p \overline{u_i' T'} \quad (2.36)$$

Agrupando aquel último término con el de transmisión de calor conductivo, se puede definir una nueva ecuación para el flujo de calor, mostrada en (2.37). El signo menos significa que el flujo de calor es considerado como positivo a medida que el gradiente de temperatura disminuye, es decir, que va de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura [15].

$$Q_i = \bar{Q}_i - Q_i' = -k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} + \rho C_p \overline{u_i' T'} \quad (2.37)$$

Por lo tanto, el término $\rho C_p \overline{u_i' T'}$ indica el transporte de calor en la dirección positiva del momentum ρu_i , cuando posee signo positiva, y en la dirección negativa, cuando es negativo.

Se puede considerar que el efecto de la turbulencia consiste en añadir al flujo de calor por conducción (primer término de ecuación (2.37)) expresada por la ley de Fourier, un nuevo término que representa el transporte de calor por fluctuaciones turbulentas.

En la ecuación (2.34), la derivada del flujo de calor de Reynolds, correspondiente al término (5), indica si se adiciona calor al calor total del flujo medio, debido a la existencia de perturbaciones que provoquen el desplazamiento del flujo calor en la dirección del campo de momentum. Si es positivo, las fluctuaciones turbulentas contribuyen al incremento de calor del flujo medio. Por el contrario, si es negativo es el flujo medio el que cede calor al flujo turbulento, disminuyendo así su tasa de incremento. Es decir, las fluctuaciones le quitan calor al flujo medio.

En particular, el término $\overline{v'T'}$ es de gran importancia, pues indica que existe transporte de momentum transversal por donde pudiera haber fugas de calor desde el lado confinado al lado protegido.

En la ecuación (2.38) se presenta la ecuación extendida de tasa de incremento de calor (ecuación (2.33) en coordenadas cartesianas [33]).

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) &= k \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) - \rho C_p \left(\frac{\partial \overline{u'T'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'T'}}{\partial y} \right) \\ &+ \mu \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right] \\ &+ \mu \left[2 \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right) + 4 \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right) + 2 \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.38)$$

En las ecuaciones (2.39) y (2.40) se presenta una versión extendida del flujo de calor total para cada coordenada cartesiana, mostrado en la ecuación (2.37).

$$\hat{x}: \quad Q_x = \bar{Q}_x - Q'_x = -k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \rho C_p \overline{u'T'} \quad (2.39)$$

$$\hat{y}: \quad Q_y = \bar{Q}_y - Q'_y = -k \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \rho C_p \overline{v'T'} \quad (2.40)$$

2.3 Jet plano en impacto

Un jet plano en impacto corresponde a un flujo de fluido que emerge desde una boquilla rectangular hacia un ambiente generalmente quieto, y que impacta una superficie plana, como se muestra en la Figura 2.9. Como se puede observar en la imagen, poseen una estructura de flujo inestable, turbulenta y caótica.

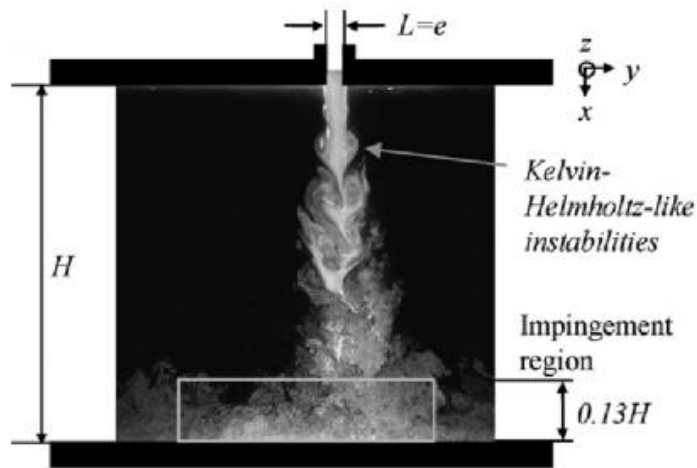


Figura 2.9: Ejemplo de un perfil de un jet plano turbulento en impacto. Fuente: [34]

2.3.1 Parámetros geométricos y cinemáticos

Para el caso del jet plano, la boquilla posee una forma rectangular y generalmente se caracteriza por una razón de aspecto igual a L/e , con L , largo de la boquilla. Si la razón de aspecto es mayor que 20, el flujo que sale de la boquilla puede ser considerado bidimensional, por lo que las magnitudes medias obtenidas en un plano $x - y$ son similares a la de los planos paralelos [35].

Según Pope [29], la dirección dominante del flujo medio es \hat{x} , la coordenada cruzada al flujo es \hat{y} , y estadísticamente son independientes de la coordenada \hat{z} . J. C. Elicer et al. [4], en una simulación numérica para un estudio de confinamiento de calor usando cortinas de aire, utilizando un modelo de Esfuerzo de Reynolds (o “RMS” por sus siglas en inglés), encontró que la estructura del flujo era esencialmente en dos dimensiones.

Por otro lado, se puede definir la razón de apertura H/e , donde H es la distancia entre la boquilla y la superficie de impacto del jet.

También, uno de los principales parámetros cinemáticos de un jet plano turbulento es su velocidad media U_0 a la salida de la boquilla. Para el caso turbulento, el perfil de velocidad media a la salida de la boquilla es prácticamente plano, salvo en los bordes producto de los efectos de pared, como se muestra en la Figura 2.10.

Entonces, se puede definir el número de Reynolds del jet como en la ecuación (2.41).

$$Re = \frac{U_0 e}{\nu} \quad (2.41)$$

En ella, e corresponde al ancho de la boquilla del jet y ν es la viscosidad cinemática del fluido que compone el jet.

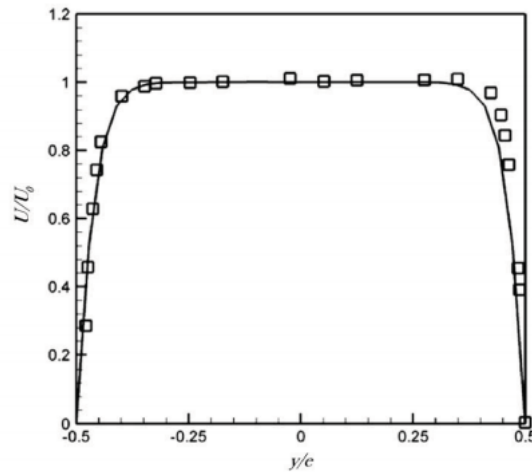


Figura 2.10: Perfil axial de velocidades a la salida de la boquilla. Fuente: [13]

Al considerar un flujo que emerge de manera constante desde una boquilla rectangular, de razón de aspecto L/e , generando un perfil de velocidad U_0 aproximadamente plano, éste fluirá desde la boquilla hacia un ambiente que se encuentra en reposo en el infinito (sectores muy lejanos al jet). Por lo tanto, manteniendo el sistema de coordenadas mencionado anteriormente, se tiene que el flujo es estadísticamente estacionario. Es decir, sus valores estadísticos no varían en el tiempo [9].

2.3.2 Zonas de un jet en impacto

En un jet plano en impacto se pueden reconocer cuatro zonas características. Cada una se distingue de la otra debido a los distintos comportamientos que se aprecian a lo largo del jet, los que permiten describir la forma del flujo en cada zona. En la Figura 2.11 se muestra una representación de cada una de las regiones, descritas a continuación.

- A. **Zona Potencial:** Es la región contigua a la boquilla y se caracteriza por delimitar una zona llamada “cono potencial”, en la que la velocidad del jet es constante e igual a la velocidad de salida del jet, U_0 . Su longitud es de 5 a 8 veces el ancho de la boquilla (entre $x/H=0.25$ y 0.4). En esta zona, la transferencia de calor en la dirección transversal es prácticamente nula [36].
- B. **Zona de Transición:** Es la región a continuación de la zona potencial, en donde comienzan a aparecer inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz en las zonas de capas de mezcla debido a mayores interacciones con el medio [37]. Sin embargo, el transporte de calor turbulento es despreciable.

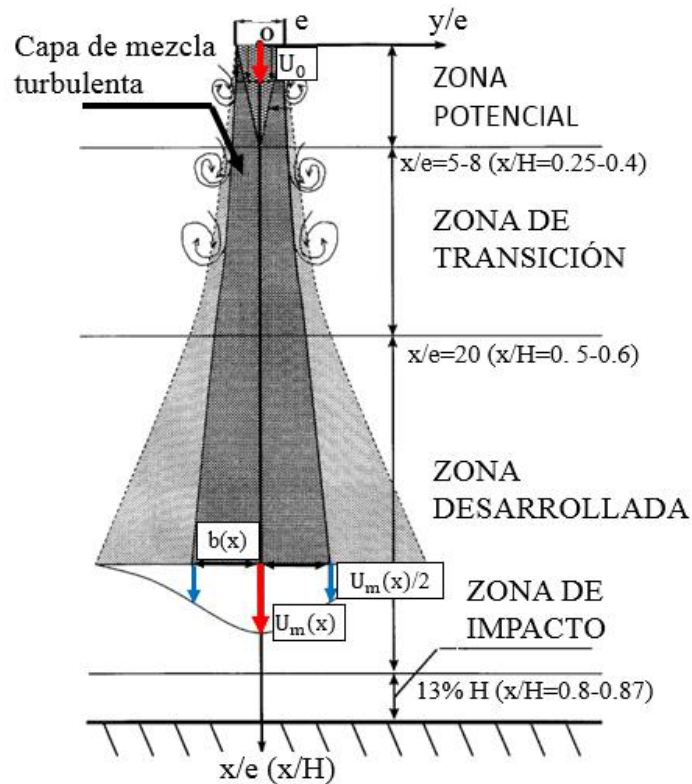


Figura 2.11: Zonas de un jet turbulento plano en impacto. Fuente: Modificación a partir de [38]

- C. **Zona Desarrollada:** Es la región donde aumenta el ancho del jet considerablemente y donde existe la auto-similitud como característica del jet. Comienza luego de $20e$, entre $x/H=0.5$ y 0.6 , y se caracteriza por tener una turbulencia completamente desarrollada.
- D. **Zona de Impacto:** Es la zona adyacente a la superficie de impacto y, según Loubière [34], corresponde al 30% de la altura del jet H , es decir, a partir de $x/H=0.87$ hasta el nivel de contacto con el suelo. En esta región, el jet impacta la superficie, expandiéndose hacia los lados, perdiendo su forma original. La turbulencia sigue siendo elevada debido a la formación de estructuras vorticiales secundarias de tipo Göertler [1].

2.3.3 Semi-ancho y Leyes de similitud

Se define el semiancho del jet, $b(x)$, como la distancia transversal desde el punto de mayor velocidad axial en el perfil de velocidades, $U_{m\acute{a}x}(x)$, hasta el punto en donde ésta se reduce a la mitad, $U_{m\acute{a}x}(x)/2$. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 2.12.

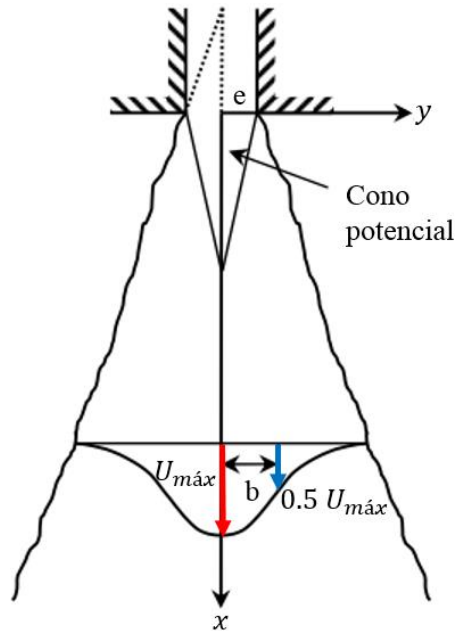


Figura 2.12: Representación del semi-ancho en un jet turbulento. Fuente: [39]

La similitud es un concepto importante que permite obtener buenas caracterizaciones del flujo en cuestión. Que un flujo sea autosimilar significa que los perfiles del flujo tienen la misma forma si es que son adimensionalizados usando variables adecuadas. Es decir, aguas abajo su comportamiento depende de propiedades locales y no del historial del flujo.

Numerosos autores describen al jet plano como auto-similar para su velocidad media y sus esfuerzos de Reynolds en la zona desarrollada [11]. Usando $U_{máx}(x)$ y $b(x)$ como magnitudes de normalización, se puede obtener un solo perfil representativo para los distintos planos verticales del jet. Así, los perfiles $U/U_{máx}$ y $\overline{u'_i u'_j}/U_{máx}^2(x)$ en función de $y/b(x)$ se convierten en auto-similares, es decir, independientes de la coordenada x .

Según Rajaratnam [40], se cumplen las relaciones (2.42) y (2.43) en la zona desarrollada de un jet plano turbulento.

$$U_m(x) \propto \frac{1}{\sqrt{x}} \quad (2.42)$$

$$b(x) \propto x \quad (2.43)$$

En la Figura 2.13 se observa un ejemplo de auto-similitud, mostrando la diferencia entre perfiles de velocidad normalizados y sin normalizar.

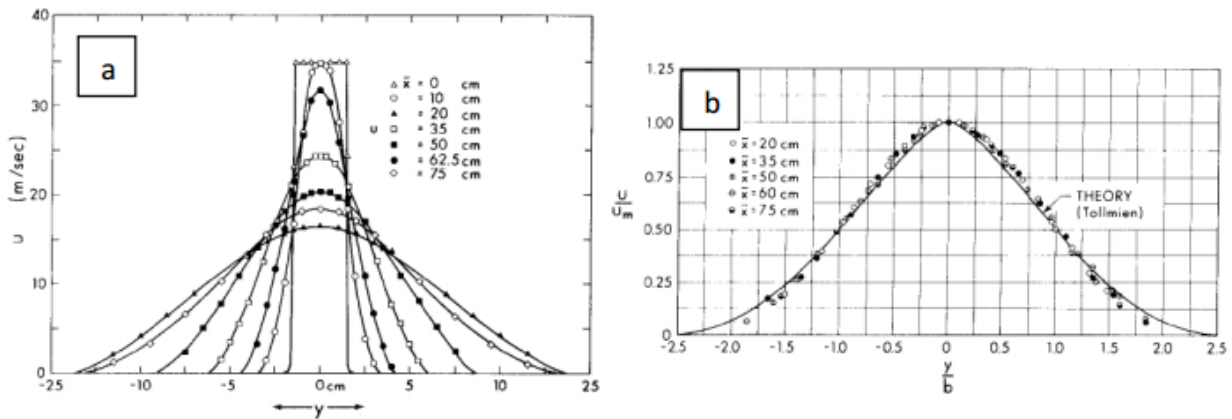


Figura 2.13: Perfiles de velocidad: a) Sin normalizar, b) Normalizados. Fuente: [35]

2.3.4 Capas de mezcla (*Mixing Layer*) y Línea central de la cortina o “*centerline*”

La capa de mezcla o *mixing layer* es la formada en la interface de dos flujos moviéndose a diferentes velocidades, como se muestra en la Figura 2.14. En el primer punto de encuentro entre los dos flujos hay una discontinuidad en la velocidad y, aguas abajo, la discontinuidad se desvanece debido al resultado de la difusión turbulenta en una distribución suave de velocidad. Una característica del espesor de capa de mezcla es definido como la diferencia entre los valores de y/x en donde la relación mostrada en la ecuación se encuentra entre 9/10 y 1/10 [29].

$$0.1 < \frac{(U - U_2)^2}{(U_1 - U_2)^2} < 0.9 \quad (2.44)$$

En la ecuación (2.44), U_1 y U_2 corresponden a las velocidades de las dos capas. Luego, el ancho de capa de mezcla $\delta(x)$ corresponde a la diferencia entre las posiciones ($y_{0.1} - y_{0.9}$) en las cuales se cumple la desigualdad mencionada.

Se forma una capa de mezcla en los bordes de un jet plano [29]. Además, se puede considerar que un jet plano es resultado de la unión de dos capas de mezcla [41].

Por otro lado, la línea central de una cortina compuesta por un jet en impacto (conocida también como “*centerline*” en inglés) corresponde a la línea de máxima velocidad del jet. Para un jet simétrico, es la línea que divide al jet exactamente a la mitad, como se observa en la Figura 2.12.

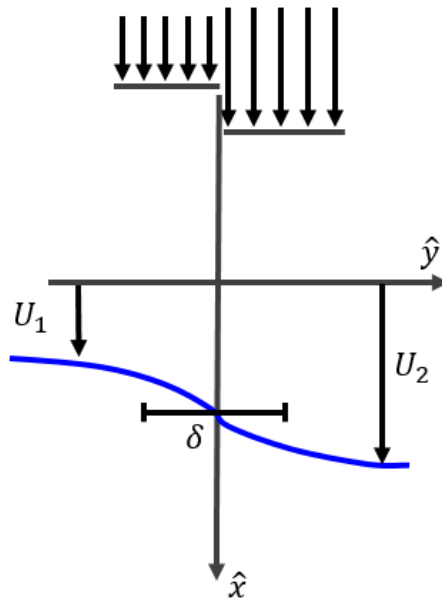


Figura 2.14: Ejemplo de capa de mezcla o *mixing layer* plana. Fuente: Elaboración propia en base a [35]

2.3.5 Configuración Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF)

Esta configuración consiste en una cortina que descarga dos chorros de aire contiguos y paralelos entre sí, que distintas velocidad y temperatura. Esta configuración ha sido justificada en diversos estudios anteriores [42][4][34] que prueban la habilidad del arreglo para confinar el calor liberado desde una fuente de calor intenso, como un incendio, ubicada entre dos cortinas de aire DJ-DF dentro de un túnel. En ellos, el jet caliente proviene de la recirculación del ambiente caliente del área confinada o encerrada, mientras que el frío está compuesto por aire tomado desde el exterior del túnel y es el que está en contacto con el área a proteger.

Ambos jets conforman un único jet aguas abajo, con diferentes características y tendiendo a ser asimétrico, por lo que la razón de aspecto de la configuración corresponde a $H/2e$ [13]. La línea “*centerline*” para una cortina con esta configuración corresponde a la línea central entre los dos jets iniciales y luego a la de máxima velocidad del jet unificado. En la Figura 2.15 se muestra un ejemplo de la formación de un único jet luego de la unificación de los dos jets iniciales. En la imagen ambos jets poseen el mismo perfil de velocidad inicial pero distintas temperaturas, por lo que se observa la asimetría.

En un jet plano en impacto, el flujo predominante es turbulento debido a que la interacción de él con la boquilla, con la superficie de impacto y con el ambiente, produce inestabilidades hidrodinámicas que conducen a la turbulencia [11]. En una cortina de aire DJ-DF, tanto la placa de separación entre las boquillas que inyectan los jets, como las diferentes características de los jets que la componen, contribuyen también a la producción de torbellinos en la zona de interacción

entre ellos. Por esta razón, es necesario estudiar este fenómeno para determinar si la turbulencia observada contribuye o no a la capacidad de confinamiento esperada.

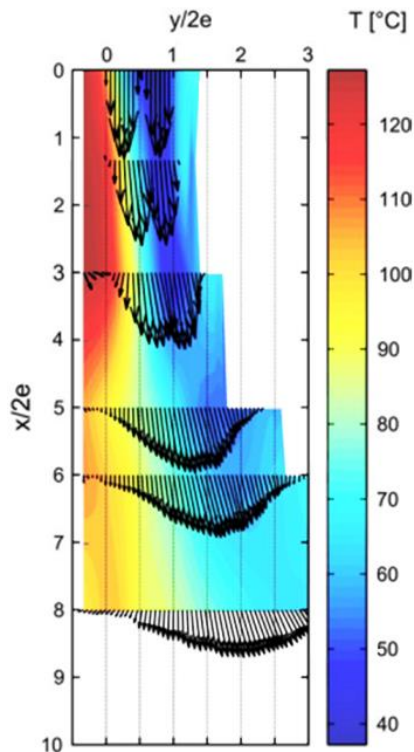


Figura 2.15: Perfil de velocidad superpuesto a un campo de temperaturas en un jet. Ejemplo de formación de un único jet a partir de dos jets con diferentes características iniciales. En el caso mostrado, se observan dos jets iniciales con igual velocidad y distintas temperaturas. Fuente: [42]

2.4 Antecedentes de la simulación base

El presente trabajo de memoria utiliza datos numéricos obtenidos de una simulación guardada, hecha previamente por otro tesista. A continuación se presenta un resumen de ella. Para más detalles, visitar la referencia [13].

La simulación corresponde a una modelación numérica 3-D de cortinas de aire, en la configuración DJ-DF, para estudiar su capacidad de confinamiento de calor al interior de túneles utilizando un modelo LES de turbulencia en el software ANSYS Fluent. Se efectuó en base a un trabajo experimental realizado paralelamente en una instalación a escala 1:1 de un túnel vial [12].

La modelo de la instalación experimental posee 3 [m] de largo y 0,3 [m] de profundidad. La zona de interés, donde se encuentran las cortinas de aire, posee una altura $H = 0,15$ [m] y está ubicada inmediatamente debajo de la región de inyección de la cortina. Un esquema de la geometría que

representa la instalación se muestra en la Figura 2.16, cuyas dimensiones están en función de la altura H del túnel. La fuente térmica se ubica cerca de la cortina izquierda y es representada por una sección del suelo del túnel, siendo la distancia entre el centro de la fuente y el eje de simetría de la cortina izquierda de $0,25$ [m]. Por otra parte, cada cortina es eyectada por dos boquillas cuyo espesor es $e = 0,75$ [mm], las cuales están separadas por una placa de espesor $0,5$ [mm]. La cortina analizada tanto en los estudios anteriores como en el presente trabajo es la más cercana a la fuente de calor. Es decir, la que está ubicada a su lado izquierdo.

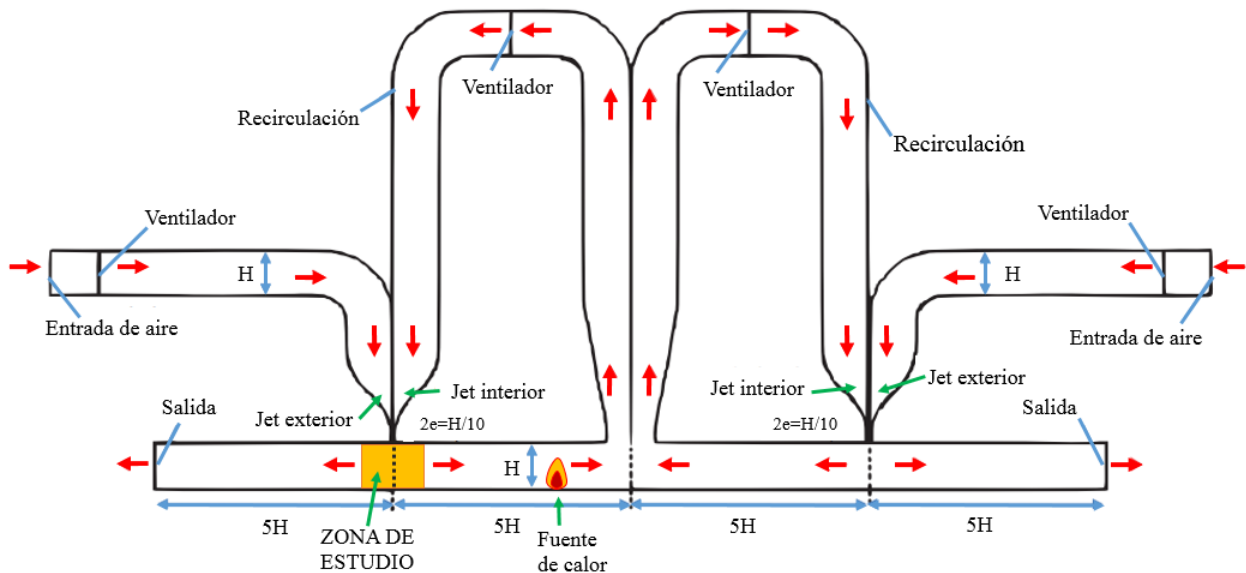


Figura 2.16: Esquema referencial de la geometría representativa de la instalación experimental. Las dimensiones están en función de la altura H . Fuente: Elaboración propia en base a [13]

La zona de interés, mostrada por un rectángulo naranja en la Figura 2.16, tiene un ancho de 20 [cm], una altura igual a la del túnel ($0,15$ [cm]) y está ubicada en el plano $z=0,15$ [cm]. Se encuentra debajo de la boquilla izquierda con respecto a la posición de la fuente de calor y posee una malla diferente al resto de la instalación modelada.

2.4.1 Mallado de la zona de interés

El mallado de la región de interés, mostrada en la Figura 2.17, posee 6 zonas con diferentes espaciados de malla.

La zona 3 y 6, ambas de color azul en la Figura 2.17, son las más finas con elementos de $0,5 \times 1$ [mm], en dirección horizontal y vertical, respectivamente. La zona 3 corresponde a la región ubicada inmediatamente debajo de los eyectores, mientras que la zona 6 corresponde a la zona de impacto y posee parte de las áreas confinada y protegida. Las zonas 2 y 4 (color rojo) son las

ubicadas a ambos lados de la zona 3 y poseen una malla más gruesa; sus elementos son de 1×2 [mm] (dirección horizontal y vertical). Finalmente, las zonas verdes 1 y 5 son las más gruesas y poseen elementos de tamaño 2×2 [mm]. El cambio de una zona a otra no es gradual, lo que obliga a tratar los datos numéricamente para obtener una malla uniforme.

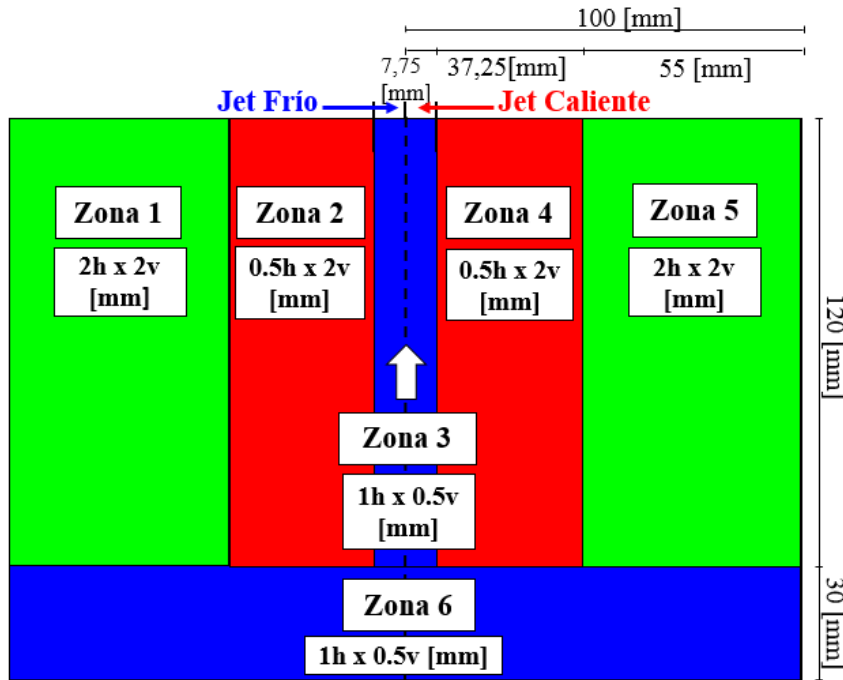


Figura 2.17: Mallado de la zona de estudio. Las medidas mostradas están en milímetros. Fuente: Elaboración propia

Debido a que la cortina es eyectada vertical hacia abajo, la convención de signos es la mostrada en la Figura 2.18, de manera de mantener la dirección principal de la cortina (dirección en que la cortina se desarrolla) como la coordenada \hat{x} . Con esto, la dirección transversal a la dirección de propagación de la cortina corresponde a la coordenada \hat{y} .

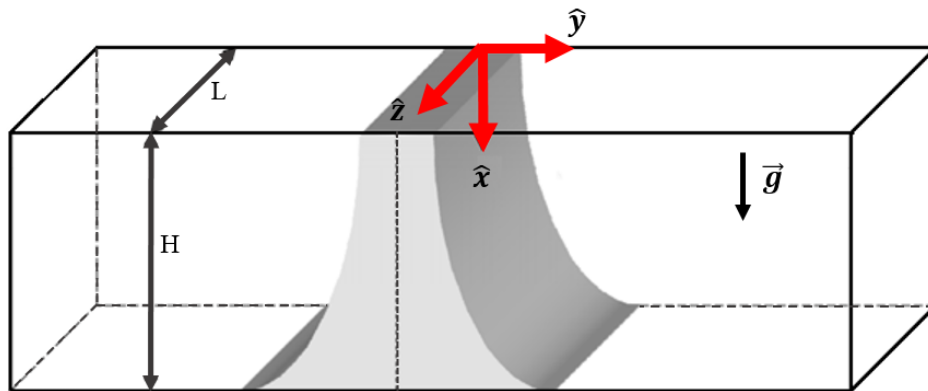


Figura 2.18: Dirección de ejes coordenados en la geometría utilizada para la cortina de aire en 3 dimensiones, mostrada en color gris. Fuente: Elaboración propia a partir de [13]

2.4.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales utilizadas en la simulación corresponden a las condiciones ambientales y se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Condiciones iniciales utilizadas en la simulación base. Fuente: Elaboración propia

Condición inicial	Valor	Unidad
Temperatura	20	[°C]
Presión	101.325	[Pa]
Velocidad	0	[m/s]

2.4.3 Condiciones de borde

En las salidas del túnel de la Figura 2.16, se consideraron valores de presión y temperatura igual a 101.325 [Pa] y 20 [°C], respectivamente. Los ventiladores fueron modelados como una diferencia de presión en una superficie. Para obtener una velocidad de salida del jet de 5,3 [m/s], aproximadamente, se impuso un salto de presión de 16 [Pa], mientras que para lograr una velocidad aproximada de 3,3 [m/s] impuso uno de 6,1 [Pa].

Para la fuente de calor, impuso un flujo de calor superficial de 46.670 [W/m²], que corresponde a una potencia de 1.400 [W] aproximadamente. Consideró las paredes del túnel como disipativas (no adiabáticas).

Finalmente, consideró una disipación de calor hacia el ambiente solo por convección natural. Utilizó un valor de 5 [M/m²K] para el coeficiente de transferencia de calor, y una temperatura del flujo libre de 20 [°C].

2.4.4 Procedimiento seguido en la simulación

Primero, se realizaron simulaciones estacionarias de los distintos casos a estudiar con el modelo $k - \varepsilon$, de manera de lograr condiciones iniciales realistas para el modelo. Luego, se cambió el tipo de simulación a transiente, manteniendo el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$; considerando un paso de tiempo constante de $5 \cdot 10^{-3}$ [s] y simulando hasta los 100 [s]. A continuación, se modificó el modelo turbulento aplicado al modelo LES, con un paso de tiempo constante bastante pequeño para lograr estabilizar las simulaciones ($5 \cdot 10^{-5}$ [s], simulando 0,2 [s]). Posteriormente, se incrementó el paso de tiempo a $3 \cdot 10^{-4}$ [s], simulando entre 60-90 [s] para lograr la estabilización estadística de las soluciones. Finalmente, la recopilación de datos se efectuó durante 10 [s]. El número total de iteraciones fue mayor a 200.000 y el tiempo simulado fue alrededor de 180 [s].

En el modelo LES, se consideró un valor fijo $C_s=0,12$ para la constante de Smagorinsky-Lilly, debido a que el modelo dinámico producía inestabilidades en el cálculo. Para la transferencia de calor por radiación, se aplicó el modelo de ordenadas discretas (DO) debido a la no uniformidad del mallado en la zona de interés.

El método de solución utilizado fue el basado en la presión con una formulación de velocidad absoluta, considerando una aceleración de gravedad igual a $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Esto, para incorporar los efectos de empuje térmico y de convección natural presentes por los cambios de densidad del aire, debido a la influencia de la temperatura. En cuanto a las propiedades del aire, se consideró una densidad dictaminada por la ley de gases ideales incompresibles.

Finalmente, el esquema de acoplamiento velocidad-presión utilizado fue SIMPLE. Para mayores detalles, visitar la referencia [13].

2.4.5 Información disponible a partir de la simulación

Los datos numéricos utilizados en este estudio corresponden a una simulación guardada, realizada previamente en un estudio anterior, como se mencionó previamente. Por lo que se cuenta solo con el último instante temporal de la simulación guardada. Debido a que los datos disponibles dependen de las variables guardadas durante la simulación (como las fluctuaciones dependientes del tiempo), se hace un listado con la información con la que se cuenta a partir de la simulación:

- Valores instantáneos de temperatura, T , y velocidad, \vec{u} , en sus tres componentes, u , v y w
- Valores medios de las tres componentes de velocidad, \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} , de la presión, \bar{p} , y de la temperatura, \bar{T}
- Valores RMS de las tres componentes de velocidad, $\sqrt{\overline{u'^2}}$, $\sqrt{\overline{v'^2}}$ y $\sqrt{\overline{w'^2}}$, y de la presión, $\sqrt{\overline{p'^2}}$
- Densidad ρ , conductividad térmica molecular, k , viscosidad dinámica molecular, μ , y calor específico a presión constante, C_p
- Esfuerzo de Reynolds resuelto, $\overline{u'v'}$
- Flujos de calor resueltos, $\overline{u'T'}$ y $\overline{v'T'}$
- Viscosidad turbulenta de escala de subgrilla, ν_{SGS}

2.4.6 Casos de estudio

En el presente trabajo se estudian 2 casos: el primero consiste en la utilización de una cortina de aire DJ-DF cuyo jet frío posee una velocidad mayor a la del jet caliente, mientras que en el segundo, el jet caliente es el que tiene una mayor velocidad respecto a la del jet frío. En ambas configuraciones los jets caliente y frío están siempre ubicados en contacto con la zona confinada y con el ambiente protegido, respectivamente. Estos corresponden a los casos 1A y 1B del trabajo previo de la referencia [13], y a los casos 1 y 2 del presente estudio, correspondientemente. En la Tabla 2.3 se muestran, con detalle, las características de cada caso.

Tabla 2.3: Casos de estudio

Variables	Caso 1	Caso 2	Unidad
Potencia de la fuente térmica	1.400,00	1.400,00	[W]
Velocidad del jet frío	5,15	3,19	[m/s]
Velocidad del jet caliente	3,65	5,59	[m/s]

Fuente: Elaboración propia.

3 Metodología

Para poder estudiar el confinamiento en las configuraciones aire propuestas, se deben estudiar los términos turbulentos de las ecuaciones (2.26), (2.27) y (2.38), correspondientes a las de balance de momentum axial, transversal y de energía, respectivamente. El procedimiento seguido para ello se detalla a continuación y, en la Figura 3.1, se presenta un diagrama de flujo del mismo.

- A. Extracción y análisis de datos numéricos provenientes de una simulación previa hecha en ANSYS Fluent, utilizada como base para este trabajo. Esto incluye:
 - a. Comprensión de la disposición física de los datos y de la malla bajo la cual fueron guardados previamente.
 - b. Identificación de posibles problemas de ordenamiento de datos y de la información extraída.
 - c. Implementación de soluciones frente a problemas encontrados. En caso de la detección de una malla no uniforme, implementación de métodos numéricos (interpolación) para transformarla en una malla uniforme.

- B. Estudio y aplicación del método numérico de diferencias finitas para el cálculo de los términos turbulentos, utilizando el software Matlab. Esto incluye:
 - a. Comparación de distintos esquemas de aplicación para el cálculo numérico diferencial.
 - b. Selección del esquema a utilizar.
 - c. Cálculo de los términos turbulentos aplicando esquema numérico seleccionado.

- C. Obtención de zonas geométricas principales de la cortina de aire. Esto considera:
 - a. Obtención de las capas de mezcla formadas entre el jet frío y el ambiente protegido, y entre el jet caliente y la zona confinada.
 - b. Obtención de la línea de intersección entre ambos jets.
 - c. Selección y aplicación de un método para obtener un rango geométrico de las capas de mezcla.

- D. Análisis de resultados obtenidos para determinar la influencia de los términos turbulentos en la existencia de fugas de calor en las diferentes configuraciones de cortinas de aire propuestas. Esto incluye:
 - a. Estudio de los campos de las variables.
 - b. Estudio de perfiles en distintos niveles de las cortinas de aire.
 - c. Estudio en zonas importantes de las cortinas de aire: capas de mezcla y línea central entre jets.

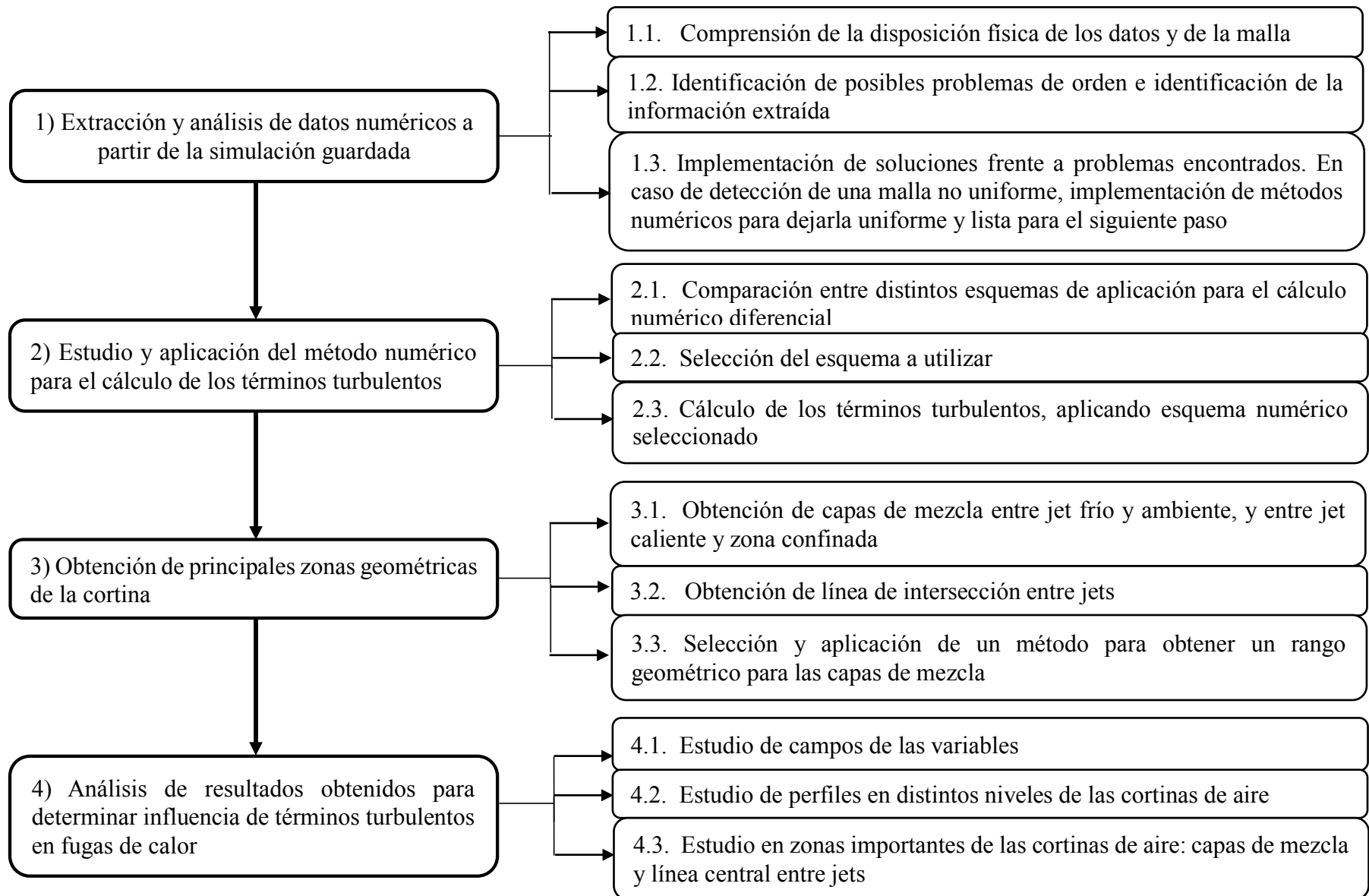


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología seguida para la elaboración del presente trabajo

4 Desarrollo

En este capítulo se presenta el desarrollo numérico realizado para la obtención de los términos turbulentos. Se presenta el análisis de los datos extraídos de la simulación previa, el estudio y selección del método numérico a aplicar para el cálculo de derivadas y los métodos utilizados para el cálculo de las principales geometrías de la cortina, correspondientes a las capas de mezcla, “centerline” y a las constantes de adimensionalización.

4.1 Análisis de los datos extraídos

La malla utilizada en la simulación previa, no era uniforme ni poseía un cambio gradual desde las zonas más finas a las más gruesas, como se puede observar en la Figura 4.1, por lo que fue infructífero intentar comprender su contenido extrayéndolos de la geometría completa. Por esta razón y para un mayor entendimiento de los mismos, se extrajeron por zona, lo que causó que se repitieran valores ubicados en las coordenadas de las líneas de contacto entre zonas contiguas.

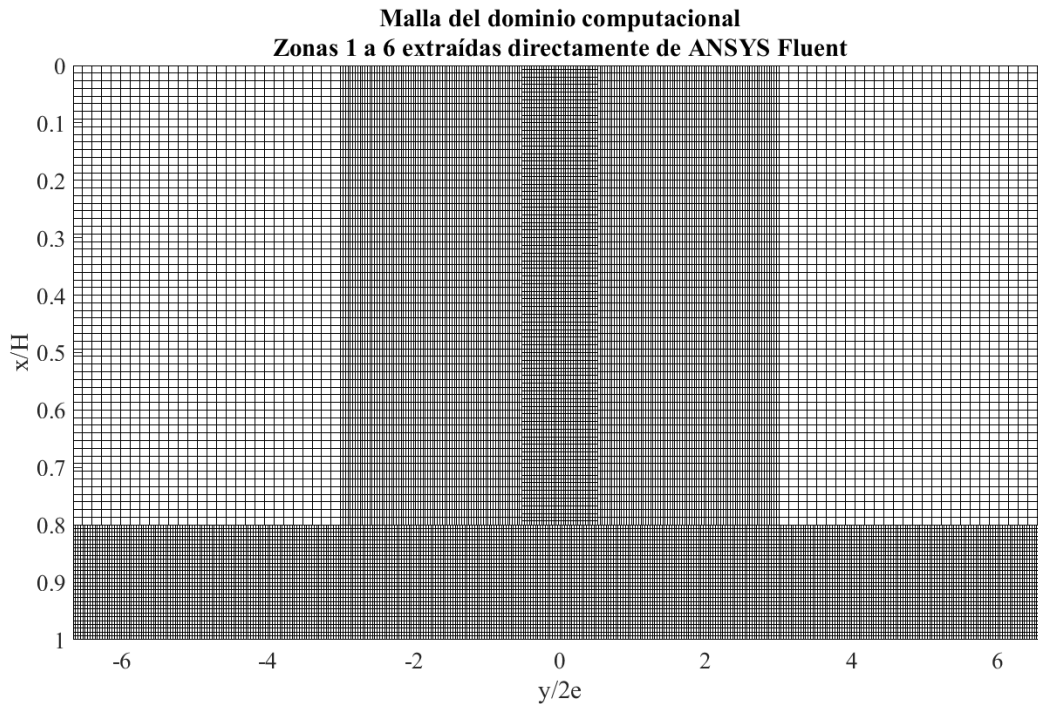


Figura 4.1: Malla computacional extraída de la simulación previa. Ambos ejes se muestran adimensionalizados: el eje transversal y , por el ancho de la boquilla de la cortina $2e$ y el eje axial x , por el largo del túnel H

Debido al cambio no gradual de las mallas no uniformes de cada zona, los valores de las variables estudiadas no eran los mismos en los nodos comunes entre zonas. Por lo cual, mediante un análisis cualitativo se detectaron los nodos que no correspondían a cada zona, obteniendo 6 matrices para cada variable extraída de la simulación.

Al calcular los términos turbulentos correspondientes a derivadas parciales, utilizando las 6 matrices mencionadas, se detectaron discontinuidades en las zonas de contacto entre malla que no estaban relacionadas con la física del problema, como se muestra en la Figura 4.2. En ella se observan discontinuidades en las regiones de contacto entre las zonas 2-3 y 3-4 en el cálculo de la derivada con respecto a y del esfuerzo de Reynolds.

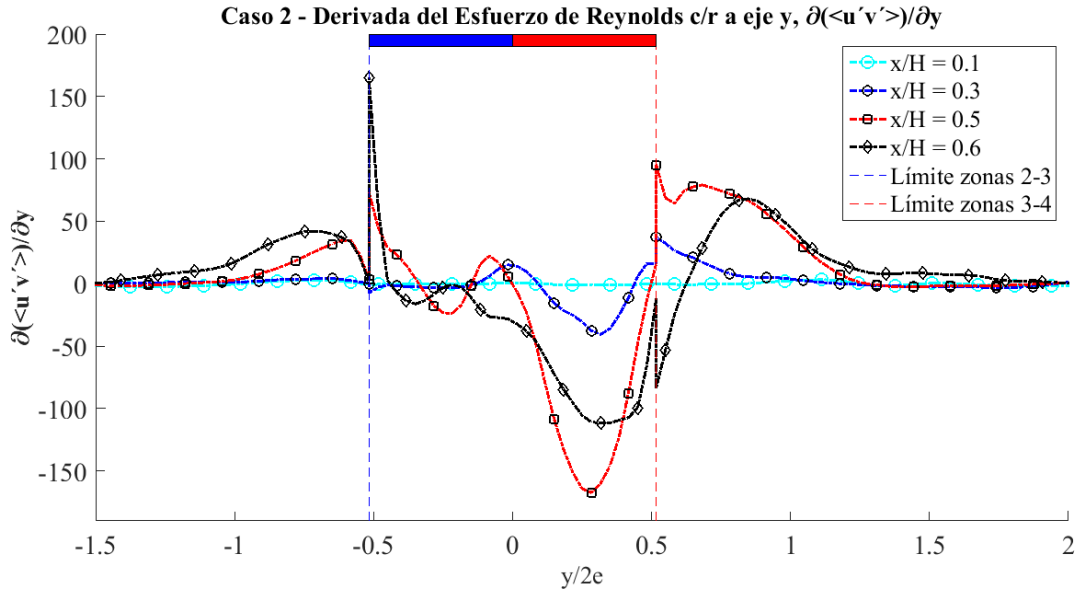


Figura 4.2: Derivada del esfuerzo de Reynolds respecto al eje y , calculando la derivada con datos extraídos directamente de la simulación, no suavizados – Caso 2

Por esta razón, se implementaron diferentes métodos para tratar de aminorar dichas discontinuidades.

I. Alisamiento luego del cálculo de derivadas

Se inició calculando las derivadas para luego suavizar las discontinuidades promediando los valores comunes en la zona de contacto, utilizando como nodo de contacto el de la malla más fina y luego el de la malla más gruesa, sin resultados positivos. Una muestra de esto se presenta en la Figura 4.3, en la cual se muestra la mejor de las tres opciones aplicadas mencionadas: la aplicación del promedio de los valores en la zona de contacto.

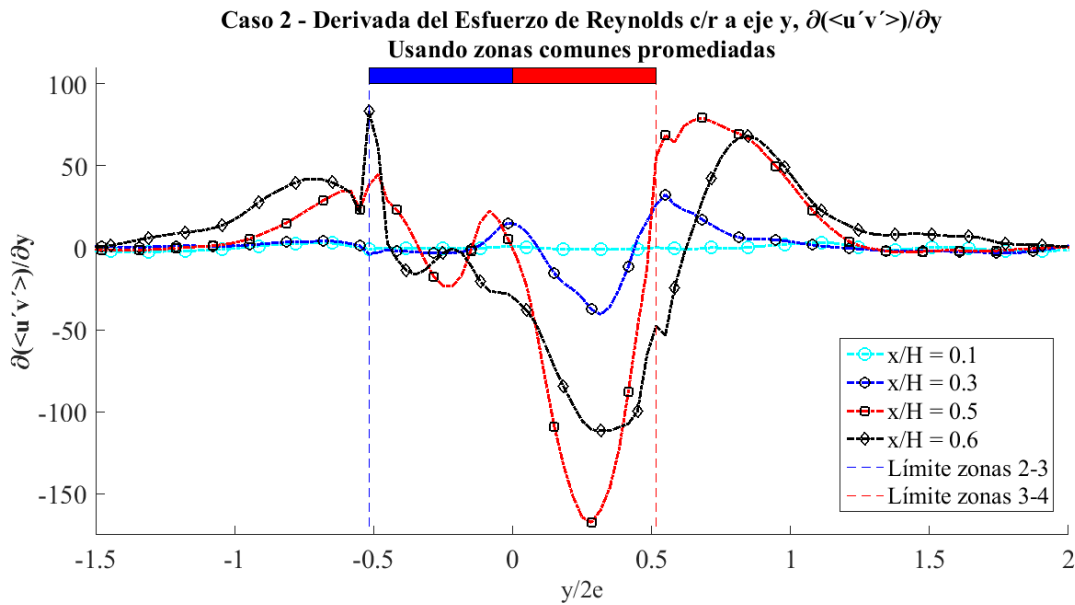


Figura 4.3: Derivada del esfuerzo de Reynolds respecto al eje transversal y , luego de utilizar el promedio entre los valores de los nodos comunes de las zonas en contacto – Caso 2

II. Alisamiento previo de los datos utilizando funciones “resample” e “interp2”

A pesar de que la malla de la zona 3 es bastante fina, la derivada castiga las discontinuidades producto de la no uniformidad de la malla, sin cambios graduales. Es por eso que se procedió a interpolar las zonas más gruesas para dejarlas con elementos del mismo tamaño de la malla más fina, perteneciente a las zonas 3 y 6, antes del cálculo de las derivadas. Se utilizaron y compararon dos funciones para ello: “resample” e “interp2”.

La función “resample” de Matlab se utilizó por medio de una función denominada “Afinar.m”, detallada en el Anexo C1, la cual era aplicable solo a las zonas 1 a 5 por dificultades de acoplamiento con la zona 6. Dicha función recibe como parámetros las matrices de variables a interpolar de las 5 zonas y entrega una matriz con una malla unificada de variables, y dos extras con las coordenadas axiales y transversales para la nueva malla.

La función “resample” aplica un filtro FIR “antialiasing” pasa baja a la columna de entrada y compensa el retardo introducido por el filtro. Utiliza dos parámetros P y Q , tal que si la razón $\frac{Q}{P} < 1$ se realiza una interpolación. En caso contrario, si se cumple que $\frac{Q}{P} > 1$ se realiza una decimación [43].

Se utilizaron diferentes parámetros, encontrando un mejor funcionamiento al seleccionar parámetros distintos en las interpolaciones vertical y horizontal, siendo $Q/P=2$ para la dirección vertical y $Q/P=4$ para la horizontal.

Actúa solo a lo largo de columnas, por lo que las matrices fueron traspuestas para poder aplicar la función. Para el acople final de las mallas interpoladas, se seleccionó el nodo de la malla más previamente más fina como nodo de la región de contacto. En ambos casos, se seleccionó el nodo de la malla más fina como nodo de la región de contacto entre zonas anteriormente no uniformes.

Paralelamente, se creó una función denominada “Afinaq.m” la cual utilizó la función “interp2” de Matlab de manera similar al uso de la función “resample”. El detalle de la función “Afinaq.m” se puede observar en el Anexo C2. Recibe como parámetros las matrices de las variables a interpolar de las zonas 1 a 5 y entrega 3 matrices unificadas, con elementos de tamaño más pequeño que el de la zona 3 (0.5 [mm] dirección vertical y 0.25 [mm] dirección horizontal): la matriz variables interpoladas y las de las coordenadas x e y asociadas a la nueva malla generada. Comienza creando vectores de coordenadas x e y originales para cada zona. Luego, utilizando la función “meshgrid”, crea matrices rectangulares con dimensiones idénticas a las de cada zona [44]. Nuevamente, antes del acople de la matriz resultante, a partir de la interpolación de las otras, se escogieron los nodos de la zona anteriormente más fina como nodos de contacto.

La función “interp2”($V_q = \text{interp2}(X, Y, V, X_q, Y_q)$) entrega valores interpolados de una función de dos variables en específicos puntos de consulta usando un método de interpolación lineal. Los resultados siempre pasan a través del muestreo original de la función. Las matrices X e Y contienen las coordenadas de los puntos de muestreo. La matriz V corresponde a la función de valores en cada punto de muestreo. X_q e Y_q contienen las coordenadas de los puntos de consulta.

En la Figura 4.4, en la cual se muestra una comparación entre los métodos “resample” e “interp2” aplicados antes del cálculo de la derivada.

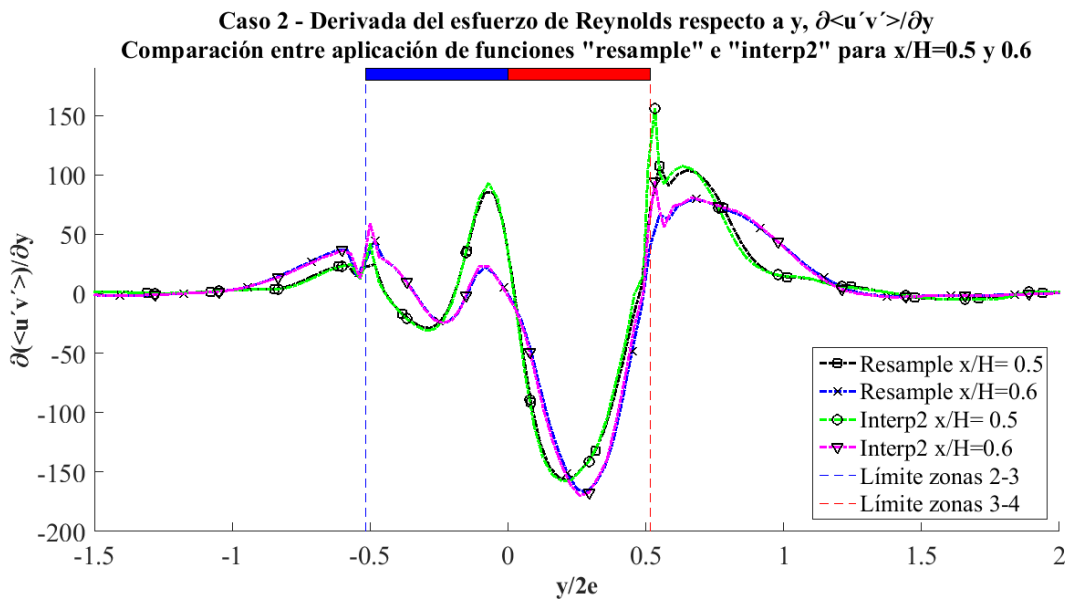


Figura 4.4: Comparación de aplicación de “resample” e “interp2” en el cálculo de la derivada del esfuerzo de Reynolds respecto a la coordenada transversal y para niveles $x/H=0.5$ y 0.6 – Caso 2

Se obtuvieron discontinuidades más leves respecto al primer método aplicado, como se puede observar en la Figura 4.4, siendo ligeramente menores con el uso de la función “resample”, en comparación con las de la función “interp2”. Sin embargo, ninguna de los dos métodos propuestos permitió una completa homogeneización de las 6 zonas, por lo que se escogió aplicar la función “interp2” inmediatamente luego del ordenamiento de los datos post-extracción de la simulación debido a la simplicidad de aplicación respecto al método “resample”.

III. Interpolación de las 6 zonas utilizando la función “interp2”

Finalmente, se interpolaron todas las zonas, utilizando la función “interp2.m” de la base de datos de Matlab, quedando una malla completamente uniforme con espaciados horizontal – vertical de 0.25 x 0.5 [mm]. El resultado final se puede observar en la Figura 4.5, cuyo código Matlab se muestra en el Apéndice C3.

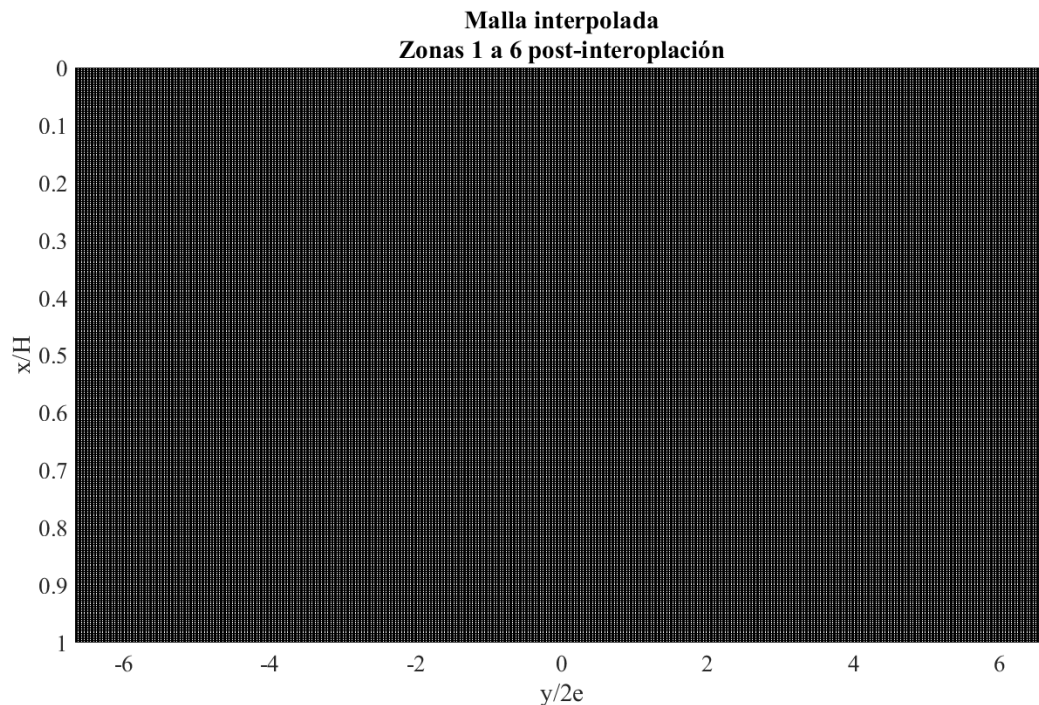


Figura 4.5: Malla final post-interpolación, cuyas distancias horizontal y vertical entre cada nodo son 0.25 [mm] y 0.5 [mm], respectivamente. Ambos ejes se muestran adimensionalizados: el eje transversal y , por el ancho de la boquilla de la cortina $2e$ y el eje axial x , por el largo del túnel H

El método de interpolación aplicado en la función “interp2” fue “spline”, de clase C^2 , la cual requiere más memoria que el método “cubic”, de clase C^1 , y cuatro puntos en cada dimensión. Por medio de ese método cada valor interpolado en un punto de consulta está basado en una interpolación cúbica de los valores de puntos vecinos de la malla en cada dimensión respectiva [45]. Está basada en un “spline cúbico” utilizando condiciones de borde “not-a-knot”.

Las condiciones finales naturales para un spline son las que se generan naturalmente desde soluciones a partir del cálculo de variaciones para un spline, tal como el caso de una viga flexible y delgada, por ejemplo. Estas condiciones de borde resultan ser cero en la segunda derivada de la curva sobre cada final del spline. Desafortunadamente, mientras esas condiciones de borde “naturales” son muy apropiadas para una viga flexible, son comúnmente inapropiadas para muchas otras formas curvas. Una mejor opción es forzar la tercera derivada a ser continua a través de los segundo y penúltimo puntos del spline. Esto es, como la tercera derivada de un cubo es una función constante, si esa tercera derivada es continua, entonces no hay quiebres entre todos esos dos segmentos en esos puntos. El nombre, entonces, deriva de la idea de que esos puntos en realidad no son puntos.

4.2 Modelo Numérico para el cálculo de términos turbulentos

Las ecuaciones (2.26), (2.27) y (2.38) son las que rigen la dinámica de fluidos turbulentos para los casos estudiados en este trabajo. Corresponden a ecuaciones diferenciales acopladas no lineales de segundo orden, cuyos términos deben ser calculados numéricamente.

Para obtener numéricamente las derivadas, se consideran tres esquemas de diferencias finitas de segundo orden [46], mostrados en las ecuaciones (4.1) a la (4.6). Los esquemas son:

- Diferencias finitas centrales, para los puntos ubicados en la zona media del dominio
- Diferencia finita lateral progresiva (o esquema *forward*), para los puntos donde comienza el mallado, tanto en la dirección axial como en la transversal
- Diferencia finita lateral regresiva (o esquema *backward*), en puntos donde termina el mallado, para ambas direcciones de la cortina

Se considera el avance según el sentido positivo de las direcciones transversal y axial a las cortinas utilizadas, es decir, de izquierda-derecha (horizontal) y superior-inferior (vertical) del mallado, respectivamente.

Se analizaron dos esquemas de diferencias finitas, uno de orden $O(h^2)$ y el segundo de orden $O(h^4)$, siendo h el tamaño de la malla. Es decir, se consideraron esquemas que necesitan tres y cinco puntos, respectivamente, para el cálculo de la derivada. Las ecuaciones representantes de cada esquema son mostradas a continuación por medio del ejemplo de aplicación en el cálculo de la derivada del campo de velocidad axial u . Los subíndices i y j corresponden a las direcciones axial (vertical) y transversal (horizontal), correspondientemente.

Esquema de diferencias finitas de orden $O(h^2)$: Derivada respecto a x_j

- Esquema central

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2h} + O(h^2) \quad (4.1)$$

- Esquema *forward*

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{-3 \cdot u_{ij} + 4 \cdot u_{i,j+1} - u_{i,j+2}}{2h} + O(h^2) \quad (4.2)$$

- Esquema *backward*

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{3 \cdot u_{ij} - 4 \cdot u_{i,j-1} + u_{i,j-2}}{2h} + O(h^2) \quad (4.3)$$

Esquema de diferencias finitas de orden $O(h^4)$: Derivada respecto a x_j

- Esquema central

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{-u_{i,j+2} + 8 \cdot u_{i,j+1} - 8 \cdot u_{i,j-1} + u_{i,j-2}}{12h} + O(h^4) \quad (4.4)$$

- Esquema *forward*

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{-25 \cdot u_{ij} + 48 \cdot u_{i,j+1} - 36 \cdot u_{i,j+2} + 16 \cdot u_{i,j+3} - 3 \cdot u_{i,j+4}}{12h} + O(h^4) \quad (4.5)$$

- Esquema *backward*

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{25 \cdot u_{ij} - 48 \cdot u_{i,j+1} + 36 \cdot u_{i,j+2} - 16 \cdot u_{i,j+3} + 3 \cdot u_{i,j+4}}{12h} + O(h^4) \quad (4.6)$$

A partir de los esquemas recién mostrados, se utilizó la función “Derivada.m”, mostrada en el Apéndice C4, para el cálculo de los términos turbulentos que incluyen derivadas parciales. La función calcula la derivada de orden $O(h^2)$ o $O(h^4)$ según un parámetro inicial ingresado para la elección del método a utilizar.

En la Figura 4.6 se observa una comparación entre los métodos analizados en la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, para 3 niveles de la cortina. A partir de ella, a simple vista, no se observa gran diferencia entre ambos métodos.

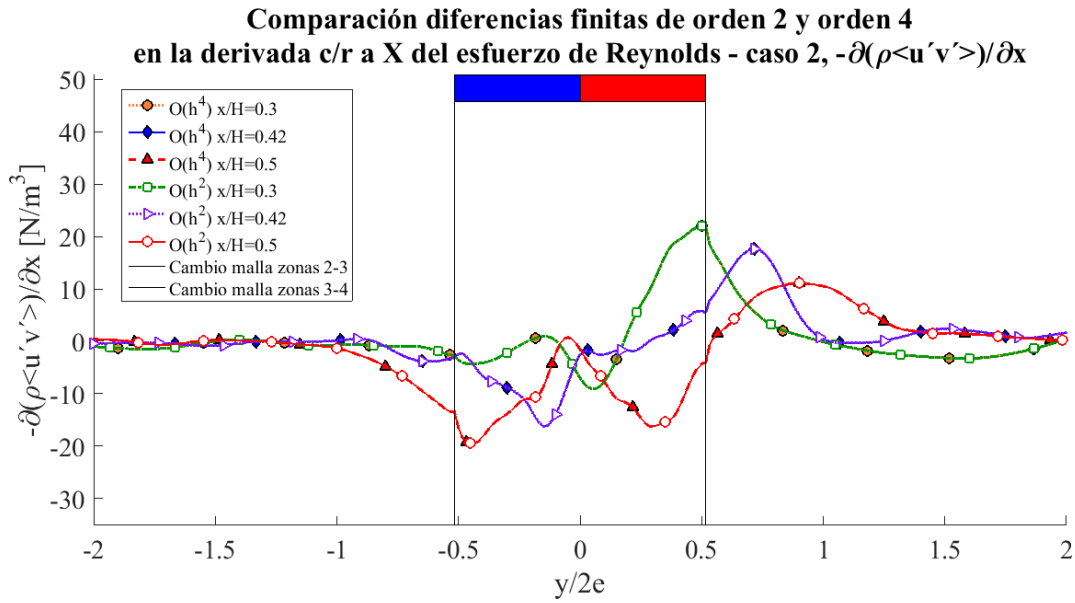


Figura 4.6: Comparación entre los métodos de diferencias finitas de orden $O(h^2)$ y $O(h^4)$, en 3 niveles de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, para el caso 2

Se procedió a calcular la diferencia porcentual de los valores de la derivada del esfuerzo de Reynolds respecto a x , para el caso 2, calculados con ambos métodos respecto a cada uno de ellos. Es decir, según las expresiones mostradas en (4.7) y (4.8).

$$\text{abs} \left[\left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^2)} - \left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^4)} \right] \cdot \frac{100}{\left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^2)}} \quad (4.7)$$

$$\text{abs} \left[\left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^2)} - \left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^4)} \right] \cdot \frac{100}{\left(\frac{-\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} \right)_{O(h^4)}} \quad (4.8)$$

Se encontraron diferencias porcentuales que van desde 0.05% a 42%, al utilizar el caso de la expresión (4.8), y 0.05% a 100%, para el caso (4.7). Los porcentajes encontrados para el caso (4.7) eran el doble que los de (4.8) para cada nodo de cada nivel. Por esta razón, se escogió utilizar el método de orden $O(h^4)$ por considerar mayor cantidad de términos que pudieran asegurar un mejor acercamiento en el cálculo de derivadas numéricas.

4.3 Método de obtención de capas de mezcla, sus rangos, línea “centerline” y de las constantes de adimensionalización

En esta sección se describe el procedimiento seguido para la obtención de las capas de mezcla y sus anchos, la línea central de la cortina y las constantes de adimensionalización. En el Anexo C5 se adjunta el código en Matlab utilizado para la obtención de las capas de mezcla, sus rangos, la línea central de la cortina y la constante de adimensionalización $\Delta U_{m\acute{a}x}(x/H)$ y $\Delta T_{m\acute{a}x}(x/H)$.

4.3.1 Obtención de capas de mezcla

El cálculo de las capas de mezcla se hizo a partir de la definición de semiancho mostrada en la sección 2.3.3 anterior. Según la definición allí mostrada, existen dos situaciones diferentes según el desarrollo de la cortina de aire con configuración DJ-DF utilizada. La situación 1, mostrada en la Figura 4.7, la cual ocurre cuando aún están separados los dos jets iniciales, uno del otro. Y, la situación 2, mostrada en la Figura 4.8, la cual sucede una vez que la cortina está completamente desarrollada, identificándose solamente un único jet.

En la situación 1, cada jet posee su respectiva velocidad máxima, denominadas $U_{m\acute{a}x,fr\acute{i}o}$, para el jet frío, y $U_{m\acute{a}x,cal}$, para el jet caliente, y, teóricamente, dos puntos con una velocidad igual a la velocidad axial máxima media, $U_{m\acute{a}x}(x/H)/2$, debido a su asimetría. Es decir, cada jet poseerá dos semianchos diferentes entre sí.

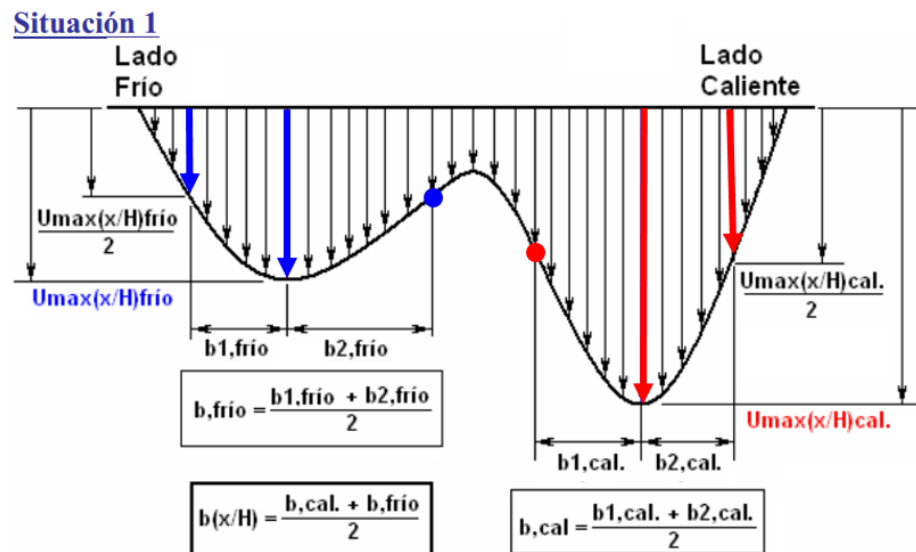


Figura 4.7: Método de cálculo de semiancho para situación 1 en que ambos jets están separados, la cual ocurre en niveles ubicados antes de la zona de transición de cada cortina de aire. Fuente: Elaboración propia

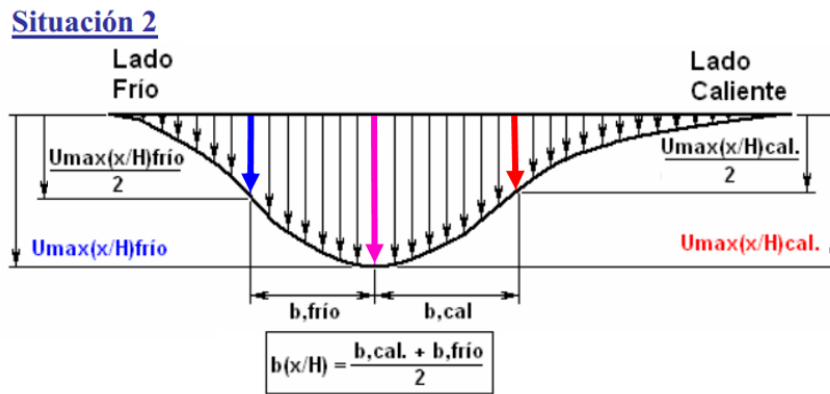


Figura 4.8: Método de cálculo de semiancho para situación 2 en que solo existe un jet único post-unificación de los jets iniciales. Ésta corresponde a los niveles a partir la zona desarrollada de la cortina de aire aguar abajo. Fuente: Elaboración propia

Encontrando la posición horizontal para cada nivel de la cortina, en que existe una velocidad mínima entre ambas velocidades máximas, se puede detectar hasta qué nivel de la cortina existe la configuración DJ-DF. A partir de dicho nivel, ocurre un proceso de transición entre las situaciones 1 y 2, producto de la unificación de ambos jets iniciales para conformar uno completamente diferente a los dos primeros.

En dicho proceso, la velocidad mínima que delimita un jet del otro comienza a desaparecer. Finalmente, se obtiene la situación 2, en la cual existen solo dos semianchos, uno por el lado del jet caliente y otro, por el del jet frío.

Entonces, la capa de mezcla, determinada por la posición del semiancho encontrado es calculada localmente. Para la situación 1, se calcula el semiancho frío, denominado $b_{frío}(x/H)$, como el promedio entre los dos semianchos encontrados, $b_{1,frío}$ y $b_{2,frío}$, en el jet frío. De igual forma, el semiancho caliente, denominado $b_{cal}(x/H)$, corresponde al promedio sus dos semianchos, $b_{1,cal}$ y $b_{2,cal}$ del jet caliente. En caso de que el semiancho interior de cada cortina desaparezca (por el proceso de unificación), el de cada jet se iguala al existente. Finalmente, se promedian los semianchos encontrados para el jet caliente y para el jet frío.

En la situación 2 el cálculo es más simple. Basta con encontrar el semiancho por cada lado de la cortina y promediarlos.

Sin embargo, el cálculo se complica durante el proceso de transición. En la Figura 4.9 se observa el proceso de unificación en perfiles de velocidad axial media para los dos casos estudiados. En ella se detectó el último nivel de existencia de ambos jets, siendo $x/H=0.45$, para el caso 1, y $x/H=0.42$, para el caso 2. A partir de estos últimos niveles, ocurre un proceso de unificación, el cual finaliza completamente en $x/H=0.7$. Este resultado difiere levemente del obtenido por Castro

[13], quien detectó que ocurría a $x/H=0.6$. Ambos son niveles cercanos entre sí, por lo que la diferencia es atribuida a la mayor cantidad de niveles estudiados en el presente estudio.

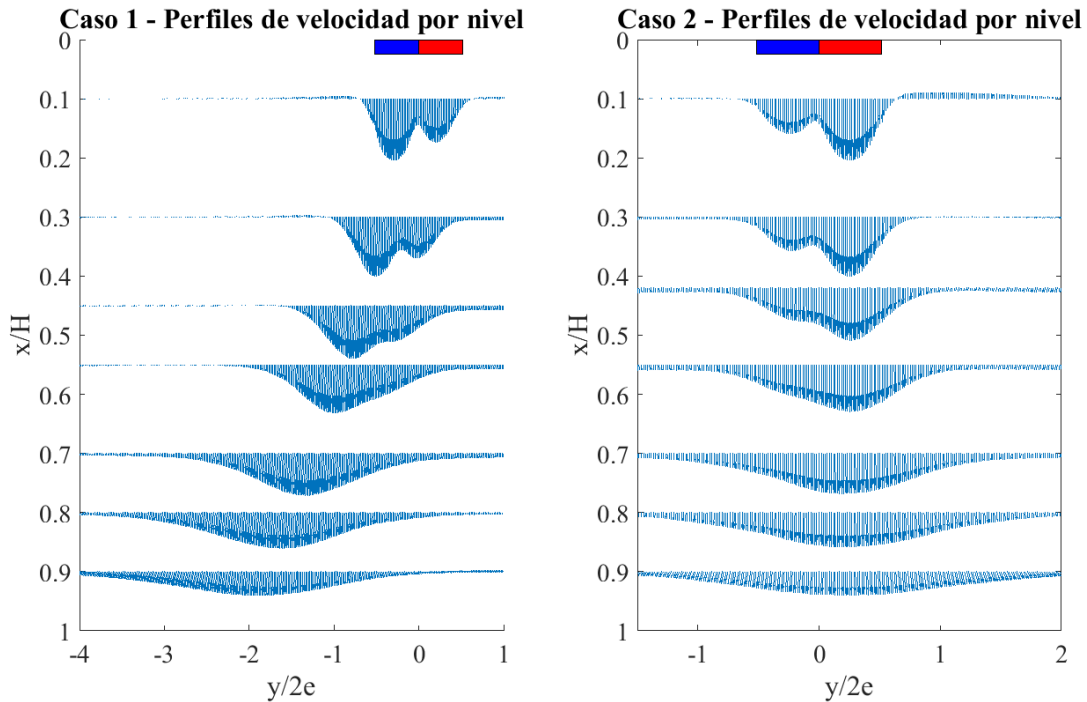


Figura 4.9: Perfiles de velocidad para ciertos niveles de las cortinas de aire de ambos casos de estudio.

En la zona de transición, para ambos casos, es el jet de menor velocidad el que comienza a desaparecer acercándose al de mayor velocidad. Por esta razón, se consideró una “influencia sobre el jet de más veloz por parte del jet menos veloz”, la cual se puede observar en el nivel $x/H=0.55$ de cada caso, en la Figura 4.9. Esto es, se extendió la situación 1 hasta un nivel en el que casi no se observaba algún tipo de influencia por parte del jet menos veloz. Dicho nivel fue escogido cualitativamente, por lo que está sometido al criterio de la memorista, siendo $x/H=0.55$, para el caso 1, y $x/H=0.57$, para el caso 2.

4.3.2 Obtención del rango para capas de mezcla

El ancho de la capa de mezcla fue calculado a partir de la ecuación (2.44) de la sección 2.3.4. Nuevamente existen dos situaciones claras y una de transición, mostradas en la Figura 4.10. Para el caso en que los jets iniciales aún permanezcan separados (situación 1), se identifican 4 capas de mezcla, mostradas en la Figura 4.10, con sus respectivos valores de velocidad U_1 y U_2 . Para la situación 3, correspondiente a la cortina desarrollada, solo se tienen dos capas de mezcla. Para la zona de unificación (situación 2), se observan 3 capas de mezcla, con sus respectivas velocidades. En esta última situación, la velocidad $U_{2,c}$ al final de la curva 2 e inicio de la 3, fue seleccionada

bajo el criterio de la memorista como la velocidad en el punto de separación entre un jet de mayor velocidad, correspondiente al jet en proceso de unificación, y uno de menor velocidad según el criterio de influencia del jet menos veloz antes mencionado.

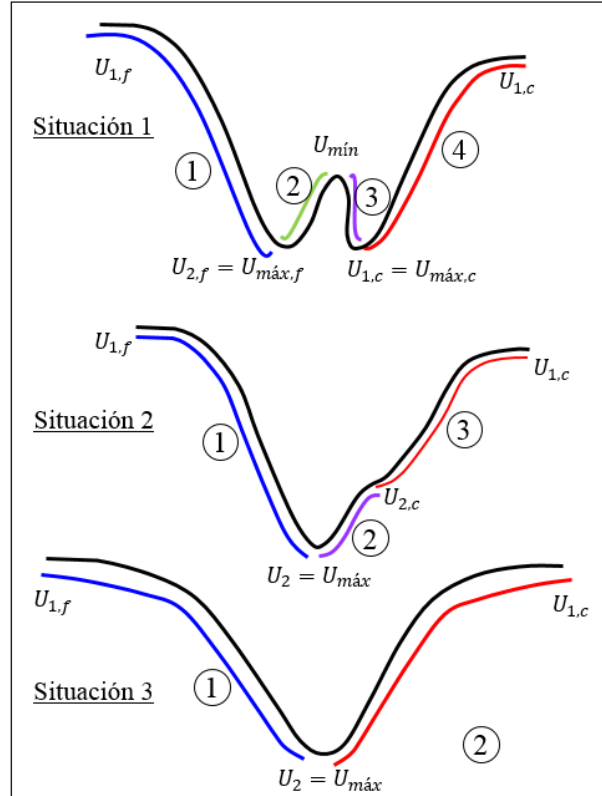


Figura 4.10: Situaciones observadas en el perfil de velocidad axial media, para el análisis de rango de capa de mezcla. Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Obtención de línea central de la cortina

La línea central de la cortina fue obtenida a partir de las 3 situaciones observadas en el perfil de velocidad axial media de la Figura 4.10. En la situación 1 de dicha figura, la línea “*centerline*” corresponde a la posición transversal de la cortina, para cada nivel, en que la velocidad corresponde a la mínima velocidad entre las máximas de cada jet, por utilizarse una cortina con configuración doble jet - doble flujo (DJ-DF). En la situación 3 de la figura mencionada, el “*centerline*” corresponde a la línea de máxima velocidad del jet unificado. Y, finalmente, en la zona de transición se utilizó la misma influencia del jet de menor velocidad sobre el jet más veloz, detectada en el cálculo del semiancho local de la cortina.

Debido a que la influencia del jet mayor velocidad sobre el jet de menor velocidad era alta, pues es el jet menos veloz el que se acopla al más veloz, el criterio aplicado en la zona de transición no fue suficiente para la obtención de una línea más continua, tanto en las capas de mezcla, sus rangos

y la línea central de la cortina. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 4.11, para el caso 2. Se debió, entonces, modificar geoméricamente cada una de las líneas obtenidas, cuyo resultado final se muestra en las Figura 5.4 y Figura 5.5, sección 5.1 del capítulo Presentación y análisis de resultados.

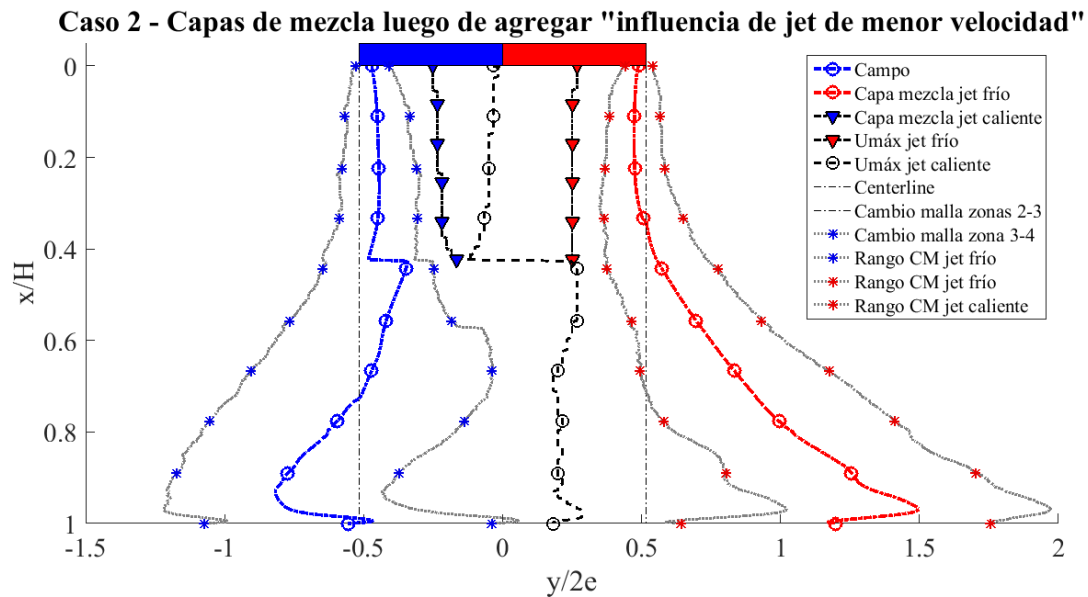


Figura 4.11: Capas de mezcla y sus rangos encontrados para el caso 2. Se muestra la versión previa a la definitiva encontrada, en la que se observa el resultado numérico real luego de aplicar el criterio de “influencia del jet de menor velocidad sobre el de mayor velocidad”

4.3.4 Obtención de constantes de adimensionalización, $U_{máx}(x/H)$ y $\Delta T_{máx}(x/H)$

El proceso de obtención de las constantes de adimensionalización para la velocidad y temperatura es análogo el uno con el otro. Es por ello que solo se muestra el código utilizado en Matlab para el cálculo de $U_{máx}(x/H)$ en el Anexo C5.

Para la obtención de $U_{máx}(x/H)$, se utilizaron las Figura 4.7 y Figura 4.8 mostradas anteriormente en la sección 4.3.1. Para la obtención de $\Delta T_{máx}(x/H)$, se utilizó un esquema base como el mostrado en la Figura 4.12.

En la situación en que existan dos jets separados, se calcula la velocidad máxima del conjunto como el promedio de las velocidades máximas de ambos jets. Luego, en la zona de transición, se utiliza nuevamente el criterio de “influencia del jet de menor velocidad sobre el de mayor velocidad”, mencionado anteriormente, considerando la existencia de un pequeño jet de menor velocidad con una velocidad máxima distinta a la existente en el punto ficticio de separación entre ambos jets. Esta velocidad máxima del jet menos veloz se promedió con la obtenida en el jet de

mayor velocidad unificándose, como se muestra en la línea central real de la cortina para el caso 2, en la Figura 4.11. Finalmente, para los niveles ubicados en la zona del jet unificado, su velocidad máxima correspondía a la velocidad máxima local de la cortina.

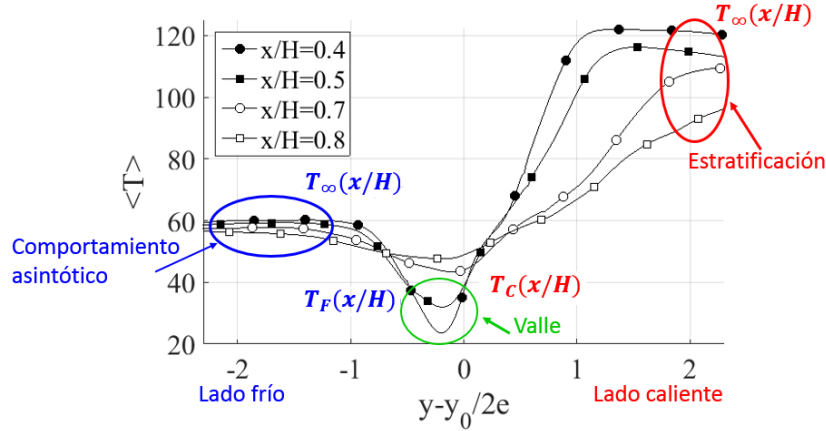


Figura 4.12: Perfil de temperatura media de la cortina de aire, a partir del cual se encuentra la constante local de adimensionalización $\Delta T_{m\acute{a}x}(x/H)$. Fuente: Elaboración propia

De forma similar, para el cálculo de $\Delta T_{m\acute{a}x}(x/H)$ se utilizaron las 3 situaciones observadas en la Figura 4.10. En la primera situación de dicha figura, para la sección 1 (curva color azul) se consideró una diferencia de temperatura entre la encontrada en la zona de comportamiento asintótico de las curvas de perfil de temperatura, $T_{\infty,f}$, como se muestra en la Figura 4.12, y la temperatura del jet frío, $T_F(x/H)$. Luego, en la curva verde de la sección 2, en la figura mencionada, se aplicó el mismo procedimiento descrito, pero considerando como temperaturas la del jet frío, $T_F(x/H)$, y la temperatura mínima observada entre ambos jets. Análogamente, en la curva morada de la sección 3, se calculó la diferencia entre la temperatura del jet caliente, $T_C(x/H)$ y la mínima entre los dos jets. Y, finalmente, se calculó la diferencia de temperatura entre la del jet caliente, $T_C(x/H)$ y la de la zona de estratificación, $T_{\infty,c}$ en la curva roja mostrada.

En la situación 2 de la Figura 4.10, de transición, se consideraron tres diferencias de temperatura: la del je frío con la de la zona protegida, $T_F(x/H)$ y $T_{\infty,f}$, respectivamente; la del jet frío, $T_F(x/H)$, y del jet caliente, $T_C(x/H)$, considerando el jet de menor velocidad respectivo a cada caso de estudio; y, por último, la diferencia entre la temperatura del jet caliente y la de la zona confinada, $T_F(x/H)$ y $T_{\infty,c}$, respectivamente.

Finalmente, en la situación 3 (Figura 4.10), se calcula una diferencia máxima de temperatura local entre ambos ambientes y la del jet unificado.

Los resultados de los términos turbulentos adimensionalizados se entregan en el Anexo B.

5 Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y sus respectivos análisis, luego de aplicar el tratamiento numérico anteriormente mencionado en los datos extraídos del programa ANSYS Fluent. Se presentan, para ambos casos de estudio, los campos medios de velocidad y temperatura, y un estudio sobre los transportes turbulentos de momentum y de calor en las direcciones axial y transversal a la cortina de aire, de manera de determinar en qué zonas existe traspaso de calor y momentum desde la zona confinada al ambiente protegido.

5.1 Campos medios de velocidades axial, transversal y de temperatura

En la Figura 5.1 se muestra el campo de velocidad axial media para el caso 1 (lado izquierdo) y para el caso 2 (lado derecho). En ambas, el color rojo simboliza la mayor velocidad axial de ambos jets, mientras que el color azul significa la ausencia de velocidad axial.

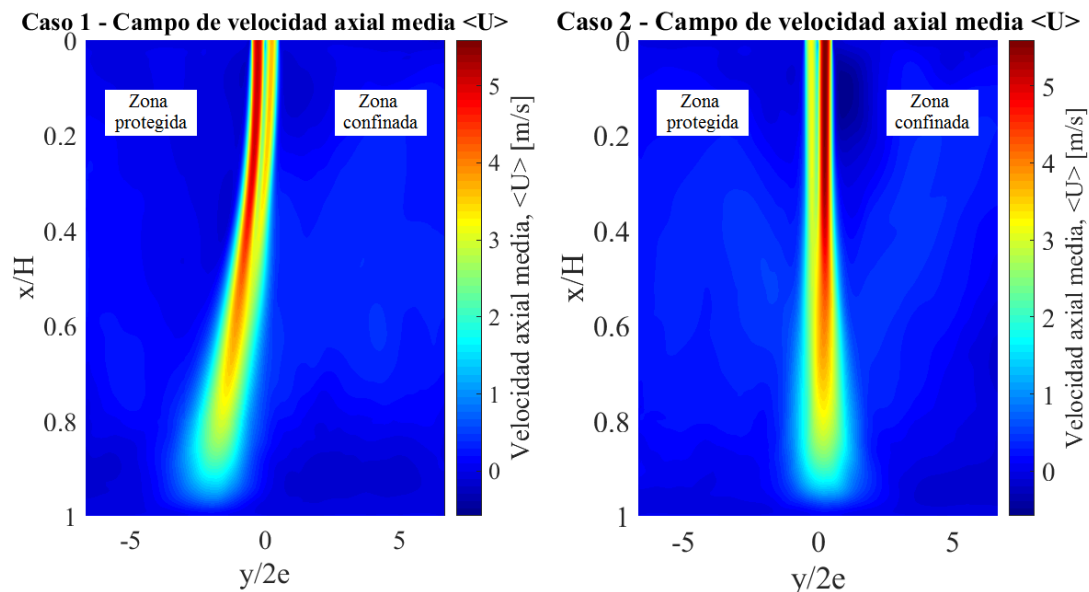


Figura 5.1: Campos de velocidad axial media, \bar{u} , para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)

En las Figura 5.2 y Figura 5.3 se presenta el campo de velocidad media axial con las capas de mezcla incluidas, para el caso 1 y 2, respectivamente. En estas ilustraciones se observa, para el caso 2, una leve inclinación de la cortina hacia el lado confinado respecto al eje axial, y una hacia el lado protegido, para el caso 1, como lo presencié Castro [13]. Esto muestra que la cortina se inclina hacia el lado del jet que posee mayor velocidad, lo cual concuerda con Fujisawa [47] en su

estudio sobre la interacción entre dos jets a diferentes velocidades de salida. Además, se observa una mayor inclinación en el caso 1 que en el caso 2. Esto se debe al efecto de mayor empuje que genera la fuente de calor sobre el jet, no permitiéndole que se expanda hacia el lado del de mayor velocidad (hacia el lado confinado para el caso 2) [13]. Como en el caso 1 es el jet frío el que posee la mayor velocidad, no posee ninguna oposición a la dirección de expansión, pues junto a él se encuentra el ambiente protegido, el cual no tiene características dinámicas importantes.

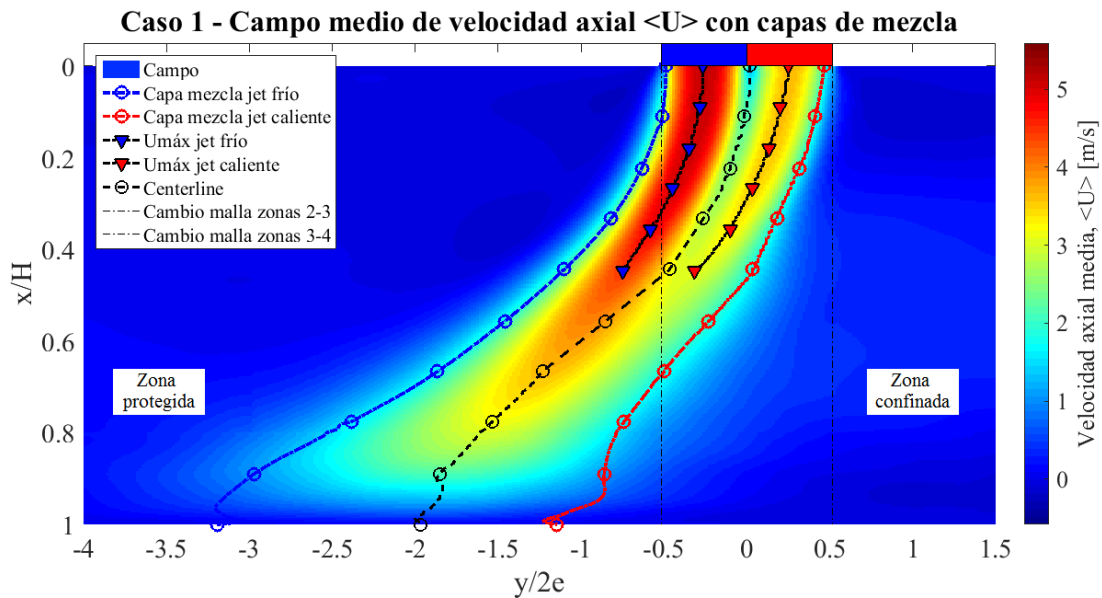


Figura 5.2: Campo de velocidad axial media, \bar{u} , con capas de mezcla incorporadas – Caso 1

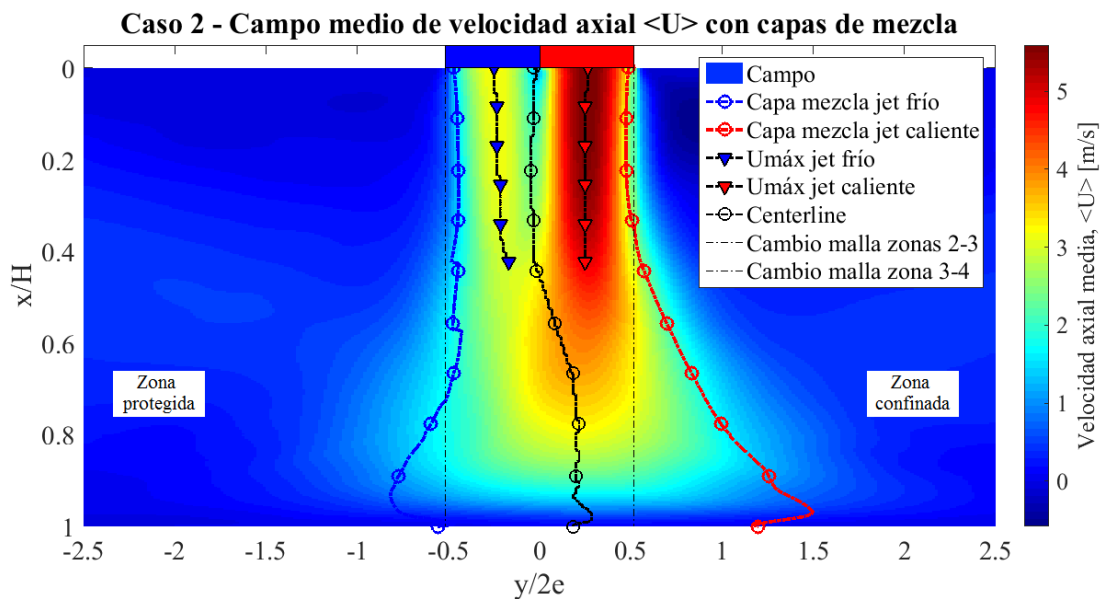


Figura 5.3: Campo de velocidad axial media, \bar{u} , con capas de mezcla incorporadas – Caso 2

Las capas de mezcla mostradas en las Figura 5.2 y Figura 5.3 fueron calculadas de acuerdo a la definición mostrada en la sección 2.3.4 y a la definición de semiancho de la sección 2.3.3. Numéricamente, se obtuvieron líneas discontinuas en los jets de menor velocidad para ambos casos, como se muestra en las Figura 5.4 y Figura 5.5.

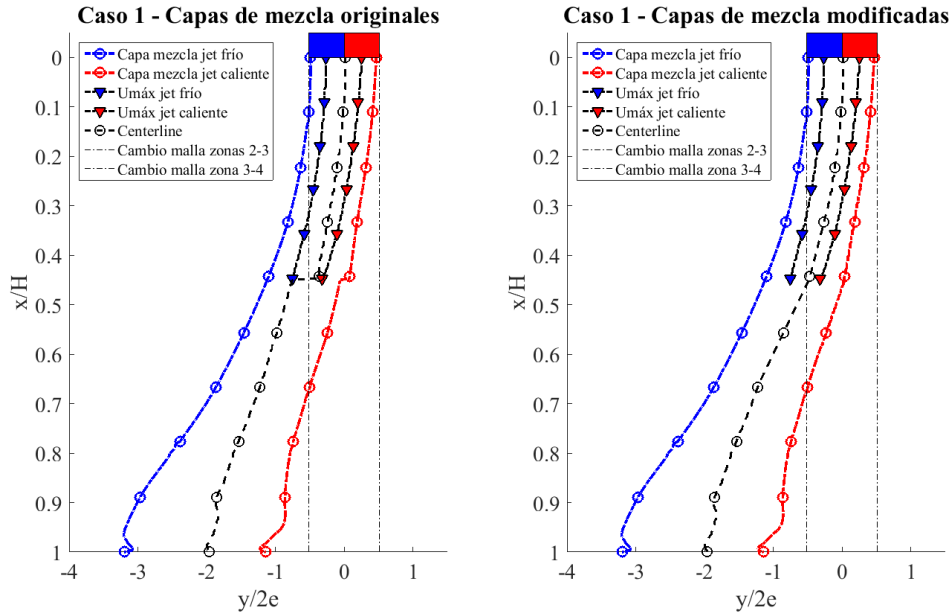


Figura 5.4: Capas de mezcla y línea central entre jets para el caso 1. En la figura izquierda se muestra el caso numérico real y en la figura derecha, el caso adaptado

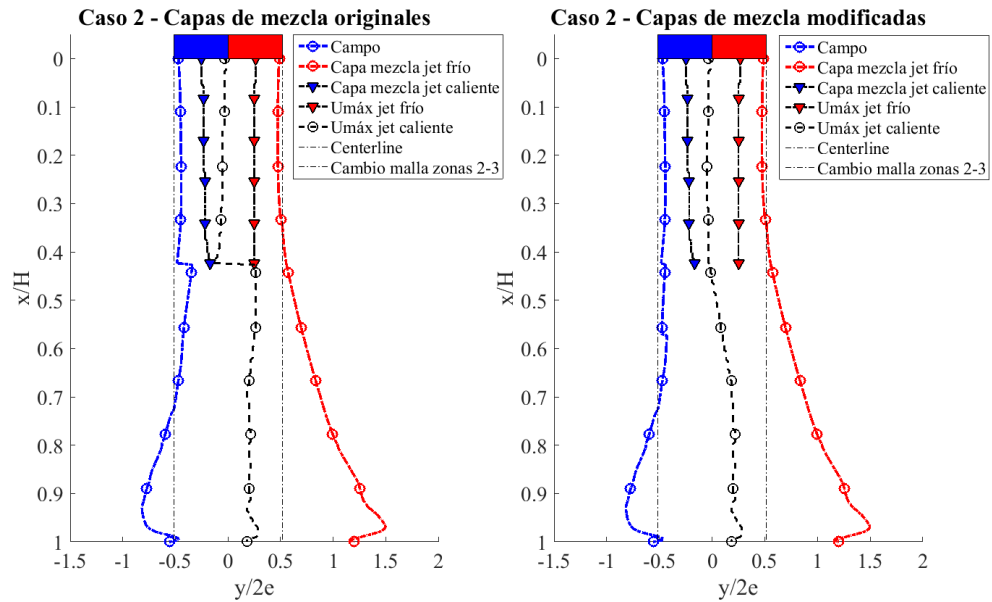


Figura 5.5: Capas de mezcla y línea central entre jets para el caso 1. En la figura izquierda se muestra el caso numérico real y en la figura derecha, el caso adaptado

La línea central de una configuración doble jet-doble flujo corresponde a la línea de mínima velocidad entre los jets, cuando están separados, y la línea de máxima velocidad de jet completamente unificado. Sin embargo, al obtenerla de esa forma se presentó una discontinuidad en la curva, como se evidencia en las figuras anteriores. Esto es debido a que la velocidad mínima entre ambos jets se acerca cada vez más a la línea de máxima velocidad del jet que va más despacio, es decir, es el jet de menor velocidad el que comienza a acoplarse al de mayor velocidad.

Más abajo, a partir del nivel en el que comienza el proceso de unificación entre ambos jets, la línea central entre jets corresponde a la continuación de la línea de máxima velocidad del jet más rápido. Esto muestra que la máxima influencia sobre la cinemática de la cortina está dada por el jet de máxima velocidad.

La línea de capa de mezcla del jet de menor velocidad, calculada con la fórmula del semiancho de cada jet, no es continua a partir del nivel en el que ambos comienzan a unificarse. Esto sucede debido a que durante dicho proceso, la máxima velocidad del conjunto sigue siendo la del jet anteriormente más veloz, razón por la cual la velocidad máxima media de esa zona no sigue la tendencia mostrada en los niveles anteriores. No obstante, se identificó una zona en que el jet de menor velocidad influye en el de mayor velocidad durante el proceso de unificación, sin observarse una velocidad mínima en la curva. Eso se observa de mejor manera en la Figura 4.9 de la sección 4.3.1 del capítulo Desarrollo.

Así, se consideró la existencia de un jet de menor velocidad hasta el nivel en el éste deja de existir. El nivel donde el único jet estaba prácticamente unificado corresponde a $x/H=0.7$ para ambos casos. Se utilizó como velocidad máxima del “jet de menor velocidad” una que fuera más continua con la línea geométrica del jet de menor velocidad antes de la unificación. De esta forma, se consideraría la influencia del jet menos veloz, obteniendo como resultados las capas de mezcla mostrada en las figuras del lado derecho de las Figura 5.4 y Figura 5.5. Por lo mismo, el cálculo del semiancho fue modificado para las capas de mezcla del jet menos veloz según la descripción anterior, siendo la versión modificada la utilizada para adimensionalizar.

En las Figura 5.6 y Figura 5.7 se presenta la posición de las capas de mezcla de ambos casos de estudio, considerando un rango estimativo que permite realizar un análisis más certero en dicha zona, pues la capa de mezcla posee un espesor característico definido por la ecuación (2.44) de la sección 2.3.4 del capítulo 2 Antecedentes.

Se identifican 3 zonas en la cortina. Entre $x/H=0$ hasta 0.45 para el caso 1, y 0.42 para el caso 2, en donde los jets iniciales aún permanecen separados. A partir de $x/H=0.45$ y $x/H=0.42$ hasta $x/H=0.7$ se detecta la región donde se unen ambos jets. En el nivel $x/H=0.7$ están prácticamente completamente unificados. Finalmente, desde $x/H=0.7$ hasta 1 se encuentra la zona de impacto de la cortina. El nivel de unificación encontrado es mayor al encontrado por Felis [42], es decir, más cercano a la zona de impacto. Ambos jets de la cortina se unifican en $x/H=0.5$, sin embargo, se

observa una presencia del jet frío sobre la unificación hasta $x/H=0.6$, siendo prácticamente nulo en $x/H=0.7$. Se cree que esta influencia no fue detectada por Felis [42] por la menor de cantidad de niveles de la cortina estudiados. Una situación similar sucede con Castro [13], quien afirma que el nivel donde la cortina es unificada es en $x/H=0.6$. Sin embargo, son niveles bastante cercanos entre sí.

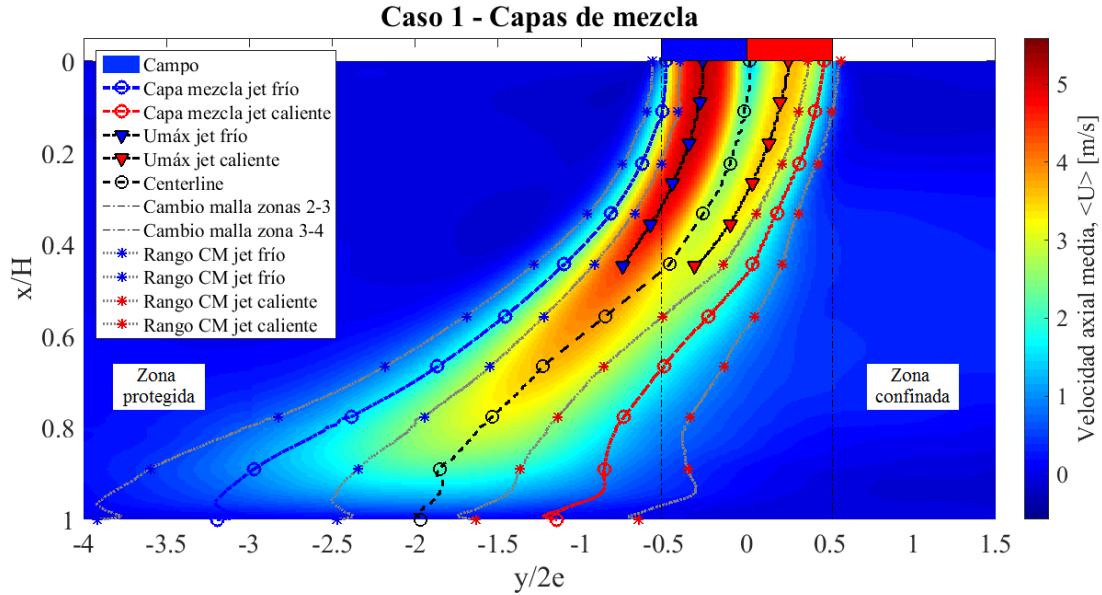


Figura 5.6: Rangos encontrados para la posición de las capas de mezcla – Caso 1

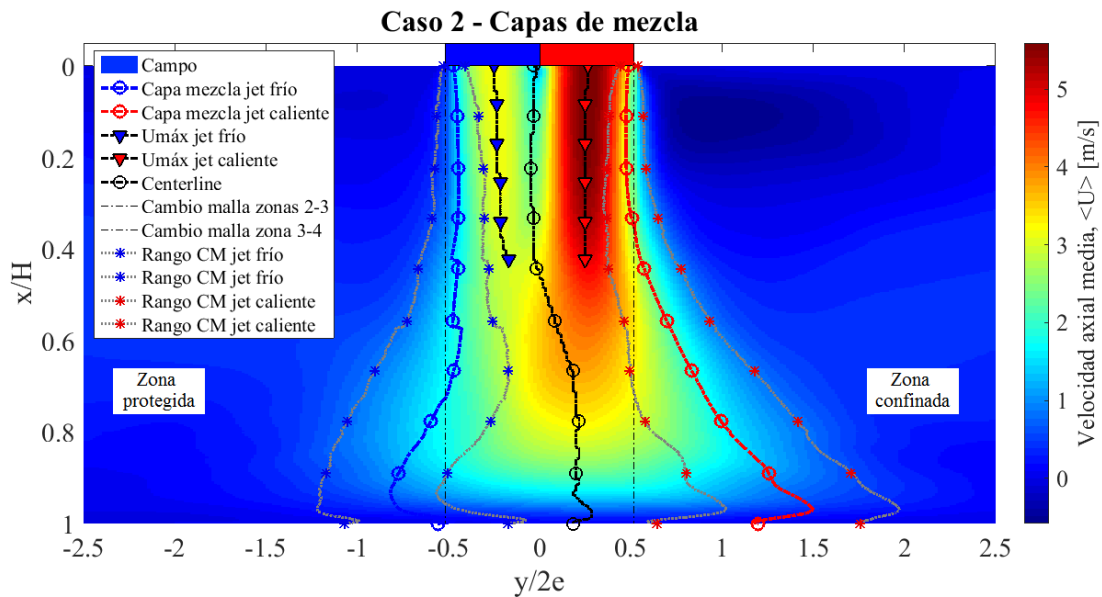


Figura 5.7: Rangos encontrados para la posición de las capas de mezcla – Caso 2

En la Figura 5.8 se presenta el campo de la velocidad transversal \bar{v} para ambos casos de estudio. Los valores color azul reflejan un movimiento positivo en la dirección \hat{y} , transversal al sentido de movimiento de la cortina de aire, mientras que los valores rojos representan un movimiento en el sentido negativo de \hat{y} .

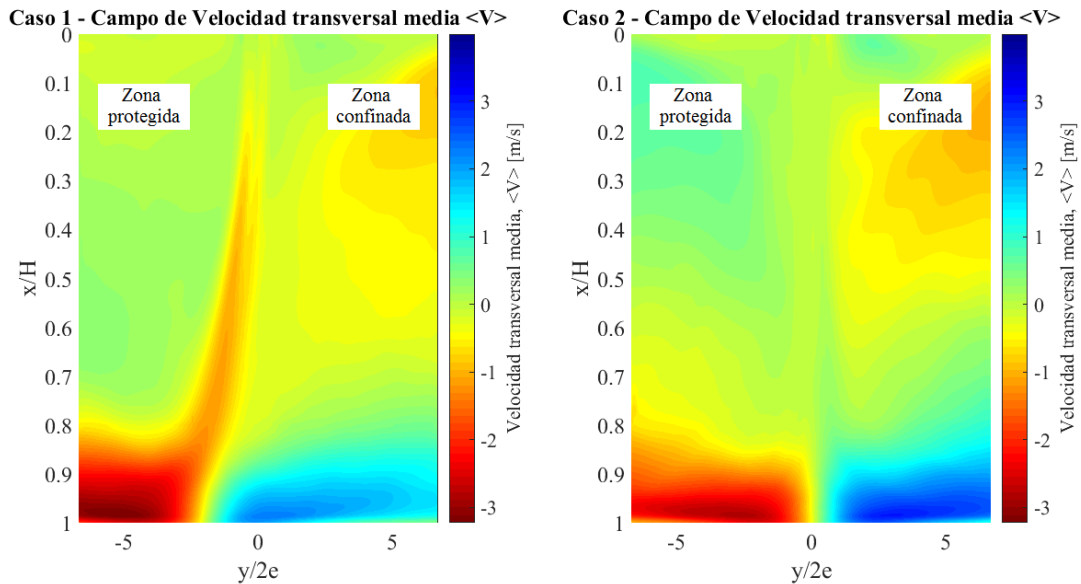


Figura 5.8: Campos de velocidad transversal media \bar{v} , para los casos 1 (figura izquierda) y 2 (figura derecha)

En el lado derecho de ambas cortinas, entre los niveles $x/H = 0.1$ y 0.4 se observan valores negativos que comienzan a transformarse en valores positivos a medida que el nivel vertical se acerca a 1. Esto indica la presencia de recirculación del aire en el lado confinado (donde se ubica la fuente de calor), desplazándose hacia la izquierda (lado protegido) y siendo desviados por la cortina de aire hacia la derecha (lado confinado) en los niveles más cercanos al suelo. En el caso 1, la transformación mencionada ocurre a niveles más tempranos que en el caso 2.

Este mismo proceso sucede en el lado protegido pero en sentido contrario. Debido a la transferencia de calor ocurrida en la zona de impacto ($x/H = 0.8$ a 1), existe un campo de velocidad transversal negativo (hacia la zona protegida) en la zona inferior izquierda del jet frío, que posteriormente se desplaza hacia el jet frío por la zona superior izquierda.

En la Figura 5.9 se observa el campo de temperatura media para ambos casos de estudio. Los colores rojo y azul representan las temperaturas más calientes y frías, respectivamente. Se puede observar en la zona superior izquierda (entre los niveles $x/H = 0$ y 0.1 y entre las posiciones horizontales $Y/2e = -6$ y -2) la presencia de altas temperaturas en la zona protegida, lo que tiene relación con la transferencia de calor en la zona de impacto. En esa zona se transfiere calor hacia el lado protegido, el cual se eleva por difusión, quedándose fijo en la zona superior por no existir

una dinámica preponderante que le permita recircular por el ambiente. Además, es necesario mencionar la conveniencia de que esto no suceda, pues facilitaría el tránsito por el ambiente protegido a pesar de haber pequeñas fugas de calor.

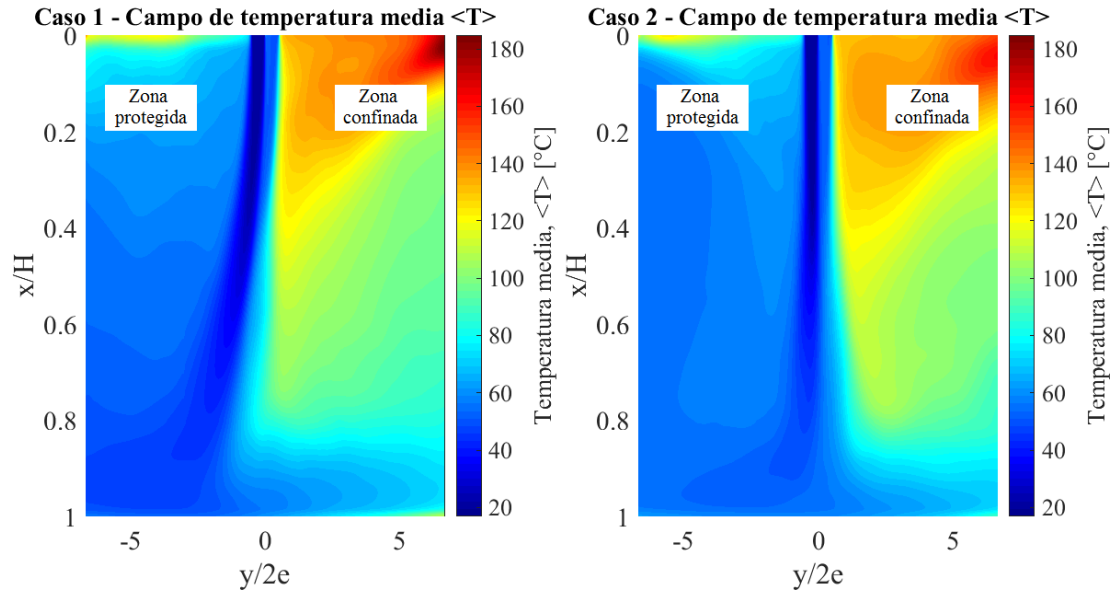


Figura 5.9: Campos de temperatura media, \bar{T} , para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)

5.2 Variables adimensionalizadas

En las Figura 5.10 y Figura 5.11 se muestran los perfiles de velocidades axial y transversal adimensionalizadas por $U_{\max}(x/H)$ para ambos casos, en donde $U_{\max}(x/H)$ se calculó según lo descrito en la sección 4.3.4 del capítulo 4 Desarrollo.

En el perfil de velocidad axial de ambos casos se identifican dos grupos de niveles auto-similares: $x/H=0.1-0.3$ y $0.6-0.95$. El último nivel en el que se encuentran separados ambos jets, $x/H=0.45$ para el caso 1 y $x/H=0.42$ para el caso 2, y $x/H=0.5$ no son auto-similares con ninguno de los dos grupos identificados. Esto indica que tanto la zona de cono potencial es auto-similar, como también lo es la zona desarrollada, incluyendo curiosamente la zona de impacto. No se presencia auto-similitud en la zona de transición.

En el caso del perfil de velocidad transversal se observa auto-similitud desde el inicio de la zona de transición ($x/H=0.3$) hasta el término de la zona desarrollada ($X/H=0.7$). Los perfiles de la zona de impacto se estratifican.

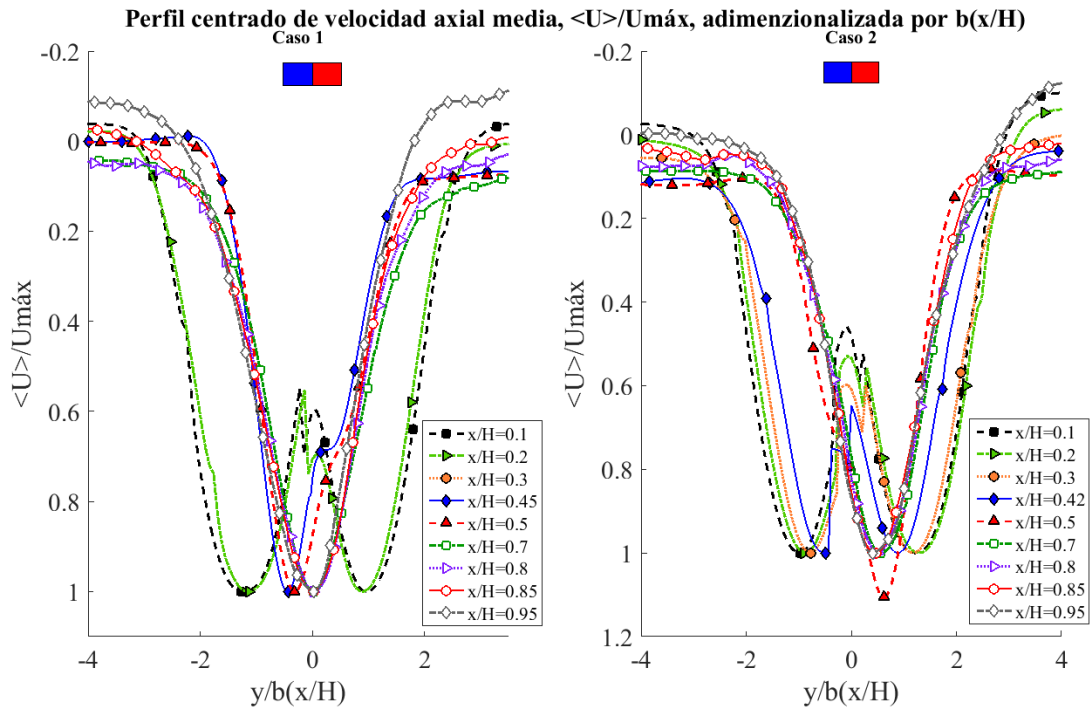


Figura 5.10: Perfil centrado de velocidad axial media adimensionalizada por $U_{m\acute{a}x}$

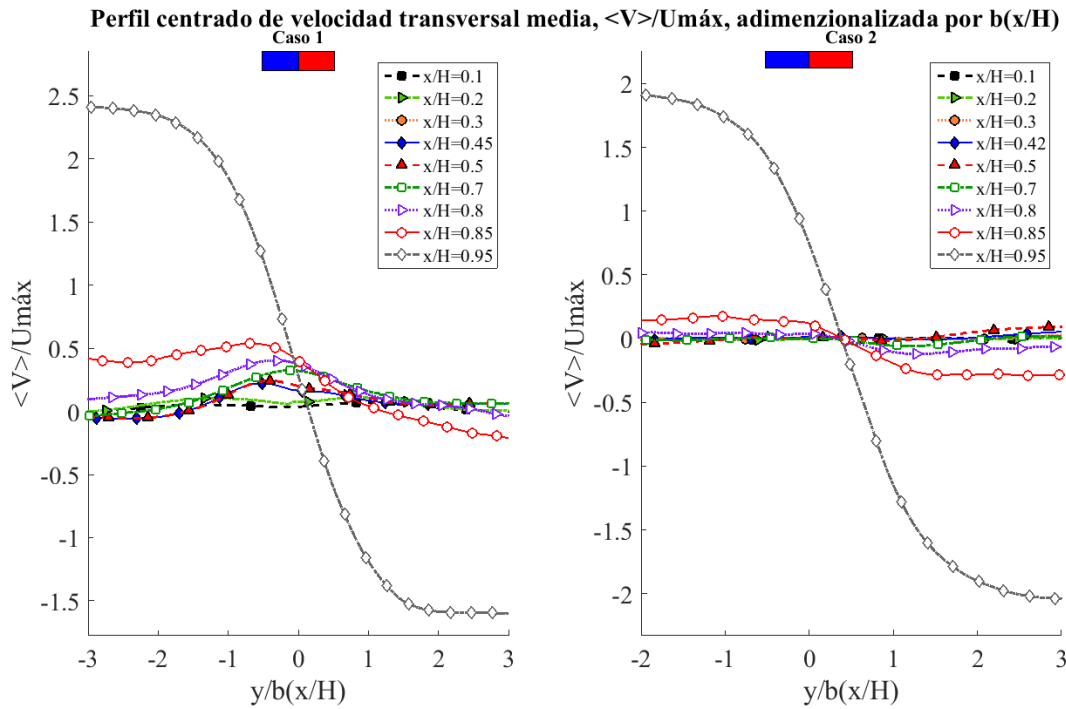


Figura 5.11: Perfil centrado de velocidad transversal media adimensionalizada por $U_{m\acute{a}x}$

Algo similar sucede con el perfil de temperatura media adimensionalizada por $\Delta T_{m\acute{a}x}$, como se observa en la Figura 5.12. Se observa auto-similitud en las zonas de cono potencial (hasta $x/H=0.3$) y desarrollada (desde $x/H=0.5$ hasta $x/H=0.6-0.7$). En la zona de impacto (desde $x/H=0.7$ en adelante) se observa estratificación.

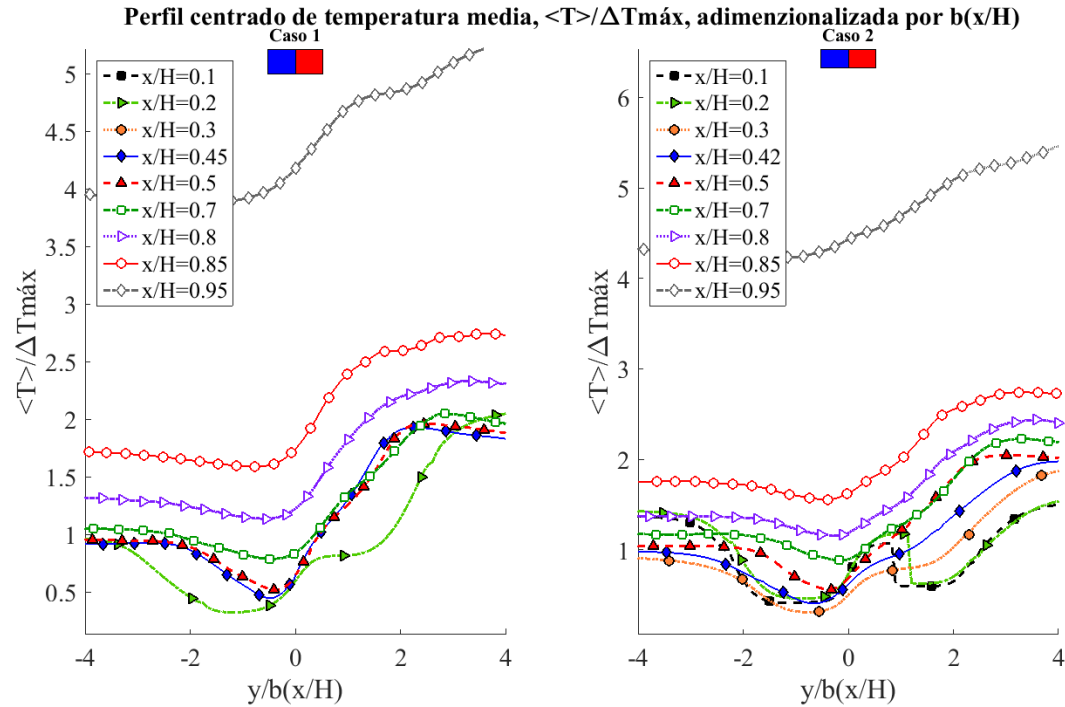


Figura 5.12: Perfil centrado de la temperatura media adimensionalizada por $\Delta T_{m\acute{a}x}$

En la Figura 5.13 se presenta la evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal, a lo largo de las capas de mezcla y de la línea “centerline” en ambos casos de estudio. Éste indica el nivel de fluctuaciones presentes debido a la turbulencia; es una magnitud local. Se identifica mayor presencia de turbulencia en el caso 2 que en el caso 1, siendo mayor en la dirección transversal respecto a la axial, en ambos casos. Se presentan peaks en $x/H=0.5$ y $x/H=0.7$ en la dirección transversal; y en $x/H=0.4, 0.5$ y 0.7 para la dirección vertical, siendo el mayor en $x/H=0.5$. Se destaca el mayor peak transversal observado en $x/H=0.55$ para el caso 1, y en $x/H=0.5$ para el caso 2, ambos correspondientes a las cortinas ubicadas en el jet de mayor velocidad. Se observa una pequeña diferencia en las capas de mezcla del jet de menor velocidad, pudiendo evidenciar alguna influencia térmica sobre ellos. Sin embargo, es necesario realizar el mismo análisis para la intensidad de turbulencia térmica. Esto último queda pendiente debido a la inexistencia del valor RMS de las fluctuaciones de temperatura en las variables guardadas de la simulación.

CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 5.14 se presenta la evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal, respectivamente, pero adimensionalizado por $U_{m\acute{a}x}(x/H)$, también a lo largo de las capas de mezcla y de la línea central de la cortina en ambos casos de estudio.

El valor de las fluctuaciones adimensionalizado por $U_{m\acute{a}x}(x/H)$ corresponde a la importancia que tienen los fenómenos turbulentos respecto a los fenómenos medios a lo largo de la cortina de aire. Es decir, compara los fenómenos locales con los globales.

Se detectan grandes peaks en la zona de impacto de ambos casos, tanto en la dirección axial como en la transversal, siendo mayores en esta última respecto a la primera. Esto evidencia que en dicha zona son más relevantes los efectos turbulentos (microscópicos) que los medios (macroscópicos). Globalmente, las fluctuaciones turbulentas toman mayor importancia en la zona de impacto, en comparación con la observada a lo largo de la cortina.

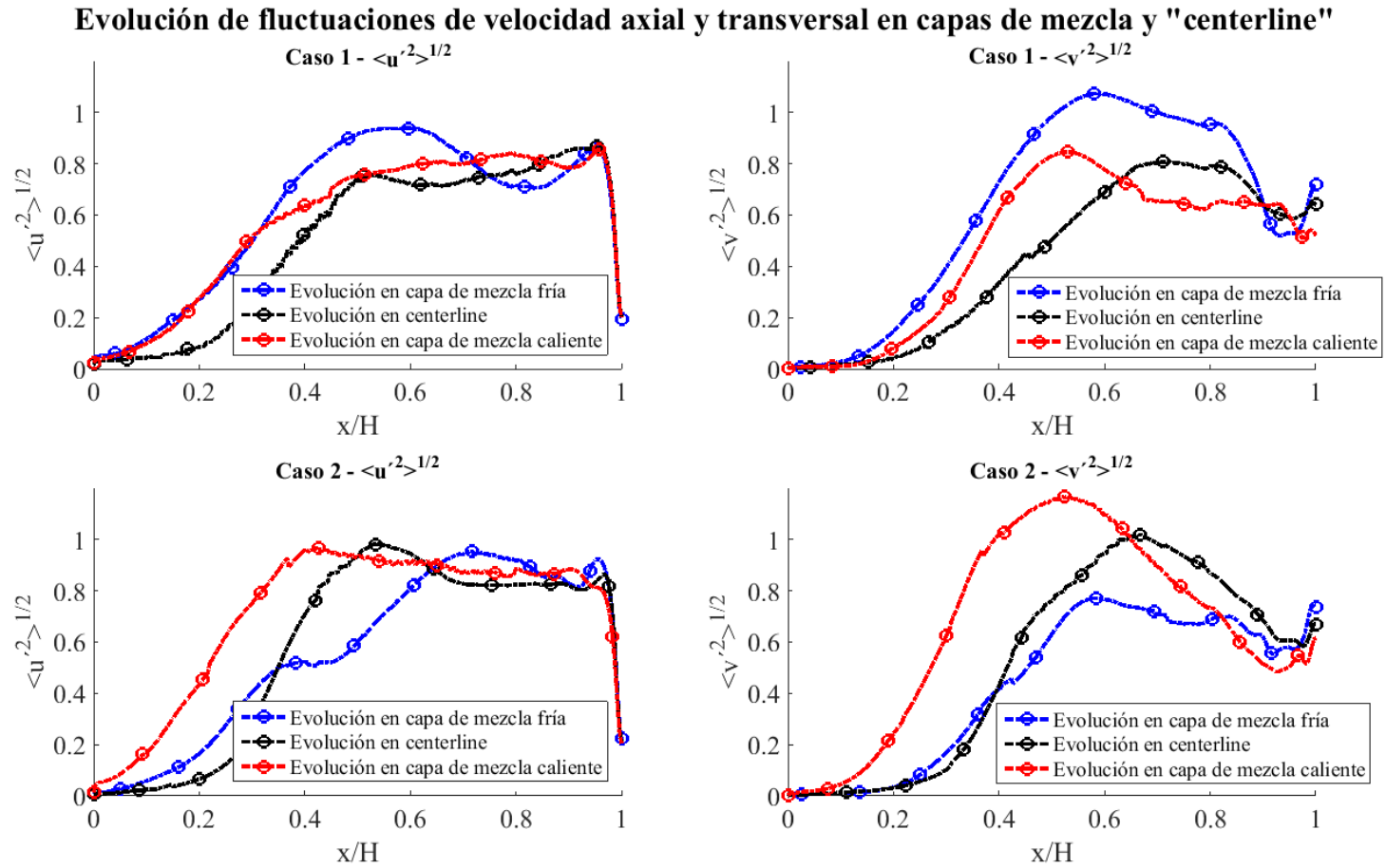


Figura 5.13: Evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal (figuras lateral izquierda y derecha, respectivamente) a lo largo de las capas de mezcla fría y caliente, y de la línea central de la cortina, para ambos casos de estudio (figuras superiores e inferiores, respectivamente)

Evolución de fluct. de veloc. axial y transv., adimensionalizadas por $U_{m\acute{a}x}$, en capas de mezcla y "centerline"

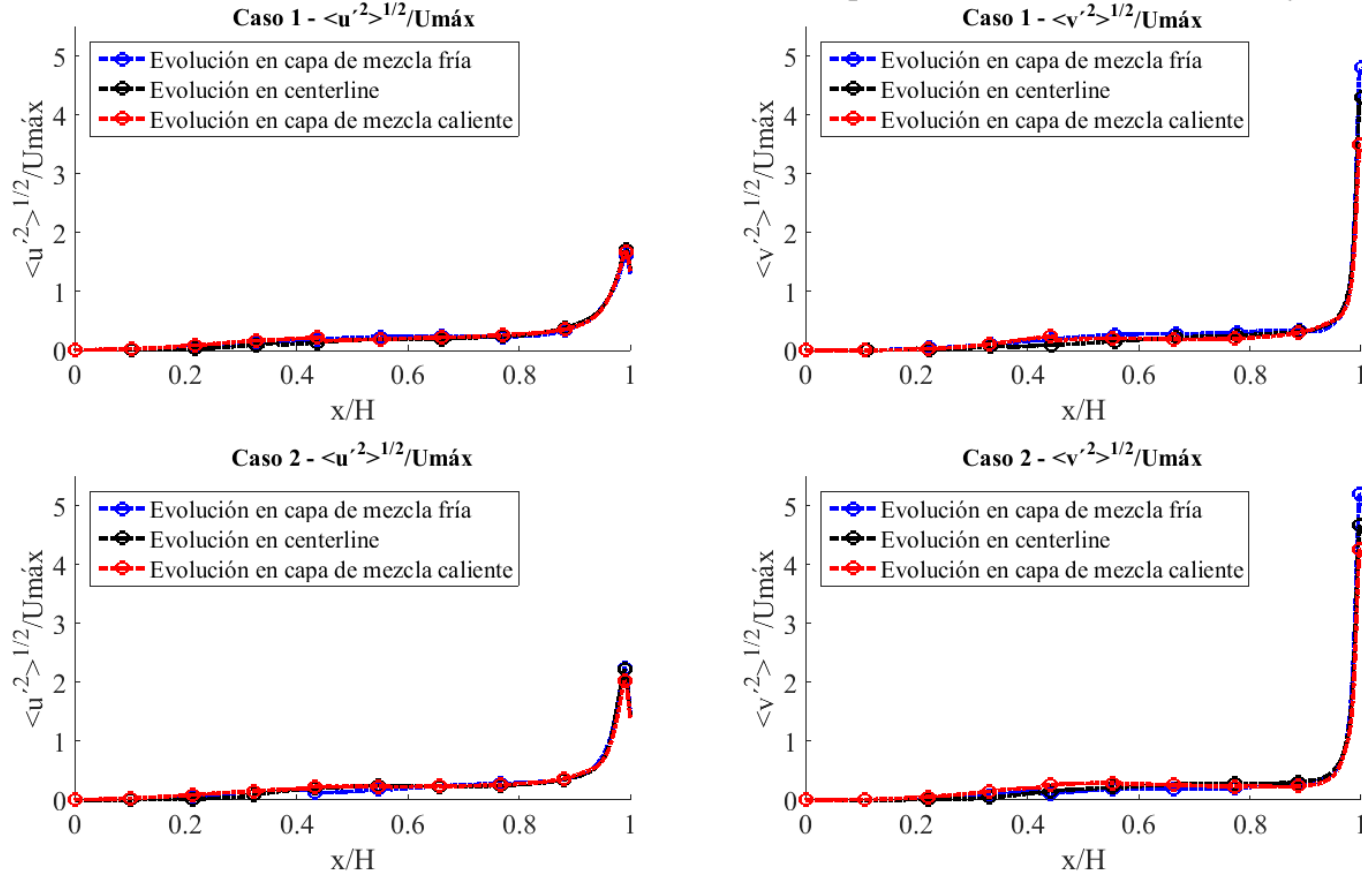


Figura 5.14: Evolución del valor RMS de las fluctuaciones de las velocidades axial y transversal (figuras lateral izquierda y derecha, respectivamente) adimensionalizadas por $U_{m\acute{a}x}(x/H)$, a lo largo de las capas de mezcla fría y caliente, y de la línea central de la cortina, para ambos casos de estudio (figuras superiores e inferiores, respectivamente)

5.3 Transporte de momentum

Si bien Bernard et. al [30] muestra que el análisis del esfuerzo de Reynolds desde el punto de vista de la ley de gradiente es incapaz de describir el proceso, su punto de vista no puede ser aplicado concretamente en este estudio. Esto debido a que se trabajó con variables guardadas provenientes del último instante temporal de una simulación transiente. Si se deseara realizar un análisis como el que él muestra en la referencia mencionada, sería necesario realizar una nueva simulación que considere los tiempos de desarrollo para que cada término de mecanismo del esfuerzo de Reynolds aparezca. Por esta razón, se propone estudiar este punto de vista en una nueva simulación transiente en la cual se incluya el estudio del paso de partículas fluidas según lo explicitado en la referencia [31].

Junto con lo anterior, se procede a analizar el transporte de momentum en la cortina de aire producto de la presencia de fluctuaciones en el campo de velocidades. Es de gran importancia el análisis de transporte de momentum en la dirección transversal, ya que puede ser la causa del traspaso de materia (humo, partículas) desde la zona confinada a la zona protegida, como también puede entregar indicios de zonas en donde esto podría ocurrir.

Se detectan regiones donde hay mayor turbulencia y posibles causas del transporte de partículas desde el lado confinado al protegido. Se estudian las derivadas parciales del esfuerzo de Reynolds en gráficos de perfiles y de evolución en zonas principales de la misma. Como zonas principales, se usan: capas de mezcla “caliente” entre la cortina y la zona confinada, “fría” entre la cortina y el ambiente protegido y la línea central de la cortina. Se presenta el estudio de 9 niveles en cada cortina, cuyos motivos de selección se muestran a continuación.

- $x/H=0.1$, como referencia debido a su cercanía a la boquilla de eyección;
- $x/H=0.2$, como referencia intermedia entre los niveles $x/H=0.1$ y 0.3 ;
- $x/H=0.3$, debido a que desde este nivel se identifica la presencia de alta turbulencia;
- $x/H=0.45$ para el caso 1 y $x/H=0.42$ para el caso 2, puesto que corresponde al último nivel donde se observan jets separados dentro de cada cortina;
- $x/H=0.5$, por la gran turbulencia observada en ambos casos y porque aún los jets no se unifican;
- $x/H=0.7$, dado que en él se unifican completamente las dos jets de ambas cortinas;
- $x/H=0.85-0.95$, debido a que se encuentran en la zona de impacto.

5.3.1 Campo y perfil del esfuerzo de Reynolds

En la Figura 5.15 se muestra el campo del esfuerzo de Reynolds, $\overline{\rho u'v'}$, en función del eje transversal (\hat{y}) a la dirección de propagación de la cortina (\hat{x}), para ambos casos de estudio. La fuente de calor se encuentra por el lado derecho del jet caliente de ambos casos. El análisis del esfuerzo $\rho u'v'$ es equivalente al de $\overline{\rho v'u'}$, debido a que $\overline{v'u'} = \overline{u'v'}$.

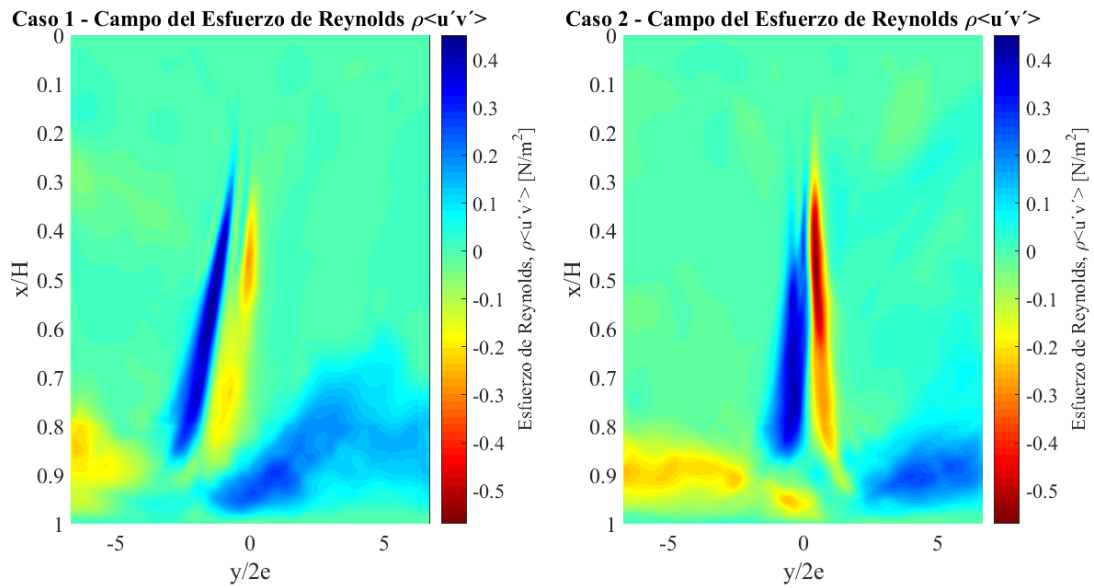


Figura 5.15: Campo del esfuerzo de Reynolds, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)

El color rojo corresponde a los valores negativos del esfuerzo, mientras que el color azul, a los positivos. Un valor positivo del esfuerzo de Reynolds $\overline{\rho u'v'}$ representa la transferencia de momentum de la dirección \hat{y} , en la dirección positiva del eje \hat{x} , debido a un traspaso convectivo en la dirección axial por fluctuaciones turbulentas. Un valor negativo, representa la transferencia del momentum-y en el sentido negativo de la dirección \hat{x} . Para el caso del esfuerzo $\overline{\rho v'u'}$, valores positivos y negativos representan un traspaso de momentum-x en las direcciones positivas y negativas de \hat{y} , respectivamente. Sin embargo, solo se mostrarán los resultados para el caso $\overline{\rho u'v'}$, pero mostrando interpretaciones para ambos términos de esfuerzo de Reynolds.

En la Figura 5.15 se observan dos zonas marcadas con colores rojo y azul. La zona con valores negativos (zona roja) se ubica en la capa de mezcla caliente de ambos casos. La zona con valores positivos (zona azul) se encuentra entre el rango de capa de mezcla fría (jet frío-ambiente protegido) y la línea central de la cortina. Esto último es más marcado en el caso 2 que en el caso 1.

Lo anterior se muestra detalladamente en las Figura 5.16 y Figura 5.17 (para los casos 1 y 2, respectivamente). A priori, de lo anterior se concluye que existen grandes cantidades de flujos turbulentos entre los niveles $x/H = 0.3$ y 0.9 en ambas capas de mezcla, para los dos casos estudiados.

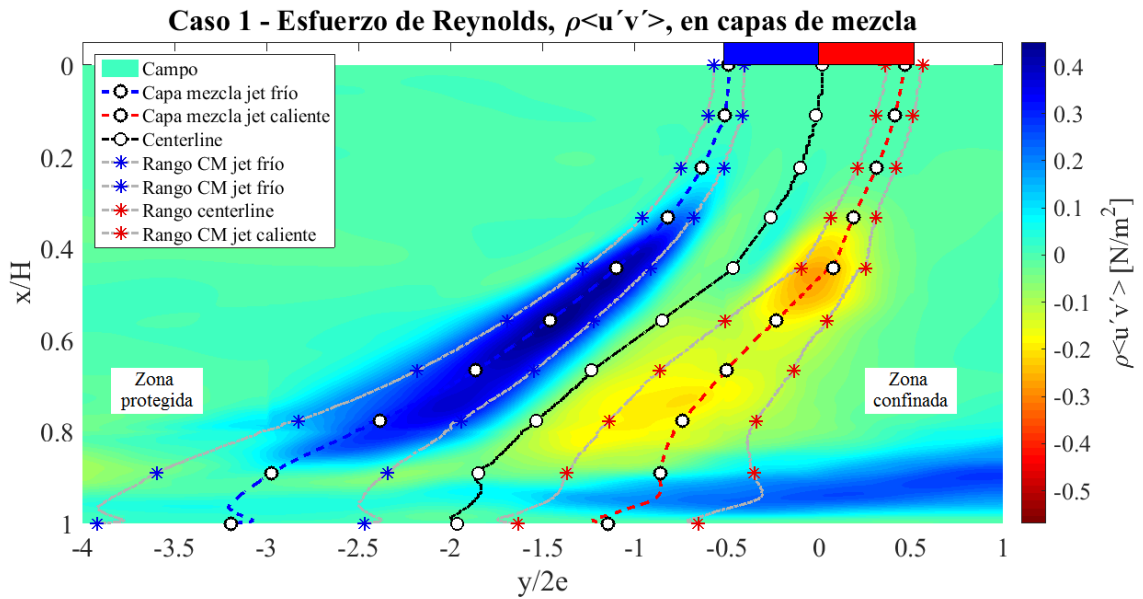


Figura 5.16: Campo del esfuerzo de Reynolds, detallado en las zonas de capas de mezcla - Caso 1

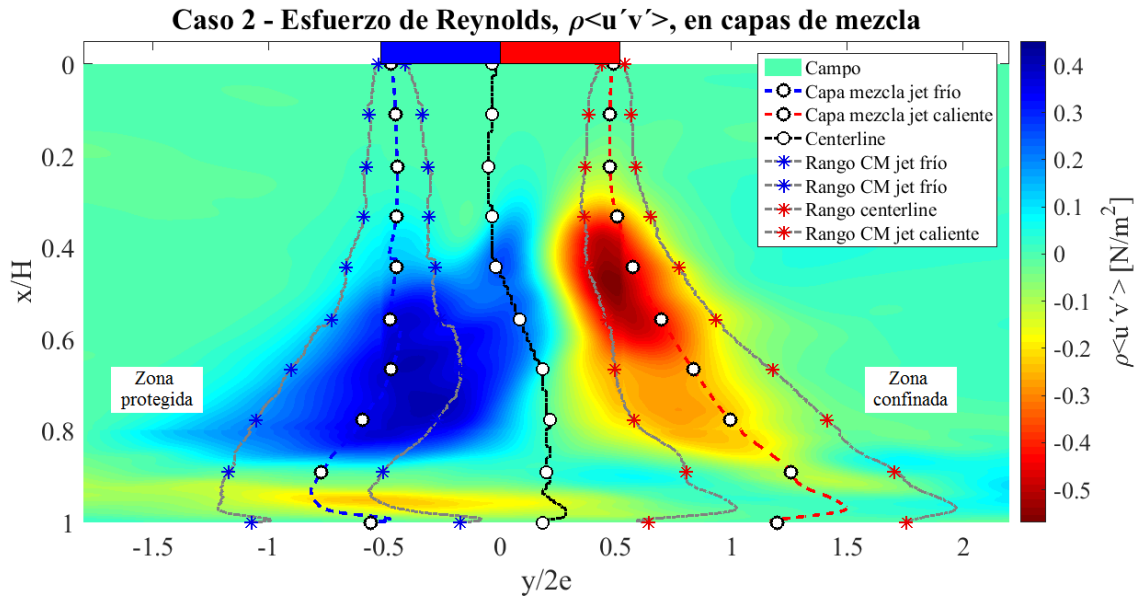


Figura 5.17: Campo del esfuerzo de Reynolds, detallado en las zonas de capas de mezcla - Caso 2

La turbulencia observada se debe al desarrollo propio del jet (por la interacción en las zonas de capas de mezcla entre la cortina con fluidos de características termodinámicas distintas) y por el proceso de unificación de ambos jets a partir del nivel $x/H = 0.4$, documentado previamente por Castro [13] y Schneider [12]. Estas dos situaciones pueden ocasionar la generación de fugas desde la zona confinada a la protegida, lo que se desarrolla más adelante en el presente informe.

Con respecto al signo del esfuerzo de Reynolds $\overline{\rho u'v'}$, las zonas con mayores valores positivos indican la presencia de esfuerzos aparentes en la dirección positiva del eje axial \hat{x} , debido a un transporte convectivo de momentum transversal \bar{y} en superficies perpendiculares a la dirección \hat{x} positiva, provocado a su vez por las fluctuaciones presentes en la zona. Simultáneamente, para el caso $\overline{\rho v'u'}$, indican la presencia de esfuerzos aparentes en la dirección positiva de \hat{y} debido a movimientos de momentum-x en la dirección positiva de \hat{y} .

Desde el punto de vista del transporte de momentum, los sectores negativos (azules), en ambos casos, indican la presencia de un flujo de momentum-x o -y en el sentido contrario al movimiento positivo de los campos de momentum transversal o axial, respectivamente. Esto debido al movimiento fluctuante de partículas en las direcciones perpendiculares a las del momentum transportado. De igual forma, los sectores positivos (rojos) corresponden a flujos de momentum -x e -y desplazados en la dirección negativa del campo de velocidad perpendicular a ellos, es decir, desplazados en los campos negativos de momentum-y y -x, respectivamente.

Con lo anterior, se muestra una zona importante en el jet frío de ambos casos en que se presencia un transporte de momentum hacia el lado protegido, pudiendo propiciar el traspaso de materia y calor desde el lado confiando. Ésta está comprendida entre los niveles $x/H=0.3$ y 0.9 de ambas cortinas de aire.

En las Figura 5.18 y Figura 5.20 se muestra el perfil del esfuerzo de Reynolds, $\overline{\rho u'v'}$, para distintos niveles verticales de la cortina, tanto para el caso 1 como para el caso 2, respectivamente.

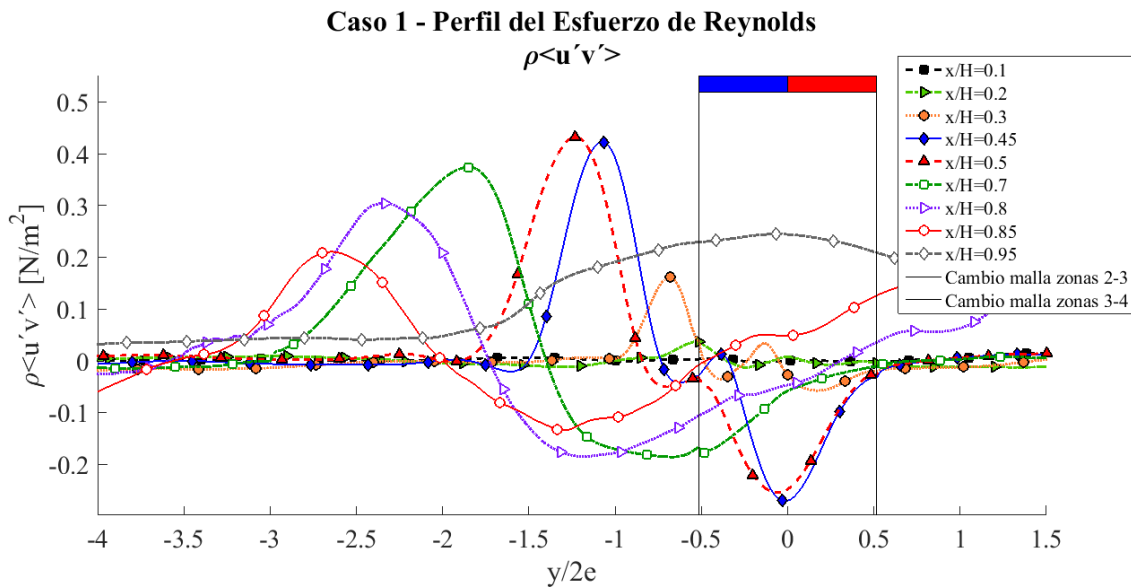


Figura 5.18: Perfil de esfuerzo de Reynolds, $\overline{\rho u'v'}$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 1

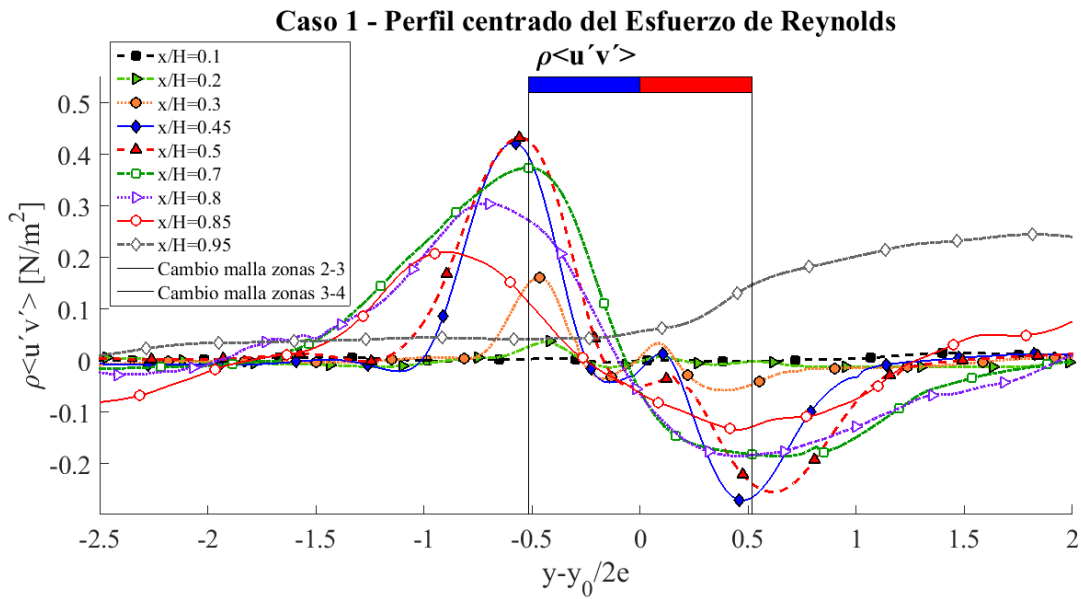


Figura 5.19: Perfil centrado del esfuerzo de Reynolds, $\rho \overline{u'v'}$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 1

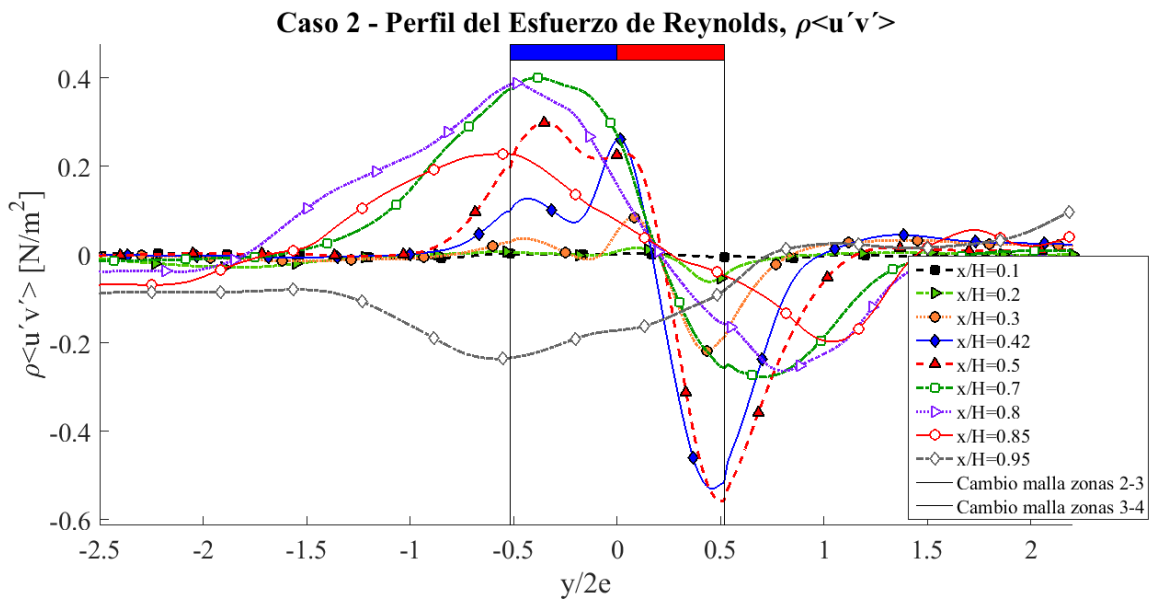


Figura 5.20: Perfil de esfuerzo de Reynolds, $\rho \overline{u'v'}$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 2

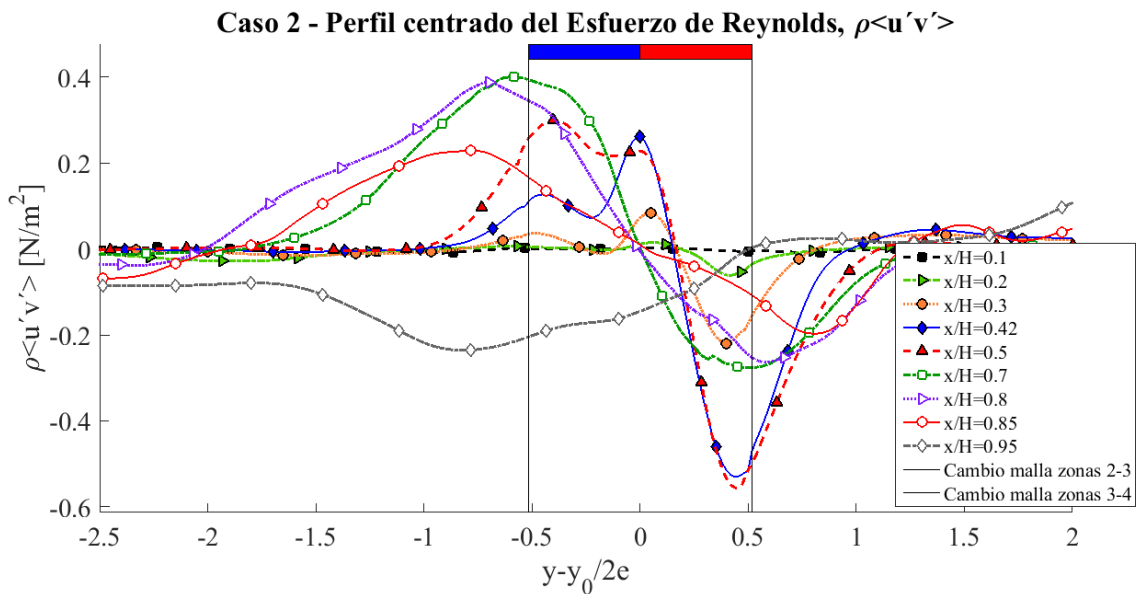


Figura 5.21: Perfil centrado del esfuerzo de Reynolds, $\rho \overline{u'v'}$, para distintos niveles de la cortina de aire – Caso 2

A partir de las figuras mencionadas, se evidencia el desplazamiento hacia el lado protegido de la cortina del caso 1, pues los perfiles de esfuerzo se desplazan hacia el lado izquierdo. De manera similar, se presencia el desplazamiento de la cortina del caso 2 hacia el lado confinado pero en menor grado que el caso 1. Para una mejor interpretación de los resultados, se muestran los perfiles mencionados centrados en las Figura 5.19 y Figura 5.21, es decir, con un desplazamiento en la dirección \hat{y} luego de centrar ambas cortinas.

En la zona de capa de mezcla “fría” existen valores positivos que luego comienzan a disminuir hasta 0, alcanzando el máximo en $x/H=0.5$, para el caso 1, y en $x/H=0.7$, para el caso 2, lo cual queda más claro en las figuras centradas. En esa zona existe un traspaso de momentum debido a que el flujo de momentum transversal es movido en la dirección axial positiva (hacia abajo), por fluctuaciones en el flujo. De manera similar, existe un flujo de momentum hacia la dirección transversal positiva (hacia la zona confinada) debido al campo de velocidades axiales. Este evento comienza a aumentar hasta que el jet comienza a unificarse, pues cuando se unifican (en $x/H=0.7$), disminuye el peak observado anteriormente. Lo anterior muestra que la turbulencia se genera y aumenta debido a la unificación de los jets de ambas cortinas.

En la línea central de la cortina, para el caso 1, hay solo valores negativos del esfuerzo de Reynolds hasta alcanzar el nivel $x/H=0.95$, en el cual se observa un valor positivo del esfuerzo. Sin embargo, su magnitud no es importante en comparación con las de la capa de mezcla fría. En este caso, existe un flujo de momentum transversal en la dirección negativa del eje axial \hat{x} (había arriba de la cortina), causado por fluctuaciones generadas por el contacto entre los jets. Para el caso 2, se observan valores positivos crecientes, que luego comienzan a hacerse más negativos. En efecto, en

el nivel en que ambos jets comienzan a juntarse ($x/H=0.3$) hay un peak positivo mayor que en la capa de mezcla fría, y es el máximo para la zona entre jets. Esto refleja un flujo de momentum transversal en la dirección positiva de \hat{x} , aguas abajo de la cortina, producto de la interacción que comienza a haber entre la cortina y el medio donde está inmersa en ese nivel, que comienza a disminuir luego de la formación del jet único. En la zona de impacto, esta situación se revierte debido al choque con el piso del túnel en ambos casos de estudio.

En la zona de la capa de mezcla caliente, se forman esfuerzos en la dirección negativa del eje \hat{x} para ambos casos de estudio. Esta condición se unifica e intensifica en la zona de unión entre los jets de la cortina (entre $x/H = 0.4$ y 0.7). Es decir, existe un flujo en el momento transversal en la dirección negativa del eje \hat{x} (hacia arriba) y, por ende, esfuerzos de corte aparentes en esa dirección. De igual forma, existe un flujo de momentum axial en la dirección negativa de \hat{y} , esto es desde la zona confinada a la zona protegida. Se observan valores más negativos en el caso 2 que en el caso 1, mientras que los máximos positivos observados son mayores en el caso 1 que en el caso 2. Esto puede estar relacionado con que los máximos observados poseen una magnitud mayor en el lado cuyo jet posee una mayor velocidad, pues los máximos positivos alcanzados en la capa de mezcla fría del caso 1 son mayores en magnitud que los del caso 2.

Esta puede ser la razón de la generación de vórtices tipo Görtler en zonas cercanas al piso del túnel, por la presencia de “esfuerzos de corte aparentes” en direcciones contrarias a la de desarrollo de la cortina, como documentó Castro [13]. También, en zonas cercanas al suelo del túnel ($x/H = 0.95$) se observa una inversión en la tendencia de los valores del esfuerzo en las zonas estudiadas. Es decir, los valores negativos se vuelven levemente positivos y viceversa. Esto sucede por la formación de jet de pared en la zona de impacto, debido al contacto con el suelo. También, esta situación puede ocurrir debido a la variación del campo de presión en la zona de impacto, reduciendo el momentum.

Este análisis queda más claro al observar las Figura 5.22 y Figura 5.23, en donde se muestra la evolución del esfuerzo de Reynolds en ambas capas de mezcla de la cortina y en la línea central de la misma, para los casos 1 y 2, respectivamente.

Se evidencia la presencia de turbulencia entre los niveles $x/H = 0.4$ y 0.8 , correspondientes al inicio de la unión entre jets y de la zona de impacto, respectivamente. También, en esta imagen se muestra claramente la presencia de jets de pared en la zona de impacto.

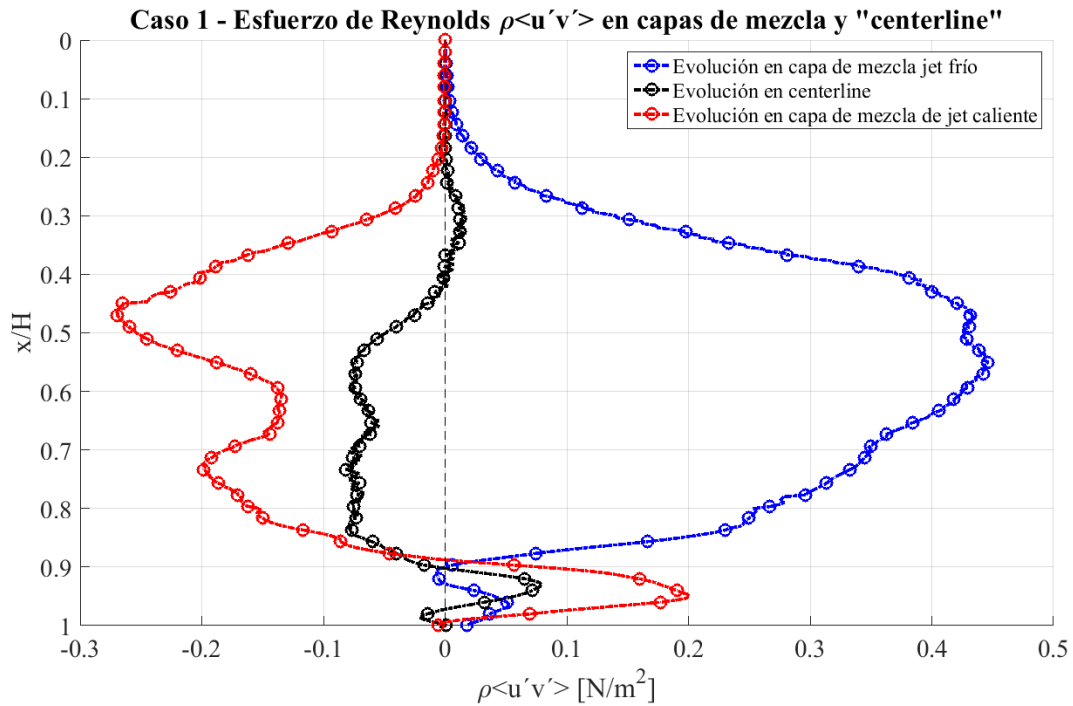


Figura 5.22: Evolución del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 1

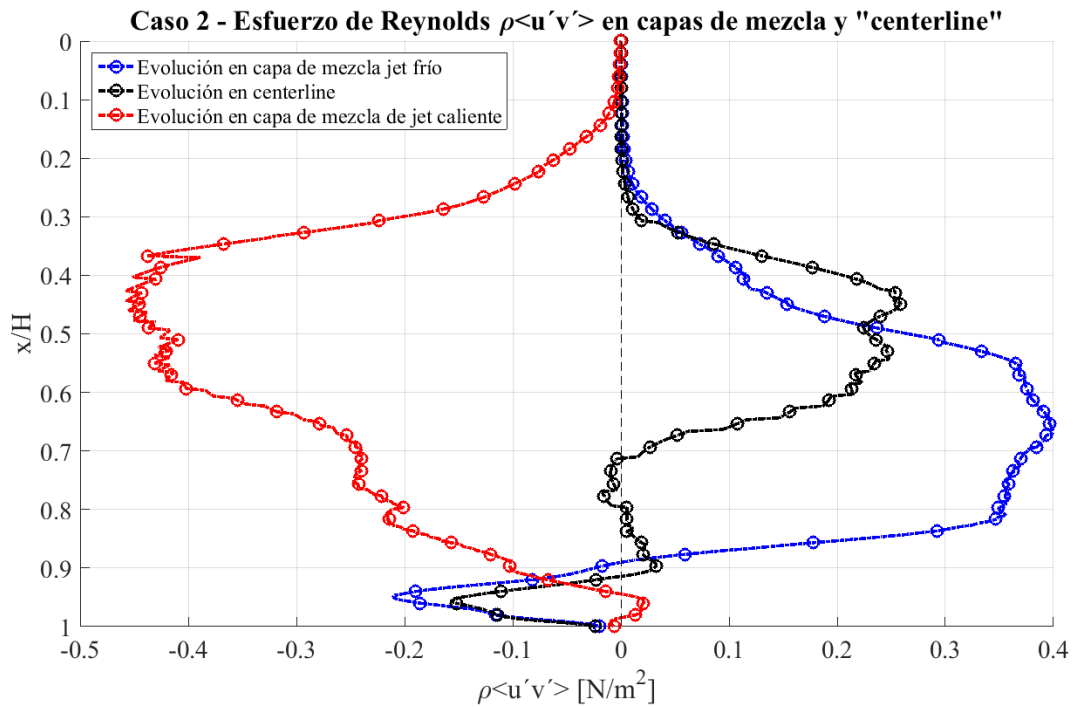


Figura 5.23: Evolución del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 2

Analizando el esfuerzo análogo, en ambas capas de mezcla fría se tendría un flujo de momentum axial en la dirección positiva de \hat{y} (hacia la zona protegida). En la línea central entre jets, para el caso 1 se detectaría un flujo de momentum axial en la dirección negativa de \hat{y} (hacia el lado protegido), mientras que para el caso 2 el flujo se dirigiría a la dirección positiva (hacia el lado confinado). Por último, en ambas capas de mezcla caliente se observa un flujo de momentum axial hacia la zona confinada.

Con todo lo anterior, es probable que el traspaso de momentum transversal máximo ocurra entre niveles los niveles $x/H = 0.5$ y 0.8 , entre los cuales se genera la unificación de los jets de la cortina de aire. Debido al comportamiento observado, los jets fríos parecieran funcionar como barrera contra el flujo transversal de momentum.

Para determinar si la presencia de turbulencia en las zonas mencionadas produce un aumento o disminución en el momentum, para cada dirección, es necesario analizar las derivadas del esfuerzo de Reynolds. Este estudio se presenta a continuación, en la sección 5.3.2.

5.3.2 Evolución del transporte de momentum axial y transversal, en las capas de mezcla y línea central de la cortina

En esta sección se presentan los perfiles de las derivadas parciales transversal y axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{v'u'})/\partial y$ y $-\partial(\rho \overline{u'v'})/\partial x$, respectivamente. El primer término pertenece al balance de momentum del flujo medio en la dirección axial, mientras que el segundo proviene del balance de momentum del flujo medio en la dirección transversal. Se pueden observar en las ecuaciones (2.26) y (2.27) de la sección 2.2.2 de Antecedentes. Dichos términos pueden ser interpretados como un traspaso de momentum desde o hacia el flujo medio debido a las fluctuaciones turbulentas existentes, en las direcciones respectivas, dependiendo del signo que cada uno posee. El análisis se presenta en dos partes: se aborda primero el transporte transversal de momentum y, luego, el transporte axial.

A continuación se presenta un análisis de estos términos en diferentes niveles x/H de la cortina.

5.3.2.1 Transporte transversal de momentum

En las Figura 5.24 y Figura 5.26 se muestran los perfiles de la derivada parcial negativa del esfuerzo de Reynolds, con respecto a \hat{x} (dirección axial a la de propagación de la cortina de aire), para diferentes niveles de la cortina de aire estudiada. Este término representa la contribución al incremento de momentum transversal del flujo medio, debido a la presencia de fluctuaciones turbulentas. En las Figura 5.25 y Figura 5.27 se presentan los perfiles centrados de derivada axial para los casos 1 y 2, respectivamente.

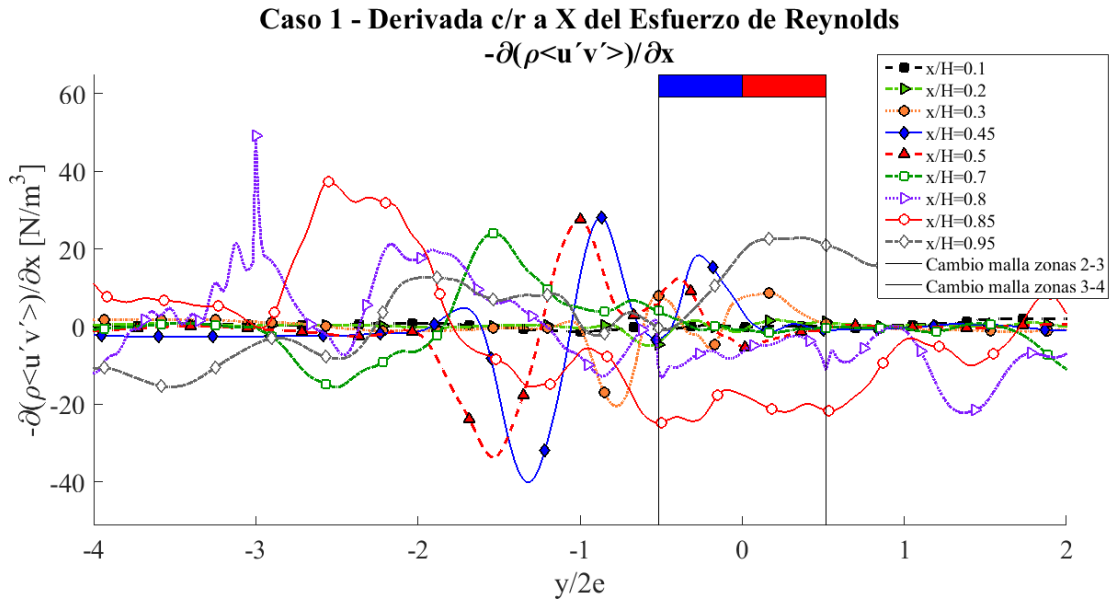


Figura 5.24: Perfil de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial x$ – Caso 1

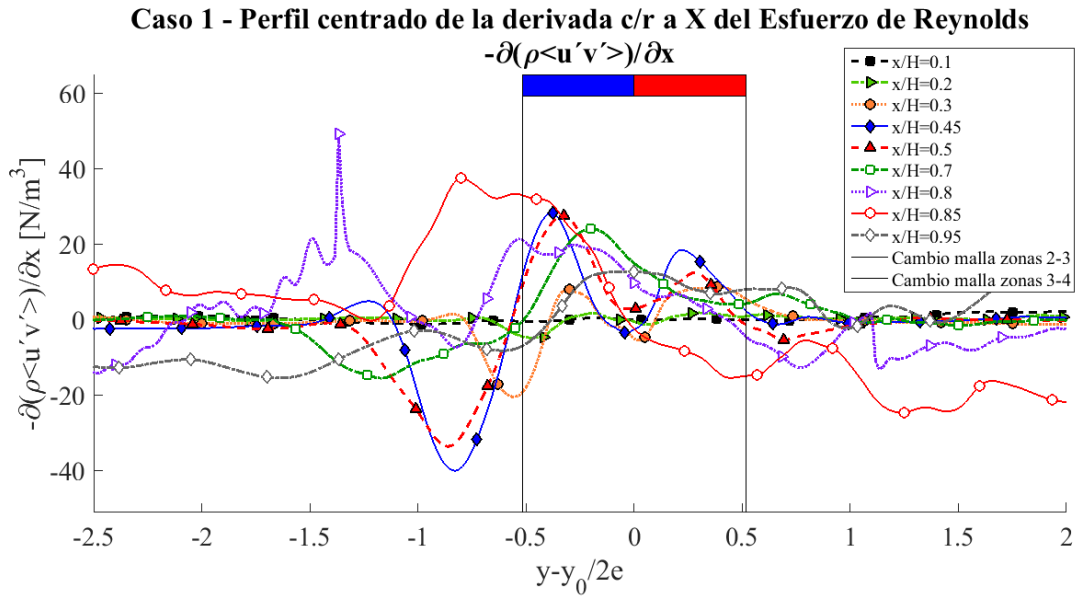


Figura 5.25: Perfil centrado de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial x$ – Caso 1

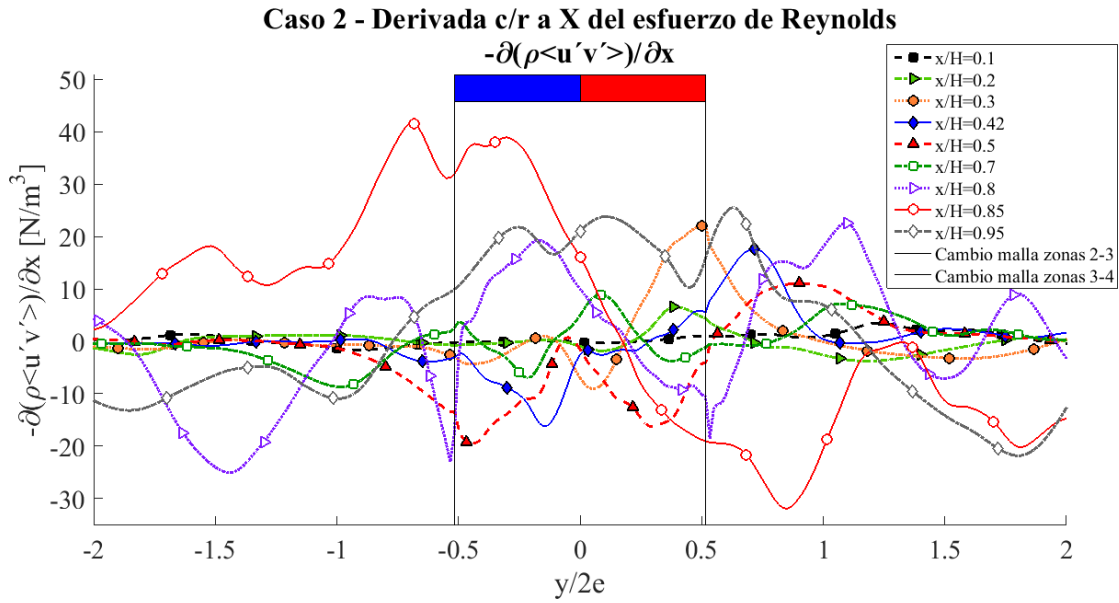


Figura 5.26: Perfil de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial x$ - Caso 2

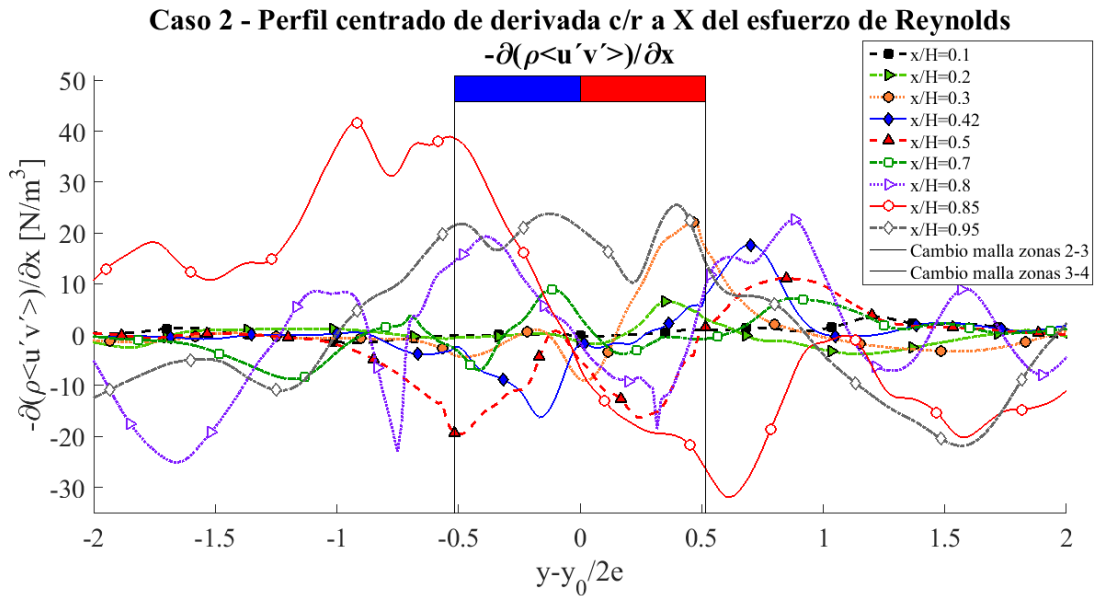


Figura 5.27: Perfil centrado de la derivada axial del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial x$ - Caso 2

Un análisis más claro se puede realizar a partir de la evolución de la derivada parcial axial en las capas de mezcla, mostradas en las Figura 5.28 y Figura 5.29. En la abscisa de cada gráfico se muestran los valores que toman las derivadas del esfuerzo de Reynolds, mientras que en sus ordenadas muestran los niveles de la cortina (posición vertical adimensionalizada por el largo del jet, H). En ellas, se destacan los peaks más grandes en los jets de mayor velocidad de cada caso de estudio.

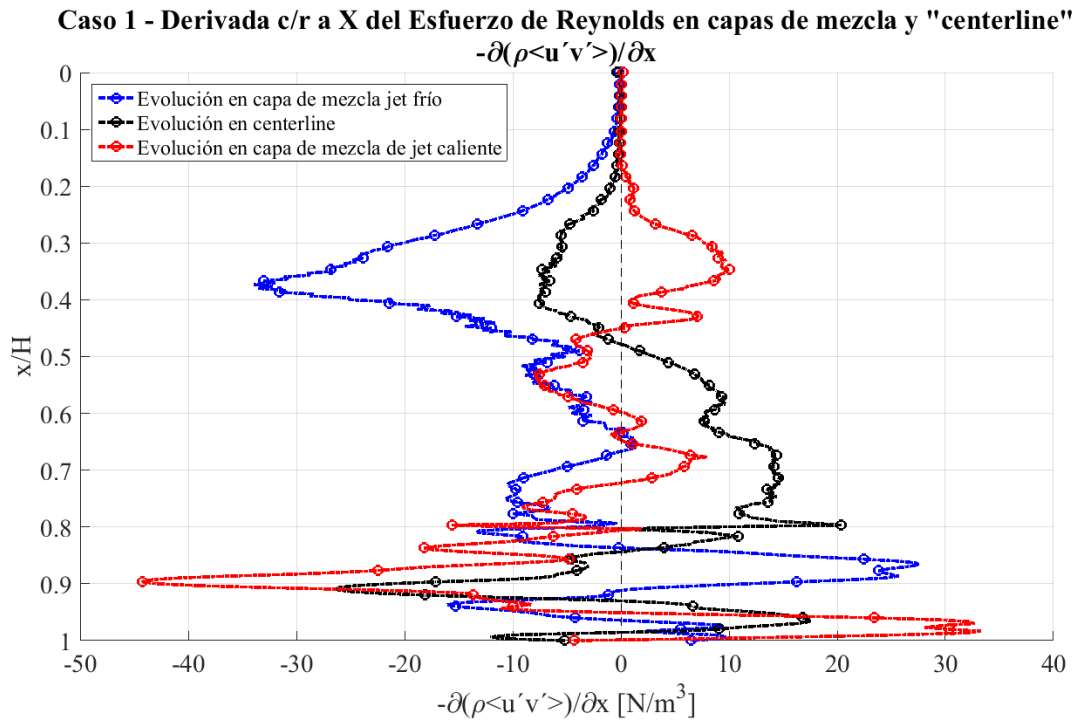


Figura 5.28: Evolución de la derivada axial negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1

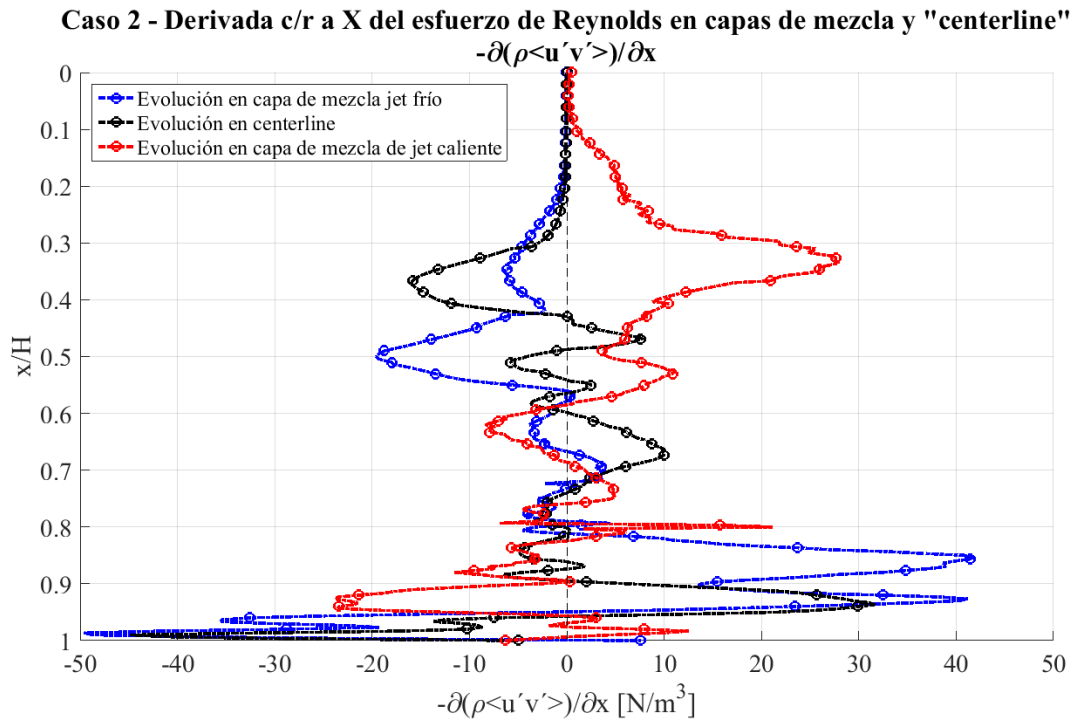


Figura 5.29: Evolución de la derivada axial negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 2

I. Transporte transversal de momentum en la capa de mezcla caliente entre el jet caliente y la zona confinada

Observando las Figura 5.28 y Figura 5.29 se puede notar en los niveles más cercanos a la boquilla ($x/H = 0.1$) desde donde el jet es lanzado (zona potencial), la inexistencia de transporte de momentum hacia o desde el flujo medio debido a la inexistencia de turbulencia en la cortina. Esto último es una característica de la zona potencial [11] en donde no hay transferencia transversal de momentum, pues la turbulencia comienza a desarrollarse luego de la pérdida del cono potencial en un jet plano en impacto, desde la zona de transición en adelante. Para ambos casos, siendo mayor en el caso 2, en $x/H = 0.3$ se observa un máximo positivo, lo que se interpreta como una contribución al momentum medio transversal por parte del momentum turbulento. Es decir, el momentum transversal comienza a aumentar en la capa de mezcla debido a la fricción entre el jet caliente con el aire de la zona confinada, la cual posee una menor o casi nula velocidad con respecto a la del jet caliente. Esto genera esfuerzos de corte responsables de la aparición de inestabilidades similares a las de tipo Kelvin-Helmholtz [48].

A partir de $x/H=0.3$, el valor de la derivada axial negativa del esfuerzo de Reynolds comienza a disminuir progresivamente, como se puede observar en los niveles siguientes. Para el caso 1, la derivada pasa a ser negativa desde $x/H=0.4$ hasta $x/H=0.6$, para luego ser nuevamente positiva hasta $x/H=0.75$. En el caso 2, en $x/H=0.55$ la derivada aún es positiva, pasando a ser negativa recién en $x/H=0.6$. En $x/H=0.7$ la derivada es positiva y después oscila entre valores positivos y negativos a partir de $x/H=0.8$, identificando el régimen de zona de impacto de ambas cortinas. Esto es, existe un incremento en el flujo de momentum, en la dirección transversal, entre $x/H=0.2$ y 0.5 , siendo mayor en el caso 2 que en el caso 1 debido a la mayor velocidad del jet caliente. Luego, existe una disminución en el flujo de momentum medio debido a una entrega del mismo hacia el flujo de momentum turbulento, en $x/H=0.5$ y 0.6 , para los casos 1 y 2, respectivamente. En la zona de impacto, comienza a haber una alternación entre un aporte hacia el flujo de momentum y una disminución del mismo, debido a flujos de momentum turbulentos.

II. Transporte transversal de momentum en la línea central de la cortina de aire o "centerline"

En el nivel $x/H= 0.4$ se evidencia la presencia de un mínimo negativo en la línea central de la cortina de aire, en ambos casos de estudio, siendo mayor en el caso 2. El signo negativo indica una disminución del momentum transversal medio producto del traspaso de momentum hacia el flujo turbulento. Es decir, se evidencia un traspaso de momentum producto de la interacción entre ambos jets.

A continuación, luego del comienzo de la unificación de ambos jets, se observan valores positivos de la derivada axial desde $x/H= 0.5$ hasta $x/H=0.8$, para el caso 1. Sin embargo, para el caso 2 los valores positivos no son tan considerables como en el caso 1. Esto evidencia una contribución

turbulenta hacia el flujo de momentum medio debido, nuevamente, a la interacción entre ambos jets en su proceso de unificación, el cual ocurre desde $x/H=0.42$ hasta 0.7.

Luego, a partir del nivel $x/H = 0.7$ el valor de la derivada comienza nuevamente a disminuir para ser negativo y comenzar a oscilar a partir de $x/H = 0.8$. Lo último mencionado sugiere un traspaso de momentum turbulento entre el flujo medio y el turbulento debido a la presencia de la zona de impacto.

III. Transporte transversal de momentum en la capa de mezcla fría entre la cortina de aire y la zona protegida

Desde $x/H = 0.3$ hasta $x/H = 0.4$, se desarrollan valores negativos de la derivada, siendo mayores en el caso 1 que en el caso 2. Esto indica un traspaso de momentum medio al momentum turbulento, lo que está relacionado con esfuerzos de corte generados en la capa de mezcla producto del contacto con un fluido que posee características diferentes a las de la cortina. Es mayor en el caso 1 debido a que el jet frío posee una mayor velocidad que en el caso 2 (similar a lo que ocurre en la capa de mezcla caliente). Se alcanza un valor mínimo negativo en $x/H = 0.5$ para el caso 2, producto de una disminución en el momentum medio por a su traspaso hacia el momentum turbulento, provocando un aumento en la turbulencia en esta zona.

En $x/H = 0.6$ el valor se hace menos negativo para luego ser más negativo a partir de $x/H = 0.8$. Después, en $x/H = 0.9$ alcanza el valor máximo positivo de presentados en la capa de mezcla “fría”, para posteriormente volver a ser negativo. Con lo recién expuesto, es evidente que la fluctuación entre valores negativos y positivos, es decir, entre intercambio de momentum entre el medio y el flujo turbulento, es debido al acercamiento a la zona de impacto.

Entonces, con todo lo anteriormente expuesto, se destaca el nivel $x/H=0.5$ en el caso 2, debido al peak negativo en la capa de mezcla fría y en la línea entre jets, y al mínimo positivo observado en la capa de mezcla caliente. Esto pudiera ser un indicio de traspaso de momentum transversal hacia la zona protegida. Para el caso 1, entre $x/H=0.5$ y 0.6 se observa un peak negativo en ambas capas de mezcla, por lo que pudiera ser un indicio de transferencia de momentum que permitan la existencia de fugas de calor.

Es necesario analizar la evolución de la derivada axial en las capas de mezcla fría y caliente, y en la línea central de la cortina para otorgar una conclusión más certera.

5.3.2.2 Transporte axial de momentum

En las Figura 5.30 (caso 1) y Figura 5.32 (caso 2) se muestran los perfiles de la derivada parcial negativa del esfuerzo de Reynolds, con respecto a la dirección transversal a la dirección de propagación de la cortina, \hat{y} , para diferentes niveles en la dirección axial de la cortina de aire. En la Figura 5.31 se muestra el perfil centrado de la derivada del caso 1, para una mejor comprensión. No se presenta el perfil centrado para el caso 2 debido a que no se observó mayores diferencias

respecto al caso no centrado. Se presenta a continuación un análisis de la evolución del transporte axial de momentum a lo largo de la cortina que pudiera favorecer un transporte transversal de momentum desde la zona confinada a la protegida.

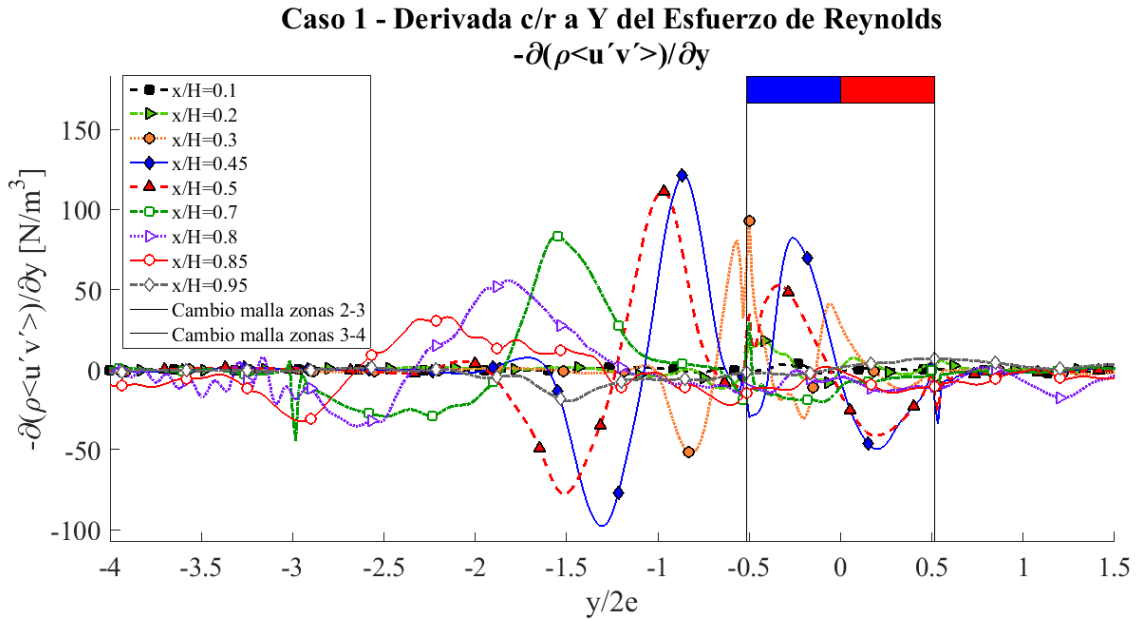


Figura 5.30: Perfil de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial y$ - Caso 1

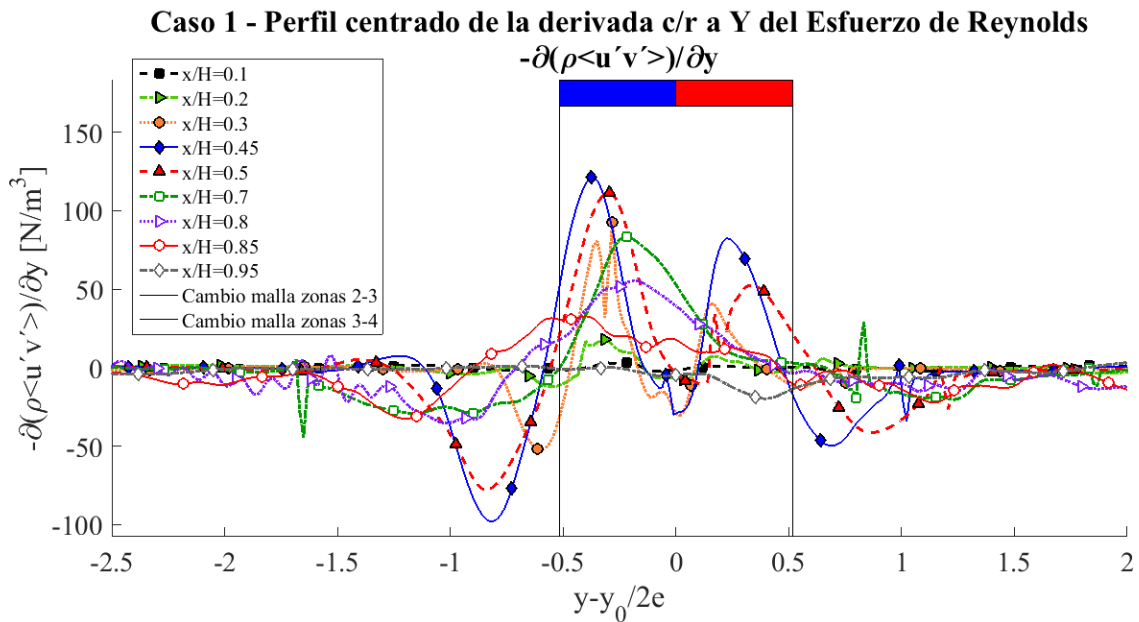


Figura 5.31: Perfil centrado de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial y$ - Caso 1

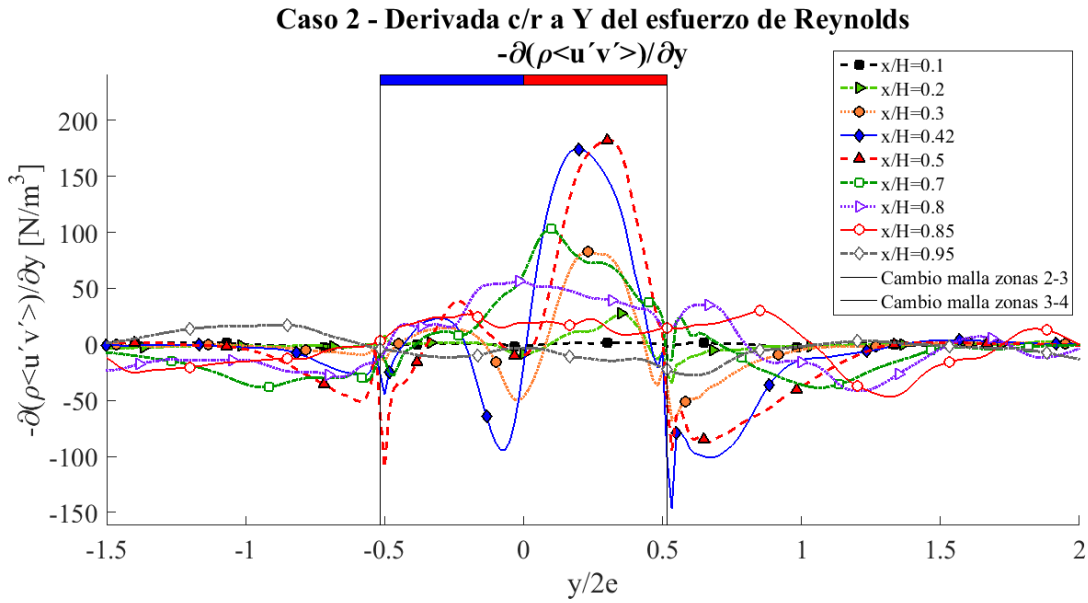


Figura 5.32: Perfil de la derivada transversal del esfuerzo de Reynolds, $-\partial(\rho \overline{u'v'}) / \partial y$ - Caso 2

I. Transporte axial de momentum en la capa de mezcla entre el jet caliente y la zona confinada

En el nivel más cercano a la boquilla donde ambos jets de la cortina son eyectados, $x/H = 0.1$, no se presenta transferencia de momentum axial por estar dentro de la zona potencial de cada jet. Avanzando por los niveles de la cortina se observan valores mínimos cada vez más negativos, por lo que es posible afirmar que el momentum axial medio disminuye debido a su contribución al momentum turbulento, lo cual tiene sentido por la interacción entre el lado caliente de la cortina y la zona confinada con diferentes características dinámicas y térmicas.

En $x/H = 0.45$, para el caso 2, y 0.42, para el caso 1, se alcanza el mínimo valor negativo, pues a partir de él solo se observan valores levemente positivos para la derivada, como se observa entre los niveles $x/H = 0.8$ y 0.9. A continuación, la derivada transversal se iguala a cero. Esto implica que, en la capa de mezcla caliente, prepondera el traspaso axial de momentum desde el flujo medio hacia el flujo turbulento debido a la interacción con la zona confinada. En la zona de impacto, la pared del túnel detiene el traspaso de momentum axial.

Los valores mínimos alcanzados se encuentran entre los niveles $x/H = 0.5$ y 0.6. Lo que indica en estos niveles existe un traspaso de momentum desde el flujo medio hacia el momentum turbulento, pudiendo provocar condiciones, como el estiramiento de vórtices, que propiciarán el intercambio transversal de momentum. Esto se debe a que un traspaso del flujo de momentum medio al turbulento genera una ralentización del flujo en la dirección considerada, facilitando el intercambio el traspaso en la dirección perpendicular a la considerada.

II. Transporte axial de momentum en la línea central de la cortina de aire o “centerline”

Tal como en el caso anterior analizado, en el nivel más cercano a la boquilla no hay intercambio axial de momentum. Posteriormente, a partir del nivel $x/H = 0.2$, se observan valores mínimos cada vez negativos en la zona entre jets, alcanzando valores de similar magnitud que los alcanzados en el mismo nivel de la capa de mezcla caliente. Entonces, existe intercambio de momentum axial medio hacia el flujo de momentum turbulento, tal como sucede en la dirección transversal de transporte de momentum analizada anteriormente. Sin embargo, a partir de $x/H = 0.5$ el valor de la derivada se hace cero y comienza a ser positivo, alcanzando su máximo en el nivel $x/H=0.7$ para luego disminuir también a cero, como en la capa de mezcla caliente. Esto muestra que existe un aumento en el momentum axial del flujo medio debido a una contribución de momentum por parte del flujo turbulento. El máximo alcanzado en 0.7 tiene sentido y se debe a que es en ese nivel donde ambos jets se unifican completamente, conformando un único jet diferente a los anteriores. Por esta razón, la turbulencia que ocasionó la mezcla entre ambos contribuye axialmente al flujo medio, pero su contribución disminuye debido a la influencia de la zona de impacto.

III. Transporte axial de momentum en la línea de velocidad máxima de la cortina de aire

A partir de $x/H = 0.2$ se observan máximos positivos en las zonas de velocidad máxima de ambos jets, refiriéndose a una contribución al momentum axial medio por parte del momentum turbulento. Dichos peaks comienzan a disminuir en los siguientes niveles del jet, producto que ambos jets comienzan a mezclarse. El proceso de mezcla comienza en $x/H = 0.42$ en el caso 2, y en $x/H=0.45$ en el caso 1, sin embargo, aún en $x/H=0.6$ se observa una leve influencia del jet frío sobre el jet nuevo que se está formando a partir de la unificación de ambos.

IV. Transporte axial de momentum en la capa de mezcla entre la cortina de aire y la zona protegida

En $x/H = 0.1$ no se observa transferencia de momentum axial, tal como en las otras zonas analizadas, debido a que en dicho nivel la velocidad axial de ambos jets es la misma con la que es eyectado [11]. Avanzando por los niveles de la cortina, y de igual forma que en la capa de mezcla caliente, se observan valores mínimos cada vez más negativos pero de menor magnitud que en caso caliente. La explicación de esta situación es la misma que en el caso caliente; la menor magnitud se debe a que el aire del lado protegido posee menores velocidades y temperaturas que el lado confinado, por lo que el intercambio axial es menor que en el lado caliente. Desde $x/H = 0.5$ en adelante, tal como en la capa de mezcla caliente, los valores negativos comienzan a atenuarse fluctuando levemente por valores positivos en niveles cercanos a la zona de impacto. Por lo tanto, en la capa de mezcla fría también prepondera la pérdida de momentum en el flujo medio por el

traspaso hacia el momentum turbulento. Vale destacar que los valores más negativos ocurren entre los niveles $x/H = 0.6$ y 0.7 .

A partir del análisis anterior, se observa que en la línea central entre los jets se observan transferencias de momentum tanto en la dirección axial como en la transversal a la cortina, mientras éstos aún se comportan como jets separados.

No es evidente aún la existencia de algún nivel de la cortina en que se propicie el intercambio de momentum desde la zona confinada a la zona protegida. Si bien es posible detectar la dirección del traspaso de momentum entre el flujo medio y el turbulento dentro de la cortina con el análisis de las derivadas del esfuerzo de Reynolds, no basta para concluir sobre el sentido del movimiento axial que pudiera favorecer el traspaso transversal de momentum. Sin embargo, se debe destacar la transferencia de momentum axial casi nula en niveles que rodean a $x/H = 0.5$ y el mínimo negativo alcanzado en $x/H = 0.4$, correspondiente al nivel donde ambos jets comienzan a juntarse.

Se procede, entonces, a analizar con más detalle la evolución de las derivadas transversal del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla y línea “*centerline*” de cada caso. La evolución del transporte de momentum en la dirección axial se observan en las Figura 5.33 para el caso 1, Figura 5.34 para el caso 2, respectivamente. En la abscisa de cada gráfico se muestran los valores que toman las derivadas del esfuerzo de Reynolds, mientras que en sus ordenadas muestran los niveles de la cortina (posición vertical adimensionalizada).

En la Figura 5.33 (caso 1), se observa un marcado peak negativo ubicado en la capa de mezcla del lado frío en el nivel $x/H = 0.4$. Para ese mismo nivel, se observan valores negativos en la línea entre jets y un valor positivo en la capa de mezcla caliente. Esto quiere decir que el flujo medio, por el lado del jet frío, disminuye su tasa de momentum debido al traspaso del mismo hacia el campo de fluctuaciones turbulentas, provocando posiblemente un aumento en el proceso de estiramiento de vórtices.

En la Figura 5.34 (caso 2), se observan peaks principales en las tres curvas, siendo el más importante el peak positivo ubicado en el nivel $x/H = 0.4$ de la capa de mezcla del jet caliente. Esto indica que en esa zona, el flujo de momentum contribuye al incremento de la tasa de momentum en la dirección transversal. También, se observan peaks en $x/H = 0.4$ de la línea central entre jets y en $x/H = 0.5$ de la capa de mezcla fría. En ambas zonas el peak es negativo, lo que indica un traspaso de momentum desde el flujo medio al flujo turbulento. Por lo tanto, es posible que el aumento generado en el nivel anterior a los dos últimos mencionados en la capa de mezcla caliente propicie el intercambio de momentum mostrado posteriormente en las capas de mezcla fría y en la línea “*centerline*”. Se evidencia la importancia de la zona comprendida entre esos niveles de la cortina.

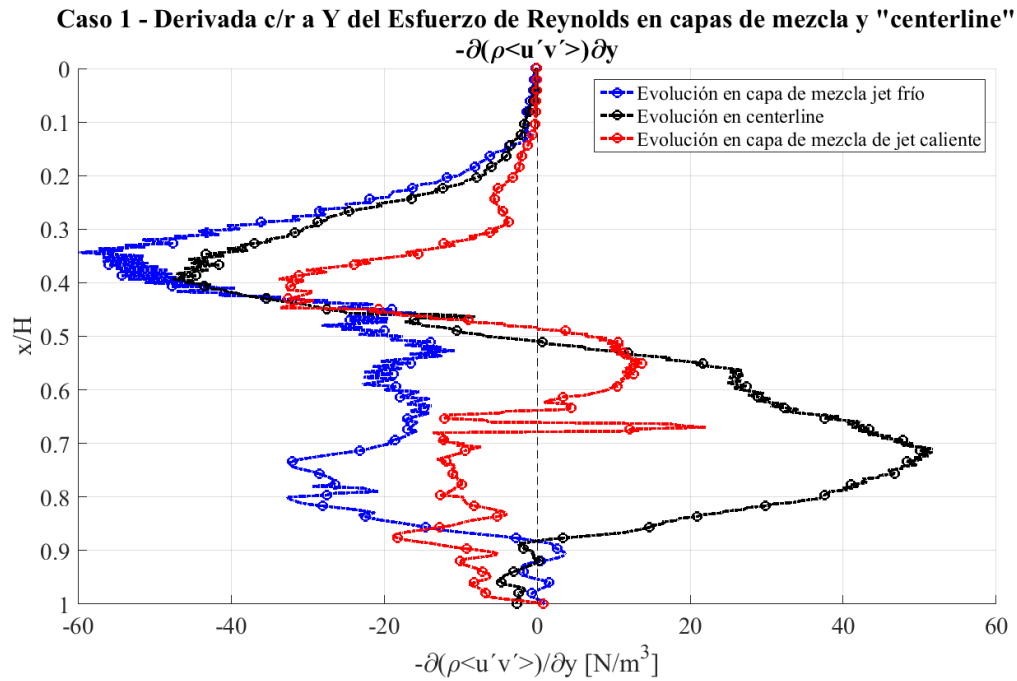


Figura 5.33: Evolución de la derivada transversal negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1

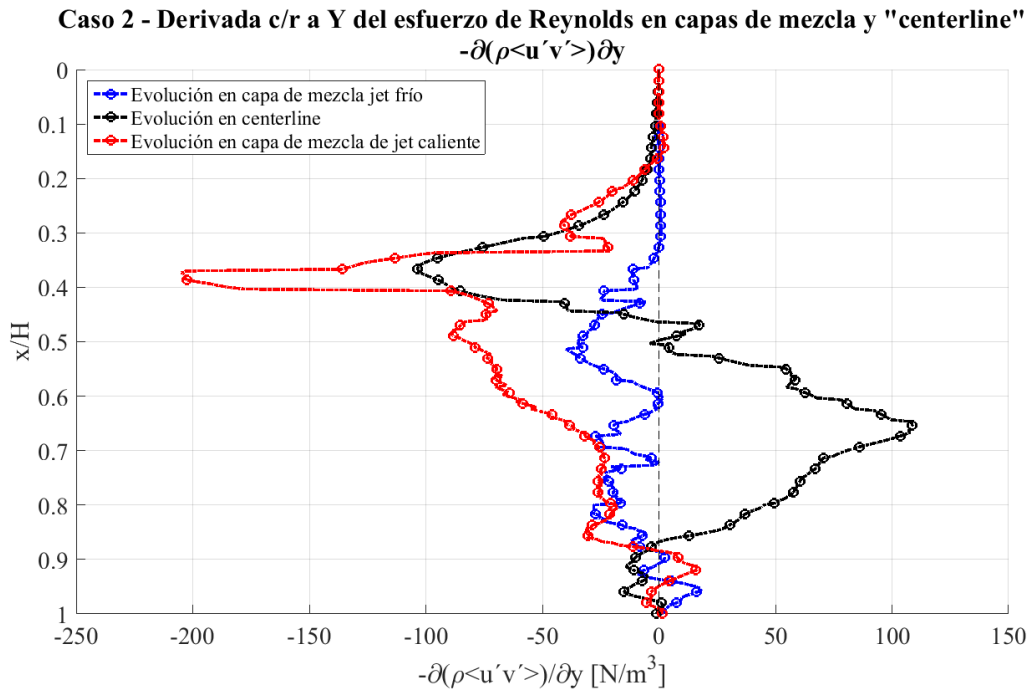


Figura 5.34: Evolución de la derivada transversal negativa del esfuerzo de Reynolds en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina - Caso 2.

Tanto para el caso 1 como para el caso 2, se observa un peak positivo en la línea central entre jets, ubicado en entre $x/H = 0.6$ y 0.7 . En esos niveles los jets de ambas cortinas están completando su unificación, razón por la cual se explica el aumento en la tasa de momentum del flujo medio.

Por lo tanto, de las figuras analizadas se desprende principalmente la importancia de la zona comprendida entre $x/H = 0.3$ y $x/H = 0.6$, como se había mencionado antes. Es necesario contrarrestar este análisis con el de transferencia de calor turbulento para concluir sobre su influencia en el confinamiento de la fuente de calor.

5.4 Transporte transversal de calor turbulento

En esta sección se presenta el análisis referente al transporte de calor turbulento. Esto último sucede debido a que un campo vectorial puede transportar magnitudes escalares activas, como es el caso de la temperatura. Se realiza un análisis del transporte de calor en la dirección transversal a la dirección de propagación de la cortina de aire y su contribución en la tasa de incremento de energía del flujo.

5.4.1 Flujo transversal de calor turbulento

En la Figura 5.35 se muestra el campo del flujo transversal de calor de Reynolds en la zona estudiada para ambos casos. En las Figura 5.36 y Figura 5.37, se demarcan la línea central de la cortina o “*centerline*” (línea negra) y las líneas de capas de mezcla formadas entre el lado frío de la cortina con el ambiente protegido (línea azul punteada) y entre el lado caliente de la cortina con la zona confinada (línea roja punteada). También, se muestran líneas de color azul y rojo más oscuros que denotan los rangos considerados para cada capa de mezcla, como se mencionó anteriormente. Los valores más positivos se muestran en un color azul oscuro en la figura, mientras que los más negativos poseen un color rojo oscuro. Un valor positivo para el transporte transversal de calor turbulento, $\overline{\rho v' T'}$, indica que el calor es transportado en la dirección positiva de la dirección del campo de velocidad incluida en la expresión. Es decir, en la dirección positiva de la dirección transversal \hat{y} . Por el contrario, un valor negativo se refiere al transporte de calor en la dirección negativa de \hat{y} .

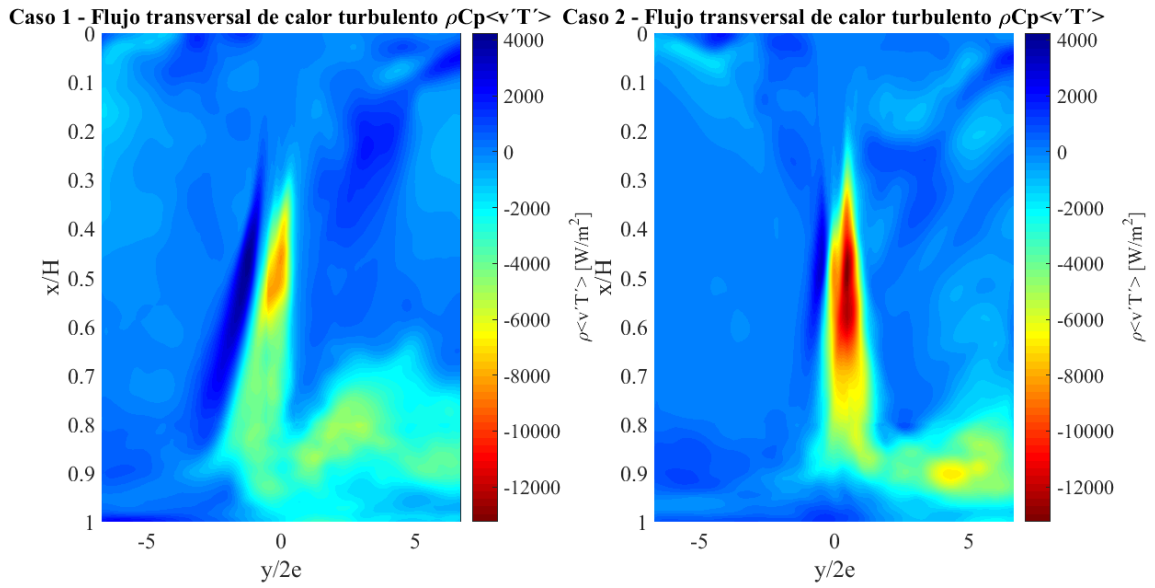


Figura 5.35: Campo del flujo transversal de calor turbulento, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)

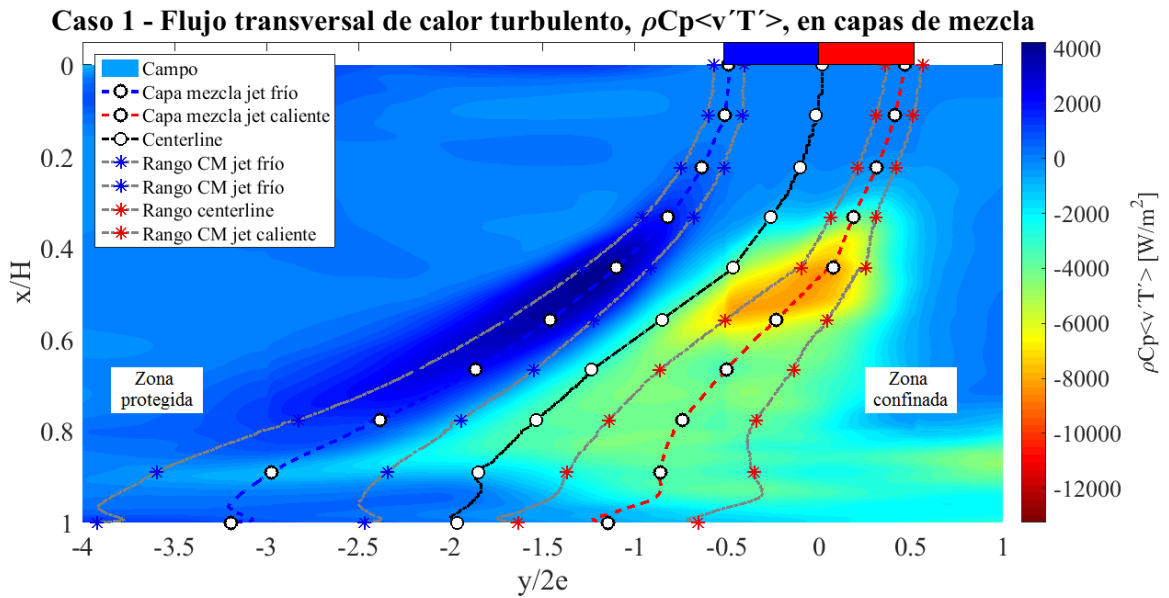


Figura 5.36: Campo del flujo transversal de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina - Caso 1

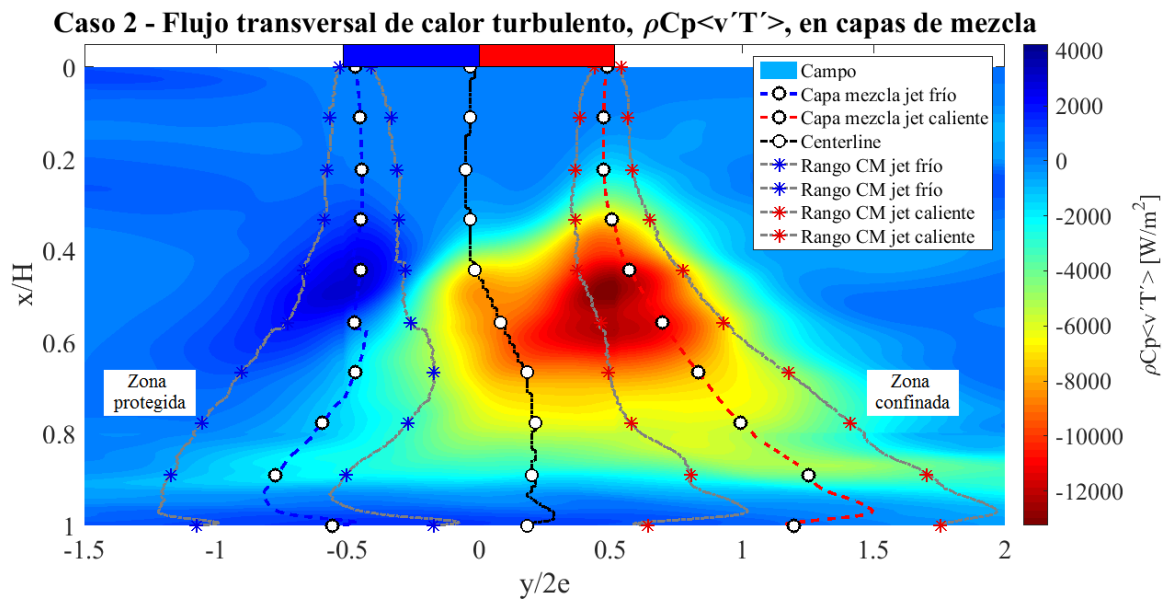


Figura 5.37: Campo del flujo transversal de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina - Caso 2

A partir de las figuras mostradas se destaca una zona roja oscura rodeada de una zona roja más clara entre los niveles $x/H = 0.4$ y 0.7 , ubicada entre la capa de mezcla y la línea central de la cortina de ambos casos. Por lo tanto, en esa zona existiría un alto transporte de calor turbulento en la dirección transversal negativa, que es hacia la zona protegida.

En la capa de mezcla del lado frío del jet, entre los niveles $x/H = 0.4$ y 0.6 se observa una pequeña zona azul oscuro. Esto quiere decir que la dirección del transporte de calor es en la dirección positiva del eje transversal. Es decir, hacia el lado protegido.

Lo anterior es un claro indicio de que existe transporte de calor turbulento en la dirección transversal negativa de la cortina. Ambas tendencias mostradas en el campo del flujo transversal se pueden confirmar o no en el estudio del perfil del flujo transversal de calor, mostrado a continuación.

5.4.2 Evolución del transporte transversal de calor turbulento en capas de mezcla y en línea central de la cortina de aire

En las Figura 5.38 y Figura 5.40 se muestra la evolución del perfil flujo transversal de calor para diferentes niveles de la cortina, para el caso 1 y 2, respectivamente. En el caso 1, se evidencia el desplazamiento que la cortina sufre, por lo que se presentan también los perfiles centrados del flujo transversal de calor en las Figura 5.39 y Figura 5.41.

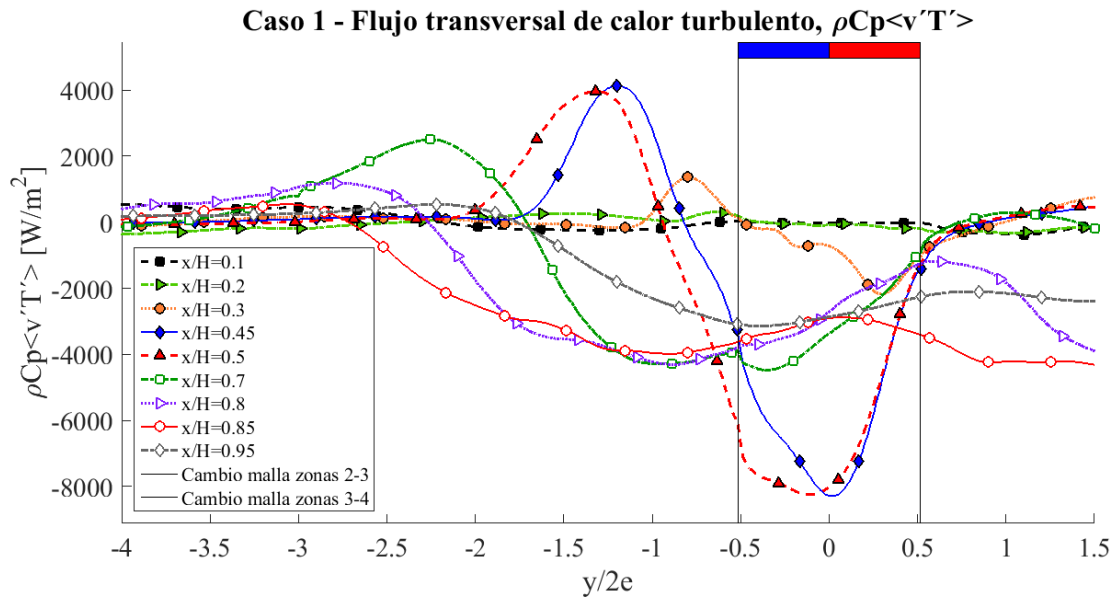


Figura 5.38: Perfiles del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 1

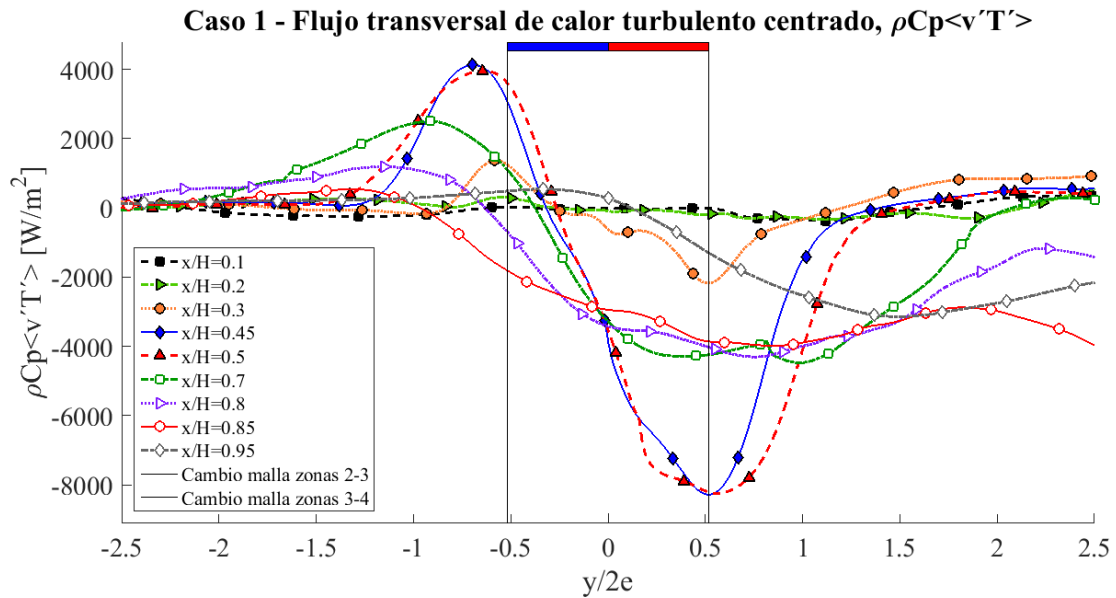


Figura 5.39: Perfiles centrados del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 1

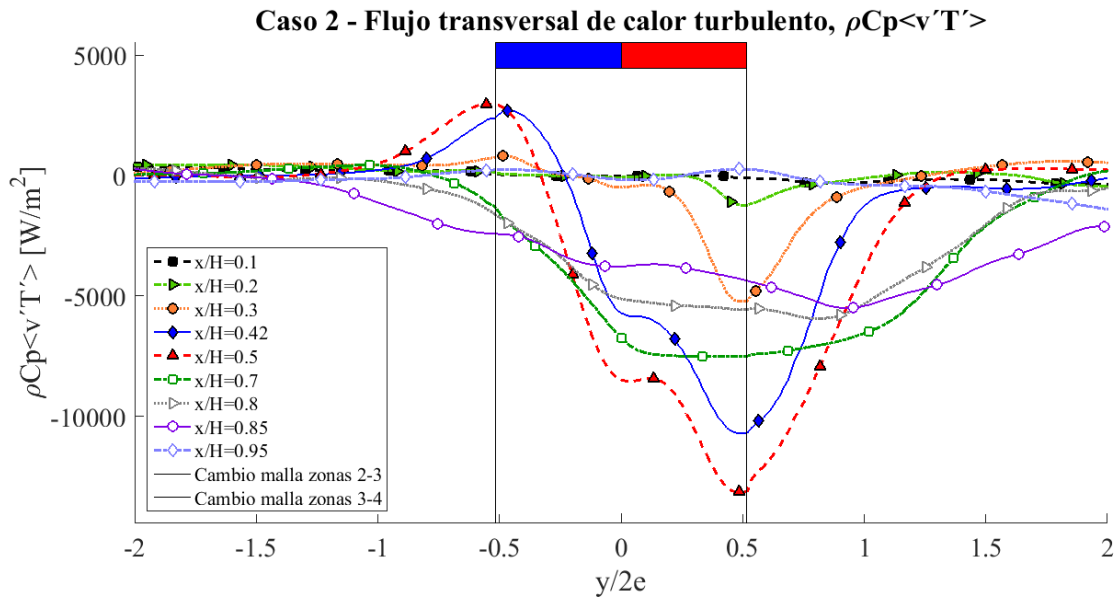


Figura 5.40: Perfiles del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 2

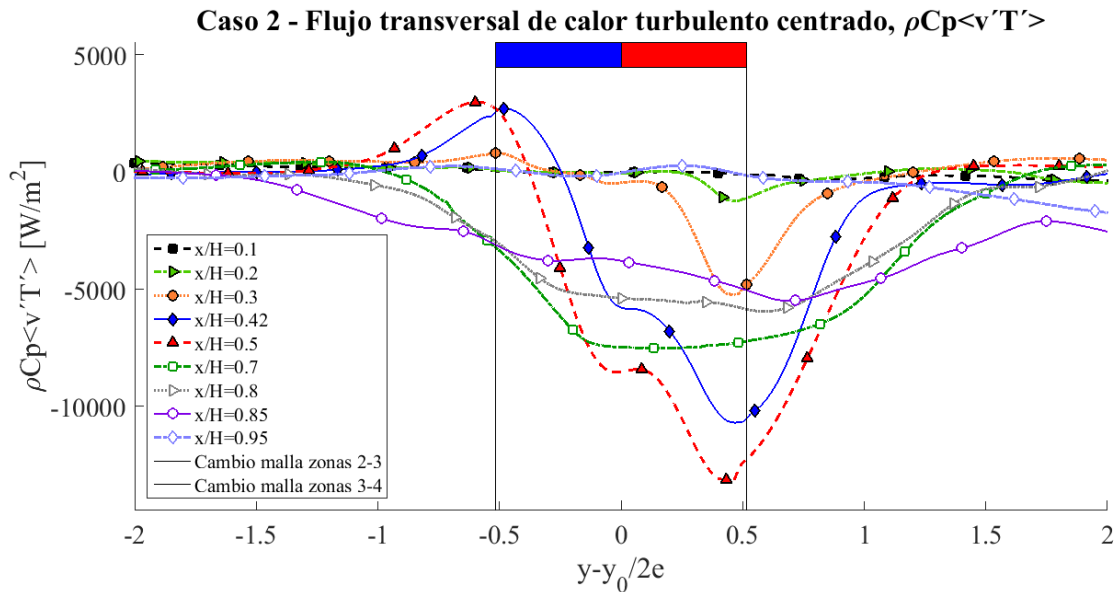


Figura 5.41: Perfiles centrados del flujo transversal de calor para distintos niveles de la cortina – Caso 2

En ambos casos de estudio se evidencia un traspaso transversal de calor en la zona de capa de mezcla caliente, pues existen dos peaks negativos tanto para dicha zona como para la línea central entre jets. Dichos peaks están ubicados entre $x/H = 0.4$ y 0.6 . Posiblemente, la extracción de momentum desde el flujo medio por parte de los campos turbulentos está provocando un aumento

de la turbulencia en la dirección transversal negativa, es decir, hacia el jet frío de ambos casos, de acuerdo al análisis del transporte de momentum turbulento descrito anteriormente.

Se mantiene la contribución transversal de flujo momentum desde la turbulencia hacia el flujo medio en la zona de capa de mezcla del jet frío, la cual comienza a disminuir y hacerse negativa a medida que se acerca a la zona de impacto. Lo mismo sucede con la contribución transversal del flujo hacia el flujo turbulento en las zonas de capa de mezcla caliente y de "centerline". Esto se puede comprobar en las Figura 5.42 y Figura 5.43, donde se muestra en detalle la evolución en las líneas de capa de mezcla fría y caliente, y en la zona central de la cortina.

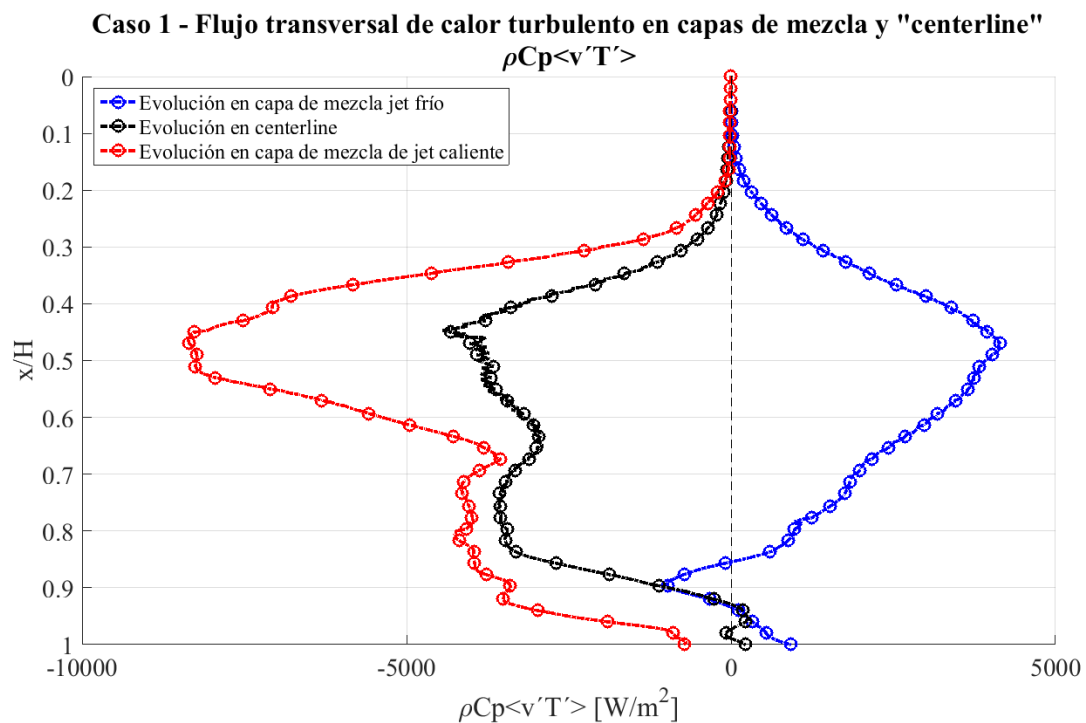


Figura 5.42: Evolución del flujo transversal de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 1

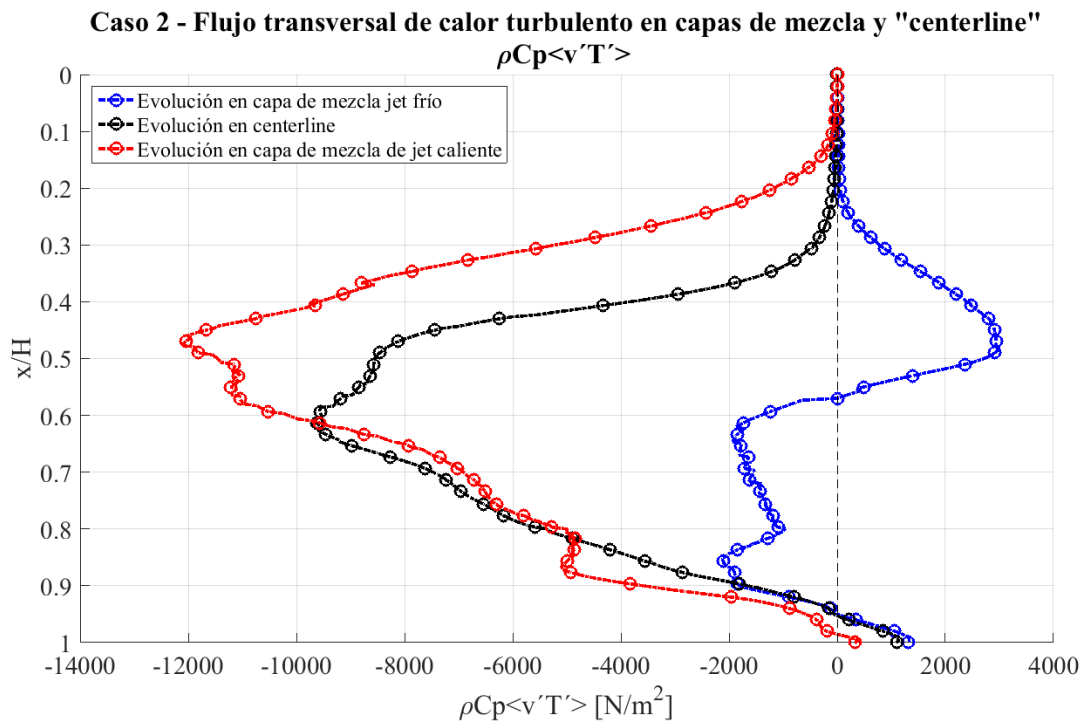


Figura 5.43: Evolución del flujo transversal de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Caso 2

En ellas se puede observar valores negativos en ambas capas de mezcla caliente, lo que se refiere a un transporte transversal de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida, destacando el peak en $x/H=0.5$ para ambos casos. Lo mismo sucede en la línea central de la cortina, pero en menor grado. Sin embargo, en la capa de mezcla fría se observan valores positivos para el caso 1, y una inversión hacia valores negativos a partir de $x/H=0.6$ en el caso 2. Esto significa que existe un transporte transversal de calor hacia la zona protegida, para los casos 1 y 2, ocurriendo un transporte hacia la zona confinada en el último caso mencionado a partir de $x/H=0.6$. El cambio de dirección ocurrido en el caso 2 entre los niveles $x/H=0.5$ y 0.6 identifican una zona crítica donde pudieran haber fugas de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida. Lo que no ocurre en el caso 1.

Entonces, se destacan los niveles comprendidos entre $x/H=0.5$ y 0.6 para ambos casos de estudio, debido a que en esos niveles los peaks observados comienzan a disminuir, pudiendo generar la condición de estiramiento de vórtices que propicie el traspaso de fugas de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida.

5.5 Transporte axial de calor turbulento

En esta sección se presenta el análisis referente al transporte axial de calor turbulento. Si bien éste no está directamente relacionado con las fugas transversales de calor, es posible que un debilitamiento en el transporte axial de calor genere posibilidades de fugas de calor en la dirección transversal.

5.5.1 Flujo axial de calor turbulento

En la Figura 5.44 se observa el campo del transporte axial de calor turbulento. En ellas, el valor azul positivo indica un transporte de calor en la dirección axial positiva (vertical hacia abajo), mientras que el color rojo negativo denota un transporte de calor en el sentido negativo de la dirección axial (vertical hacia arriba).

Se presenta el flujo axial de calor en la zona estudiada con las capas de mezclas y sus rangos, en las Figura 5.45 y Figura 5.46.

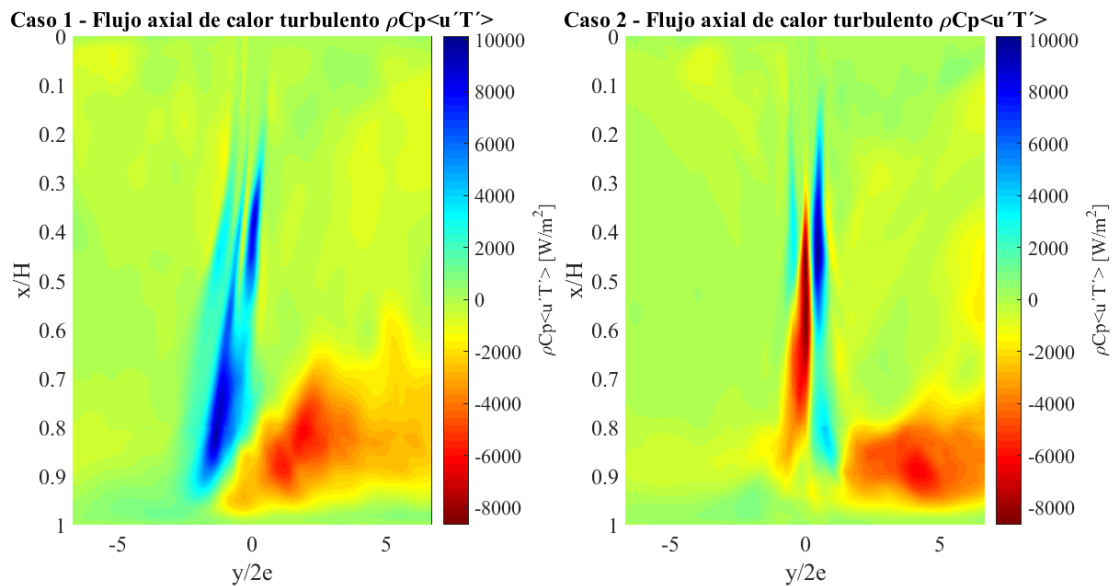


Figura 5.44: Campo de flujo axial de calor turbulento, para el caso 1 (figura izquierda) y el caso 2 (figura derecha)

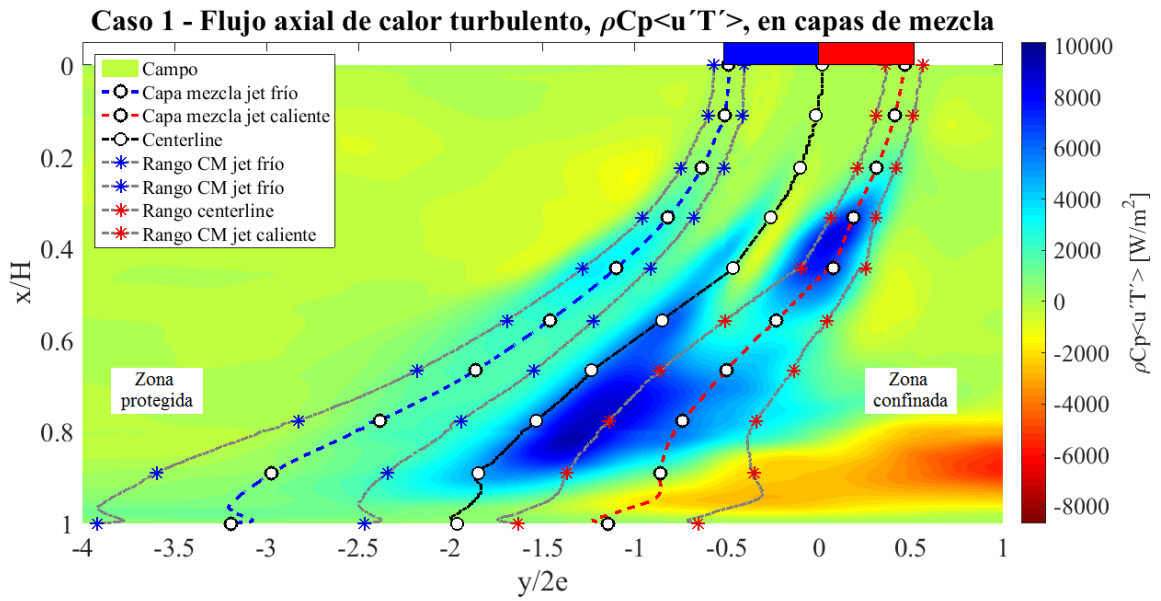


Figura 5.45: Campo del flujo axial de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina – Caso 1

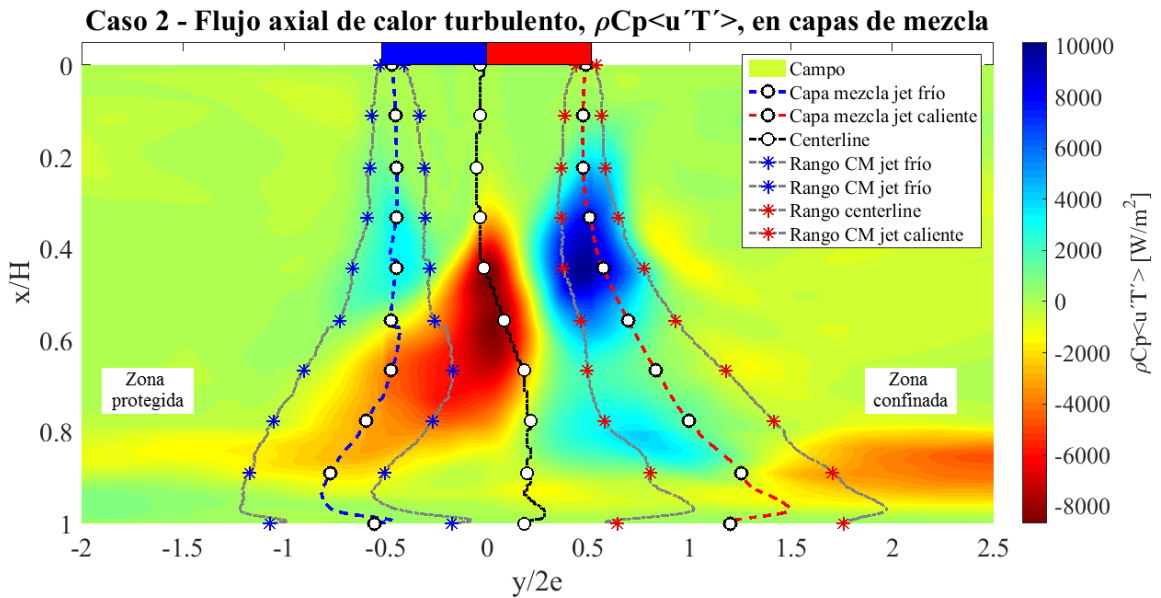


Figura 5.46: Campo del flujo axial de calor turbulento, en la zona de desarrollo de la cortina – Caso 2

En el caso 1, se detectan zonas positivas de color azul entre la línea “centerline” y la capa de mezcla caliente, y una de color celeste (zona positiva de menor intensidad) en $x/H=0.4$ de la capa de mezcla fría. Esto quiere decir que existe un flujo de calor en la dirección axial positiva de la cortina (vertical hacia abajo) en las regiones mencionadas, debido a interacciones entre ambos jets durante el

proceso de unificación del único jet. Además, se observa una zona roja con valores negativos al lado derecho de la capa de mezcla caliente, lo que evidencia un flujo de calor axial hacia arriba, producto de la detención del flujo axial por la presencia de la zona de impacto.

El caso 2 es bastante diferente al caso 1. Se observa una zona azul más pequeña con valores positivos entre $x/H=0.2$ y 0.6 de la capa de mezcla caliente, y dos zonas rojas con valores negativos: una entre $x/H=0.4$ y 0.8 , entre la línea central del jet y la capa de mezcla fría, y otra a la derecha del jet caliente. Se presenta, entonces, un flujo axial de calor hacia abajo en el jet caliente y un flujo de calor axial hacia arriba, en la zona de impacto y entre la capa de mezcla fría y el “centerline”, como se mencionó. Esta inversión en los flujos de momentum pudiera contribuir al transporte transversal de calor y momentum entre los niveles mencionados.

5.5.2 Evolución del transporte axial de calor turbulento en capas de mezcla y en línea central de la cortina de aire

En las Figura 5.47 y Figura 5.49 se muestra el perfil del transporte axial de calor turbulento para el caso 1 y 2, respectivamente. En la Figura 5.48 se muestra el caso 1 con los perfiles centrados, es decir, considerando el jet del caso 1 centrado para un mejor entendimiento. No se muestra el caso 2 centrado debido a que la figura es bastante similar al caso no centrado.

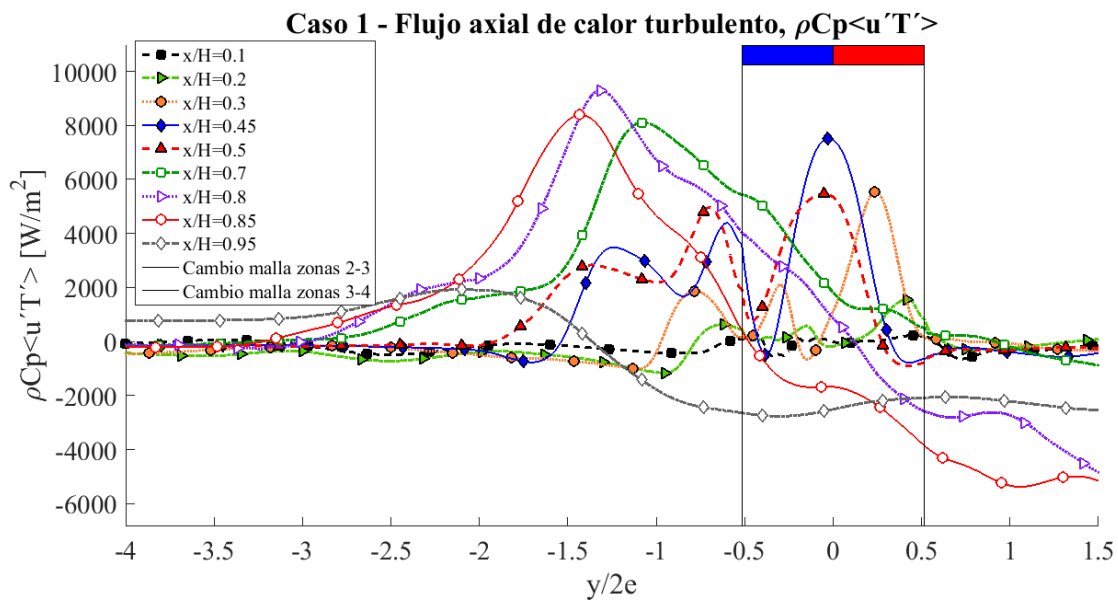


Figura 5.47: Perfil del flujo axial de calor, $\rho C_p \overline{u'T'}$ - Caso 1

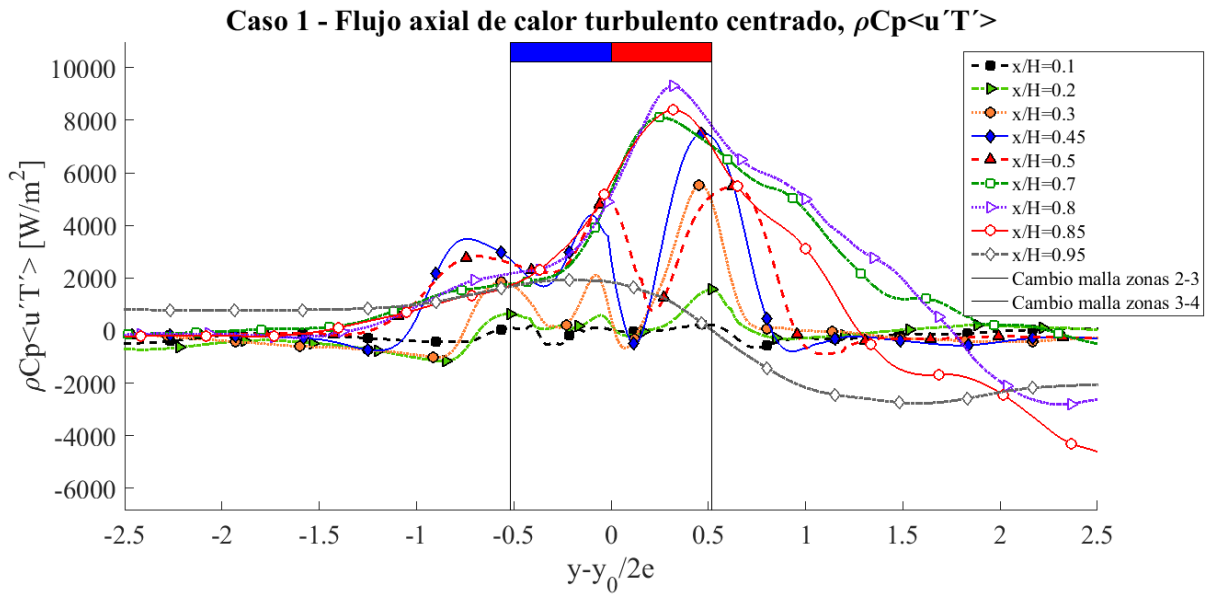


Figura 5.48: Perfil centrado del flujo axial de calor, $\rho C_p \overline{u' T'}$ - Caso 1

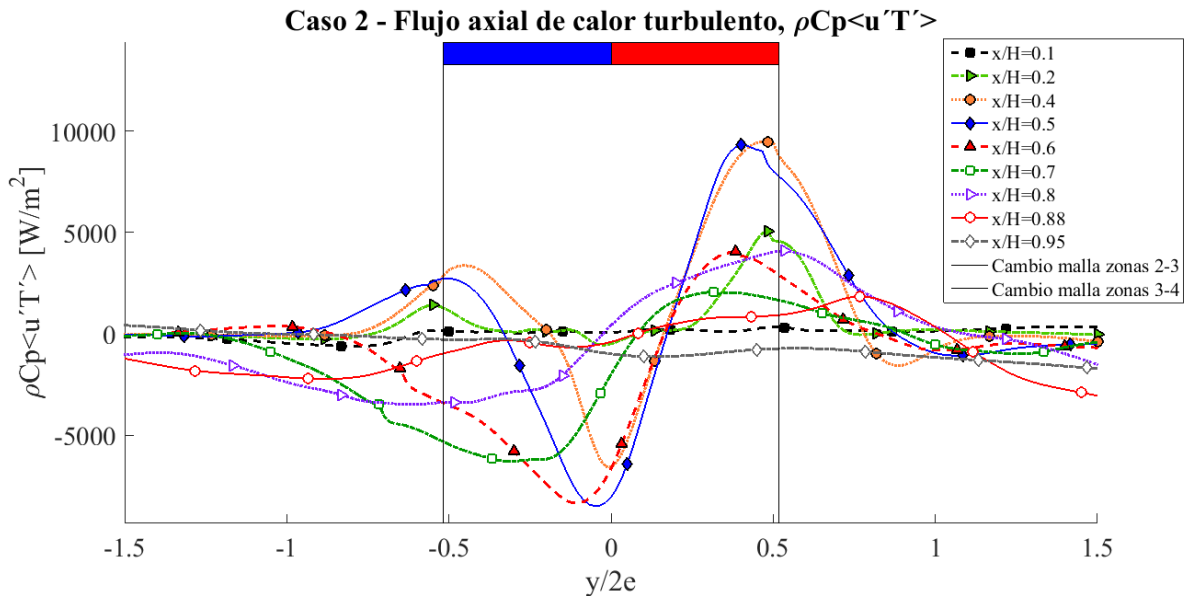


Figura 5.49: Perfil del flujo axial de calor, $\rho C_p \overline{u' T'}$ - Caso 2

Para el caso 1, el transporte de calor axial posee un comportamiento diferente al del caso 2. Para los niveles iniciales se observan solo valores positivos, lo que indica una transferencia de calor solo en la dirección vertical hacia abajo. Ese transporte se mantiene constante a medida que la cortina se sigue desarrollando, y solo toma valores negativos cuando entra en la zona de impacto. Se

observan valores máximos desde 0.5 hasta 0.8, pudiendo ser estos en los que ocurra transferencia transversal de calor.

En el caso 2, se observan valores positivos en ambas capas de mezcla: hasta $x/H=0.5$ en la capa fría y hasta $x/H=0.85$ en la capa caliente. Es decir, existe un flujo de calor axial hacia abajo en esas zonas, siendo mayor en la capa de mezcla caliente. A lo largo de toda la línea central de la cortina se presentan solo valores mínimos negativos, evidenciando un flujo de calor axial hacia arriba, el cual disminuye en la zona de impacto.

La evolución del flujo axial de calor en las capas de mezcla y la línea entre jets de ambos casos se puede observar con más detalle en la Figura 5.50, siendo la figura izquierda para el caso 1, y la derecha para el caso 2.

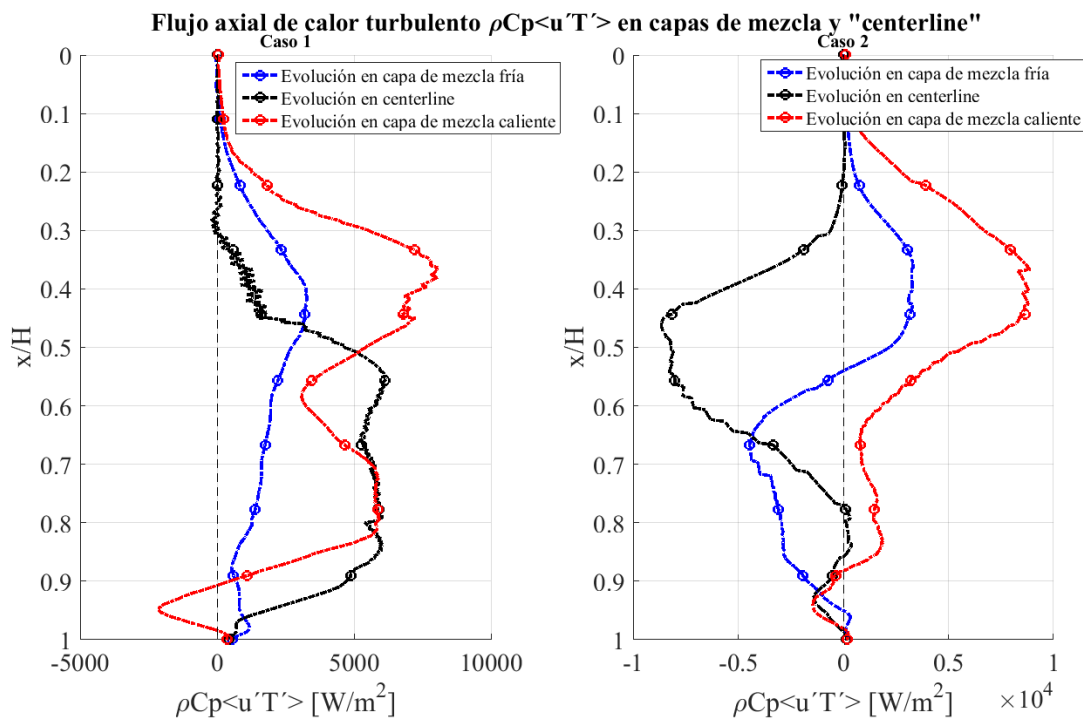


Figura 5.50: Evolución del flujo axial de calor turbulento en las capas de mezcla entre la cortina y los lados confinado y protegido, y en la línea central de la cortina – Casos 1 y 2

En el caso 1, en la línea de capa de mezcla caliente se observan dos peaks positivos, uno en $x/H=0.4$ y el segundo en $x/H=0.8$. Esto indica un flujo de calor axial hacia abajo, debido a la gran cantidad de fluctuaciones presentes en esa zona, respecto a los otros niveles. En la línea central entre jets solo se observan valores positivos, destacando los niveles que van desde $x/H=0.6$ y 0.9 que es donde se observan los máximos de esa curva. En la capa de mezcla fría también se observan solo valores positivos, presentándose un máximo en $x/H=0.5$. Es decir, la alta turbulencia entre $x/H=0.4$ y 0.6 , que genera un flujo de calor axial a la cortina en sus tres líneas, conduce el flujo de calor

axial aguas debajo de la cortina, lo cual es deseado para obtener un mejor confinamiento de la fuente de calor.

En la figura del caso 2 (grafo derecho de Figura 5.50), se observan valores negativos en la línea inter-jets, con un máximo entre $x/H=0.4$ y 0.6 . Es decir, existe transporte de calor turbulento en la dirección vertical hacia arriba, en el sentido negativo axial de la cortina. En la capa de mezcla fría se observan valores positivos hasta $x/H=0.6$, los que luego son negativos hasta encontrarse con la zona de impacto. Por consiguiente, se evidencia la existencia de turbulencia entre los niveles $x/H=0.4$ y 0.7 debido a los flujos de corte generados por la interacción entre ambos jets. Es esa turbulencia la que pudiera propiciar el transporte de calor y masa hacia la zona confinada. El resultado final sobre esta observación en el caso 2 se presenta en el análisis del flujo de calor total transversal y axial, presentado en la sección 5.6 del presente capítulo.

Se destaca la zona entre los niveles $x/H=0.6$ y 0.7 , debido a que se observa un mínimo positivo en la capa de mezcla caliente, un máximo negativo en la capa de mezcla fría y una disminución de valores negativos en la línea entre jets.

5.6 Flujo de calor total axial y transversal

En esta sección se presenta un análisis del flujo total de calor en las direcciones axial y transversal de la cortina para poder concluir sobre la transferencia de calor en ella que pudiera originar fugas de calor hacia la zona protegida.

5.6.1 Flujo de calor transversal total

El estudio del flujo transversal de calor total muestra las zonas en que hay fugas de calor. Consiste en la suma de las contribuciones turbulenta y molecular, según la forma mostrada en la ecuación (2.37). El término molecular (término de la izquierda, a la derecha del signo igual) posee el signo menos debido a que el flujo de calor es negativo cuando se mueve desde una mayor temperatura a una de menor temperatura.

En las Figura 5.52 y Figura 5.53 se muestra la variación del flujo transversal de calor, para los casos 1 y 2, respectivamente. La serie superior de imágenes corresponden a los flujos transversales moleculares (en color azul), turbulentos (en color rojo) y totales (en color negro) en las capas de mezcla y en la línea central de la cortina, mientras que la imagen inferior muestra el flujo transversal neto de calor, para el caso correspondiente.

Se observa, en ambos casos, que la contribución molecular al flujo de calor es mucho menor que el caso turbulento, pues posee órdenes de magnitud mucho menores en comparación con los aportes turbulentos. Para el caso molecular, los valores son del orden $10^2 - 10^3$ [W/m^2], frente a valores

del orden 10^4 [W/m^2] para el caso turbulento, como se observa en las Figura 5.55. Por ende, puede ser despreciable a nivel global, en la dirección transversal.

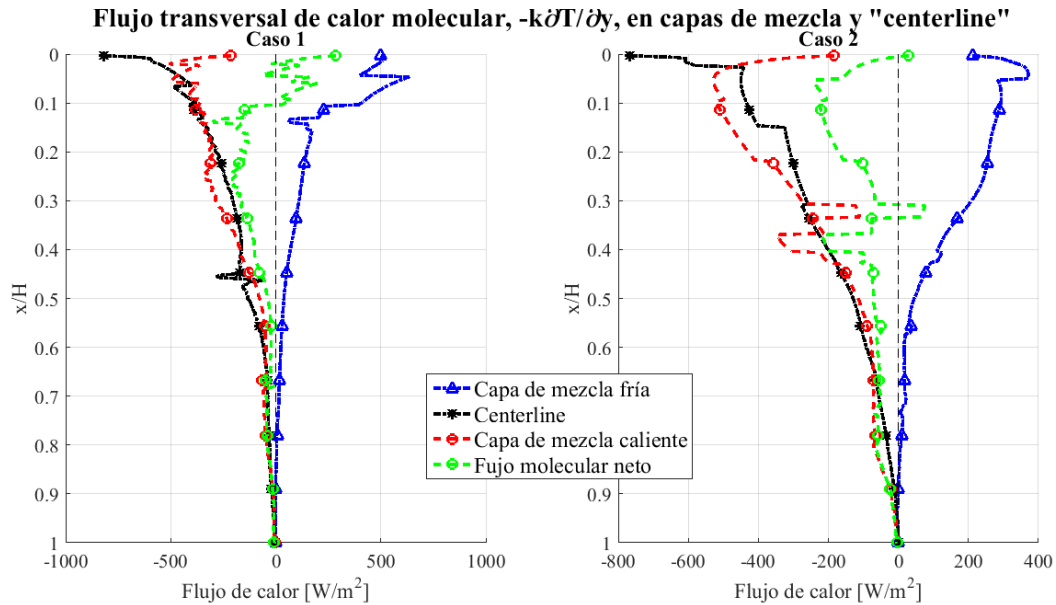


Figura 5.51: Evolución del flujo molecular transversal para los casos 1 y 2, a lo largo de las capas de mezcla y línea central de la cortina

En las zonas desarrollada y de impacto de la cortina se corrobora la menor importancia del flujo de calor por contribución molecular, el cual toma más importancia en la zona potencial.

Existe una mayor contribución molecular entre los niveles $x/H=0$ y 0.2 , correspondientes a la zona de cono potencial, y un aporte turbulento casi nulo en la zona mencionada. A partir de $x/H=0.2$, el aporte molecular comienza a disminuir hasta ser casi nulo en comparación con la contribución turbulenta, la cual comienza a aumentar desde el mismo nivel mencionado en dirección aguas abajo de la cortina.

Con lo anterior, se comprueba que para una mayor velocidad aumentan las áreas de desarrollo de los regímenes turbulentos y, por ende, disminuye la de cono potencial, como se comprueba en el jet caliente del caso 2 y en el jet frío del caso 1 (Figura 5.52 y Figura 5.53). En ambos jets de mayor velocidad, la zona potencial se encuentra hasta $x/H=0.2$ mientras que en los jets menos veloces es hasta $x/H=0.25$.

En ambos casos se muestran valores negativos del flujo transversal de calor total en las líneas de capa de mezcla caliente (figura superior derecha) y de centerline (figura superior central). Los valores negativos indican la existencia de un flujo transversal de calor en la dirección negativa de \hat{y} , es decir, desde la zona confinada hacia la zona protegida, en las zonas de capa de mezcla caliente

CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

y línea central entre jets de la cortina. Para el caso 1, en la capa de mezcla fría de la cortina se muestran valores positivos hasta $x/H=0.85$ y valores levemente negativos en $x/H=0.9$. En cambio, en el caso 2, el sector positivo se encuentra hasta $x/H=0.6$. Valores positivos de flujo transversal de calor muestran que éste se mueve en la dirección positiva de \hat{y} , desde la zona protegida hacia la zona confinada.

Lo anterior evidencia claramente la presencia de un flujo transversal de calor desde la zona confinada hasta la zona protegida, el cual es levemente detenido por el jet frío de ambas cortinas. Es decir, existen fugas de calor desde la zona confinada hacia la protegida en ambas configuraciones estudiadas.

Al calcular el flujo neto en la dirección transversal de la cortina, entre los jets frío y caliente de ambos casos, se obtiene el grafo inferior mostrado en las Figura 5.52 y Figura 5.53. En la Figura 5.54 se muestra la comparación entre ambos flujos netos.

En ésta última se evidencia de mejor forma la existencia de un flujo neto, en la dirección transversal de ambos casos de estudio, desde la zona confinada hacia la zona protegida. Es decir, existen fugas de calor y son evidenciadas en dicha figura. Sin embargo, es el caso 1 el que posee una mayor capacidad de confinamiento, lo cual coincide con los resultados de Castro [13].

Al integrar el flujo de calor transversal neto se obtiene una medida del traspaso de calor hacia la zona protegida, por unidad de longitud, cuyos valores se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Traspaso de calor desde zona confinada hacia zona protegida, para ambos casos. Fuente: Elaboración propia

Traspaso de calor desde zona confinada hacia zona protegida		
Caso 1	-311,64	[W/m]
Caso 2	-808,33	[W/m]
Diferencia	496,69	[W/m]
Diferencia porcentual	61,45	%

De ella se puede observar que existe un menor traspaso transversal de calor en el caso 1, en un 61% menos que en el caso 2. Sin embargo, el caso 1 posee fugas de calor.

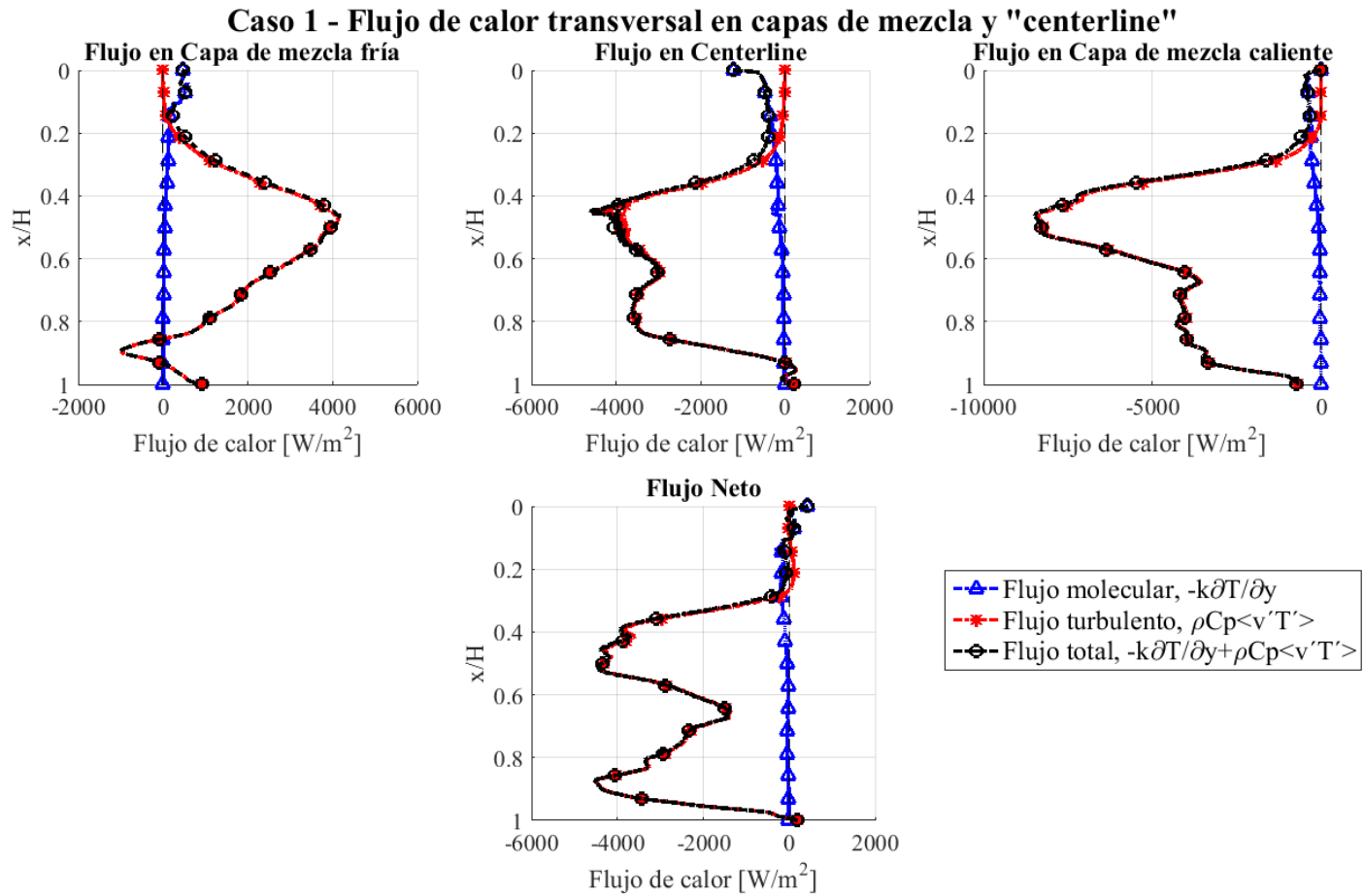


Figura 5.52: Flujos de calor transversal molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 1

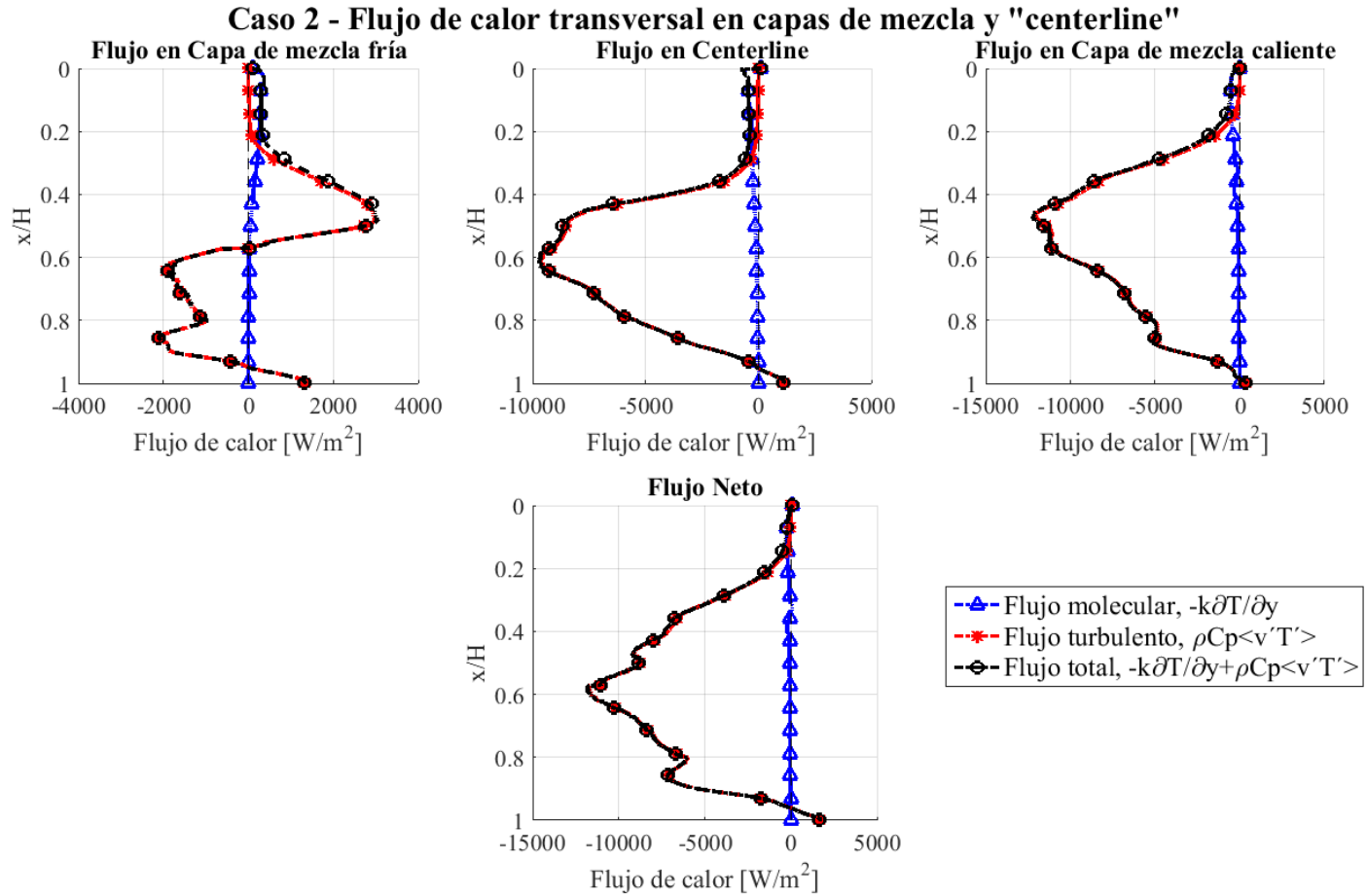


Figura 5.53: Flujos de calor transversal molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 2

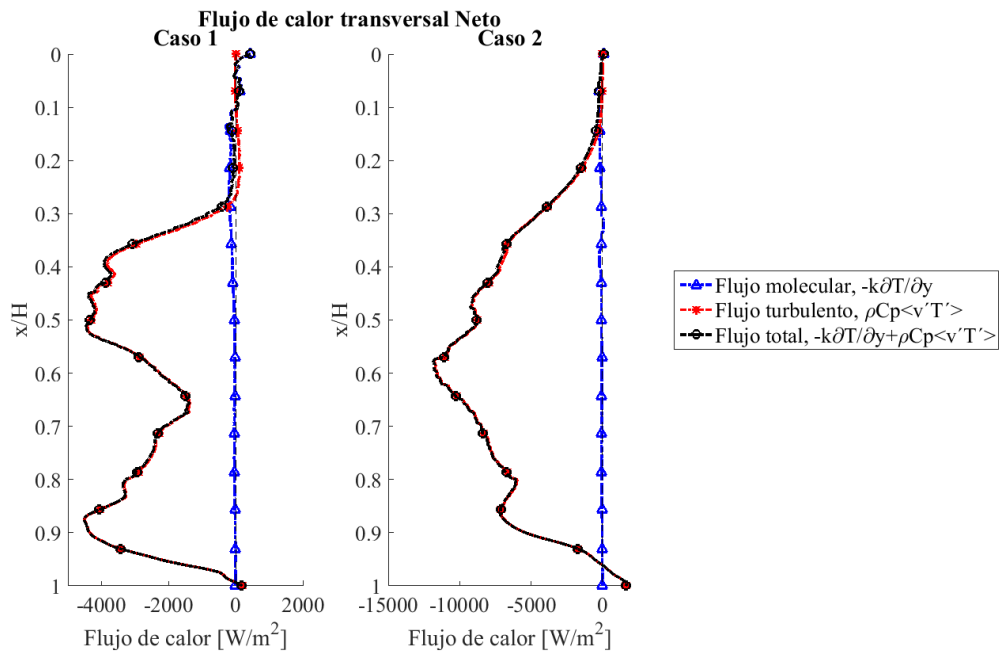


Figura 5.54: Flujos transversales netos de calor para ambos casos estudiados. Caso 1, figura izquierda. Caso 2, figura derecha

5.6.1 Flujo de calor transversal total

En las Figura 5.56 y Figura 5.57 se muestra el flujo total de calor en la dirección axial de las cortinas, compuesto por la contribución molecular, en color azul (la cual se detalla en la Figura 5.55), y la contribución turbulenta, en color rojo.

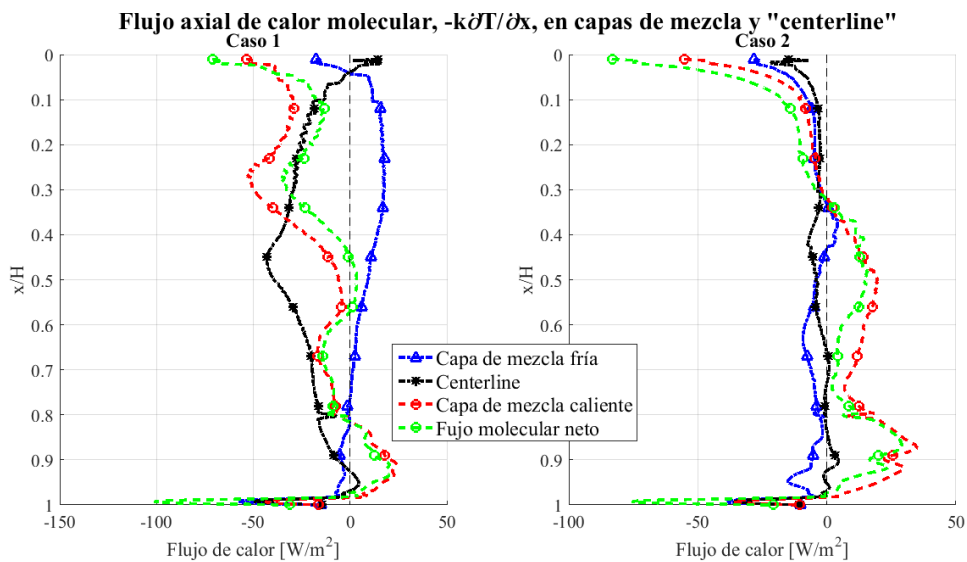


Figura 5.55: Evolución del flujo molecular axial para los casos 1 y 2, a lo largo de las capas de mezcla y línea central de la cortina

CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se observa que, de manera similar al caso transversal, el flujo de calor molecular axial es mucho menor respecto al flujo turbulento axial. Sin embargo, en la Figura 5.55 se observa su evolución a lo largo de las líneas de capas de mezcla de ambas cortinas. Posee valores del orden $10^2 [W/m^2]$, los cuales son mucho menores a los detectados en el flujo molecular transversal.

En el flujo total axial de calor, para el caso 1, se observan solo valores positivos a lo largo de las capas de mezcla y línea central de la cortina. Se destacan los peaks positivos en la capa de mezcla fría (imagen superior izquierda en Figura 5.56) en el nivel $x/H=0.4$, el cual se atribuye al proceso de interacción entre el jet frío, de gran velocidad, y la zona protegida sin características termodinámicas relevantes. Esto refleja un flujo de calor total desde la zona protegida hacia la zona confinada, debido a fluctuaciones turbulentas. Dicha interacción comienza a disminuir a medida que la cortina se desarrolla, lo que comprueba la existencia de turbulencia a partir de la zona de transición (los vórtices de gran tamaño comienzan a hacerse más pequeños).

En la capa de mezcla caliente (imagen superior derecha en Figura 5.56), se observan valores positivos con una leve depresión en el nivel $x/H=0.6$. Esto pudiera significar una tendencia a la inversión en la dirección del flujo total de calor axial, aunque permaneciendo siempre positivo.

En la línea central de la cortina se observan valores nulos hasta $x/H=0.3$, los cuales comienzan a hacerse positivos y constantes a partir de $x/H=0.5$.

Calculando el flujo total neto en la dirección axial, entre las capas de mezcla fría y caliente, como se hizo en el análisis de la dirección transversal, se obtiene la imagen inferior de la Figura 5.56. En ella se comprueba que solo existen valores positivos, lo que concuerda con los gráficos de campo de flujo de calor axial turbulento en la Figura 5.44 de la sección 5.5.1. Es decir, en el caso 1, se mantiene un flujo axial total constante aguas abajo de la cortina.

Sin embargo, en el caso no sucede lo mismo, el cual se muestra en la Figura 5.57. En la capa de mezcla caliente el flujo de calor axial total es positivo, lo que indica un flujo de calor en dirección aguas abajo de la cortina. Por el contrario, tanto en la línea central como en la capa de mezcla fría se observan valores negativos, los cuales reflejan un flujo de calor axial total hacia arriba. Esto es evidenciado con más claridad en el flujo neto total en dirección axial (imagen inferior, Figura 5.57). En ella se observa claramente la inversión ocurrida a partir del nivel $x/H=0.6$. Es decir, existe un flujo de calor axial total en dirección aguas arriba de la cortina que pudiera facilitar la transferencia transversal de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida.

Una comparación de los flujos netos de ambos casos se muestra en la Figura 5.58, en donde se muestra una mayor efectividad del caso 1 en cuanto al confinamiento de la fuente de calor, pues es deseado un flujo continuo hacia abajo que funcione como barrera contra las fugas de calor.

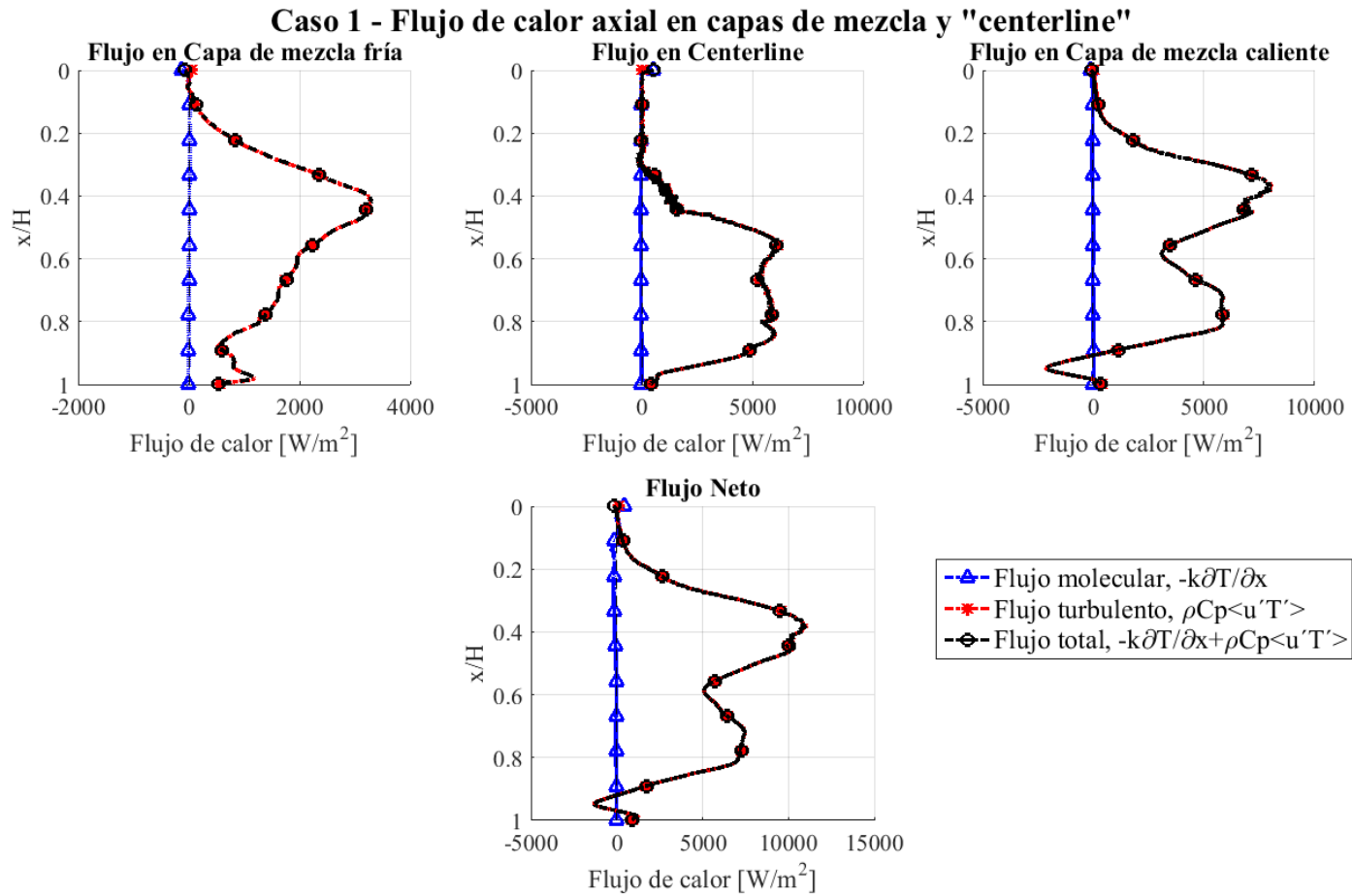


Figura 5.56: Flujos de calor axial molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso 1

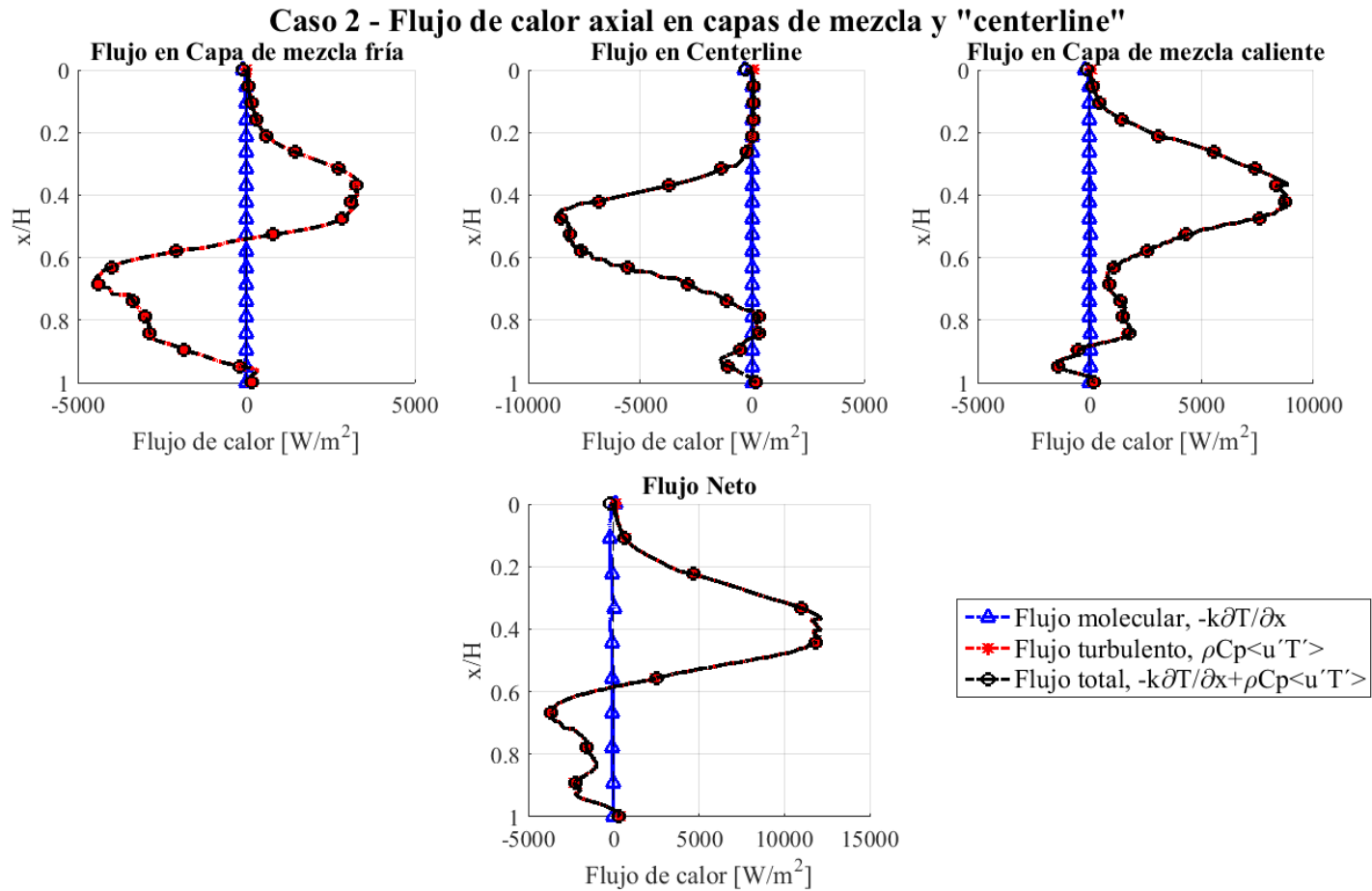


Figura 5.57: Flujos de calor axial molecular, turbulento y total en todas las líneas de capas de mezcla y centerline. En la cuarta figura, se muestra el flujo transversal de calor neto, calculado como la diferencia entre los flujos ubicados en las capas de mezcla fría y caliente – Caso

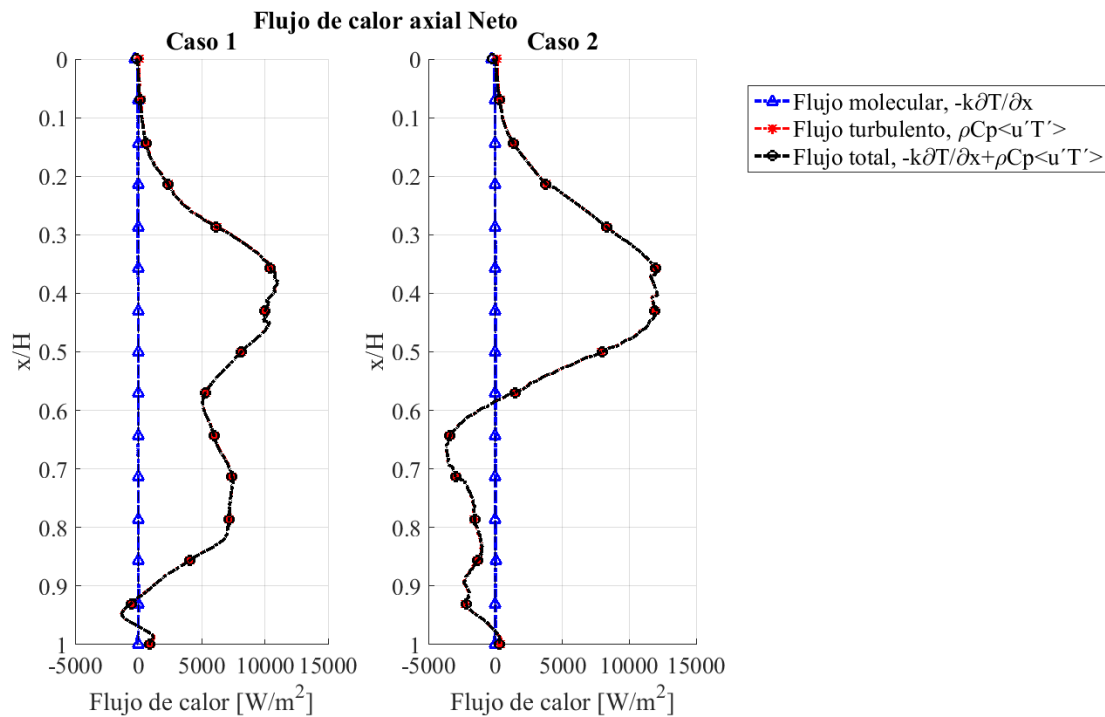


Figura 5.58: Flujos axiales netos de calor para ambos casos estudiados. Caso 1, figura izquierda. Caso 2, figura derecha

De ambos casos estudiados se concluye que el jet frío, independiente de la velocidad que éste posea, genera mayor oposición al flujo de calor transversal desde la zona donde está la fuente de calor hacia el área protegida.

Por lo tanto, en ambos casos de estudio se detectan fugas de calor transversal hacia la zona protegida, siendo mayores en el caso 2. El caso 1 posee mejores características a favor del confinamiento de la fuente de calor respecto al caso 2.

5.7 Influencia del transporte de calor turbulento en la tasa de calor del flujo medio

Como se mencionó antes, el transporte de calor turbulento, por medio de sus derivadas parciales, contribuyen adicionando calor al flujo o quitándole calor. De esta forma, se puede observar cuánto calor agregó o quitó cada componente turbulento en la ecuación (2.3). Un valor negativo de la derivada indica que el flujo medio le entrega calor al flujo turbulento, posiblemente para ser transportado axial o transversalmente por un mecanismo advectivo. Por el contrario, un valor positivo significa la contribución al calor del flujo medio por parte del flujo turbulento.

5.7.1 Contribución transversal

El calor no posee dirección, por lo que uno puede estudiar la contribución de ambos términos turbulentos mediante su derivada.

En las Figura 5.59 y Figura 5.60 se muestra la contribución del término turbulento transversal al incremento total del flujo medio, tanto para el caso 1 como para el caso 2, respectivamente.

En ambas figuras se destacan valores negativos en las capas de mezcla y valores positivos en la línea entre jets y en las líneas de máxima velocidad de los jets. Esto indica que en las capas de mezcla, la turbulencia le roba calor al flujo medio, mientras que le aporta en la zona central del jet, lo que sucede en ambos casos. Los peaks que no siguen la tendencia de las curvas son debido al cambio de malla no gradual entre las diferentes zonas de la malla y no están asociados a procesos físicos, por lo que son ignorados.

De igual manera, en la Figura 5.61 se presenta la contribución transversal en las capas de mezcla y “centerline” de ambos casos. Nuevamente, los peaks que no siguen la tendencia son debido a que en ese nivel de la cortina la curva cruza una región de cambio de malla, por lo que no tienen importancia en la interpretación física del término turbulento analizado.

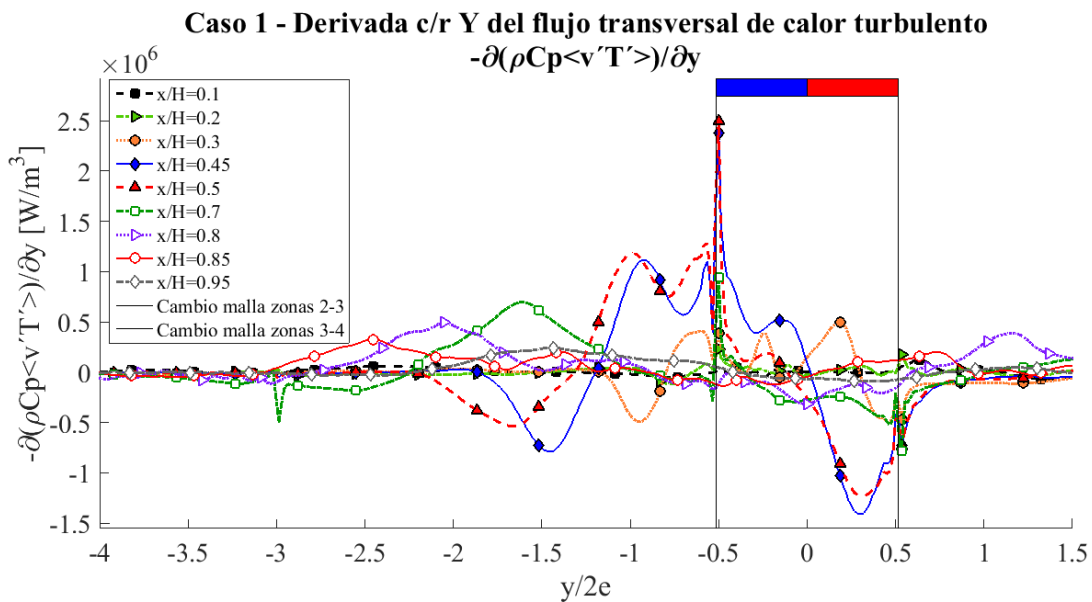


Figura 5.59: Perfil de derivada transversal del flujo transversal de calor turbulento, $-\partial(\rho \overline{v'T'}) / \partial y$ - Caso 1

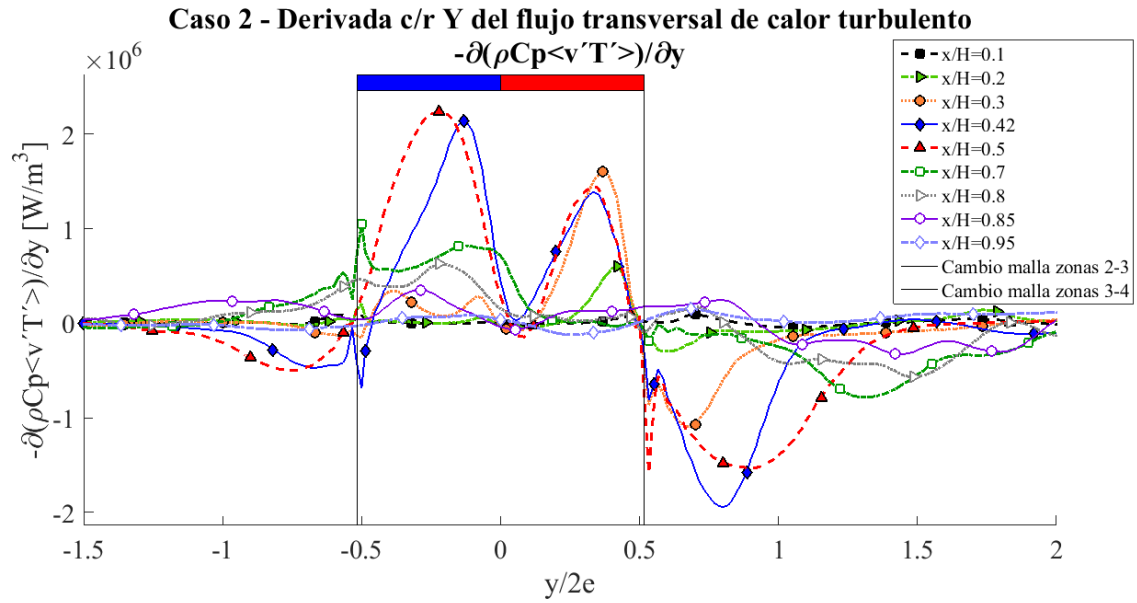


Figura 5.60: Perfil de derivada transversal del flujo transversal de calor turbulento, $-\partial(\rho \overline{v'T'}) / \partial y$ - Caso 2

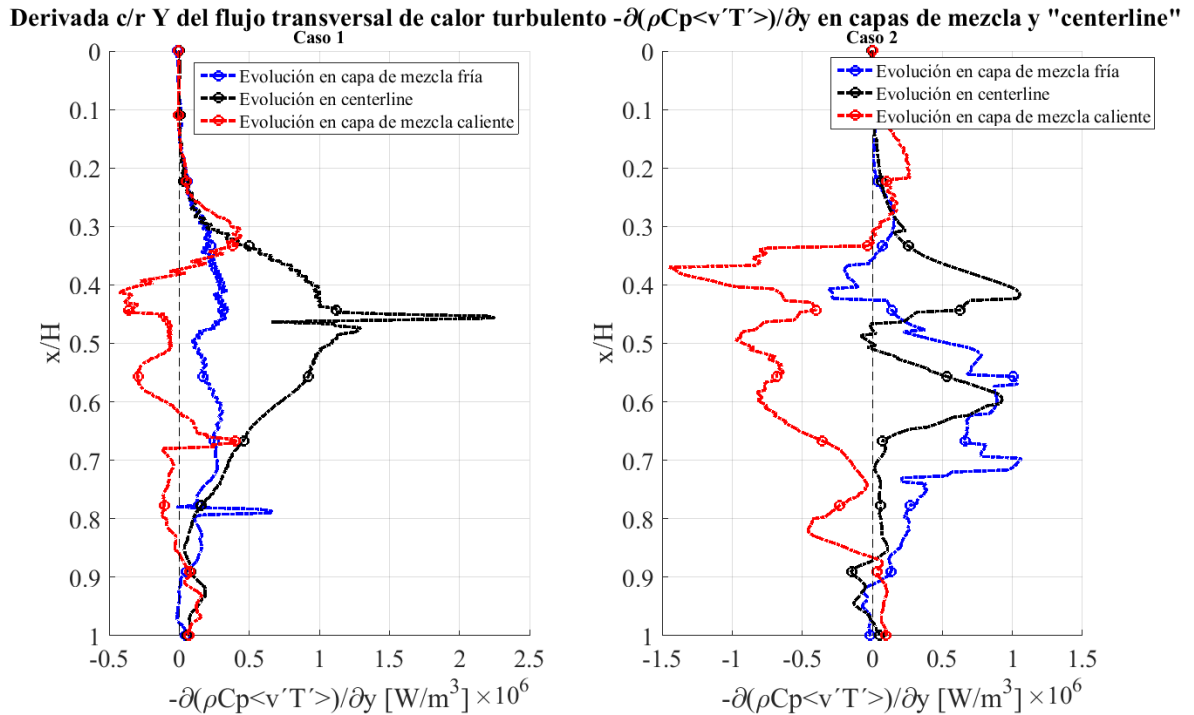


Figura 5.61: Derivada transversal del transporte transversal de calor turbulento en las líneas de capa de mezcla y en la línea media de la cortina – Caso 1

Se puede observar que entre los niveles $x/H = 0.4$ y 0.6 existe una contribución positiva al incremento de calor del flujo medio en la línea entre jets y, en menor grado, en la capa de mezcla del jet frío, por parte del término de derivada transversal del caso 1. En la capa de mezcla caliente se observa una contribución de calor positiva en el nivel $x/H = 0.3$, pero luego comienza a disminuir hasta convertirse en un proceso inverso. Es decir, le quita calor al flujo medio en $x/H=0.4$.

El caso 2 presenta condiciones similares a las del caso 1 pero mayormente potenciadas. Existen más fluctuaciones, lo cual se atribuye a una mayor interacción con la zona confinada producto de su configuración (jet caliente más rápido). Se observan también valores negativos para la capa de mezcla caliente entre $x/H = 0.4$ y 0.6 , mientras que en la línea entre jets, para esos mismos niveles, los valores positivos disminuyen. La capa de mezcla fría se hace más positiva en los niveles mencionados.

Lo anterior muestra la extracción de calor del flujo medio en la capa de mezcla caliente de ambos casos, por parte del flujo turbulento, mientras que, tanto en la capa de mezcla fría como en la “centerline”, existe una contribución al flujo de calor medio por parte de las fluctuaciones turbulentas.

5.7.2 Contribución axial

En las Figura 5.62 y Figura 5.63 se observa la contribución axial de la adición de calor al flujo medio producto de fluctuaciones turbulentas, para los casos 1 y 2, respectivamente.

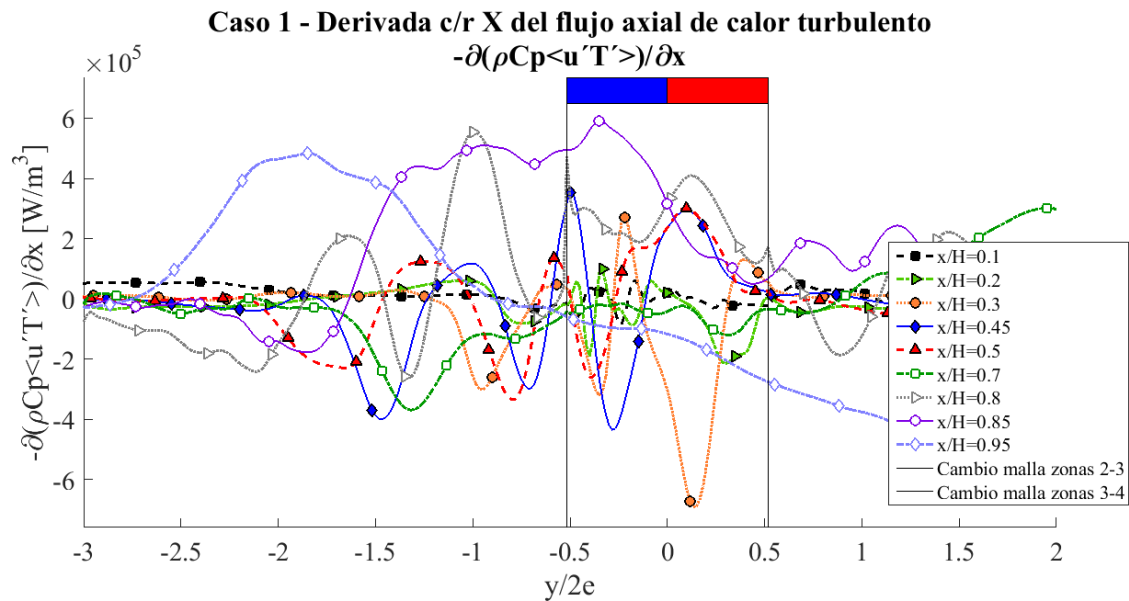


Figura 5.62: Perfil de derivada transversal del flujo axial de calor turbulento, $-\partial(\rho \overline{u'T'})/\partial x$ - Caso 1

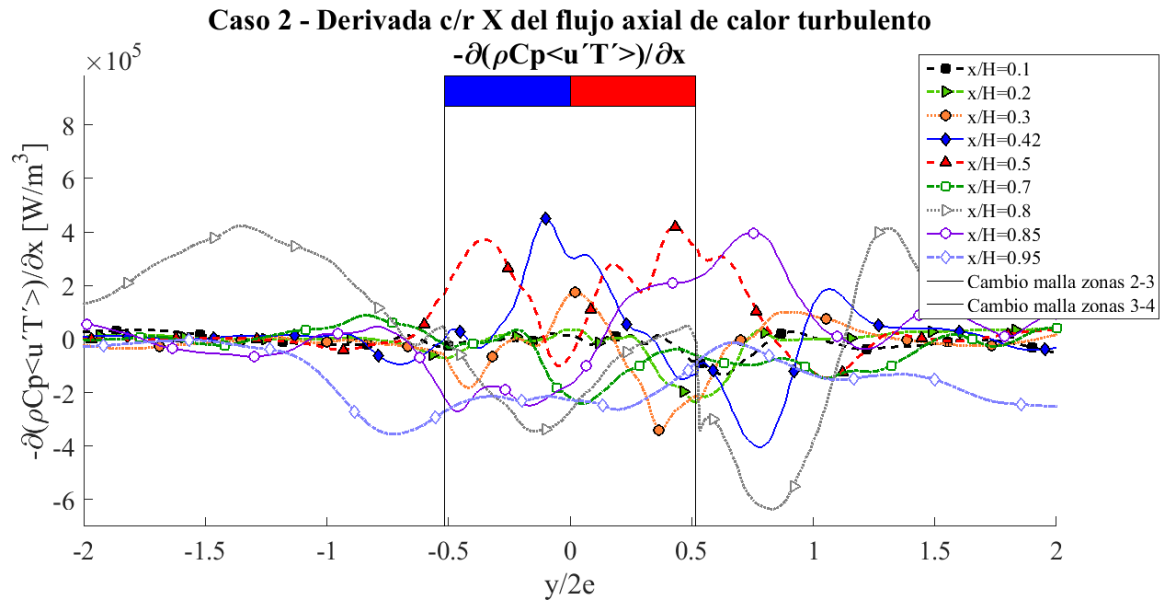


Figura 5.63: Perfil de derivada transversal del flujo axial de calor turbulento, $-\partial(\rho \overline{u'T'})/\partial x$ - Caso 1

En la Figura 5.64 se observa la misma contribución del término de derivada axial del flujo turbulento pero a lo largo de las capas de mezcla fría y caliente, y a lo largo de la línea central de la cortina, para los casos 1 (figura izquierda) y 2 (figura derecha).

Se observan, principalmente, incremento en el calor del flujo medio en $x/H = 0.4$ en la línea de interacción entre jets, y entre $x/H = 0.5$ y 0.6 para ambas capas de mezcla. También, se observa una disminución en el incremento de calor en el nivel $x/H = 0.3$ para ambas capas de mezcla. Esto muestra que la disminución de calor en la cortina está relacionado con el desarrollo de turbulenta en ambas capas de mezcla debido a la interacción con el medio, pues en la línea central entre jets no existe contribución o disminución alguna para $x/H = 0.3$. A medida que la cortina se desarrolla, específicamente en la zona de unificación de los jets, se genera calor producto de la turbulencia generada en este proceso. Finalmente, ocurre una oscilación entre la adición o sustracción de calor hacia o desde el flujo medio en la zona de impacto, lo cual se debe a la turbulencia generada en esa zona por razones ya conocidas.

Esto ocurre tanto en la configuración del caso 1, como en la del caso 2. Se observa en el caso 1 que la pérdida de calor en la capa de mezcla caliente es mucho mayor que la del caso 2. Empero, la pérdida de calor en la zona de capa de mezcla fría es menor en el caso 1 que en el caso 2. Es decir, el caso 2 contribuye menos a las pérdidas de calor axial que el caso 1.

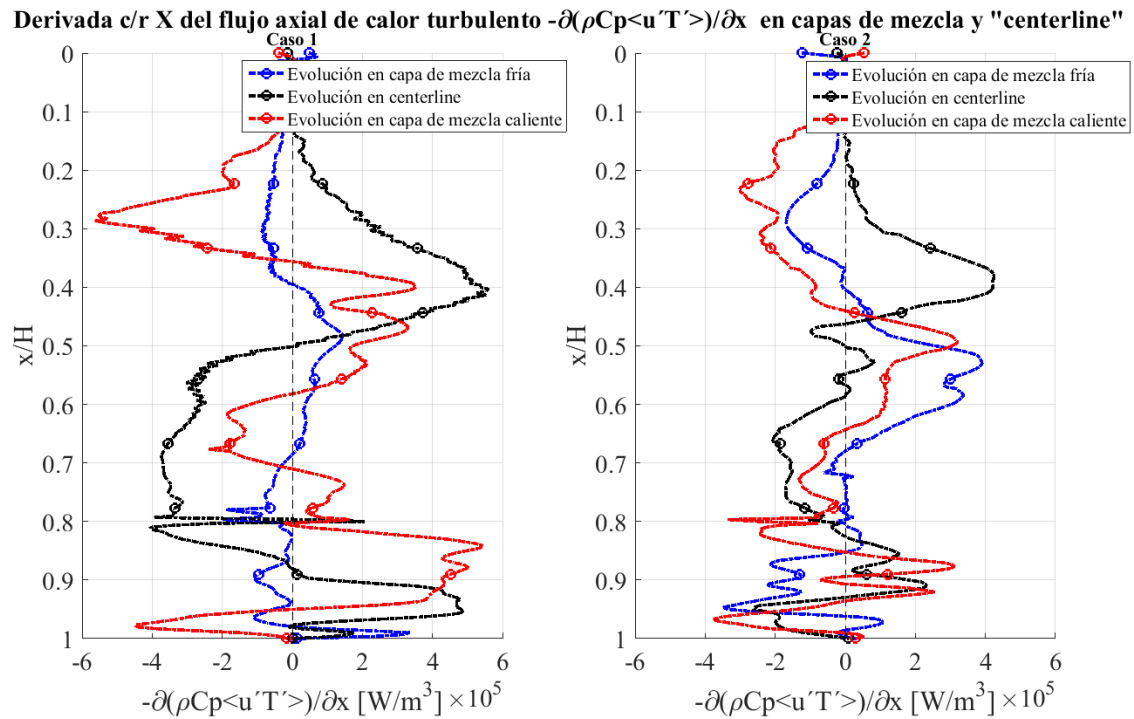


Figura 5.64: Evolución de la derivada del flujo axial de calor turbulento, en capas de mezcla y línea central de la cortina, para Caso 1 (figura izquierda) y Caso (figura derecha)

5.7.3 Contribución total

Finalmente, en las Figura 5.65, Figura 5.66 y Figura 5.67 se presenta la adición de calor total al flujo medio en cada caso, en las líneas de capa de mezcla caliente, "centerline" y fría, respectivamente. Se muestran también las componentes turbulenta y molecular, reiterando que la intervención molecular es mayor en la zona de cono potencial de las cortinas, y comienza a disminuir a lo largo del desarrollo de la misma, siendo mínima en la zona de impacto.

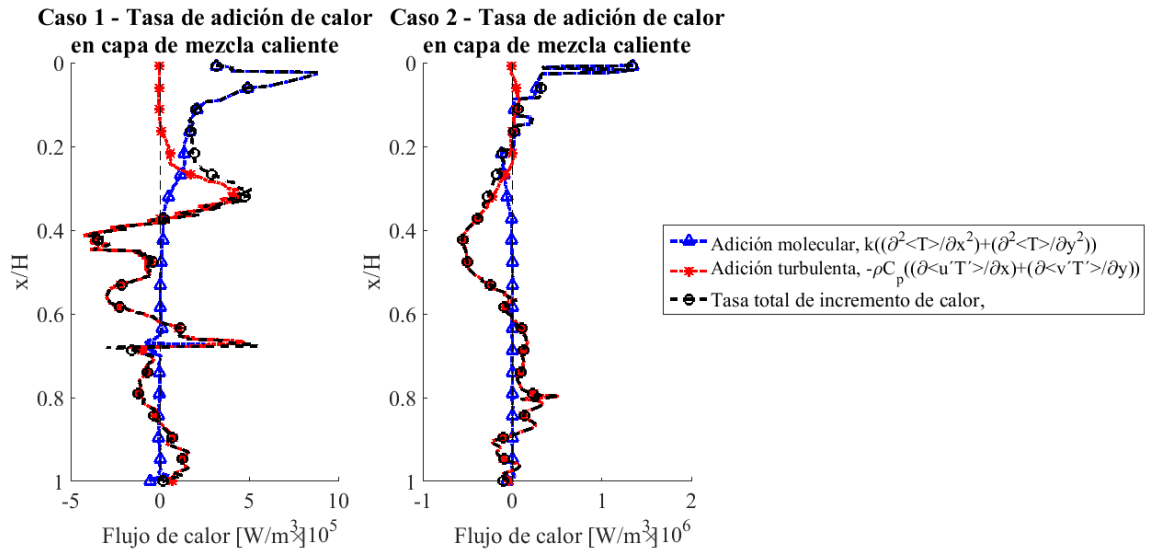


Figura 5.65: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la capa de mezcla del jet caliente (lado confinado). Se muestra también la tasa total de contribución de calor, por parte del término molecular y del turbulento - Casos 1 y 2

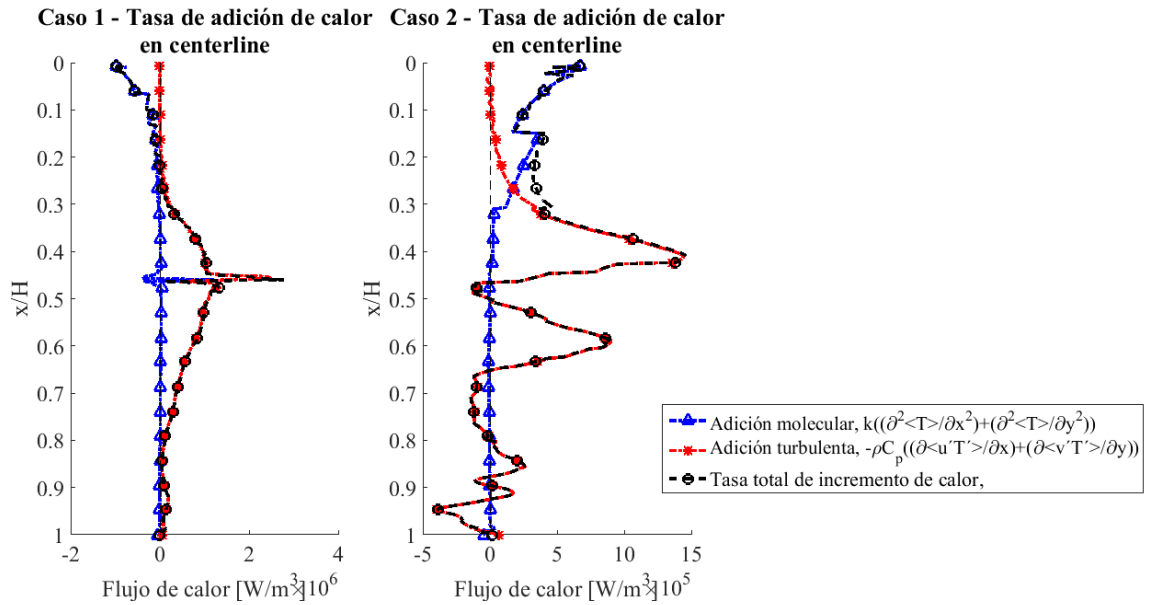


Figura 5.66: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la línea central de la cortina. Se muestra también la tasa total de contribución de calor- Casos 1 y 2

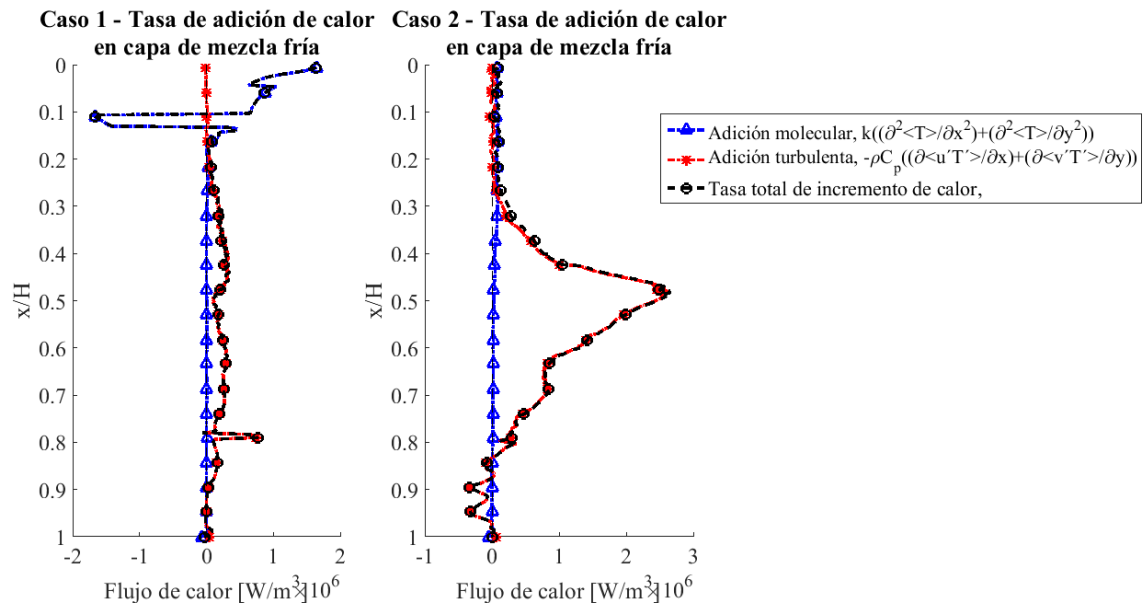


Figura 5.67: Contribución al incremento de calor del flujo medio por parte del término conductivo y convectivo en la capa de mezcla del jet frío (lado protegido). Se muestra también la tasa total de contribución de calor, por parte del término molecular y del turbulento - Casos 1 y 2

Para ambos casos, se destaca la pérdida de calor del flujo medio en $x/H = 0.4$, para ambos casos, en la capa de mezcla caliente. También, la adición de calor al flujo medio en la línea de interacción entre jets para ambos casos: en $x/H=0.45$ para el caso 1, correspondiente al nivel donde comienza el proceso de unificación entre los jets; y en $x/H=0.42$ y $x/H=0.6$ para el caso 2, correspondientes al nivel donde comienza la unificación y al nivel donde se presenta la inversión en el flujo de calor axial, respectivamente. Finalmente, es relevante la adición de calor desde el flujo turbulento hacia el flujo medio, mostrada en la capa de mezcla fría entre los niveles $x/H = 0.4$ y 0.7 . Estos cambios se asocian a la presencia de turbulencia en las zonas identificadas, siendo menores en el caso 1 (del orden de $10^5 [W/m^3]$) que en el caso 2 $10^6 [W/m^3]$.

No se evidencia relación entre la dirección del flujo de calor en las direcciones axial y transversal con la contribución, o no, al calor del flujo medio por parte de turbulencia. Solo se detectó una extracción de calor desde el flujo medio, por parte las fluctuaciones turbulentas) en las capas de mezcla caliente de ambos casos, y una contribución al flujo de calor medio en las capas de mezcla fría y línea central de la cortina de ambos casos, siendo mayor en el caso 2.

Con toda la información antes expuesta, se observan peaks positivos y negativos en un rango de niveles constantes (entre $x/H = 0.3$ y 0.7), los que corresponden a la zona de transición y desarrollo de la cortina. En ellos, como se ha dicho antes, ocurre el proceso de unificación entre ambos jets de la cortina. Antes de $x/H = 0.3$ se observa una buena capacidad de confinamiento para ambos casos estudiados, y en $x/H=0.6$ se observan fugas de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida La zona de impacto coincide con la encontrada por Fernández [8].

6 Conclusiones y comentarios

En el presente estudio se analizó la influencia de los términos turbulentos de transporte de calor y masa en el confinamiento de una fuente de calor, que pudieran originar fugas de calor y gases en el uso de cortinas de aire doble jet – doble flujo (DJ-DF). Los términos turbulentos estudiados fueron los esfuerzos y flujos de calor de Reynolds y su contribución en el balance de momentum y de calor del flujo medio, respectivamente.

Se analizaron datos numéricos obtenidos a partir de una simulación en 3-D sobre el uso de cortinas de aire DJ-DF como dispositivo de confinamiento de una fuente de calor dentro de un túnel, utilizando el método LES en ANSYS Fluent. La simulación fue previamente realizada por un tesista. Se identificó la gran importancia que tiene el uso de un cambio gradual en mallas no uniformes, pues de esa forma se asegura la veracidad de los resultados y su relación con la física real del problema a estudiar. Una malla no uniforme, sin cambios graduales entre las zonas con elementos de distintos tamaños, dificulta el tratamiento posterior de los datos que pudieran utilizarse con el fin de obtener mayores resultados, como es el caso de esta memoria. Por esto, se recomienda la obligación de realizar dicho cambio gradual en mallas no uniformes.

En el cálculo geométrico de regiones importantes de las cortinas estudiadas, correspondientes a las capas de mezcla fría y caliente y la línea central, se identificó que es el jet de mayor velocidad el que posee mayor importancia dinámica en el desarrollo de la cortina. El jet de menor velocidad se acopla al de mayor velocidad en el proceso de unificación de ambos para conformar un único jet aguas abajo de la cortina. Dicho proceso dificultó la obtención de las capas de mezcla y de la línea “*centerline*” en las que se evaluaron los términos turbulentos mostrados, lo cual, a su vez, afectó el cálculo de las constantes de adimensionalización. Se propuso un método para resolver este problema. Sin embargo, no fue del todo efectivo, por lo que se propone estudiar la relación entre los jets de diferentes velocidades durante el proceso de unificación.

Se encontraron zonas auto-similares en ambas cortinas la zona potencial y la zona desarrollada con la de impacto. Esto último es curioso debido a que en estudios previos solo se ha detectado similitud en niveles de la cortina pertenecientes a la zona desarrollada. La zona de transición no presenta característica de auto-similitud alguna.

En el análisis de fluctuaciones de velocidad axial y transversal, se detectó una gran cantidad local de fluctuaciones en las zonas de transición y desarrollada de ambos casos estudiados, observando mayor cantidad en el caso 2 respecto al caso 1. Además, se presentaron mayores fluctuaciones transversales que en la dirección axial, en los jets de mayor velocidad de cada caso. Se destacaron peaks en $x/H=0.45$, para el caso 1, y en $x/H=0.42$, para el caso 2, y en $x/H=0.5-0.6$ para ambos casos. Estos fueron constantes en la dirección axial, mientras que disminuyeron levemente en la

dirección transversal a medida que la cortina se desarrollaba. Lo anterior fue asociado a la presencia de estructuras de mayor tamaño en la zona de transición, producto de la interacción entre ambos jets con el ambiente. Globalmente, en el gráfico de fluctuaciones adimensionalizadas por la velocidad axial máxima local, se detectó mayor turbulencia en la zona de impacto en comparación con la observada a lo largo de la cortina.

En el análisis del esfuerzo de Reynolds se observaron flujos de momentum en direcciones aguas abajo y hacia la zona confinada de la cortina en la capa de mezcla fría, y en direcciones aguas arriba y hacia la zona protegida en la capa de mezcla caliente de ambos casos de estudio. Sin embargo, la negatividad observada en la capa de mezcla caliente era mayor en el caso 1 que en el caso 2, lo que mostró una mayor tendencia al traspaso de momentum desde la zona confinada hacia la protegida en el último caso mencionado.

Se observó una disminución en el flujo axial de momentum del flujo medio en la zona de la transición y en la zona desarrollada de ambos casos, siendo mayor en la primera región de la cortina mencionada y en el caso 2 respecto al caso 1. Este fenómeno está asociado a la generación de turbulencia debido al contacto de la cortina con el medio y al proceso de unificación de los jets iniciales. Se detectó una contribución positiva al flujo axial de momentum del flujo medio en la línea “*centerline*” de ambos casos a partir del nivel $x/H=0.5$. En la dirección transversal, se detectó una disminución en el incremento del flujo de momentum medio por fluctuaciones turbulentas en los jets de mayor velocidad de cada caso, con valores comparables entre ellos.

En los análisis de flujo de calor total de ambas direcciones de movimiento se comprobó la poca importancia de los fenómenos moleculares frente a los turbulentos, a lo largo del desarrollo de la cortina. Por lo que pueden ser despreciados.

El análisis del flujo de calor total en la dirección transversal de la cortina, mostró una gran cantidad de transporte transversal de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida entre los niveles $x/H=0.4$ y 0.7 de ambos casos de estudio. Se observaron peaks negativos en $x/H=0.5$ en la capa de mezcla caliente, tanto para el caso 1 como para el caso 2. Sumado a esto, se observó un peak negativo más pequeño en la capa de mezcla fría del caso 2 en $x/H=0.6$, asociado a fugas de calor hacia la zona protegida. El flujo neto de calor transversal evidenció la existencia de fugas de calor en ambos casos de estudio: en $x/H=0.5$ (zona de transición) y en $x/H=0.9$ (zona de impacto) del caso 1, y en $x/H=0.6$ (zona de transición-zona desarrollada) del caso 2. Se obtuvo que el caso 1 posee un 60% de menos fugas de calor desde la zona confinada a la zona protegida, respecto al caso 2.

El análisis del flujo total de calor en la dirección axial corroboró la mejor capacidad de confinamiento del caso 1 frente al caso 2. Esto debido a que se observó, a partir del estudio del flujo axial neto de calor de ambos casos, un constante flujo axial de calor aguas abajo de la cortina en el caso 1, lo que corresponde a la condición necesaria para un mejor confinamiento de la fuente

de calor. A su vez, se observó un quiebre en el flujo axial de calor del caso 2, arrojando una inversión de éste (flujo aguas abajo) a partir de $x/H=0.6$, cuyo nivel corresponde al nivel en el que ocurre un traspaso de calor desde la zona confinada hacia la zona protegida (valor negativo en el flujo de calor transversal neto). Por lo que se desprende que dicha inversión es un factor concluyente para determinar la menor capacidad de confinamiento del caso 2 y, por ende, la existencia de mayores fugas de calor en la dirección transversal, desde la zona confinada hacia la zona protegida.

En el estudio de la influencia de los flujos turbulentos en el incremento o disminución del calor del flujo medio, se observó una contribución por parte de la turbulencia hacia el flujo medio a lo largo de la capa de mezcla fría y un aporte calórico desde el flujo medio al turbulento en la capa de mezcla caliente de ambos casos de estudio. Sin embargo, no se evidenció alguna relación entre la dirección del flujo de calor y la contribución de calor hacia el flujo medio por parte de la turbulencia.

Se concluye, entonces, que el caso 1 es el que posee mayor capacidad de confinamiento, a pesar de que su inclinación hacia el lado protegido pudiera favorecer la existencia de fugas de calor hacia la zona protegida desde la fuente de calor.

Se sugiere continuar con esta línea de investigación, estudiando el grado de inclinación hacia la zona confinada de la cortina utilizada en la configuración del caso 1 y comparando esta situación con otra sin cortina de aire como dispositivo de confinamiento, de manera de generar un criterio del grado de confinamiento con el cual caracterizar la aplicación en estudio. Además, se propone disminuir las velocidades de salida de ambos jets de esta configuración, para lograr un desarrollo posterior de los regímenes turbulentos en la cortina.

Para obtener resultados que estén más relacionados con los procesos turbulentos que generan la existencia del esfuerzo de Reynolds, se recomienda realizar estudios posteriores que implementen la modelación del camino recorrido de partículas fluidas, durante una simulación transiente, para obtener los términos que representan los diferentes mecanismos de formación del esfuerzo de Reynolds. Estos son por gradientes de presión en zonas cercanas a paredes, debido al desplazamiento de partículas y producto de aceleraciones/desaceleraciones de las mismas. Es necesario mencionar que este tipo de simulación requiere de una capacidad computacional considerable, debido al tamaño de malla que se debe utilizar y al tiempo de cálculo necesario para que los mecanismos aparezcan.

Bibliografía

- [1] J. Rivera, “Estudio numérico usando un modelo LES para el confinamiento celular de contaminantes calóricos al interior de túneles,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2009.
- [2] J. Rivera, J. C. Elicer-Cortés, and M. Pavageau, “Turbulent heat and mass transfer through air curtains devices for the confinement of heat inside tunnels,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 6, pp. 688–695, 2011.
- [3] Berner International Corp., “Air Curtains 101: How Berner Air Curtains Work.” [Online]. Available: <http://www.berner.com/sales-support/air-curtains-101/>.
- [4] J. C. Elicer-Cortés, R. Demarco, a. Valencia, and M. Pavageau, “Heat confinement in tunnels between two double-stream twin-jet air curtains,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 5, pp. 438–444, 2009.
- [5] Z. J. Ji, W. Huo, and J. R. Sun, “Critical conditions for fire-induced smoke confinement by air curtain in long channels,” Proceedings of ASME Heat Transfer Summer Conference, San Francisco, California, 2009.
- [6] S. Gupta, M. Pavageau, and J. C. Elicer-Cortés, “Cellular confinement of tunnel sections between two air curtains,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3352–3365, 2007.
- [7] F. González, “Diseño y construcción de una instalación experimental para el estudio de confinamiento de escalares y contaminantes activos por medio de jets de cortinas de aire en impacto,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2005.
- [8] J. A. Fernández, J. C. Elicer-Cortés, A. Valencia, M. Pavageau, and S. Gupta, “Comparison of low-cost two-equation turbulence models for prediction flow dynamics in twin-jets devices,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 34, no. 5, pp. 570–578, 2007.
- [9] R. Demarco, “Estudio numérico del transporte turbulento de cortinas de aire en impacto para el confinamiento de un escalero activo,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2008.
- [10] M. Lecaros, J. C. Elicer-Cortés, A. Fuentes, and F. Felis, “On the ability of twin jets air curtains to confine heat and mass inside tunnels,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 8, pp. 970–977, 2010.

- [11] P. I. Rojas Muñoz, “Estudio numérico sobre confinamiento de calor al interior de túneles mediante cortinas de aire, usando el código FDS: Efectos debido a paredes no-adiabáticas del túnel,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2012.
- [12] J. Schneider, “Estudio experimental del transporte turbulento de calor y masa a través de cortinas de aire para el análisis de confinamiento al interior de túneles,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2013.
- [13] J. Castro, “Estudio numérico del transporte de calor turbulento a través de cortinas de aire para confinamiento de calor, utilizando un modelo LES,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2013.
- [14] P. A. Davidson, *Turbulence, An Introduction For Scientists and Engineering*. New York: Oxford University Press, 2015.
- [15] J. T. Davies, *Turbulence Phenomena. An Introduction to the Eddy Transfer of Momentum, Mass, and Heat, Particularly at Interfaces*. New York and London: Academic Press, Inc., 1972.
- [16] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A First Course in Turbulence*. Massachusetts and London: The MIT Press, 1972.
- [17] C. C. Lin, *Turbulent Flows and Heat Transfer*, Vol. 5. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1959.
- [18] A. Kolmogorov, “Equations of Turbulent Motion of an Incompressible Fluid,” *Izv. Acad. Sci. USSR*, vol. 6, no. Physics, pp. 56–58, 1942.
- [19] A. Dewan, *Tackling Turbulent Flows in Engineering*, vol. 33. New Delhi: Springer, 2012.
- [20] K. Luo, S. Zhang, Z. Gao, J. Wang, and L. Zhang, “Large-eddy simulation and wind-tunnel measurement of aerodynamics and aeroacoustics of a horizontal-axis wind turbine,” *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 351–362, 2015.
- [21] FLUENT Inc., “FLUENT TM 14.5 User’s Guide.” 2010.
- [22] Y. Niño, “Ecuaciones diferenciales de flujo y transporte en aguas superficiales.” Santiago, pp. 1–15, 2002.

- [23] F. Beaubert and S. Viazzo, “Large eddy simulations of plane turbulent impinging jets at moderate Reynolds numbers,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 24, no. 4, pp. 512–519, 2003.
- [24] Y. Zhigin, “Large-eddy simulation: past, present and the future,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 28, no. 2009, 2015.
- [25] M. Hussaini and J. L. Lumley, “Large Eddy Simulation,” in *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*, T. Gatski, Ed. Oxford: Oxford University Press, 1996, pp. 109–154.
- [26] J. L. Guermond, J. T. Oden, and S. Prudhomme, “Mathematical perspectives on Large Eddy Simulation models for turbulent flows,” *J. Math. Fluid Mech.*, vol. 6, no. 2, pp. 194–248, 2004.
- [27] R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Second Edi. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [28] J. R. Welty, C. E. Wicks, and R. E. Wilson, *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*, Sexta edic. Oregón: Limusa, 1994.
- [29] S. B. Pope, *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [30] P. S. Bernard, M. F. Ashmawey, and R. A. Handler, “Evaluation of the gradient model of turbulent transport through direct Lagrangian simulation,” *AIAA*, vol. 27, no. 9, pp. 1290–1292, 1989.
- [31] P. S. Bernard and R. a. Handler, “Reynolds stress and the physics of turbulent momentum transport,” *J. Fluid Mech.*, vol. 220, pp. 99, 1990.
- [32] P. S. Bernard, M. F. Ashmawey, and R. A. Handler, “An analysis of particle trajectories in computer simulated turbulent channel flow,” *Phys. Fluids*, vol. 1, pp. 1532–1540, 1989.
- [33] J. N. Reddy, *An Introduction to Continuum Mechanics*, Second Edi. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [34] K. Loubière and M. Pavageau, “Educing coherent eddy structures in air curtain systems,” *Chem. Eng. Process.*, vol. 47, pp. 435–448, 2007.
- [35] N. Rajaratnam, *Turbulent jets*, Fifth edit. New York: Elsevier, 1976.
- [36] J. F. Crisóstomo, “Estudio numérico para el confinamiento de calor al interior de tuneles usando el código FDS,” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2011.

- [37] C. YM and L. KH, “Unsteady Heat Transfer Analysis of an Impinging Jet,” *ASME. J. Heat Transf.*, vol. 124, no. 6, pp. 1039–1048, 2002.
- [38] L. Guyonnaud, C. Sollicec, M. Dufresne de Virel, and C. Rey, “Design of air curtains used for area confinement in tunnels,” *Exp. Fluids*, vol. 28, no. 4, pp. 377–384, 2000.
- [39] T. N. Aziz, J. P. Raiford, and A. A. Khan, “Numerical Simulation of Turbulent Jets,” *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 2, no. 2, pp. 234–243, 2008.
- [40] N. Rajaratnam, “Turbulent Jet.” Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1976.
- [41] P. Bradshaw, “Interactions Between Adjacent Turbulent Flows,” *6th Australas. Hydraul. Fluid Mech. Conf.*, no. 5–9, 1977.
- [42] F. Felis, M. Pavageau, J. C. Elicer-Cortés, and T. Dassonville, “Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a double stream-twin jet air curtain for heat confinement in case of tunnel fire,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 9, pp. 1191–1196, Nov. 2010.
- [43] MathWorks Matlab 2015a, “resample - Resample uniform or nonuniform data to new fixed rate.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/resample.html>.
- [44] MathWorks Matlab 2015a, “meshgrid - Rectangular grid in 2-D and 3-D space.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/meshgrid.html>.
- [45] MathWorks Matlab 2015a, “interp2 - Interpolation for 2-D gridded data in meshgrid format.” [Online]. Available: http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/interp2.html#inputarg_method.
- [46] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [47] N. Fujisawa, K. Nakamura, and K. Srinivas, “Interaction of two parallel plane jets of different velocities,” *J. Vis.*, vol. 7, no. 2, pp. 135–142, 2004.
- [48] N. Zuckerman and N. Lior, “Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling,” *Adv. Heat Transf.*, vol. 39, no. 06, pp. 565–631, 2006.

Anexos

Anexo A: Tabla comparativa sobre modelos de turbulencia

Tabla A.1: Comparación de modelos de turbulencia aplicados para problemas de jets incidentes

COMPARISON OF CFD TURBULENCE MODELS USED IMPINGING JET PROBLEMS			
Turbulence model	Computational cost (time required)	Impinging jet transfer coefficient prediction	Ability to predict secondary peak
$k-\epsilon$	★★★★ Low cost	★ Poor: Nu errors of 15–60%	★ Poor
$k-\omega$	★★★★ Low–moderate	★★ Poor–fair: anticipate Nu errors of at least 10–30%	★★ Fair: may have incorrect location or magnitude
Realizable $k-\epsilon$ and other $k-\epsilon$ variations	★★★★ Low	★★ Poor–fair: expect Nu errors of at 15–30%	★★ Poor–fair: may have incorrect location or magnitude
Algebraic stress model	★★★★ Low	★★ Poor–fair: anticipate Nu errors of at least 10–30%	★ Poor
Reynolds stress model (full SMC)	★★ Moderate–high	★ Poor: anticipate Nu errors of 25–100%	★★ Fair: may have incorrect location or magnitude
Shear stress transport (SST), hybrid method	★★★ Low–moderate	★★★ Good: typical Nu_0 errors of 20–40%	★★ Fair
v^2f	★★★ Moderate	★★★★ Excellent: anticipate Nu errors of 2–30%	★★★★ Excellent
DNS/LES time-variant models	★ Extremely high (DNS available for low Re only)	★★★★ Good–excellent	★★★★ Good–excellent

[★ indicating undesirable model characteristics, to ★★★★ indicating excellent model characteristics.]

Fuente: [48]

Anexo B: Evolución de términos turbulentos adimensionalizados en las capas de mezcla y en la línea centerline

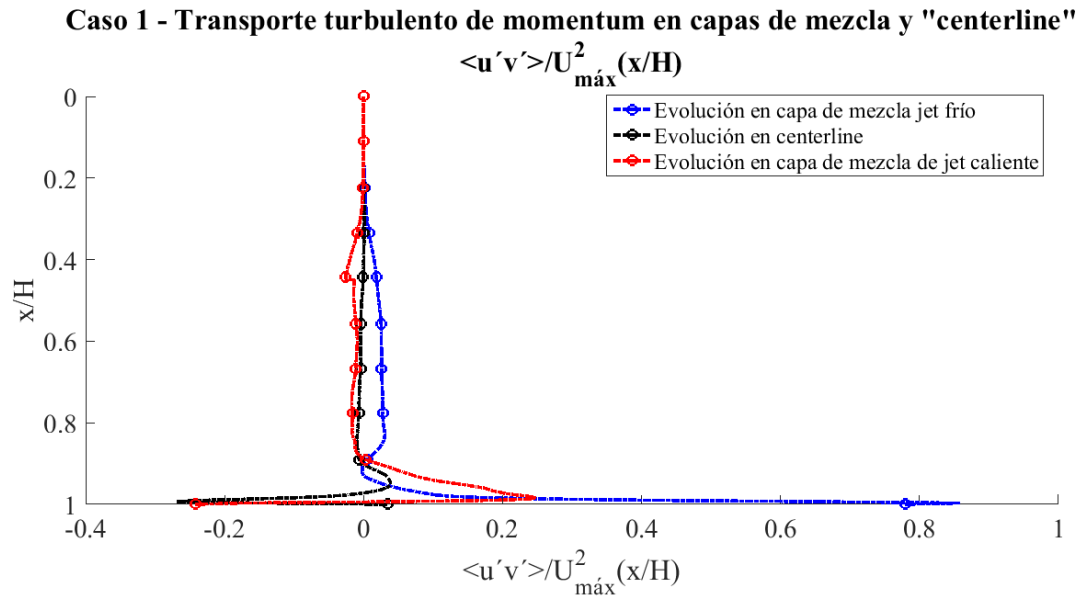


Figura B.1: Evolución del esfuerzo de Reynolds adimensionalizado en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1

Caso 2 - Transporte turbulento de momentum en capas de mezcla y "centerline"

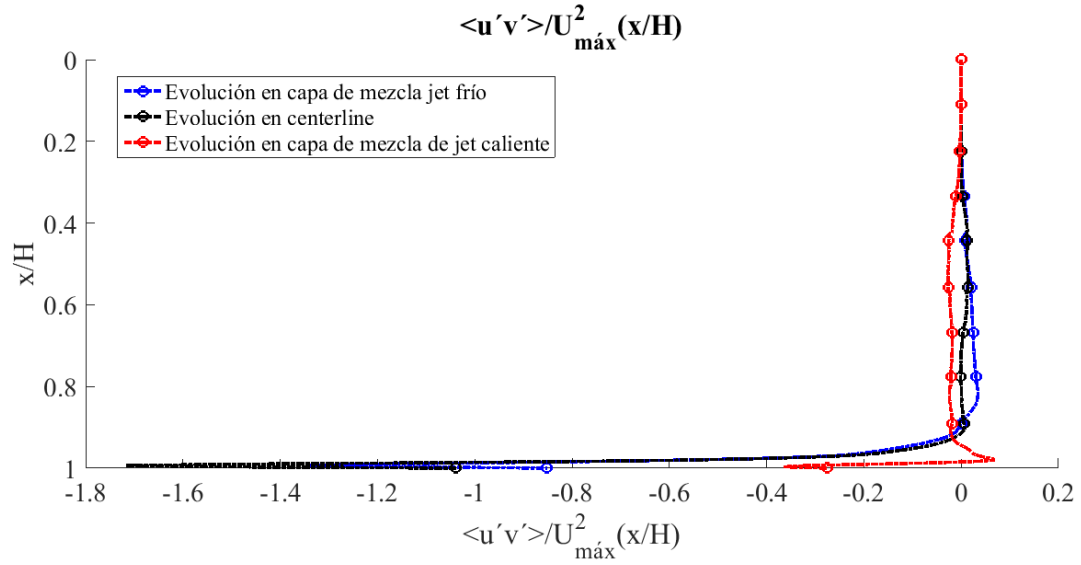


Figura B.2: Evolución del esfuerzo de Reynolds adimensionalizado en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2

Caso 1 - Transporte axial de calor turbulento en capas de mezclas y en "en centerline"

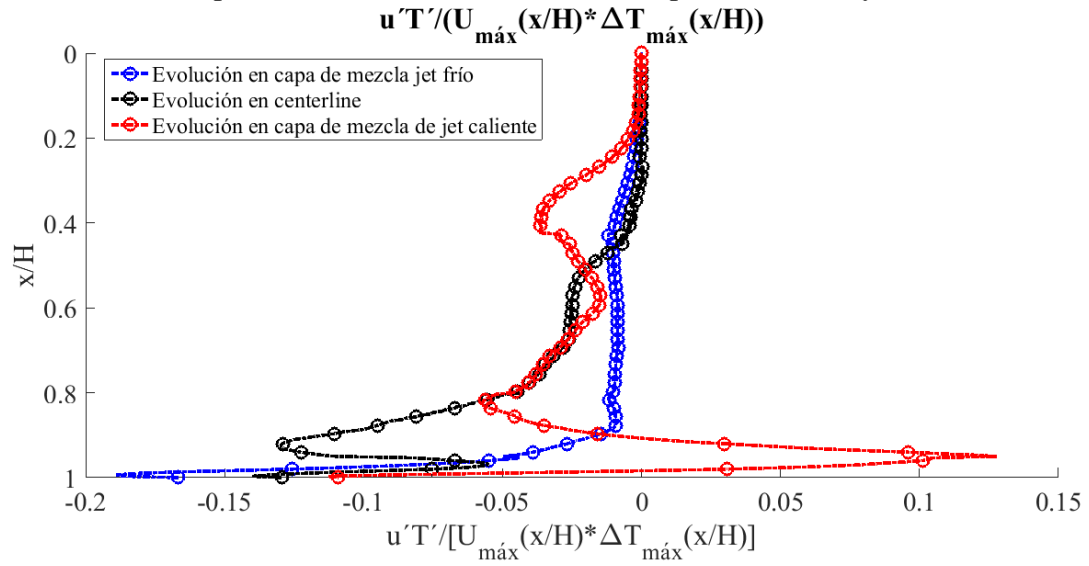


Figura B.3: Evolución del transporte axial de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1

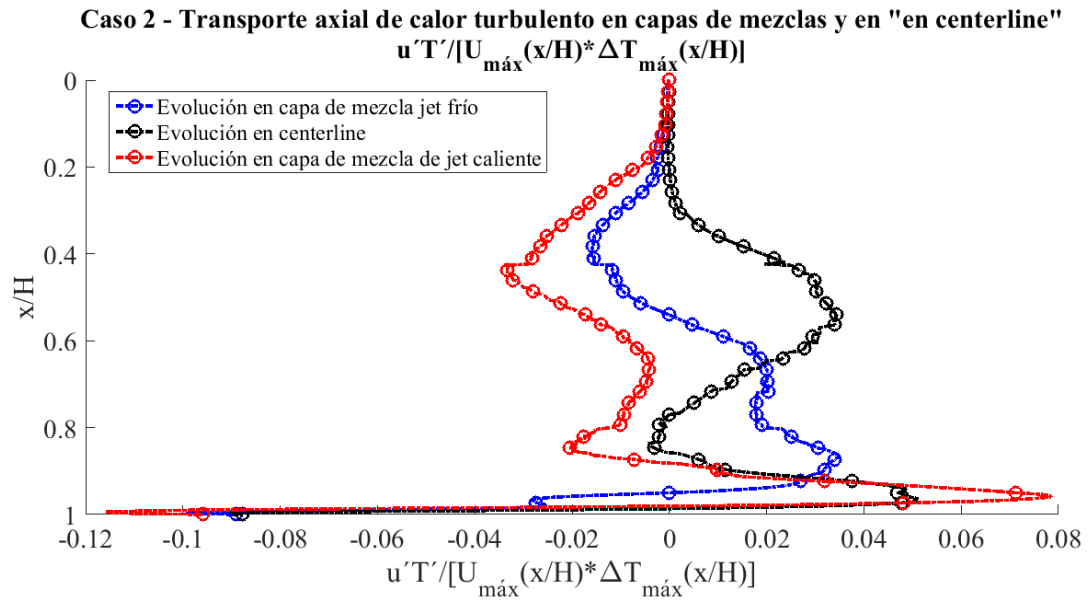


Figura B.4: Evolución del transporte axial de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2

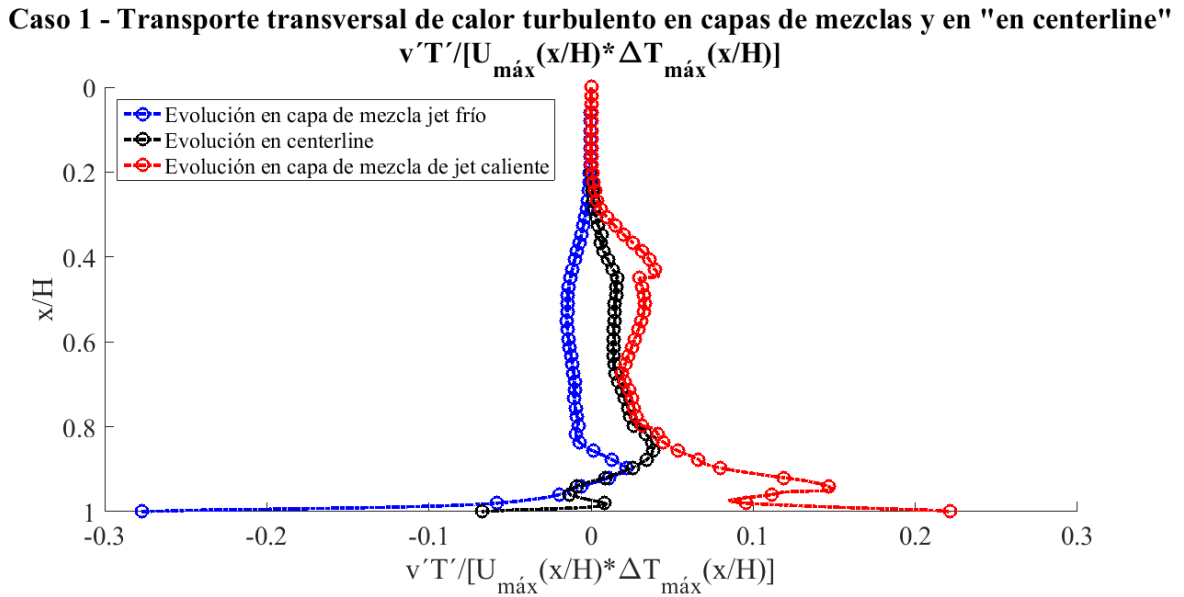


Figura B.5: Evolución del transporte transversal de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 1

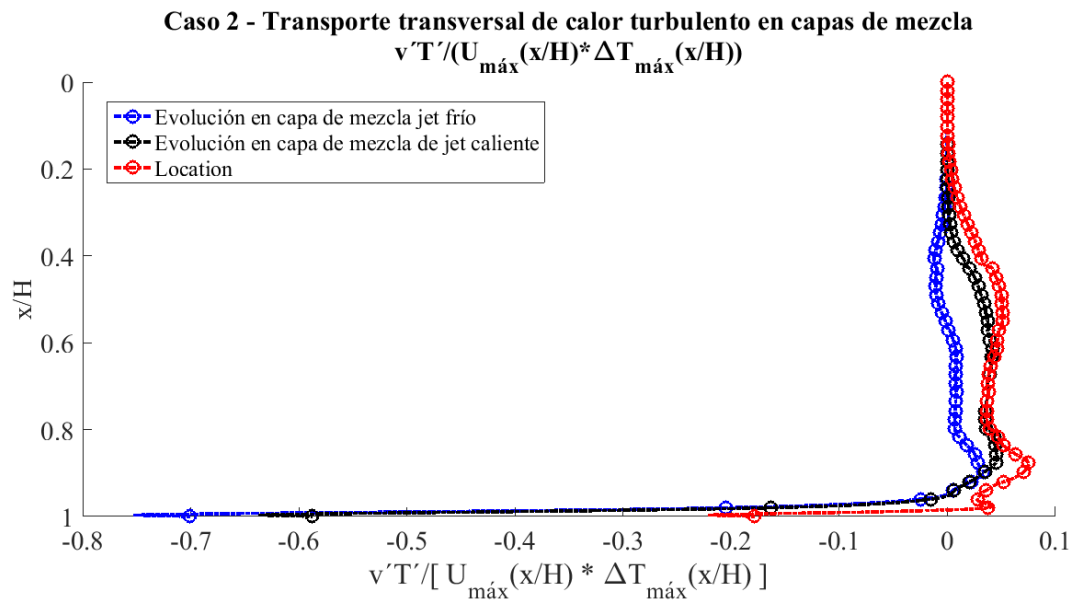


Figura B.6: Evolución del transporte transversal de calor adimensionalizado, en las líneas de capa de mezcla y en la línea central de la cortina – Caso 2

Anexo C: Código numérico de cálculo

C1: Método 1 de refinamiento de malla, utilizando “resample”. Función Afinar.m

```
function [ Mr,Xr,Yr,drx,dry ] = Afinar(M1,M2,M3,M4,M5)
%AFINAR es una función que interpola en zonas menos densas para obtener mallas
como la zona más densa, que es la zona 3. Para ello, se utiliza la función
Resample, la cual se define como resample(data,P,Q),en donde P y Q son números
enteros y si (Q/P)<1 entonces resulta una interpolación"; mientras que si
(Q/P)>1,resulta una decimación. La función "resample" solo actúa en las filas,
no en las columnas. Se extrae la primera columna y se adjunta después, el algunas
matrices, debido a que en caso de que se dejara la función "resample" no
funcionaría como se necesita.

% RESAMPLE: dx=1 y dy=0.5. Matriz total: (121x412)
%
%   RECIBE:
%       Mi      = Matriz a modificar, de la zona i
%   ENTREGA:
%       Mr      = Matriz M afinada usando función "resample", incluye todas las
zonas acopladas
%       ax,ay   = Espaciados nuevos para direcciones x e y, respect.
%       Xr,Yr   = Vectores de coordenadas axial y transversales, respect.

%%%% PARÁMETROS RESAMPLE

% Parámetros de función resample tal que sea interpolación Q/P<1. Factor de
interpolación =P/Q
px=4;                               % Factor de interpolación en x P/Q=2
py=8;                               % Factor de interp. en zonas 1y5, en y, P/Q=4
q=2;

%%%% INTERPOLACIÓN DATOS

% Extracción de primera fila de zonas 1,2,4 y 5, para ser agregadas en el
% resampling dirección y
Mz1_f1=M1(1,:);                     % Fila 1 de la zona 1
Mz2_f1=M2(1,:);                     % Fila 1 de la zona 2
Mz4_f1=M4(1,:);                     % Fila 1 de la zona 4
Mz5_f1=M5(1,:);                     % Fila 1 de la zona 5

% Aplicación de "resample" factor 2 (interpolación) en dirección x. Espaciados
de zonas 1,2,4 y 5 pasan de 2 a 1 [mmm]
% (Cant. de puntos en zona más densa: zona 3. Cantidad de puntos aumentan al
doble (de 60 a 120). Fila 1 se adjunta luego.
Mrx1=resample(M1(2:end,:),px,q);     % Zona 1 (120x29)
Mrx2=resample(M2(2:end,:),px,q);     % Zona 2 (120x76)
Mrx4=resample(M4(2:end,:),px,q);     % Zona 4 (120x76)
Mrx5=resample(M5(2:end,:),px,q);     % Zona 5 (120x29)
```

```

% Matrices con "resample" en dirección x son completadas, agregándoles la fila
1 extraída
Mrxc1=[Mz1_f1;Mrx1];           % Zona 1 (121x29)
Mrxc2=[Mz2_f1;Mrx2];           % Zona 2 (121x76)
Mrxc4=[Mz4_f1;Mrx4];           % Zona 4 (121x76)
Mrxc5=[Mz5_f1;Mrx5];           % Zona 5 (121x29)

% Aplicación de "resample" en dirección y. Se generan espaciados en todas las
zonas de 0.5 [mm]
Mry1=resample(Mrxc1',py15,q);   % Resampling factor 8 en zona 1. Cambia
espaciado en y desde 2 a 0.25 [mm] (116x121)
Mry5=resample(Mrxc5',py15,q);   % Resampling factor 8 en zona 5. Cambia
espaciado en y desde 2 a 0.25 [mm] (116x121)

% Trasposición de matrices Mry de cada zona, para obtener la matriz en el
orden inicial
A1=Mry1';                       % Zona 1 (121x116)
A2=Mrxc2';                       % Zona 2 (121x76)
A4=Mrxc4';                       % Zona 4 (121x76)
A5=Mry5';                       % Zona 5 (121x116)

% Se considera solo zona de intersección de la zona con malla más gruesa
Mr1=A1(:,1:end-1);              % Zona 1 (121x115)
Mr2=A2(:,1:end-1);              % Zona 2 (121x75)
Mr3=M3;                          % Zona 3 es la misma, no es modificada en
esta función (121,32)
Mr4=A4(:,2:end);                % Zona 4 (121x75)
Mr5=A5(:,2:end);                % Zona 5 (121x115)

% Acople de todas las zonas, para entregar la matriz final.
Mr=[Mr1 Mr2 Mr3 Mr4 Mr5];       % (121x412)

%%% GENERACIÓN DE MATRICES CON COORDENADAS INTERPOLADAS
n15=length(M1(1,:));            %Largo horizontal zonas 1 y 5
n24=length(M2(1,:));            %Largo horizontal zonas 2 y 4
n3=length(M3(1,:));             %Largo horizontal zonas 3

drx=2/(px/q);
dry=2/(py15/q);

%Diferencial de paso
dry15=(100-45)/(n15-1+(n15-1)*3)-0.013;
dry24=(45-7.75)/(n24-1);
dry3=(2*7.75)/(n3-1);

Xrr=-((1:drx:121)-1)/1000;      % Vector con posiciones en x interpoladas,
según dx. A usar en todas las zonas

Yr1=(-100:dry15:-45)/1000;      % Vector con posiciones en y interpoladas,
según dy, zona 1

```

```

Yr2=(-45:dry24:-7.75)/1000;           % Vector con posiciones en y interpoladas,
según dy, zona 1                       % Vector con posiciones en y interpoladas,
Yr3=(-7.75:dry3:7.75)/1000;           % Vector con posiciones en y interpoladas,
según dy, zona 1                       % Vector con posiciones en y interpoladas,
Yr4=(7.75:dry24:45)/1000;             % Vector con posiciones en y interpoladas,
según dy, zona 1                       % Vector con posiciones en y interpoladas,
Yr5=(45:dry15:100)/1000;              % Vector con posiciones en y interpoladas,
según dy, zona 1

% Vector en dirección x
Xr=Xrr;
% Vector en dirección y
Yr=[Yr1(1:end-1) Yr2(1:end-1) Yr3 Yr4(2:end) Yr5(2:end)];

End

```

C2: Método 2 de refinamiento de malla, utilizando “interp2”. Función Afinaq.m

```
function [ Mq,Xq,Yq,dx,dy ] = Afinaq(M1,M2,M3,M4,M5)
%AFINARi es una función que interpola en zonas menos densas para obtener mallas
como la zona más densa, que es la zona 3. Para ello, se utiliza la función
"interp2", la cual necesita de matrices de posición en X e Y en base a las
cuales se obtienen los datos interpolados.
%
% dx=0.5 y dy=0.25. Matriz total: (121x412)
%
% RECIBE:
%     Mj      = Matriz a modificar, de la zona j
% ENTREGA:
%     Mq      = Matriz Mi afinada usando función "resample"
%     Xq      = Vector de coordenadas x, axiales
%     Yq      = Vector de coordenadas transversales para graficar las
matrices entregadas acopladas
%     dx,dy   = Espaciados que se desea tener en las nuevas coordenadas,para
interpoliar

%%%% GENERACIÓN DE MATRICES CON COORDENADAS ORIGINALES

xx1245=-((1:2:121)-1)/1000;           % Vector con posiciones en x de zonas
1,2,4 y 5
xx3=-((1:1:121)-1)/1000;             % Vector con posiciones en x de zona 3

yy1=(-100:1.964:-45)/1000;           % Vector con posiciones en y de zona 1
interpoladas
yy2=(-45:0.496:-7.75)/1000;          % Vector con posiciones en y de zona 2
interpoladas
yy3=(-7.75:0.496:7.75)/1000;         % Vector con posiciones en y de zona 3
interpoladas
yy4=(7.75:0.496:45)/1000;            % Vector con posiciones en y de zona 4
interpoladas
yy5=(45:1.964:100)/1000;             % Vector con posiciones en y de zona 5
interpoladas

[Y1,X1]=meshgrid(yy1,xx1245);        % Generación de matrices con
coordenadas x e y para zona 1
[Y2,X2]=meshgrid(yy2,xx1245);        % Generación de matrices con
coordenadas x e y para zona 2
[Y3,X3]=meshgrid(yy3,xx3);           % Generación de matrices con
coordenadas x e y para zona 3
[Y4,X4]=meshgrid(yy4,xx1245);        % Generación de matrices con
coordenadas x e y para zona 4
[Y5,X5]=meshgrid(yy5,xx1245);        % Generación de matrices con
coordenadas x e y para zona 5
```

```

%%%% GENERACIÓN DE MATRICES CON COORDENADAS INTERPOLADAS

```

```

dx=0.496; % Espaciado vertical
dy=0.248; % Espaciado horizontal

Xqq=-((1:dx:121)-1)/1000; % Vector con posiciones en x
interpoladas, según dx. A usar en todas las zonas

Yqq1=(-100:dy:-45)/1000; % Vector con posiciones en y
interpoladas, según dy, zona 1
Yqq2=(-45:dy:-7.75)/1000; % Vector con posiciones en y
interpoladas, según dy, zona 1
Yqq3=(-7.75:dy:7.75)/1000; % Vector con posiciones en y
interpoladas, según dy, zona 1
Yqq4=(7.75:dy:45)/1000; % Vector con posiciones en y
interpoladas, según dy, zona 1
Yqq5=(45:dy:100)/1000; % Vector con posiciones en y
interpoladas, según dy, zona 1

[Yq1,Xq1]=meshgrid(Yqq1,Xqq); % Generación de matrices con
coordenadas x e y interpoladas para zona 1
[Yq2,Xq2]=meshgrid(Yqq2,Xqq); % Generación de matrices con
coordenadas x e y interpoladas para zona 2
[Yq3,Xq3]=meshgrid(Yqq3,Xqq); % Generación de matrices con
coordenadas x e y interpoladas para zona 3
[Yq4,Xq4]=meshgrid(Yqq4,Xqq); % Generación de matrices con
coordenadas x e y interpoladas para zona 4
[Yq5,Xq5]=meshgrid(Yqq5,Xqq); % Generación de matrices con
coordenadas x e y interpoladas para zona 5

```

```

%%%% GENERACIÓN DE MATRIZ M INTERPOLADA SEGÚN MATRICES POSICIÓN Yq y Xq nuevas

```

```

% Aplicación de función "interp2" en todas las zonas

```

```

Mq1=interp2(Y1,X1,M1,Yq1,Xq1); % Zona 1
Mq2=interp2(Y2,X2,M2,Yq2,Xq2); % Zona 2
Mq3=interp2(Y3,X3,M3,Yq3,Xq3); % Zona 3
Mq4=interp2(Y4,X4,M4,Yq4,Xq4); % Zona 4
Mq5=interp2(Y5,X5,M5,Yq5,Xq5); % Zona 5

```

```

%%%% ACOUPLE DE MATRICES Mqi, Yqi y Xqi

```

```

% Considera zona de contacto de malla más fina

```

```

Mq=[Mq1(:,1:end-1) Mq2(:,1:end-1) Mq3 Mq4(:,2:end) Mq5(:,2:end)]; %
Matriz acoplada de M, malla fina
Xq=Xqq(1,:); %
Vector en dirección x
Yq=[Yq1(1,1:end-1) Yq2(1,1:end-1) Yq3(1,:) Yq4(1,2:end) Yq5(1,2:end)]; %
Vector en dirección y

```

```

end

```


C3: Archivo de extracción y ordenamiento de datos. Ejemplo aplicado para extracción de velocidad axial media – Caso 1

```
%%%%%%%%%% TRABAJO SOBRE VELOCIDAD AXIAL U %%%%%%%%%%%

% Punto (0,0) está centrado en el jet, en el punto del cual emerge (Tiene una
boquilla a cada lado)
% "X" corresponde al eje de la dirección axial a la dirección de propagación
del jet
% "Y" corresponde al eje de la dirección transversal a la dirección de
propagación del jet

e=7.5/1000;           % Ancho de la boquilla de donde emerge un jet, [m]
H=0.15;              % Altura del túnel de la simulación, [m]

%%%%%%%%%% PARTE 1): ORDENAMIENTO DE DATOS EXTRAÍDOS DE SIMULACIÓN
%%%%%%%%%%

% Extracción de datos
Udesorden1=load('z1_data_c1.txt'); % Matriz de zona 1 con coordenadas X (col
2), Y (col 3), Z (col 4) y valor de U (col 5) para cada nodo (col 1)
Udesorden2=load('z2_data_c1.txt'); % Matriz de zona 2
Udesorden3=load('z3_data_c1.txt'); % Matriz de zona 3
Udesorden4=load('z4_data_c1.txt'); % Matriz de zona 4
Udesorden5=load('z5_data_c1.txt'); % Matriz de zona 5
Udesorden6=load('z6_data_c1.txt'); % Matriz de zona 6

%%% Orden Zona 1 (Malla más gruesa: 61x29, vertical x horizontal)
% Desde nodo 1770:end se repite información, por lo que no se consideran en el
ordenamiento

dy1=(ceil(55/28))/1000; % Espaciado en y, es 1.9643 [mm] (~2 [mm])
dx1=(120/60)/1000;     % Espaciado en x, es de 2 [mm]
h1=120/1000;           % Altura zona 1, [m]
b1=55/1000;            % Ancho zona 1, [m]

ny1=ceil(b1/dx1+1);   % N° de nodos en dirección transversal, y
(columnas)
nx1=h1/dx1+1;         % N° de nodos en dirección axial, x
(filas)
n1=ny1*nx1;           % Cantidad de nodos en zona 1

% Creación de matriz de nodos ordenados según la malla de Fluent
M1=zeros(nx1,ny1);   % Matriz inicial de nodos, según posición
en FLUENT
Desorden1=[2 3 6:2:58;1 4 5:2:57]; % Orden de nodos que están desordenados
k1=1;                % Variable auxiliar, permite hacer
relación entre índices y posición de nodos
for i=1:nx1
    for j=1:ny1
```

```

        if i<=nx1-2          % Recorre toda la malla excepto las últimas dos
filas, que son las malas
            M1(i,j)=n1-i*ny1+k1; % Algoritmo para zona 1 que relaciona
índice de iteración con valor del nodo
            k1=k1+1;          % Se suma 1 a variable auxiliar para seguir con
el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M1(i,j)=Desorden1(i-(nx1-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla
        end
    end
    k1=1;                    % Variable nuevamente inicializada para recorrer
columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 1
Uf1=zeros(nx1,ny1);        % Matriz inicial de
valores U para zona 1
Xf1=zeros(nx1,ny1);        % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo
Yf1=zeros(nx1,ny1);        % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx1
    for j=1:ny1
        Uf1(i,j)=Udesorden1(M1(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M1(i,j) de la malla
        Yf1(i,j)=Udesorden1(M1(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf1(i,j)=Udesorden1(M1(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end

% Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy1=ny1-1;              % Cantidad de elementos en
zona 1
d1=(-45--100)/elemy1;      % Espaciado para nueva
malla
Ym1=(-100:d1:-45)/1000;    % Coordenadas dirección y

%Dirección x
elemx1=nx1-1;
dxm1=(0--120)/elemx1;
Xmm1=(-120:dxm1:0)/1000;
Xm1=zeros(nx1,1);
jota=0;
for i=1:nx1
    Xm1(i)=Xmm1(i+(nx1-(i+jota)));
    jota=jota+1;
end
%%%% Fin ordenamiento zona 1

```

```

%%%% Orden Zona 2 (Malla menos gruesa: 61x76, vertical x horizontal)
% Los primeros 121 nodos son de la malla siguiente, por lo que no se
consideran en el ordenamiento de la zona 2. Lo bueno parte en nodo 122

dy2=(round(37.25/75,1))/1000; % Espaciado en y es de
0.4967 (~0.5 [mm])
dx2=(120/60)/1000; % Espaciado en x, es de 2
[mm]
h2=120/1000; % Altura zona 2, en [m]
b2=37.25/1000; % Ancho zona 2, en [m]

ny2=ceil(b2/dy2+1); % N° de nodos en dirección
transversal, y (columnas)
nx2=h2/dx2+1; % N° de nodos en dirección
axial, x (filas)
n2=nx2*ny2; % Cantidad correcta de
nodos en zona 2
nf2=length(Udesorden2(:,2)); % Cantidad de puntos
extraídos
dif2=nf2-n2; % Cantidad de puntos a
ignorar en el ordenamiento

% Creación de matrices coordenadas y valor de U para zona 2
Desorden2=[123 124:2:268 271 272;122 125:2:269 ... % Orden de nodos que están
desordenados
270 273];
M2=zeros(nx2,ny2); % Matriz inicial de nodos,
según posición de éstos en malla de FLUENT
k2=1; % Variable auxiliar,
permite hacer relación entre índices y posición de nodos
for i=1:nx2
    for j=1:ny2
        if i<=nx2-2
            M2(i,j)=n2+dif2-i*ny2+k2; % Algoritmo para zona 2
que relaciona índice de iteración con valor del nodo
            k2=k2+1; % Se suma 1 a variable
auxiliar para seguir con el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M2(i,j)=Desorden2(i-(nx2-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla
        end
    end
    k2=1; % Variable nuevamente
inicializada para recorrer columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 2
Uf2=zeros(nx2,ny2); % Matriz inicial de
valores U para zona 2
Xf2=zeros(nx2,ny2); % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo

```

```

Yf2=zeros (nx2,ny2); % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx2
    for j=1:ny2
        Uf2(i,j)=Udesorden2(M2(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M2(i,j) de la malla
        Yf2(i,j)=Udesorden2(M2(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf2(i,j)=Udesorden2(M2(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end

% Ordenamiento de últimos nodos desordenados en zona 2
Uf2(1,1)=Udesorden2(M2(1,2),9);
Uf2(1,2)=Udesorden2(M2(1,1),9);
Yf2(1,1)=Udesorden2(M2(1,2),2);
Yf2(1,2)=Udesorden2(M2(1,1),2);
Xf2(1,1)=Udesorden2(M2(1,2),3);
Xf2(1,2)=Udesorden2(M2(1,1),3);

Uf2(15,1)=Udesorden2(M2(15,2),9);
Uf2(15,2)=Udesorden2(M2(15,1),9);
Yf2(15,1)=Udesorden2(M2(15,2),2);
Yf2(15,2)=Udesorden2(M2(15,1),2);
Xf2(15,1)=Udesorden2(M2(15,2),3);
Xf2(15,2)=Udesorden2(M2(15,1),3);

Uf2(55,1)=Udesorden2(M2(55,2),9);
Uf2(55,2)=Udesorden2(M2(55,1),9);
Yf2(55,1)=Udesorden2(M2(55,2),2);
Yf2(55,2)=Udesorden2(M2(55,1),2);
Xf2(55,1)=Udesorden2(M2(55,2),3);
Xf2(55,2)=Udesorden2(M2(55,1),3);

% Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy2=ny2-1; % Cantidad de elementos en
zona 1
d2=(-7.75--45)/elemy2; % Espaciado para nueva
malla
Ym2=(-45:d2:-7.75)/1000; % Coordenadas dirección y

%Dirección y
Xm2=Xm1;
%% Fin ordenamiento zona 2

%% Orden Zona 3 (Malla menos gruesa: 121x32, vertical x horizontal)

dy3=0.5/1000; % Espaciado en y igual a
0.5 [mm]

```

```

dx3=1/1000; % Espaciado en x igual a 1
[mm]
h3=120/1000; % Altura zona 3, en [m]
b3=15.5/1000; % Ancho zona 3, en [m]

ny3=b3/dy3+1; % N° de nodos en dirección
transversal, y (columnas)
nx3=h3/dx3+1; % N° de nodos en dirección
axial, x (filas)
n3=ny3*nx3; % Cantidad correcta de
nodos en zona 3

% Creación de matrices coordenadas y valor de U para zona 3
M3=zeros(nx3,ny3); % Matriz inicial de nodos,
según posición de éstos en malla de FLUENT
k3=1; % Variable auxiliar,
permite hacer relación entre índices y posición de nodos
Desorden3=[2 3:2:45 48 49:2:63; 1 4:2:46 47 ... % Orden de nodos que están
desordenados
50:2:64];
for i=1:nx3
    for j=1:ny3
        if i<=nx3-2
            M3(i,j)=n3-i*ny3+k3; % Algoritmo para zona 3
que relaciona índice de iteración con valor del nodo
            k3=k3+1; % Se suma 1 a variable
auxiliar para seguir con el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M3(i,j)=Desorden3(i-(nx3-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla
        end
    end
    k3=1; % Variable nuevamente
inicializada para recorrer columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 3
Uf3=zeros(nx3,ny3); % Matriz inicial de
valores U para zona 3
Xf3=zeros(nx3,ny3); % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo
Yf3=zeros(nx3,ny3); % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx3
    for j=1:ny3
        Uf3(i,j)=Udesorden3(M3(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M3(i,j) de la malla
        Yf3(i,j)=Udesorden3(M3(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf3(i,j)=Udesorden3(M3(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end
end

```

```

% Ordenamiento de últimos nodos desordenados en zona 3
Uf3(1,1)=Udesorden3(M3(1,2),9);
Uf3(1,2)=Udesorden3(M3(1,1),9);
Yf3(1,1)=Udesorden3(M3(1,2),2);
Yf3(1,2)=Udesorden3(M3(1,1),2);
Xf3(1,1)=Udesorden3(M3(1,2),3);
Xf3(1,2)=Udesorden3(M3(1,1),3);

Uf3(29,1)=Udesorden3(M3(29,2),9);
Uf3(29,2)=Udesorden3(M3(29,1),9);
Yf3(29,1)=Udesorden3(M3(29,2),2);
Yf3(29,2)=Udesorden3(M3(29,1),2);
Xf3(29,1)=Udesorden3(M3(29,2),3);
Xf3(29,2)=Udesorden3(M3(29,1),3);

% Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy3=ny3-1; % Cantidad de elementos en
zona 3 % Espaciado para nueva
d3=(7.75--7.75)/elemy3; % Coordenadas dirección y
malla
Ym3=(-7.75:d3:7.75)/1000;

%Dirección x
elemx3=nx3-1;
dxm3=(0--120)/elemx3;
Xmm3=(-120:dxm3:0)/1000;
Xm3=zeros(nx3,1);
jota=0;
for i=1:nx3
    Xm3(i)=Xmm3(i+(nx3-(i+jota)));
    jota=jota+1;
end
%%%% Fin ordenamiento zona 3

%%%% Orden Zona 4 (Malla más fina: 61x76, vertical x horizontal)
% Los primeros 62 nodos están repetidos, por lo que no se consideran en el
ordenamiento de la zona 4. Lo bueno parte en nodo 63

dy4=(round(37.25/75,1))/1000; % Espaciado en y, es de
0.4967 (~0.5 [mm])
dx4=(120/60)/1000; % Espaciado en x, es de 2
[mm]
h4=120/1000; % Altura zona 4, en [m]
b4=37.25/1000; % Ancho zona 4, en [m]

ny4=ceil(b4/dy4+1); % N° de nodos en dirección
transversal, y (columnas)
nx4=h4/dx4+1; % N° de nodos en dirección
axial, x (filas)
n4=nx4*ny4; % Cantidad correcta de
nodos en zona 4

```

```

nf4=length(Udesorden4(:,2)); % Cantidad de puntos
extraídos % Cantidad de puntos a
dif4=nf4-n4; % Cantidad de puntos a
ignorar en el ordenamiento

% Creación de matrices coordenadas y valor de U para zona 2
Desorden4=[63 64:2:212;62 65:2:213]; % Orden de nodos que están
desordenados
M4=zeros(nx4,ny4); % Matriz inicial de nodos,
según posición de éstos en malla de FLUENT
k4=1; % Variable auxiliar,
permite hacer relación entre índices y posición de nodos
for i=1:nx4
    for j=1:ny4
        if i<=nx4-2
            M4(i,j)=n4+dif4-i*ny4+k4; % Algoritmo que relaciona
índice de iteración con valor del nodo
            k4=k4+1; % Se suma 1 a variable
auxiliar para seguir con el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M4(i,j)=Desorden4(i-(nx4-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla
        end
    end
    k4=1; % Variable nuevamente
inicializada para recorrer columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 4
Uf4=zeros(nx4,ny4); % Matriz inicial de
valores U para zona 4
Xf4=zeros(nx4,ny4); % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo
Yf4=zeros(nx4,ny4); % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx4
    for j=1:ny4
        Uf4(i,j)=Udesorden4(M4(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M4(i,j) de la malla
        Yf4(i,j)=Udesorden4(M4(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf4(i,j)=Udesorden4(M4(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end

% Ordenamiento de últimos nodos desordenados en zona 4
Uf4(6,1)=Udesorden4(M4(6,2),9);
Uf4(6,2)=Udesorden4(M4(6,1),9);
Yf4(6,1)=Udesorden4(M4(6,2),2);
Yf4(6,2)=Udesorden4(M4(6,1),2);
Xf4(6,1)=Udesorden4(M4(6,2),3);
Xf4(6,2)=Udesorden4(M4(6,1),3);

```

```

Uf4 (20,1)=Udesorden4 (M4 (20,2),9);
Uf4 (20,2)=Udesorden4 (M4 (20,1),9);
Yf4 (20,1)=Udesorden4 (M4 (20,2),2);
Yf4 (20,2)=Udesorden4 (M4 (20,1),2);
Xf4 (20,1)=Udesorden4 (M4 (20,2),3);
Xf4 (20,2)=Udesorden4 (M4 (20,1),3);

% Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy4=ny4-1; % Cantidad de elementos en
zona 4
d4=(45-7.75)/elemy4; % Espaciado para nueva
malla
Ym4=(7.75:d4:45)/1000; % Coordenadas dirección y

%Dirección x
Xm4=Xm1;
%%%% Fin ordenamiento zona 4

%%%% Orden Zona 5 (Malla menos gruesa: 61x76, vertical x horizontal)

dy5=(ceil(55/28))/1000; % Espaciado en y, es de
1.9643 [mm]
dx5=(120/60)/1000; % Espaciado en x, es de 2
[mm]
h5=120/1000; % Altura zona 5, en [m]
b5=55/1000; % Ancho zona 5, en [m]

ny5=ceil(b5/dy5+1); % N° de nodos en dirección
transversal, y (columnas)
nx5=h5/dx5+1; % N° de nodos en dirección
axial, x (filas)
n5=ny5*nx5; % Cantidad correcta de
nodos en zona 5

% Creación de matrices coordenadas y valor de U para zona 5
Desorden5=[2 3:2:49 52 53 55 57;1 4:2:50 51 54 56 58];% Orden de nodos que
están desordenados
M5=zeros(nx5,ny5); % Matriz inicial de nodos,
según posición de éstos en malla de FLUENT
k5=1; % Variable auxiliar,
permite hacer relación entre índices y posición de nodos
for i=1:nx5
    for j=1:ny5
        if i<=nx5-2
            M5(i,j)=n5-i*ny5+k5; % Algoritmo que relaciona
índice de iteración con valor del nodo
            k5=k5+1; % Se suma 1 a variable
auxiliar para seguir con el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M5(i,j)=Desorden5(i-(nx5-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla

```



```

        end
    end
    k5=1; % Variable nuevamente
    inicializada para recorrer columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 5
Uf5=zeros(nx5,ny5); % Matriz inicial de
valores U
Xf5=zeros(nx5,ny5); % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo
Yf5=zeros(nx5,ny5); % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx5
    for j=1:ny5
        Uf5(i,j)=Udesorden5(M5(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M5(i,j) de la malla
        Yf5(i,j)=Udesorden5(M5(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf5(i,j)=Udesorden5(M5(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end

% Ordenamiento de últimos nodos desordenados en zona 5
Uf5(33,1)=Udesorden5(M5(33,2),9);
Uf5(33,2)=Udesorden5(M5(33,1),9);
Yf5(33,1)=Udesorden5(M5(33,2),2);
Yf5(33,2)=Udesorden5(M5(33,1),2);
Xf5(33,1)=Udesorden5(M5(33,2),3);
Xf5(33,2)=Udesorden5(M5(33,1),3);

Uf5(46,1)=Udesorden5(M5(46,2),9);
Uf5(46,2)=Udesorden5(M5(46,1),9);
Yf5(46,1)=Udesorden5(M5(46,2),2);
Yf5(46,2)=Udesorden5(M5(46,1),2);
Xf5(46,1)=Udesorden5(M5(46,2),3);
Xf5(46,2)=Udesorden5(M5(46,1),3);

% Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy5=ny5-1; % Cantidad de elementos en
zona 5
dym5=(100-45)/elemy5; % Espaciado para nueva
malla
Ym5=(45:dym5:100)/1000; % Coordenadas dirección y

%Dirección x
Xm5=Xm1;
%%%% Fin ordenamiento zona 5

%%%% Orden Zona 6 (Malla más fina: 61x29, vertical x horizontal)

```

```

% Los primeros 241 nodos están repetidos. Se consideran desde el nodo 242 en
adelante para zona 6

dy6=0.5/1000; % Espaciado en y, igual a
0.5 [mm]
dx6=1/1000; % Espaciado en x, igual a
1 [mm]
h6=30/1000; % Altura zona 6, en [m]
b6=200/1000; % Ancho zona 6, en [m]

ny6=b6/dy6+1; % N° de nodos en dirección
transversal, y (columnas)
nx6=h6/dx6+1; % N° de nodos en dirección
axial, x (filas)
n6=nx6*ny6; % Cantidad correcta de
nodos en zona 6
nf6=length(Udesorden6(:,2)); % Cantidad de puntos
extraídos
dif6=nf6-n6; % Cantidad de puntos a
ignorar en el ordenamiento

% Creación de matrices coordenadas y valor de U para zona 6
M6=zeros(nx6,ny6); % Matriz inicial de nodos,
según posición de éstos en malla de FLUENT
k6=1; % Variable auxiliar,
permite hacer relación entre índices y posición de nodos

Desorden6=[244 245:2:455 458 459:2:617 620 ... % Orden de nodos que están
desordenados
621:2:711 714 715:2:761 764 765:2:909 912 913:2:1043;243 246:2:456 ...
457 460:2:618 619 622:2:712 713 716:2:762 763 766:2:910 911 914:2:1044];
for i=1:nx6
    for j=1:ny6
        if i<=nx6-2
            M6(i,j)=n6+dif6-i*ny6+k6; % Algoritmo que relaciona
índice de iteración con valor del nodo
            k6=k6+1; % Se suma 1 a variable
auxiliar para seguir con el algoritmo en nodo siguiente
        else
            M6(i,j)=Desorden6(i-(nx6-2),j); % Se agregan los valores
desordenados de la malla
        end
    end
    k6=1; % Variable nuevamente
inicializada para recorrer columnas de nueva fila
end

% Extracción de matrices coordenadas y valor de U para zona 6
Uf6=zeros(nx6,ny6); % Matriz inicial de
valores U
Xf6=zeros(nx6,ny6); % Matriz inicial de
coordenada X (axial) de cada nodo

```

```

Yf6=zeros (nx6,ny6); % Matriz inicial de
coordenada Y (transversal) de cada nodo
for i=1:nx6
    for j=1:ny6
        Uf6(i,j)=Udesorden6(M6(i,j),9); % Valor de U según orden
de nodos de M6(i,j) de la malla
        Yf6(i,j)=Udesorden6(M6(i,j),2); % Posición en Y
(coordenada transversal)
        Xf6(i,j)=Udesorden6(M6(i,j),3); % Posición en X
(coordenada axial)
    end
end

%Creación de matrices coordenadas en X e Y en matlab
%Dirección y
elemy6=ny6-1; % Cantidad de elementos en zona 6
dym6=(100--100)/elemy6; % Espaciado para nueva malla
Ym6=(-100:dym6:100)/1000; % Coordenadas dirección y

%Dirección x
elemx6=nx6-1;
dxm6=(-120--150)/elemx6;
Xmm6=(-150:dxm6:-120)/1000;
Xm6=zeros (nx6,1);
jota=0;
for i=1:nx6
    Xm6(i)=Xmm6(i+(nx6-(i+jota)));
    jota=jota+1;
end
%%%% Fin ordenamiento zona 6

%%%%%%%%%%%%%% PARTE 2): ORDENAMIENTO DE DATOS EN UNA SOLA MATRIZ %%%%%%%%%%%%%%%

%1)Creo matrices con posiciones originales (sacadas del FLUENTE) para X e Y
%de todas las zonas
[Yo1,Xo1]=meshgrid(Ym1,Xm1); % (61x29)
[Yo2,Xo2]=meshgrid(Ym2,Xm2); % (61x76)
[Yo3,Xo3]=meshgrid(Ym3,Xm3); % (121x32)
[Yo4,Xo4]=meshgrid(Ym4,Xm4); % (61x76)
[Yo5,Xo5]=meshgrid(Ym5,Xm5); % (61x29)
[Yo6,Xo6]=meshgrid(Ym6,Xm6); % (31x401)

%2)Densifico zonas 6 y 3 para obtener una matriz con espaciados 0.5x0.25 (VxH)
%ZONA 6
% Dirección x
elemx6n=elemx6*2; %Elemnto se divide en 2 (de 1 a 0.5)
dxm6n=(-120--150)/elemx6n; %Nuevo espaciado para nueva cant. de elem.
Xmm6n=(-150:dxm6n:-120)/1000; %Nuevo vector en x

%Doy vuelta el vector Xmm6
nx6n=length(Xmm6n); %Dimensión de nuevo vector X de z6: 241
Xm6n=zeros (nx6n,1); % (241x1)

```

```

jota=0;
for i=1:nx6n
    posicion=i+(nx6n-(i+jota)); %Fórmula para invertir el índice
    Xm6n(i)=Xmm6n(posicion);
    jota=jota+1;
end

% Dirección y
elemy6n=elemy6*2; %Elemento en y se divide en 2 (de 0.5 a
0.25)
dym6n=(100--100)/elemy6n; %Nuevo espaciado para nueva cant. de elem.
Ym6n=(-100:dym6n:100)/1000; %Nuevo vector en y

%ZONA 3
% Dirección x
elemx3n=elemx3*2; %Elemnto se divide en 2 (de 1 a 0.5)
dxm3n=(0--120)/elemx3n; %Nuevo espaciado para nueva cant. de elem.
Xmm3n=(-120:dxm3n:0)/1000; %Nuevo vector en x

%Doy vuelta el vector Xmm3
nx3n=length(Xmm3n); %Dimensión de nuevo vector X de z3: 241
Xm3n=zeros(nx3n,1); %(241x1)
jota=0;
for i=1:nx3n
    posicion=i+(nx3n-(i+jota)); %Fórmula para invertir el índice
    Xm3n(i)=Xmm3n(posicion);
    jota=jota+1;
end

% Dirección y
elemy3n=elemy3*2; %Elemento en y se divide en 2 (de 0.5 a
0.25)
dym3n=(7.75--7.75)/elemy3n; %Nuevo espaciado para nueva cant. de elem.
Ym3n=(-7.75:dym3n:7.75)/1000; %Nuevo vector en y

%3)Creo vectores en dirección X para zonas 1,2,4y5 con nuevo espaciado 0.5
%Primero para zona 1
elemx1n=elemx1*4; %Elemnto se divide en 4 (de 2 a 0.5)
dxm1n=(0--120)/elemx1n; %Nuevo espaciado para nueva cant. de elem.
Xmm1n=(-120:dxm1n:0)/1000; %Nuevo vector en x

nx1n=length(Xmm1n);
Xm1n=zeros(nx1n,1); %(241x1)
jota=0;
%Doy vuelta el vector Xmm1
for i=1:nx1n
    posicion=i+(nx1n-(i+jota)); %Fórmula para invertir el índice
    Xm1n(i)=Xmm1n(posicion);
    jota=jota+1;
end

%Dirección x para el resto de las zonas (2, 4 y 5) (Espaciado 0.5)

```

```

Xm2n=Xm1n; Xm4n=Xm1n; Xm5n=Xm1n;%(241x1)

%4)Busco y guardo sectores en z6 que corresponden a las zonas 1,2,3,4,5, en
%vector cuyo espaciado es 0.25
Ym1n=Ym6n(1:221);           %(241x1)
Ym2n=Ym6n(221:370);       %(241x1)
Ym4n=Ym6n(432:581);       %(241x1)
Ym5n=Ym6n(581:end);       %(241x1)

%5)Genero nueva matriz interpolada de coordenadas para cada zona, con
%meshgrid
[Yi1,Xi1]=meshgrid(Ym1n,Xm1n); %(241x221)
[Yi2,Xi2]=meshgrid(Ym2n,Xm2n); %(241x150)
[Yi3,Xi3]=meshgrid(Ym3n,Xm3n); %(241x63)
[Yi4,Xi4]=meshgrid(Ym4n,Xm4n); %(241x150)
[Yi5,Xi5]=meshgrid(Ym5n,Xm5n); %(241x221)
[Yi6,Xi6]=meshgrid(Ym6n,Xm6n); %(61x801)

%6)Interpolo valores de velocidades para todas las zonas, considerando
%mallas nuevas interpoladas, acoplables a la zona 6
Ui1=interp2(Ym1,Xm1,Uf1,Yi1,Xi1,'spline'); %(241x221)
Ui2=interp2(Ym2,Xm2,Uf2,Yi2,Xi2,'spline'); %(241x150)
Ui3=interp2(Ym3,Xm3,Uf3,Yi3,Xi3,'spline'); %(241x63)
Ui4=interp2(Ym4,Xm4,Uf4,Yi4,Xi4,'spline'); %(241x150)
Ui5=interp2(Ym5,Xm5,Uf5,Yi5,Xi5,'spline'); %(241x221)
Ui6=interp2(Ym6,Xm6,Uf6,Yi6,Xi6,'spline'); %(61x801)

%7)Acoplo todas las matrices para trabajar con una sola. Se usa zona de
%contacto de zona anteriormente más fina
Yt=[Yi1(1:end-1,1:end-1) Yi2(1:end-1,1:end-1) Yi3(1:end-1,:)...
    Yi4(1:end-1,2:end) Yi5(1:end-1,2:end);Yi6];
Xt=[Xi1(1:end-1,1:end-1) Xi2(1:end-1,1:end-1) Xi3(1:end-1,:)...
    Xi4(1:end-1,2:end) Xi5(1:end-1,2:end);Xi6];
Ut=[Ui1(1:end-1,1:end-1) Ui2(1:end-1,1:end-1) Ui3(1:end-1,:)...
    Ui4(1:end-1,2:end) Ui5(1:end-1,2:end);Ui6];
C1_U=Ut;

```

C4: Función “Derivada.m”

```
function [Dx,Dy]=Derivada(M,hx,hy,a)
%% Derivada es una función que calcula la derivada de orden 2 de una sola
%% matriz.
% Dirección "y" es la transversal a la dirección de propagación del jet
% Dirección "x" es la dirección axial a la de propagación del jet

%RECIBE:
% M = Matriz a derivar
% hx = Espaciado en x
% hy = Espaciado en y
% a = Opción para aplicar derivada. a=1 usa derivada con error O(h^2);
%     a=2 usa derivada con error O(h^4)
%ENTREGA:
% Dx = matriz con valor de derivada respecto a x, dirección vertical
% Dy = matriz con valor de derivada respecto a y, dirección horizontal

lx=length(M(:,1)); %Cantidad de filas es la cantidad de puntos que hay en
dirección x
ly=length(M(1,:)); %Cantidad de columnas es la cantidad de valores en
dirección y

if a==1
    %Derivada respecto a y
    for i=1:lx
        for j=1:ly
            if j==1
                %Columna 1: Derivada hacia adelante
                Dy(i,j)=(-3*M(i,j)+4*M(i,j+1)-M(i,j+2))/(2*hy);
            elseif j==ly
                %Columna última: Derivada hacia atrás
                Dy(i,j)=(3*M(i,j)-4*M(i,j-1)+M(i,j-2))/(2*hy);
            else
                %El resto: Derivada central
                Dy(i,j)=(M(i,j+1)-M(i,j-1))/(2*hy);
            end
        end
    end
end

%Derivada respecto a x
for j=1:ly
    for i=1:lx
        if i==1
            %Columna 1: Derivada hacia adelante
            Dx(i,j)=(-3*M(i,j)+4*M(i+1,j)-M(i+2,j))/(2*hx);
        elseif i==lx
            %Columna última: Derivada hacia atrás
            Dx(i,j)=(3*M(i,j)-4*M(i-1,j)+M(i-2,j))/(2*hx);
        else
            %El resto: Derivada central
            Dx(i,j)=(M(i+1,j)-M(i-1,j))/(2*hx);
        end
    end
end
```

```

        end
    end

elseif a==2
    %Derivada respecto a y
    for i=1:lx
        for j=1:ly
            if j<3
                %Columna 1: Derivada hacia adelante
                Dy(i,j)=(-25*M(i,j)+48*M(i,j+1)-36*M(i,j+2)+16*M(i,j+3)-
3*M(i,j+4))/(12*hy);
            elseif j>ly-3
                %Columna última: Derivada hacia atrás
                Dy(i,j)=(25*M(i,j)-48*M(i,j-1)+36*M(i,j-2)-16*M(i,j-
3)+3*M(i,j-4))/(12*hy);
            else
                %El resto: Derivada central
                Dy(i,j)=(M(i,j-2)-8*M(i,j-1)+8*M(i,j+1)-M(i,j+2))/(12*hy);
            end
        end
    end

    %Derivada respecto a x
    for j=1:ly
        for i=1:lx
            if i<3
                %Columna 1: Derivada hacia adelante
                Dx(i,j)=(-25*M(i,j)+48*M(i+1,j)-36*M(i+2,j)+16*M(i+3,j)-
3*M(i+4,j))/(12*hx);
            elseif i>lx-3
                %Columna última: Derivada hacia atrás
                Dx(i,j)=(25*M(i,j)-48*M(i-1,j)+36*M(i-2,j)-16*M(i-3,j)+3*M(i-
4,j))/(12*hx);
            else
                %El resto: Derivada central
                Dx(i,j)=(M(i-2,j)-8*M(i-1,j)+8*M(i+1,j)-M(i+2,j))/(12*hx);
            end
        end
    end
end
end
end

```

C5: Archivo para cálculo de capa de mezcla, sus rangos y línea entre jets

```

%%%%%%%%%% PARTE 1): RECUPERACIÓN DE DATOS EXTRAÍDOS DE SIMULACIÓN %%%%%%%%%%%

% Recuperación de matrices unificadas U, X e Y
au=load('Ut'); U=au.Ut; ax=load('Xt'); X=ax.Xt; ay=load('Yt'); Y=ay.Yt;
adxx=load('dxxm6n'); dx=adxx.dxxm6n; adyy=load('dyy6n'); dy=adyy.dyy6n;
av=load('Vt'); V=av.Vt;

% % Recuperación de velocidades instantáneas
% zu=load('UReal'); Ureal=zu.UReal; zv=load('VReal'); Vreal=zv.VReal;

%%%%%%%%%% PARTE 2): CREACIÓN DE NIVELES A MOSTRAR %%%%%%%%%%%

nivel=(-[12 36 60 72 90 105 120 132 142.5]/1000)'; % Valores en [m] que se
quieren mostrar
nn=length(nivel); % Dimensión de vector
"nivel"
%Cant. de niveles en cada zona
cont=0;
x_H=zeros(nn,1);
for i=1:nn
    if nivel(i)>-120/1000
        cont=cont+1;
        x_H(i)=roundn(-nivel(i)/H,-1); % Posición de nivel
adimensionalizada, redondeada al primer decimal
    else
        cont=cont;
        x_H(i)=roundn(-nivel(i)/H,-2); % Posición de nivel
adimensionalizada, redondeada al primer decimal
    end
end
nn6=nn-cont; % Cantidad de niveles en
zona impacto

Xdata=roundn(X(:,1),-5); % Vector de matriz de
coordenadas x para graficar
Ydata=roundn(Y(1,:),-5);
X_H=Xdata/H; % Coordenada x
adimensionalizada

%%%%%%%%%% PARTE 3): CÁLCULO DEL HALF-WIDTH %%%%%%%%%%%

%%%(3.1) DATOS OBTENIDOS DE OBSERVACIÓN DE CURVAS

%(3.1.1) OBTENCIÓN DE CURVAS DE VELOCIDAD MOSTRADAS EN CADA NIVEL
onivel=-[5 12 36 60 66 72 78 84 90 105 ... % Valores en [mm] que se
quieren mostrar
119.5 120 132 142.5]/1000;

```



```

onn=length(onivel); % Dimensión de vector "nivel"

%Cantidad de niveles en zona de impacto
ocont=0;
for i=1:onn
    if onivel(i)>-120/1000
        ocont=ocont+1;
    end
end
onn6=onn-ocont; % Cantidad de niveles en zona
impacto
ox_H=roundn(-onivel/H,-2);

% Obtención de niveles en zonas 1 a 5 y 6
oU=GetLevel(onivel,U,Xdata); % Matriz de veloc. en niveles
deseados; filas de matrices ... %originales donde se
encuentran esas vel.
% Mínimo de cada nivel a graficar
omi=zeros(onn,1); % Mínimo para zonas 1 a 5
for i=1:onn
    omi(i)=min(oU(i,:));
end
% Obtención de mínimo global para graficar
omin=min(omi);

% Escalamiento para graficar
oUesq=oU;
ok=1;
for i=1:onn
    oUesq(i,:)=oU(i,:)-abs(omin)*ok;
    ok=ok+1.2;
end

%(3.1.2) INGRESO DE POSICIONES OBSERVADAS
C=NaN(onn,5);
C(1,:)=[-0.01075 -0.004 -0.00025 0.0035 0.01175];
C(2,:)=[-0.0125 -0.00425 0 0.00375 0.01275];
C(3,:)=[-0.0165 -0.00625 -0.00175 0.001 0.014];
C(4,:)=[-0.02325 -0.01 -0.005 -0.003 0.00975];
C(5,:)=[-0.026 -0.011 -0.0055 -0.0045 0.01];
C(6,:)=[-0.031 -0.01225 -0.00725 -0.006 0.01025];
C(7,:)=[-0.03425 -0.0135 -0.0075 -0.0065 0.00825];
C(8,:)=[-0.044 NaN -0.015 NaN 0.0075];
C(9,:)=[-0.045 NaN -0.01625 NaN 0.00725];
C(10,:)=[-0.0575 NaN -0.01975 NaN 0.00675];
C(11,:)=[-0.06525 NaN -0.024 NaN 0.0075];
C(12,:)=[-0.0645 NaN -0.02425 NaN 0.011];
C(13,:)=[-0.0825 NaN -0.0275 NaN 0.0055];
C(14,:)=[-0.0835 NaN -0.028 NaN 0.01375];

```

```
%%(3.2) OBTENCIÓN DE VELOC. MÁXIMA DE TODOS LOS NIVELES
```

```
% (3.2.1) OBTENCIÓN DE POSICIÓN ENTRE LAS CUALES ENCONTRAR VELOC. MÁXIMAS
[znx,zny]=size(U); % Tamaño de matriz de velocidades U
%zcol2=[find(Ydata==C(11,1),1) find(Ydata==C(11,5),1)]; % Nodos finales de
última curva de zonas 1 a 5
zcol=[find(Ydata==-0.02,1) find(Ydata==0.0075,1);... % Nodos entre los
cuales encontrar el máximo
find(Ydata==-0.03,1) find(Ydata==0,1);...
find(Ydata==-0.035,1) find(Ydata==-0.01,1)];
zfil=[0 find(X(:,1)/-H==0.4) find(X(:,1)/-H==0.7) znx]; % Niveles entre
los cuales encontrar el máximo
zmaxd=[find(Ydata==C(1,2),1) find(Ydata==C(2,4),1)]; % Nodos entre los
que está la máxima distancia entre máximos de distintos jets
```

```
% (3.2.2) OBTENCIÓN DE VELOCIDADES MÁXIMAS[ok]
```

```
zmax=NaN(znx,6); % Máximos de jet frío (col 3) y jet caliente (col
6). Las otras dos columnas son sus posiciones en U
zmin=NaN(znx,4); % Veloc. mínima entre los dos máximos (col 1),
posición de ese valor (col 2)
zcont=ones(znx,1); % Contador
zUmax=NaN(znx,3); % Velocidades máximas de jet frío (col 1), jet
caliente (col 3) y jet unificado (col 2)
zposmax=NaN(znx,9); % Fil,Col,Coord de velocidad máxima, para cada tipo
de jet: frío,mezcla,caliente
zjd=0; % Nivel hasta el cual existen dos jets separados
for cas=1:3
for i=zfil(cas)+1:zfil(cas+1)
% Máximos (mínimos por el "-") de cada jet (que máximo sea mayor al
siguiente y al anterior)
for j=zcol(cas,1):zcol(cas,2) % Recorro columnas para cada
fila
%Jet frío
if zcont(i)==1 && U(i,j)<U(i,j-1) && U(i,j)<U(i,j+1)
zmax(i,3)=U(i,j); % Asigno el
máximo de la velocidad de jet frío
[zmax(i,1),zmax(i,2)]=find(U==zmax(i,3),1); % Asigno
posición de nodos de ese máximo frío
zcont(i)=zcont(i)+1;
%Jet caliente
elseif zcont(i)==2 && U(i,j)<U(i,j-1) && U(i,j)<U(i,j+1)
zmax(i,6)=U(i,j); % Asigno
máximo de la velocidad de jet caliente
[zmax(i,4),zmax(i,5)]=find(U==zmax(i,6),1); % Asigno
columna de ese máximo caliente
zcont(i)=zcont(i)+1;
end
end

% Mínimo entre los máximos encontrados, y asigno los máximos
%Casos en que aún están los dos jets separados y que el valor mínimo
no se encuentre en jet frío unificado
if zmax(i,2)<zmax(i,5) %&&
max(U(i,zmax(i,2):zmax(i,5)))~=U(i,zmax(i,2)) && zmax(i,3)>zmax(i,6)
```

```

        %Contador que obtiene la cantidad de filas donde los jets aún
están separados (donde hay dos máximos)
        zjd=zjd+1;

        % Asignación de posición intermedia entre jets
        zmin(i,4)=max(U(i,zmax(i,2):zmax(i,5))); % Valor numérico de
veloc. mínima entre los dos máximos
        [zmin(i,1),zmin(i,2)]=find(U==zmin(i,4),1); % Fil,Columna de ese
mínimo

        if i<=zjd
            zmin(i,3)=Ydata(zmin(i,2)); % Coordenada de la
velocidad mínima
        end

        % Asignación de máximos de jets separados
        zUmax(i,1)=zmax(i,3); % Máximos de jet frío
        zUmax(i,3)=zmax(i,6); % Máximos de jet
caliente
        zposmax(i,1:2)=zmax(i,1:2); % Posición de máximo
del jet frío
        zposmax(i,3)=Ydata(zposmax(i,2)); % Coordenada en y del
máximo del jet frío
        zposmax(i,7:8)=zmax(i,4:5); % Posición de máximo
del jet caliente
        zposmax(i,9)=Ydata(zposmax(i,8)); % Coordenada en y del
máximo del jet caliente

    else
        % Asignación de máximos de jets unificados
        zUmax(i,2)=zmax(i,3);
        zposmax(i,4:5)=zmax(i,1:2);
        zposmax(i,6)=Ydata(zposmax(i,5));
    end
end
end

%(3.2.3) VELOCIDAD MÁXIMA MEDIA
zUmed=zUmax/2;

%(3.2.4) UBICACIÓN DE VELOCIDAD MÁXIMA MEDIA

zNod=NaN(znx,8); % Nodos entre los que está de umax/2, 2 primeras
col:jet frío; 2 del medio: jet unif; 2 últimas: jet caliente
zPos=NaN(znx,8); % Coordenada en Y donde se encuentra Umax/2, 2 del
medio: jet unif; 2 últimas: jet caliente
zPos_prom=NaN(znx,4); % Coordenada de semiancho, 2 primeras col:jet
frío, columna del medio: jets unidos, 2 últimas: jet caliente
zk=ones(znx,8); % Contador
zjf=0; % Nivel hasta donde hay capa mezcla interna de jet
frío

```

```

zjc=0; % Nivel hasta donde hay capa mezcla interna de jet
caliente
for zz=1:znx
% Zonas jets separados. Se abordan ambos jets por los dos lados. Por cada
lado abordado, hay dos resultados
    if zz<=zjd
        for j=1:zny-1
            % JET FRÍO
            if U(zz,j)>=zUmed(zz,1) && U(zz,j+1)<=zUmed(zz,1) && zk(zz,1)==1

                % Primera llegada, por el lado del ambiente
                zNod(zz,1:2)=[j j+1]; % Guarda la
                posición de los nodos entre los que se encuentra la Umax/2
                zPos(zz,1:2)=[Ydata(j) Ydata(j+1)]; % Guarda posición
                en y de nodos anteriores

                %Posición interpolada de Umax/2
                zPos_prom(zz,1)=(zPos(zz,2)-zPos(zz,1))*(zUmed(zz,1)-
                U(zz,j))/(U(zz,j+1)-U(zz,j))+zPos(zz,1);
                zk(zz,1)=zk(zz,1)+1;

                % Segunda llegada por zona interacción jet-jet
                for i=j+1:zny-1
                    if U(zz,i)<=zUmed(zz,1) && U(zz,i+1)>=zUmed(zz,1) &&
                    zk(zz,2)==1 && i<=zmax(zz,5)
                        zNod(zz,3:4)=[i i+1]; % Guarda la
                        posición de los nodos entre los que se encuentra la Umax/2
                        zPos(zz,3:4)=[Ydata(i) Ydata(i+1)]; % Guarda
                        posición en y de nodos anteriores

                        %Posición interpolada de Umax/2
                        zPos_prom(zz,2)=(zPos(zz,4)-zPos(zz,3))*(zUmed(zz,1)-
                        U(zz,i))/(U(zz,i+1)-U(zz,i))+zPos(zz,3);
                        zk(zz,2)=zk(zz,2)+1;

                        %Contador para identificar hasta qué nivel está
                        zjf=zjf+1;
                    end
                end

            % JET CALIENTE
            elseif U(zz,zny-j)<=zUmed(zz,3) && U(zz,zny-j+1)>=zUmed(zz,3) &&
            zk(zz,3)==1

                % Primera llegada, por el lado de la zona confinada
                zNod(zz,7:8)=[zny-j zny-j+1];
                zPos(zz,7:8)=[Ydata(zny-j) Ydata(zny-j+1)];

                %Posición interpolada de Umax/2
                zPos_prom(zz,4)=(zPos(zz,8)-zPos(zz,7))*(zUmed(zz,3)-U(zz,zny-
                j))/(U(zz,zny-j+1)-U(zz,zny-j))+zPos(zz,7);
                zk(zz,3)=zk(zz,3)+1;

```

```

        % Segunda llegada, por zona interacción jet-jet
        for i=1:zny-(j+1)
            if U(zz, zny-j-i) >= zUmed(zz, 3) && U(zz, zny-j-
i+1) <= zUmed(zz, 3) && zny-j-i+1 > zmax(zz, 2) && zk(zz, 4) == 1
                zNod(zz, 5:6) = [zny-j-i zny-j-i+1];
                zPos(zz, 5:6) = [Ydata(zny-j-i) Ydata(zny-j-i+1)];

                % Posición interpolada de Umax/2
                zPos_prom(zz, 3) = (zPos(zz, 6) - zPos(zz, 5)) * (zUmed(zz, 3) -
U(zz, zny-j-i)) / (U(zz, zny-j-i+1) - U(zz, zny-j-i)) + zPos(zz, 5);
                zk(zz, 4) = zk(zz, 4) + 1;

                % Contador
                zjc = zjc + 1;
            end
        end
    end
end

% Zonas jets juntos
elseif zz > zjd
    for j=1:zny-1
        % JET FRÍO
        if U(zz, j) >= zUmed(zz, 2) && U(zz, j+1) <= zUmed(zz, 2) && zk(zz, 5) == 1
            zNod(zz, 3:4) = [j j+1]; % Guarda la
            zPos(zz, 3:4) = [Ydata(j) Ydata(j+1)]; % Guarda posición
            posición de los nodos entre los que se encuentra la Umax/2
            en y de nodos anteriores

            % Posición interpolada de Umax/2
            zPos_prom(zz, 2) = (zPos(zz, 4) - zPos(zz, 3)) * (zUmed(zz, 2) -
U(zz, j)) / (U(zz, j+1) - U(zz, j)) + zPos(zz, 3);
            zk(zz, 5) = zk(zz, 5) + 1;

            % JET CALIENTE
        elseif U(zz, zny-j) <= zUmed(zz, 2) && U(zz, zny-j+1) >= zUmed(zz, 2) &&
zk(zz, 6) == 1
            zNod(zz, 5:6) = [zny-j zny-j+1];
            zPos(zz, 5:6) = [Ydata(zny-j) Ydata(zny-j+1)];

            % Posición interpolada de Umax/2
            zPos_prom(zz, 3) = (zPos(zz, 6) - zPos(zz, 5)) * (zUmed(zz, 2) - U(zz, zny-
j)) / (U(zz, zny-j+1) - U(zz, zny-j)) + zPos(zz, 5);
            zk(zz, 6) = zk(zz, 6) + 1;

        % INFLUENCIA JET CALIENTE EN JET UNIFICADO
        elseif U(zz, zny-j) <= zUmed(zz, 3) && zUmed(zz, 3) <= U(zz, zny-j+1) &&
zk(zz, 7) == 1
            zNod(zz, 7:8) = [zny-j zny-j+1];
            zPos(zz, 7:8) = [Ydata(zny-j) Ydata(zny-j+1)];

            % Posición interpolada de Umax/2

```

```

%                               zPos_prom(zz,4)=(zPos(zz,8)-zPos(zz,7))*(zUmed(zz,3)-
U(zz,zny-j))/(U(zz,zny-j+1)-U(zz,zny-j))+zPos(zz,7);
%                               zk(zz,7)=zk(zz,7)+1;
                                end
                                end
                                end
                                end

%Incluyo la presencia de jet caliente en jet unificado
zjcd=54; zcontador1=0; zcontador2=0; zmenos=1; zposinic1=423; zposfin1=176;
zposinic2=403;
for i=zjcd:zposfin1
    if i<=zjd
        zcontador1=zcontador1+1;
        zPos_prom(i,3)=Ydata(zposinic1);
        if zcontador1==4
            zcontador1=0;
            zposinic1=zposinic1-1;
        end
    else
        zcontador2=zcontador2+1;
        zPos_prom(i,3)=Ydata(zposinic2);
        if zcontador2==2
            zcontador2=0;
            zposinic2=zposinic2-1;
        end
    end
end
end

% Sin influencia de jet caliente sobre jet unificado
zPos_promx1=zPos_prom;
zPos_promx1(zjd+1:end,1)=zPos_prom(zjd+1:end,2);
zPos_promx1(zjd+1:end,4)=zPos_prom(zjd+1:end,3);
zPos_prom1(:,1)=zPos_promx1(:,1); zPos_prom1(:,2)=zPos_promx1(:,4);

% Con influencia de jet caliente sobre jet unificado
zPos_promx2=zPos_prom;
zPos_promx2(zjd+1:end,1)=zPos_prom(zjd+1:end,2);
zPos_promx2(zjcd:end,4)=zPos_prom(zjcd:end,3);
zPos_prom2(:,1)=zPos_promx2(:,1); zPos_prom2(:,2)=zPos_promx1(:,4);

%Posición de las capas de mezcla
zNod_prom1=NaN(znx,2); zNod_prom2=NaN(znx,2); difprom1=NaN(znx,zny,2);
difprom2=NaN(znx,zny,2);
for k=1:2
    for i=1:znx
        for j=1:zny
            difprom1(i,j,k)=abs(zPos_prom1(i,k)-Ydata(j));
            difprom2(i,j,k)=abs(zPos_prom2(i,k)-Ydata(j));
        end
        minimo1(k)=min(difprom1(i,:,k));
        minimo2(k)=min(difprom2(i,:,k));
    end
end

```

```

        zNod_prom1(i,k)=find(minimo1(k)==difprom1(i,:,k),1);
        zNod_prom2(i,k)=find(minimo2(k)==difprom2(i,:,k),1);
    end
end

%(4.2.5) CAPAS DE MEZCLA
%Extracción Variable ubicadas en la posición de los nodos de la capa de
%mezcla "b"
%Jet frío.
%Col1:nodo del nivel;Col2:Nivel;Col3,5:Columna de y;Col4,6: Valor de Y;
zcapa_f=zeros(znx,4);
zcapa_f(1:zjd,1)=zposmax(1:zjd,1);           % Nodo de coordenada en x
zcapa_f(zjd+1:end,1)=zposmax(zjd+1:end,4);   % Nodo de coordenada
en x
zcapa_f(:,2)=Xdata;                           % Coordenada en x
zcapa_f(:,4)=zPos_prom2(:,1);                 % Coordenada y
for i=1:znx
    if i<=zjd
        d1s=abs(zcapa_f(i,4)-zPos(i,1));      % Distancia entre Umax/2 y
1er nodo del cual se sacó
        d2s=abs(zcapa_f(i,4)-zPos(i,2));      % Distancia entre Umax/2 y
2do nodo del cual se sacó
        % Guardo nodo más cercano al punto de capa de mezcla
        if d1s<d2s
            zcapa_f(i,3)=zNod(i,1);
        else
            zcapa_f(i,3)=zNod(i,2);
        end
    else
        d1s=abs(zcapa_f(i,4)-zPos(i,1));
        d2s=abs(zcapa_f(i,4)-zPos(i,2));

        % Guardo nodo más cercano al punto de capa de mezcla
        if d1s<d2s
            zcapa_f(i,3)=zNod(i,1);
        else
            zcapa_f(i,3)=zNod(i,2);
        end
    end
end
end

%Jet caliente. No tiene ajuste
zcapa_c=zeros(znx,6);
zcapa_c(1:zjd,1)=zposmax(1:zjd,1);           % Nodo de coordenada en x
zcapa_c(zjd+1:end,1)=zposmax(zjd+1:end,4);   % Nodo de coordenada en x
zcapa_c(:,2)=Xdata;                           % Coordenada en x
zcapa_c(:,4)=zPos_prom1(:,2);                 % Coord. en y SIN influencia
de jet caliente
zcapa_c(:,6)=zPos_prom2(:,2);                 % Coord. en y CON influencia
de jet caliente
for i=1:znx
    %Sección jets separados
    if i<=zjd
        %SIN influencia jet caliente

```

```

        d1s=abs(zcapa_c(i,4)-zPos(i,7));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y primer nodo del cual se sacó
        d2s=abs(zcapa_c(i,4)-zPos(i,8));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y segundo nodo del cual se sacó

        % Guardo nodo más cercano al punto
        if d1s<d2s
            zcapa_c(i,3)=zNod(i,7);
        else
            zcapa_c(i,3)=zNod(i,8);
        end

        %CON influencia jet caliente
        d1c=abs(zcapa_c(i,6)-zPos(i,7));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y primer nodo del cual se sacó
        d2c=abs(zcapa_c(i,6)-zPos(i,8));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y segundo nodo del cual se sacó

        % Guardo nodo más cercano al punto
        if d1c<d2c
            zcapa_c(i,5)=zNod(i,7);
        else
            zcapa_c(i,5)=zNod(i,8);
        end
        %Sección jets juntos
    else
        %SIN influencia jet caliente
        d1s=abs(zcapa_c(i,4)-zPos(i,5));
        d2s=abs(zcapa_c(i,4)-zPos(i,6));

        % Guardo nodo más cercano al punto
        if d1s<d2s
            zcapa_c(i,3)=zNod(i,5);
        else
            zcapa_c(i,3)=zNod(i,6);
        end

        %CON influencia jet caliente
        d1c=abs(zcapa_c(i,6)-zPos(i,5));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y primer nodo del cual se sacó
        d2c=abs(zcapa_c(i,6)-zPos(i,6));           % Cálculo de distancia entre
Umax/2 y segundo nodo del cual se sacó

        % Guardo nodo más cercano al punto
        if d1c<d2c
            zcapa_c(i,5)=zNod(i,5);
        else
            zcapa_c(i,5)=zNod(i,6);
        end
    end
end
end

```



```

%(4.2.6) CÁLCULO DE "b" PARA CADA ADIMENSIONALIZAR CURVAS
zb_fc=zeros(znx,3);           % Valor de b para cada jet. Col 1= jet frío,Col
2=jet caliente y Col 3= jet caliente MOD
zb=zeros(znx,2);             % Valor final de b para Caso analizado, col 1 es
jet caliente real y col 2, jet caliente mod
for i=1:znx
%   Calculo las distancias de b de cada sector
    if i<=zjc
        %"b" Jet frío
        bf1=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,1));
        bf2=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,2));
        zb_fc(i,1)=(bf1+bf2)/2;

        %"b" Jet caliente
        bc1=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom(i,3));
        bc2=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom(i,4));
        zb_fc(i,2)=(bc1+bc2)/2;           %Caso caliente real
        zb_fc(i,3)=zb_fc(i,1);           %Caso caliente modificado

        %b TOTAL
        zb(i,1)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,2))/2; %Caso caliente real
        zb(i,2)=zb(i,1);                 %Caso caliente modificado

    elseif i>zjc && i<zjcd
        %"b" Jet frío
        bf1=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,1));
        bf2=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,2));
        zb_fc(i,1)=(bf1+bf2)/2;

        %"b" Jet caliente
        zb_fc(i,2)=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom(i,4));
        zb_fc(i,3)=zb_fc(i,2);

        %b TOTAL
        zb(i,1)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,2))/2;           %Caso caliente real
        zb(i,2)=zb(i,1);                             %Caso caliente modificado

    elseif i>=zjcd && i<=zjf
        %"b" Jet frío
        bf1=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,1));
        bf2=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,2));
        zb_fc(i,1)=(bf1+bf2)/2;

        %"b" Jet caliente
        zb_fc(i,2)=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom1(i,2)); %Caso caliente real
        zb_fc(i,3)=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom2(i,2)); %Caso caliente
modificado

        %b TOTAL
        zb(i,1)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,2))/2;           %Caso caliente real
        zb(i,2)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,3))/2;           %Caso caliente
modificado

```

```

elseif i>zjf && i<=zjd
    %"b" Jet frío
    zb_fc(i,1)=abs(zposmax(i,3)-zPos_prom(i,2));

    %"b" Jet caliente
    zb_fc(i,2)=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom1(i,2)); %Caso caliente real
    zb_fc(i,3)=abs(zposmax(i,9)-zPos_prom2(i,2)); %Caso caliente
modificado

    %b TOTAL
    zb(i,1)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,2))/2; %Caso caliente real
    zb(i,2)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,3))/2; %Caso caliente
modificado

elseif i>zjd
    %"b" Jet frío
    zb_fc(i,1)=abs(zposmax(i,6)-zPos_prom(i,2));

    %"b" Jet caliente
    zb_fc(i,2)=abs(zposmax(i,6)-zPos_prom1(i,2)); %Caso caliente real
    zb_fc(i,3)=abs(zposmax(i,6)-zPos_prom2(i,2)); %Caso caliente
modificado

    %b TOTAL
    zb(i,1)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,2))/2; %Caso caliente real
    zb(i,2)=(zb_fc(i,1)+zb_fc(i,3))/2; %Caso caliente
modificado
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARTE 4): CÁLCULO DEL RANGO DE CAPAS DE MEZCLA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%(4.1) OBTENCIÓN DE LOS RANGOS DE CAPA DE MEZCLA
yrango=[-0.08 0.02]/(2*e); % Rango en donde evaluar la capa
de mezcla
pos_rango=[find(Ydata/(2*e)==yrango(1),1) find(Ydata/(2*e)==yrango(2),1)];
%Posición del rango

%Obtención de velocidades límite entre los cuales obtener capa de mezcla
u1=NaN(znx,4); % Velocidades mín de la capa de mezcla
u2=u1; % Velocidades máxima de la capa de mezcla
for i=1:znx
    if i<=zjd
        u1(i,:)= [U(i,pos_rango(1)) zmin(i,4) zmin(i,4) U(i,pos_rango(2))];
        u2(i,:)= [zUmax(i,1) zUmax(i,1) zUmax(i,3) zUmax(i,3)];
    else
        u1(i,1:2)= [U(i,pos_rango(1)) U(i,pos_rango(2))];
        u2(i,1:2)= [zUmax(i,2) zUmax(i,2)];
    end
end
end

```

```

% Obtención de variable para obtención de capa de mezcla
rango=pos_rango(2)-pos_rango(1)+1;           % Cant. de nodos dentro del rango
de la capa de mezcla
Variable=NaN(znx,rango);                     % Variable inicial con cte. para
capa de mezcla
for i=1:znx
    if i<=zjd
        %Ambiente-jet frío
        for j=pos_rango(1):zposmax(i,2)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,1))^2/(u2(i,1)-
u1(i,1))^2;
        end
        %Jet frío-jet caliente (parte fría)
        for j=zposmax(i,2):zmin(i,2)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,2))^2/(u2(i,2)-
u1(i,2))^2;
        end
        %Jet frío-jet caliente (parte caliente)
        for j=zmin(i,2):zposmax(i,8)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,3))^2/(u2(i,3)-
u1(i,3))^2;
        end
        %Jet caliente-ambiente
        for j=zposmax(i,8):pos_rango(2)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,4))^2/(u2(i,4)-
u1(i,4))^2;
        end

    else
        %Ambiente-jet frío
        for j=pos_rango(1):zposmax(i,5)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,1))^2/(u2(i,1)-
u1(i,1))^2;
        end
        %Jet caliente-ambiente
        for j=zposmax(i,5):pos_rango(2)
            Variable(i,j-pos_rango(1)+1)=(U(i,j)-u1(i,2))^2/(u2(i,1)-
u1(i,2))^2;
        end
    end
end

%Criterio para encontrar las variables que sean 0.9 y 0.1
%Calculo la diferencia para analizar después el valor más cercano al buscado
Criterio1=NaN(znx,rango);
Criterio2=NaN(znx,rango);
for i=1:znx
    for j=1:rango
        if Variable(i,j)>=0.4 && Variable(i,j)<=0.95
            Criterio1(i,j)=abs(Variable(i,j)-0.9);
        elseif Variable(i,j)>=0.01 && Variable(i,j)<=0.15
            Criterio2(i,j)=abs(Variable(i,j)-0.1);
        end
    end
end

```

```

end

%Selección de ancho de capa de mezcla
crit1=NaN(znx,4); %Valor mínimo del criterio 1 anterior para cada sector
crit2=crit1; %Valor mínimo del criterio 2 anterior para cada sector
yCM1=NaN(znx,4); %Posiciones transv. en las que se cumple el criterio 1
yCM2=yCM1; %Posiciones transv. en las que se cumple el criterio 2
poscm1=yCM1; %Posición (nodo columna) donde se cumple el criterio 1
poscm2=poscm1; %Posición (nodo columna) donde se cumple el criterio 2
col_cms=zeros(znx,8); k=zeros(znx,1);
for i=1:znx
    if i<=zjd
        col_cms(i,1:4)=[pos_rango(1)-pos_rango(1)+1 zposmax(i,2)-
pos_rango(1)+1 ...
zposmax(i,2)-pos_rango(1)+2 zmin(i,2)-pos_rango(1)+1];
        col_cms(i,5:8)=[zmin(i,2)-pos_rango(1)+2 zposmax(i,8)-pos_rango(1)+1
...
zposmax(i,8)-pos_rango(1)+2 pos_rango(2)-pos_rango(1)+1];
        %Valores que cumplen con el criterio
        for j=1:4
            seccionCriterio1=Criterio1(i,col_cms(i,2*j-1):col_cms(i,2*j));
            seccionCriterio2=Criterio2(i,col_cms(i,2*j-1):col_cms(i,2*j));
            crit1(i,j)=min(seccionCriterio1); %Criterio 1
            crit2(i,j)=min(seccionCriterio2); %Criterio 2

            %Posiciones (columnas) donde se cumplen los criterios
            poscm1(i,j)=find(crit1(i,j)==seccionCriterio1,1)+col_cms(i,2*j-1)-
1;
            poscm2(i,j)=find(seccionCriterio2==crit2(i,j),1)+col_cms(i,2*j-1)-
1;

            %Coordenada referente a posición anterior
            yCM1(i,j)=Y(i,poscm1(i,j)+pos_rango(1)-1);
            yCM2(i,j)=Y(i,poscm2(i,j)+pos_rango(1)-1);
        end
    else
        col_cms(i,1:2)=[pos_rango(1)-pos_rango(1)+1 ...
zposmax(i,5)-pos_rango(1)+1];
        col_cms(i,3:4)=[zposmax(i,5)-pos_rango(1)+1 ...
pos_rango(2)-pos_rango(1)+1];
        %Valores que cumplen con el criterio
        for j=1:2
            crit1(i,j)=min(Criterio1(i,col_cms(i,2*j-1):col_cms(i,2*j)));
            crit2(i,j)=min(Criterio2(i,col_cms(i,2*j-1):col_cms(i,2*j)));
        end
        %Posiciones (columnas) donde se cumplen los criterios
        poscm1(i,j)=find(Criterio1(i,col_cms(i,2*j-
1):col_cms(i,2*j))==crit1(i,j),1)...
+col_cms(i,2*j-1)-1;
    end
end

```

```

        poscm2(i,j)=find(Criterio2(i,col_cms(i,2*j-
1):col_cms(i,2*j))==crit2(i,j),1)...
        +col_cms(i,2*j-1)-1;

        %Coordenada referente a posición anterior
        yCM1(i,j)=Y(i,poscm1(i,j)+pos_rango(1)-1);
        yCM2(i,j)=Y(i,poscm2(i,j)+pos_rango(1)-1);
    end
end
end

%Delta para usar en capas de mezcla
Delta=yCM1-yCM2;

Delta2=Delta./2;

%Coordenada del rango de capa de mezcla (a partir del DELTA)
zYcapa=NaN(znx,6);
for i=1:znx
    if i<=zjd
        zYcapa(i,1:2)=[zcapa_f(i,4)-Delta2(i,1) zcapa_f(i,4)+Delta2(i,1)];
        %Zona capa lado frío
        zYcapa(i,3:4)=[zmin(i,3)-Delta2(i,2) zmin(i,3)-Delta2(i,3)]; %Zona
interacción jets (lado frío-lado cal.)
        zYcapa(i,5:6)=[zcapa_c(i,4)+Delta2(i,4) zcapa_c(i,4)-Delta2(i,4)];
        %Zona capa lado caliente
    else
        zYcapa(i,1:2)=[zcapa_f(i,4)-Delta2(i,1) zcapa_f(i,4)+Delta2(i,1)];
        %Zona jet unif. (lado frío)
        zYcapa(i,5:6)=[zcapa_c(i,4)+Delta2(i,2) zcapa_c(i,4)-Delta2(i,2)];
        %Zona capa lado caliente
    end
end

zYcapa2=zYcapa; difprom1=68; dtot=0.0116; % Coord. en y de cada capa
for i=136:203
    quito=dtot*(difprom1-(i-134))/difprom1/4;
    zYcapa2(i,5:6)=[zYcapa(i,5)+quito zYcapa(i,6)-quito];
end

%Posición del rango de capa de mezcla (se usa el nodo más cercano)
zposcapa=NaN(znx,6); % Nodo + cercano al que corresponde cada coord. en y
anterior
znodcapa=NaN(znx,12); % Nodos entre los cuales se encuentra Ycapa
for i=1:znx
    if i<=zjd
        for j=1:zny-1
            if Ydata(j)<=zYcapa(i,1) && zYcapa(i,1)<=Ydata(j+1)

                znodcapa(i,1:2)=[j j+1];
                dif1=abs(zYcapa(i,1)-Ydata(j));
                dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,1));
                if dif1<=dif2

```

```

        zposcapa(i,1)=j;
elseif dif1>dif2
        zposcapa(i,1)=j+1;
end

elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,2) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,2)

        znodcapa(i,3:4)=[j j+1];
        dif1=abs(zYcapa(i,2)-Ydata(j));
        dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,2));
        if dif1<=dif2
                zposcapa(i,2)=j;
        elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,2)=j+1;
        end

        elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,3) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,3) ||
Ydata(j)>=zYcapa(i,3) && Ydata(j+1)<=zYcapa(i,3)

        znodcapa(i,5:6)=[j j+1];
        dif1=abs(zYcapa(i,3)-Ydata(j));
        dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,3));
        if dif1<=dif2
                zposcapa(i,3)=j;
        elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,3)=j+1;
        end

        elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,4) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,4) ||
Ydata(j)>=zYcapa(i,4) && Ydata(j+1)<=zYcapa(i,4)

        znodcapa(i,7:8)=[j j+1];
        dif1=abs(zYcapa(i,4)-Ydata(j));
        dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,4));
        if dif1<=dif2
                zposcapa(i,4)=j;
        elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,4)=j+1;
        end

elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,5) && zYcapa(i,5)<=Ydata(j+1)

        znodcapa(i,9:10)=[j j+1];
        dif1=abs(zYcapa(i,5)-Ydata(j));
        dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,5));
        if dif1<=dif2
                zposcapa(i,5)=j;
        elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,5)=j+1;
        end

elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,6) && zYcapa(i,6)<=Ydata(j+1)

```

```

        znodcapa(i,11:12)=[j j+1];
        dif1=abs(zYcapa(i,6)-Ydata(j));
        dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,6));
        if dif1<=dif2
            zposcapa(i,6)=j;
        elseif dif1>dif2
            zposcapa(i,6)=j+1;
        end
    end
end

elseif i>zjd
    for j=1:zny-1
        if Ydata(j)<=zYcapa(i,1) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,1)

            znodcapa(i,1:2)=[j j+1];
            dif1=abs(zYcapa(i,1)-Ydata(j));
            dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,1));
            if dif1<=dif2
                zposcapa(i,1)=j;
            elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,1)=j+1;
            end

        elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,2) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,2)

            znodcapa(i,3:4)=[j j+1];
            dif1=abs(zYcapa(i,2)-Ydata(j));
            dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,2));
            if dif1<=dif2
                zposcapa(i,2)=j;
            elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,2)=j+1;
            end

        elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,5) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,5)

            znodcapa(i,9:10)=[j j+1];
            dif1=abs(zYcapa(i,5)-Ydata(j));
            dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,5));
            if dif1<=dif2
                zposcapa(i,5)=j;
            elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,5)=j+1;
            end

        elseif Ydata(j)<=zYcapa(i,6) && Ydata(j+1)>=zYcapa(i,6)

            znodcapa(i,11:12)=[j j+1];
            dif1=abs(zYcapa(i,6)-Ydata(j));
            dif2=abs(Ydata(j+1)-zYcapa(i,6));
            if dif1<=dif2

```

```

                zposcapa(i,6)=j;
            elseif dif1>dif2
                zposcapa(i,6)=j+1;
            end
        end
    end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARTE 5): VELOC. MAX PARA ADIMENSIONALIZACIÓN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Matriz con velocidades máximas para adimensionalizar
%Col1:jet frío, Col2=zona entre jets, Col3: jet cal
Umax1=zeros(znx,3);    %Jet unificado SIN influencia del jet caliente
% Umax2=zeros(znx,3);    %Jet unificado CON influencia del jet caliente
for i=1:znx
    %Zona 2 jets
    if i<=zjd
        Umax1(i,1)=zUmax(i,1);
        Umax1(i,2)=(zUmax(i,1)+zUmax(i,3))/2;
        Umax1(i,3)=zUmax(i,3);

    else
        Umax1(i,1)=zUmax(i,2);
        Umax1(i,2)=zUmax(i,2);
        Umax1(i,3)=zUmax(i,2);
    end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARTE 6): CENTERLINE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ycenterline=NaN(znx,1);
Ycenterline(1:zjd,1)=zmin(1:zjd,3);
Ycenterline(zjd+1:end,1)=zposmax(zjd+1:end,6);
Ycenterline2=Ycenterline;

%Modificación en zona de jets separados
DUp=abs((Ydata(356)-Ycenterline(89))/2); largol=zjd-89+1;
Dceroreal1=zeros(largol,1);Dcerofic1=Dceroreal1; Dmov1=Dceroreal1;
for i=89:zjd
    Dceroreal1(i-88)=abs(Ycenterline(89)-Ycenterline(i));
    Dcerofic1(i-88)=abs(DUp*(i-88)/(largol-1));
    Dmov1(i-88)=abs(Dcerofic1(i-88)-Dceroreal1(i-88));

    Ycenterline2(i)=Ycenterline(i)-Dmov1(i-88);
end

%Modificación en zona de jets juntos
Ddown=abs(Ycenterline(201)-Ycenterline2(zjd)); largol2=201-zjd+1;
Dceroreal2=zeros(largol2,1); Dcerofic2=Dceroreal2; Dmov2=Dceroreal2;
for i=zjd+1:201
    Dceroreal2(i-zjd)=abs(Ycenterline(i)-Ycenterline(201));
end

```



```

Dcerofic2(i-zjd)=abs(Ddown*(largo2-1-(i-zjd))/(largo2-1));
Dmov2(i-zjd)=abs(Dceroreal2(i-zjd)-Dcerofic2(i-zjd));

Ycenterline2(i)=Ycenterline(i)+Dmov2(i-zjd);
end

%Posiciones (nodo) de centerline
NodoCenterline=NaN(znx,1); difprom1=NaN(znx,zny);
for i=1:znx
    for j=1:zny
        difprom1(i,j)=abs(Ycenterline2(i)-Ydata(j));
    end
    minimo=min(difprom1(i,:));
    NodoCenterline(i)=find(minimo==difprom1(i,:),1);
end

```