

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Efecto de perfiles aerodinámicos sobre la velocidad media de flujo en ductos circulares

Trabajo de titulación

Kléber Alexander Saavedra García

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 9 de enero de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Efecto de perfiles aerodinámicos sobre la velocidad media de flujo en
ductos circulares**

Kléber Alexander Saavedra García

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

David Escudero, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 9 de enero de 2017

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Kléber Alexander Saavedra García

Código: 00103761

Cédula de Identidad: 1721517793

Lugar y fecha: Quito, 9 de enero de 2017

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios, por su infinito amor e inagotable paciencia.

A mis padres, a quienes con su ejemplo, me guían por el sendero del bien.

AGRADECIMIENTOS

El hermoso y perfecto diseño de la creación y en específico la dinámica de los vórtices, me han llevado a explorar y recorrer aguas desconocidas del conocimiento, afortunadamente encontré a mi alrededor profesionales que me motivaron y apoyaron con sus conocimientos.

A mi director de tesis David Escudero Ph. D., por su invaluable ayuda. A Edward Jiménez por incentivarme a desarrollar este trabajo y a mis padres por su constante motivación y apoyo, a mis abuelos por sus sabios consejos y especialmente agradezco a dios por acompañarme y no dejarme solo ni desfallecer en esta aventura.

RESUMEN

El método de simulación computacional usando el software COMSOL fue adoptado para analizar el efecto en los perfiles de velocidades de flujos turbulentos causado por estructuras tipo perfiles aerodinámicos añadidos a la integridad de ductos cilíndricos. Los perfiles aerodinámicos añadidos al ducto se diseñaron para que actúen acorde a la teoría de movimientos grandes y muy grandes en escala de los flujos turbulentos (LSM y VLMS), tomando en cuenta la forma de flujos de los dos modos POD (Proper Orthogonal Decomposition) más energéticos de un flujo con $Re \approx 60000$, los cuales han sido proclamados que promueven orden en la turbulencia. Las estructuras se disponen con un ángulo de 7 grados respecto del eje simétrico del ducto. Los resultados muestran un aumento en la velocidad media y máxima del flujo turbulento de agua comparado contra un tubo sin perturbaciones bajo las mismas condiciones de borde. El cálculo de flujo másico no se ha tomado en cuenta debido a las limitaciones matemáticas en las ecuaciones que resuelve COMSOL. Varios parámetros en el diseño de los perfiles aerodinámicos se mantuvieron constantes para el desarrollo del estudio dejando como variables solamente su distribución espacial dentro del tubo, es decir número de perfiles y distancia entre ellos.

Palabras Clave: Vórtices, Turbulencia, Perfil aerodinámico, Perfil de velocidad, Ducto circular, Comsol, LSM & VLMS

ABSTRACT

A computational simulation method using COMSOL software was adopted to analyze the overall effect caused over turbulent flow velocity profiles by aerodynamic structures added to circular pipes wall. Added structures to the pipe were designed according to the large-scale-motions and very-large-scale-motions (LSM & VLSM) flow theory, taking into consideration the flow movement shapes of the two most energetic POD (Proper Orthogonal Decomposition) modes of a $Re \sim 60000$ turbulent flow, which have been proclaimed to promote special order in turbulence. The aerodynamic structures were arranged to have an inclination of 7 degrees with respect to the pipe longitudinal axis. Results show an increase in the average and maximum turbulent flow velocity, compared to the velocity of the flow in pipes without added structures under the same boundary conditions. Calculation of mass flow has not been taken into account because of mathematical limitations in equations solved by COMSOL. Many design parameters of aerodynamic structures were kept constant in order to develop the study, leaving only variable their spatial distribution within the pipe, in explanation, the number of structures within the pipe and the distance between them.

Key Words: Vortex, Turbulence, Aerodynamic Profile , Velocity Profile, Circular Pipe, Comsol, LSM & VLSM

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
TABLA DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
Turbulencia clásica	17
Turbulencia nueva tendencia.....	22
METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	29
Diseño de estructuras	29
Importancia de movimientos Q2 para el diseño.	29
Organización energética del flujo.....	31
Diseño en Inventor y medición.....	35
Diseño del problema en COMSOL	43
ANÁLISIS DE DATOS	49
Perfiles de velocidades convencionales y no convencionales.....	50
Caracterización de campos turbulentos en estado estable	53
Perfiles de velocidades adversos.....	57
Perfiles de velocidades superiores	58
Perfiles de velocidades especiales.....	59
CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO A: PERFILES DE VELOCIDAD DE DISTANCIAS CONSTANTE	71

ANEXO B: VALORES DE RESULTADOS PROMEDIO DE LOS MODELOS 73

ANEXO C: FIGURAS DE LOS PERFILES AERODINÁMICOS..... 77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ángulos helicoidales de los 3 modos más energéticos, evaluado a diferentes alturas respecto de la pared del ducto.....	32
Tabla 2: Datos para diseño de perfiles aerodinámicos.....	38
Tabla 3: Longitudes de los distintos perfiles aerodinámicos diseñados.....	40
Tabla 4: Parámetros de trabajo para el fluido simulado.	45
Tabla 5: Parámetros para la construcción del mallado usando herramientas del software COMSOL.	47
Tabla 6: Tamaño de granos para los diferentes mallados	48
Tabla 7: Error normal relativo %L2 (valores en porcentaje).....	55
Tabla 8: Tasa de convergencia para tres mallas, R2.	56
Tabla 9: Clasificación de los modelos dependiendo de su perfil de velocidad.....	57
Tabla 10: Resultados comparativos de modelos con perfiles de velocidades adversos....	58
Tabla 11: Resultados comparativos de modelos con perfiles de velocidades superiores.	59
Tabla 12: Resultados de modelos YR031-D055 y YR031-D065	60
Tabla 13: Resultados de modelos YR043-D055 y YR031-D07	61
Tabla 14: Resultados de modelo YR043-D06	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: a) Elemento infinitesimal de fluido; b) Elemento bajo efecto de esfuerzo cortante.....	18
Figura 2: Perfil de velocidades laminar y turbulento de fluido dentro de un ducto circular.	18
Figura 3: Ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.....	18
Figura 4: Ley de la pared para flujo turbulento.	20
Figura 5: Sub-regiones de ley de la pared en flujo turbulento.	20
Figura 6: Formación y destrucción de lo Hairpins o vórtices de herradura (estructuras de longitud 0.2R).....	24
Figura 7: Mecanismo de formación de LSM en base a Hairpins.	24
Figura 8: a) Representación de campo vectorial de velocidades para un plano perpendicular al eje de flujo. b) Campo vectorial para modo $n=1$ ($i_x = 1, i_\theta = 2$) mostrando el patrón de giro de los vectores. Altura de vórtices $Y/R=0.43$ c) Campo vectorial para modo $n=1$ ($i_x = 2, i_\theta = 3$) mostrando el patrón de giro de los vectores. Altura de vórtices $Y/R=0.31$	30
Figura 9: Extracto de imágenes de las mostradas en la figura 8 para una sección del ducto circular, donde se muestra claramente la sección de cero fluctuación de velocidad en color blanco extendiéndose desde el centro del vórtice hasta la pared del ducto. a) $Y/R=0.43$ b) $Y/R=0.31$	36
Figura 10: Plano de perfil con altura $Y/R=0.31$ extraído de planos vectoriales como los de la Figura 9.	37
Figura 11: Perfil $Y/R=0.43$	40
Figura 12: Perfil $Y/R=0.31$	40
Figura 13: Perfil $Y/R=0.15$	40
Figura 14: Dominio para $Y/R=0.43 - D07$	41
Figura 15: Caras del dominio que presentan “Periodic-flow condition”.	46
Figura 16: Magnitud de velocidad vs. Radio, para el perfil YR015 bajo distintas separaciones entre perfiles.	50
Figura 17: Magnitud de velocidad vs. Radio, para perfil YR031 bajo distintas separaciones entre perfiles.	52
Figura 18: Magnitud de velocidad vs. Radio, para perfil YR043 bajo distintas separaciones entre perfiles.	52

Introducción

Un fluido incompresible que viaja en régimen laminar, totalmente desarrollado, dentro de un tubo llano presenta un perfil específico de velocidades que se puede obtener mediante demostración directa de las ecuaciones de Navier-Stokes (White, 2011). En el caso de estar en el régimen turbulento, el perfil de velocidades no presenta una regularidad y su velocidad máxima se reduce en comparación al caso anterior. Del mismo modo, el movimiento de fluido se muestra aleatorio en contraste con el movimiento regular que presenta el flujo laminar, debido a efectos de viscosidad, temperatura, fricción, presión y vorticidad.

Townsend (1958) y Grant (1958) observaron una regularidad estructural en sus estudios sobre flujos turbulentos, observaron “estructuras en forma de colas largas dentro del fluido en las funciones de tiempo-retrasado auto-correlacionadas de la velocidad en sentido de flujo, diferentes de cero, con longitudes de hasta 1.4δ (siendo δ el ancho de la capa límite del fluido). Ellos infirieron correctamente que existían movimientos de gran escala (LSM), aun cerca de la pared, y que acarreaban una fracción significativa de energía cinética turbulenta (Guala et. Al., 2005). Baltzer et al. (2012) encontró que existen movimientos de gran escala (LSM) y de muy gran escala (VLSM) que juegan un papel importante sobre el comportamiento turbulento del fluido, y mucho más significativa su importancia por el hecho de tener efectos interrelacionados el uno con el otro ,y sobre la turbulencia. Se evidencia dos tipos de LSM: los unidos a la pared limite y los separados, como indican los estudios de Sean C. C. (2009). Del mismo estudio se puede entender una relación en la formación de VLSM, que estos pueden ser formados de pseudo-alineados y

más antiguos LSM desapegados de la pared límite, en vez de pequeños movimientos a gran escala localizados cerca de la pared.

Bajo una perspectiva energética del fluido, las superestructuras representan aportes importantes al flujo turbulento. J. R. Baltzer (2012) explica en su estudio que los movimientos del tipo VLSM de longitud de onda mayor a tres veces el radio de tubo contribuyen más del 40% de la energía de turbulencia en sentido de flujo, y más del 30% del esfuerzo cortante uv (normal al flujo en pared) del fluido. Hellström Sinha & Smits (2011) aportan a este criterio estableciendo que al realizar un estudio de *Descomposición Ortogonal Apropriada* (POD) en un estudio usando PIV (Particle Imagen Visualization), han encontrado que en flujo turbulento en un tubo, la reconstrucción con los diez modos más energéticos de POD capturan todas las principales características de VLMS. En similares técnicas de medición tipo PIV, basados en la teoría de Taylor, se ha observado que las mediciones indican la presencia de regiones de velocidades altas y bajas que se extienden hasta varios radios de tubería en la dirección del flujo. Große & Westerweel (2011) también encontraron estructuras que tenían una fuerte coherencia (i.e similar shapes) para un amplio rango de radios acomodados entre $y/R=0.05$ a 0.5 (cerca de la pared hasta la mitad del radio del tubo). Los análisis en espectros energéticos muestran que las contribuciones a la energía cinética turbulenta y la producción de tensión de Reynolds, no son despreciables (Guala et. Al. 2006; Balakumar & Adrian 2007), que los distingue de los movimientos inactivos propuestos por Townsend (1976). Desde otro punto de vista Townsed (1958) y Grant (1958) infirieron correctamente que VLSM existían, aun cerca de la pared, y que acarreaban una fracción significativa de la energía cinética turbulenta.

Como expresa M. Gualas et. Al. 2005, varios estudios de correlación (Favre, Graviglio & Dumas 1967; Bradshaw 1967; Tritton 1967; Blackwelder & Kovasznay 1971) soportan y amplifican sus observaciones referentes a la energía del componente en sentido del flujo los cuales han sido nombrados y conocidos como Townsend's 'large eddies'. M. Gualas et. al. 2005, también clarifica algunas características de los movimientos a grandes escalas con respecto a la energía que aportan. Usando la técnica de POD para realizar los estudios, Liu, Adrian & Hanratty (2001) encontraron que por lo menos la mitad de la energía cinética, promediada por capas, reside en los modos de menores órdenes.

Los doce modos más energéticos tienen longitudes de onda acordes con el flujo, hacia el infinito, $2.4h$ y $1.2h$, y alturas de h y rugosidad de $h/2$, observados para el caso de canales. Los modos energéticos no son solamente largos sino altos. Existe también evidencia de escalas muy grandes con longitudes de hasta 10δ a 50δ , conteniendo una fracción significativa de la energía cinética total, en el caso de tubos cilíndricos (M. Guala et. Al., 2005). La energía de turbulencia es contribuida por el 50% debido a "the large eddies"... y alrededor del 80% aportado a los esfuerzos de Reynolds, como lo aclara Blackwelder & Kovasznay (1972). A todo esto M. Guala et. al. (2005) concluye que existe una importancia alta en las funciones que cumplen LSM y VLSM con respecto a las cantidades turbulentas como la energía cinética y el esfuerzo cortante de Reynolds, pero que aun existen muchas cuestiones abiertas.

Es evidente que el comportamiento turbulento de las partículas de fluido es influenciado en cierta medida por los movimientos descritos. Ellos representan mecanismos

preferenciales que las partículas ocupan para fluir en la turbulencia. Baltzer et al., 2012 muestra en sus estudios por POD que los dos modos más energéticos acogen ~2% (1% cada uno) del total de energía cinética disponible, tomando en cuenta que la correlación con la que trabajó apuntaba a identificar estructuras semejantes a VLSM & LSM, y aun con los movimientos conocidos como Q2 (comportamientos debido a cúmulos (grumos) de fluido que se despegan del límite de dominio (o sea el contorno, o pared del tubo) hacia el centro de la tubería provocando variaciones de velocidades adversas (o que frenan el fluir)). El resto de modos POD contenía el ~98% restante pero ninguno llegó a contener 1% por sí solo, y solo representan de 0.2 a 0.3% cada uno. De igual forma describe su modelo de alineación de estructuras de movimiento a gran escala; estructuras tipo paquetes de fluctuaciones de velocidades, que se alinean azimutalmente (desplazamiento a lo largo del perímetro del tubo en un sentido o en el otro) para crear movimiento a muy gran escala (VLSM). Mediciones de las longitudes características de dichas estructuras arrojan resultados de valores entre 1 y 2 radios de largo para LSM, mientras que para VLSM pueden llegar a longitudes tan largas como la misma longitud de tubería (Baltzer et al., 2012).

Para que sea posible el control de estas estructuras presentes en los fluidos en régimen turbulento, se propone añadir al dominio del fluido, en su defecto a las paredes del tubo, estructuras que nos permitan modificar las velocidades, direcciones y desplazamientos de las estructuras LSM y VLSM. Los perfiles aerodinámicos añadidos al sistema actuarán principalmente en la región cerca de la pared del tubo.

Este estudio pretende investigar los efectos en las velocidades máximas y medias del fluido debido a dichos perfiles aerodinámicos, de forma que se pueda evidenciar el control de las estructuras de escala grande y muy grande (LSM & VLSM) para mejorar el transporte de fluidos por tuberías usando mínimas modificaciones en la fabricación e instalaciones de las mismas. Así mismo investigar los efectos sobre la caída de presión a través del ducto al usar los perfiles aerodinámicos.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para estudiar la turbulencia debemos conocer el comportamiento del fluido bajo ciertas condiciones de presión, temperatura, límite geométrico, viscosidad; entre otros factores, que afectan directamente en el comportamiento turbulento del fluido. Existen diferentes teorías y leyes que se han estudiado haciendo esfuerzo en la comprensión de este fenómeno de los fluidos. Existen simplificaciones razonables que nos permiten estudiar los fenómenos y que han permitido profundizar en áreas industriales importantes; y aplicar sus resultados en la ingeniería. También existen estudios y publicaciones sobre los fluidos turbulentos, sobre todo investigaciones que buscan encontrar relaciones entre los efectos viscosos y su interacción con los límites de borde del sistema. Sobre todo, el estudio de la turbulencia cobra mucha importancia, tanto en fluidos compresibles e incompresibles, cuando se toman en cuenta las interacciones que existen entre las partículas del fluido para crear estructuras internas que guardan energía y organizan el flujo. La carencia de información sobre el tema de la turbulencia viene muy relacionado con la carencia de estudios debido a la complejidad que representa resolver el problema en si mismo. Recientemente, se han hecho avances importantes en esta área debido a la creciente capacidad de cómputo que la tecnología ha traído consigo. De otro modo, no existiría forma viable de estudiar campos vectoriales tan extensos y tantas variables a tomar en cuenta.

Turbulencia clásica

Las teorías y leyes que los fluidos siguen, y bajo las que están gobernadas, son un tanto distintas en su forma de manifestarse cuando se trata de gases o líquidos. Aunque se trata de las mismas leyes para todos los fluidos, su principal diferencia se encuentra en como los elementos diferenciales de fluido se deforman debido a los esfuerzos cortantes que partículas aledañas ejercen sobre el y sobre qué trayectorias dibuja dentro del campo de velocidad y presión en el cual se encuentra sumergido. Bajo esta perspectiva a los fluidos Newtonianos se los puede diferenciar entre compresibles e incompresibles. Su principal diferencia radica en la capacidad de disminuir o aumentar la distancia relativa entre partículas debido a estímulos de presión. Los incompresibles muestran mínima disminución de tal distancia a comparación de los compresibles, como el aire o los gases, que pueden disminuir su volumen notablemente a la vez que aumenta su densidad; por lo tanto la densidad permanece aproximadamente constante para los incompresibles como el agua o los líquidos.

“Los fluidos Newtonianos son aquellos como agua, aceite o aire que tienen una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y su tasa resultante de deformación” (White, 2009)

$$\tau \propto \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

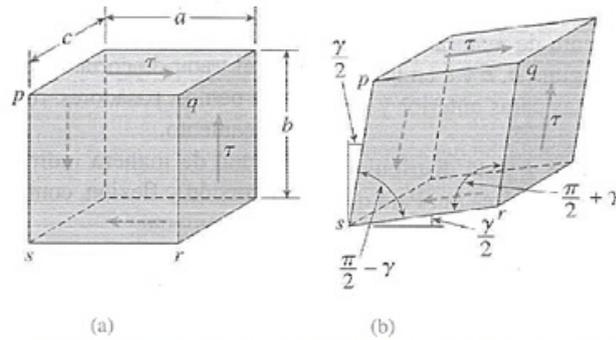


Figura 1: a) Elemento infinitesimal de fluido; b) Elemento bajo efecto de esfuerzo cortante.

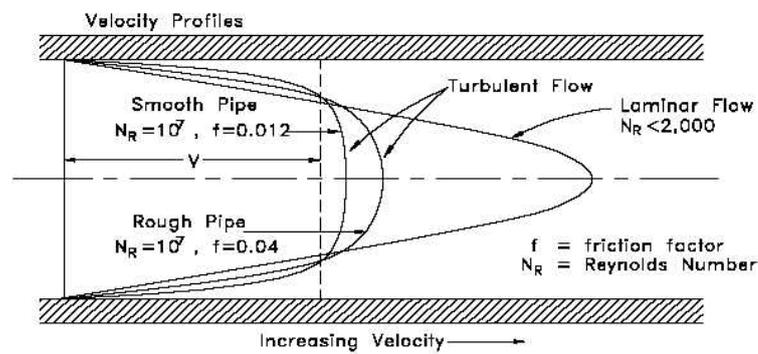


Figura 2: Perfil de velocidades laminar y turbulento de fluido dentro de un ducto circular.

Tanto el uno como el otro manifiestan turbulencia y generan estructuras organizadoras dentro del flujo (J. R. Baltzer, 2012; M. Guala, et. Al, 2005; Bailey & Smits, 2009). Igualmente a estos se los puede caracterizar bajo variables de estado [Presion y velocidad]. La forma de resolver las variables de estado para los flujos incompresibles es mediante la ecuación de Navier-Stokes.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Figura 3: Ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.

Del mismo modo, diferenciar la forma de fluir es importante para el estudio de la mecánica de fluidos; el número de Reynolds diferencia el fluido por su modo de fluir. El número de Reynolds relaciona las fuerzas inerciales y fuerzas viscosas presentes en el flujo y caracteriza el movimiento del fluido diferenciando los tres regímenes de flujo:

- Laminar $Re \leq 2100$
- Transición $2100 < Re \leq 4000$
- Turbulento $4000 < Re$

Cada uno representa un nivel energético y de ordenamiento de partículas identificable para cada régimen. El estado laminar, es la forma más ordenada y estable que las partículas presentan para fluir. La transición presenta imperfecciones en las trayectorias debido al quebrantamiento del flujo por efectos viscosos muy ligeros y se ve influenciada también por la rugosidad de la pared. El estado de turbulencia de un fluido significa que observaremos muchas irregularidades, fluctuaciones y agitación en las trayectorias tomadas por las partículas al fluir debido a efectos viscosos (White, 2009). Las partículas experimentan fluctuaciones de velocidad positiva y negativa, aceleran y frenan; interfieren unas con otras cuando viajan por el campo turbulento, se chocan; y los efectos debidos a la viscosidad pueden ser muy aleatorios, dependiendo de la posición de la partícula en el espacio y el estado de sus variables físicas.

El efecto global sobre la velocidad que tiene la turbulencia es que reduce la velocidad máxima que las partículas pueden alcanzar en un medio. Entre otros efectos, la turbulencia, presenta cambios rápidos y variados de presión y los vectores velocidad sobre todo su campo. La variación de estas propiedades también depende de las

condiciones impuestas al problema: paredes sólidas, movimiento relativo de límites, condiciones iniciales, restricciones u obstáculos en el sistema, entre otros. Los estudios a flujos turbulentos externos e internos realizados por J. Baltzer, Adrian & Wu (2012), S. Baltzer & Smits (2012), Guala, Hommema & Adrian (2005), entre otros, muestran que existen estructuras dentro del flujo que se repiten en los experimentos, a pesar de las diferencias de condiciones de dichos experimentos. Estas zonas aparecen predominantemente en los lugares donde el fluido y el límite del sistema se encuentran, también conocido como la frontera del sistema; en este caso las paredes del ducto circular.

En la frontera del sistema se destacan diferentes capas o zonas donde las partículas tienen diferentes comportamientos:

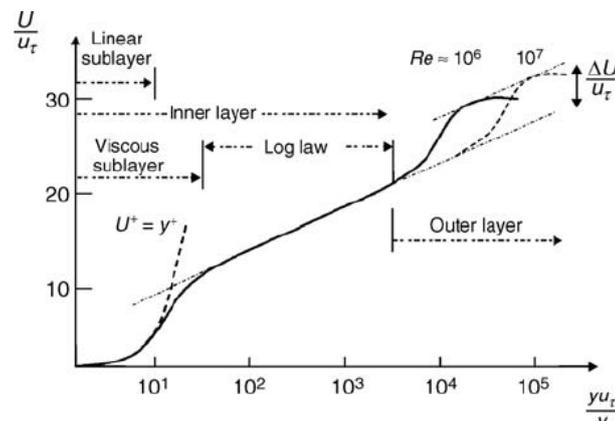


Figura 4: Ley de la pared para flujo turbulento.

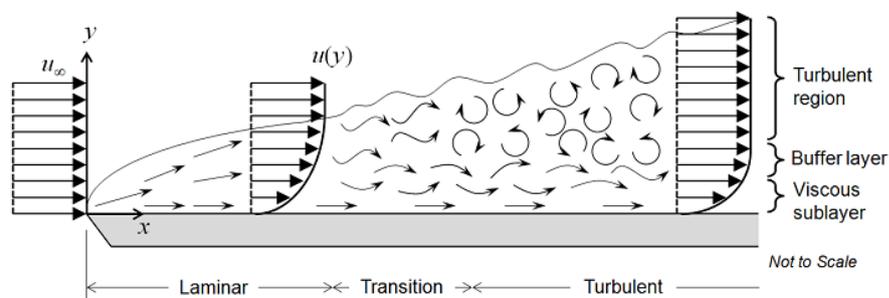


Figura 5: Sub-regiones de ley de la pared en flujo turbulento.

La altura de las capas depende del número de Reynolds con que se caracteriza el flujo, su viscosidad y la rugosidad de la pared o el límite de la frontera, cada uno aporta para el efecto turbulento, entre otras variables como velocidad o energía interna de la partícula o aglomerado de partículas. Sobre todo influye mucho más si el fluido está fluyendo en un límite cerrado o flujo interno, como una tubería; o un límite abierto o flujo externo, como un canal. Esta diferencia fundamental afecta directamente el comportamiento global de la turbulencia y produce que la altura de las capas límite aumente en el caso de flujo cerrado.

Cada capa presenta un comportamiento del fluido diferente con respecto a su velocidad (White, 2009):

- Inner Layer
 - Wall layer o Sub-capa viscosa: Bajo las 5 unidades de pared, la variación de velocidad respecto a distancia a la pared es 1 a 1.
 - Overlap layer o Capa amortiguada/ región de mezclado: entre las 5 y 30 unidades de pared, la variación de velocidad respecto a la distancia obedece una mezcla de la ley de sub-capa viscosa y la ley logarítmica. Pero en la unidad 11 de pared, ninguna de las dos leyes parece ser la correcta.
 - Outer layer o Región completamente turbulenta: Sobre las 30 unidades de pared, la variación de velocidad obedece la ley logarítmica donde la velocidad depende de las unidades de separación hacia la pared.
- Outer Layer
 - Límite superior
 - Límite inferior

La turbulencia generada en la frontera del sistema se debe al efecto que tiene el borde límite sobre el flujo. Las paredes más rugosas producen más arrastre, debido a sus imperfecciones en la superficie, por lo tanto los efectos viscosos aumentan su influencia, y por eso se produce turbulencia. No se puede dejar pasar desapercibida la importancia de los efectos viscosos en esta zonas que también producen turbulencia.

Turbulencia nueva tendencia

Las capas límites presentan diferentes velocidades en sus subcapas, cada una gobernada por una ley distinta, y la interferencia de las mismas, como se mostró anteriormente; que aproxima al valor real de velocidad de flujo. Avanzando en un sentido perpendicular a la pared límite, nos encontramos con la zona de flujo libre donde la velocidad de flujo aumenta hasta llegar a un máximo denominado velocidad de flujo libre, U_{∞} . La causa de la turbulencia después de este punto tienen una correlación especial con los efectos provocados cerca de la pared.

Adrián (2007) soporta la existencia de estructuras tipo vórtice, largas con forma de herraduras que se juntan para formar paquetes de estructuras, con evidencia que fue revisada por Bailey & Alexander (2009). Movimientos llamados LSM y VLSM por sus siglas en inglés (Large-scale motions & Very-large-scale motions); tales movimiento se los encuentra tanto en flujos abiertos como cerrados (J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua wu 2012).

Las conclusiones a las que llegan Sean C. C. Bailey & Alexander J. Smits, (2010) sobre soportar la hipótesis de los paquetes de estructuras tipo vórtice que se juntan para formar los movimientos a gran escala (LSM) que inducen una región de momento uniforme, que se inclinan a la pared a un ángulo proporcional a la tasa de crecimiento del paquete de estructuras; son basados en mediciones multi-punto, de una componente de la velocidad sobre un tubo de pared llana bajo $Re_D=1.5E5$. Del mismo experimento, correlaciones cruzadas filtradas espectralmente sugieren que en la capa externa, más allá de la zona de la frontera del sistema, los LSM son paquetes desapegados de la pared, que tienen poca correlación con los LSM cerca de la pared y por esta razón se los diferencia como movimiento circulares apegados y desapegados de la pared. Sean C. C. Bailey & Alexander J. Smit (2010) indican que es mucho más certero que los LSM estén apegados a la pared en la región logarítmica. Mientras que para zonas superiores se espera que los LSM estén desapegados de la pared y que su velocidades de convección sean mayores a los LSM apegados a la pared.

En el trabajo realizado por Sean C. C. Bailey & Alexander J. Smit (2010) se denota el límite de ocurrencia entre estos dos movimientos circulares a una distancia $Y/r=0.1$. Por otro lado J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua wu (2012) en su estudio revela la existencia de pequeñas fluctuaciones de velocidad con longitudes en el orden de $0.2R$ que se alinean en sentido del flujo, predominantemente, consiguiendo formar paquetes de longitudes entre $1R$ y $2R$; longitudes asociadas con los LSM. Pero ellos mismo advierten que se debe notar que las longitudes aproximadas de $1R-2R$ son basados en observaciones realizadas a una distancia $Y/R=0.15$ del borde límite. Ellos arbitrariamente eligieron este límite para

la capa superior logarítmica ($y^+=101$) en el flujo en tubería; por lo que un valor similar de y^+ puede ser considerado relativamente bajo en la capa logarítmica para un flujo con mayor número de Reynolds (J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua wu, 2012). El mecanismo en que los efectos viscosos actúan en zonas muy cercanas al borde límite llegan a ser más significativos al momento de organizar la turbulencia.

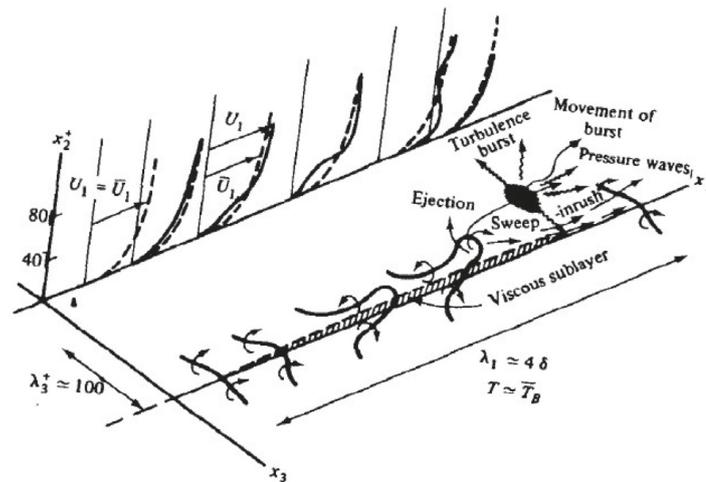


Figura 6: Formación y destrucción de los Hairpins o vórtices de herradura (estructuras de longitud $0.2R$).



Figura 7: Mecanismo de formación de LSM en base a Hairpins.

Bajo una perspectiva similar J. R. Baltzer (2012) indica que los movimientos circulares, o estructuras en forma de herradura, también conocidos como hairpins, se organizan en paquetes alineados al eje de simetría del tubo y estos son identificados con los LSM. Su estudio es más profundo y propone un mecanismo de alineamiento azimuthal de los

LSMs formados entre cierto rango preferencial de ángulos con respecto al eje de simetría del tubo, para formar VLSMs con ciertos ángulos helicoidales. Dependiendo en como ocurran y de su representación energética, podrían resultar en la formación de VLSMs que muestran una trayectoria helicoidal de flujo que rodea al eje del tubo, cercano al borde límite del dominio, o pared del tubo, y que se extiende hacia el centro del tubo con distancias que dependen del modo energético específico. Bajo el mecanismo de formación de VLSMs descrito anteriormente existen dos discrepancias que no se pueden responder en el estudio de Sean C. C. Bailey & Alexander J. Smit (2010).

J. R. Baltzer et al. (2012) propone un mecanismo de formación de los VLSMs muy dinámico, no se limitan a la idea de arreglos de LSM apegados unos a otros; ellos proponen que vórtices centrados por encima de la capa logarítmica levantan fluido de baja velocidad fuera del borde límite, o pared del tubo. Estos movimientos fueron observados con anterioridad por otros estudios realizados en planos perpendiculares al flujo de canales abiertos como los estudios de Mito et al. (2007). Las características de estos movimientos principales son eyecciones radialmente apartadas del borde límite acompañados por fluctuaciones negativas, u' , de velocidad. Tales fluctuaciones negativas de velocidad ocurren cuando el flujo lento cercano al borde límite es transportado hacia el centro de la capa externa, donde se desarrolla el flujo libre. Estas regiones corresponden a los movimientos Q2 en el flujo (J. R. Baltzer et al., 2012). Esto nos lleva a pensar que cuando los LSM están alienados acimutalmente unos con otros apegados a la pared, llega un momento cuando son expulsados fuera de la capa logarítmica debido a los movimientos tipo Q2, y es en ese momento cuando llegan a formar parte de VLSMs o

suben con suficiente energía para llegar a fluir hasta por sobre ellos, como explican las correlaciones de Sean C. C. Bailey & Alexander J. Smith (2010) y por ello sus LSM despegados de la pared que forman los VLSM y los apegados a la pared que se juntan azimutalmente para ganar longitud, no encuentran similitudes en sus escalas azimutales, es decir, no se relacionan. Mientras que los VLSM, que ocurren en locaciones alrededor de la capa logarítmica y los LSM desapegados de la pared si encuentran correlación.

Por otro lado, si se sigue el rastro de fluctuaciones velocidad positivas y negativas de las amplias zonas azimutales en la zona de la ley logarítmica radialmente hacia el borde límite, se puede encontrar que la tendencia será encontrar más fluctuaciones de velocidad con el mismo signo que las fluctuaciones de zonas más altas, un resultado consistente con la característica de dejar rastros de los VLSMs (J. R. Baltzer et al., 2012). Esta característica es de suma importancia al analizar las fluctuaciones promedio de velocidad de flujo en un evento de velocidad negativa, aislado. La correlación de la velocidad representado en planos perpendiculares al flujo muestran una sorprendente independencia a la posición de referencia (donde ocurre el evento aislado). Estas regiones son evidencia de regiones dominantes de fluctuaciones de velocidad en el sentido del flujo que penetran profundamente en el centro del tubo mientras alejándose de la pared (J. R. Baltzer et al., 2012).

El último fenómeno que J. R. Baltzer et al. analiza es el campo vectorial que se forma en un plano perpendicular al flujo. Ellos analizan que debe existir una combinación de fenómenos que ocurren para formar el campo de vectores resultante: Movimiento cerca

de la pared entre vórtices (movimientos Q2) y las huellas de VLSMs. Para diferenciar las contribuciones de cada fenómeno, ellos usan el método de POD que resulta en estudiar la contribución energética de distintas estructuras. Como resultado se obtuvo que existen dos modos muy energéticos en el fluido, los cuales aportan un aproximado de 2% de la energía total del flujo, lo que significa que son los modos que más influyen en la forma en que el fluido se mueve. Tales modos presentaban características importantes en la forma en que fluían: los caminos que trazan dentro del tubo es de una helicoidal con ángulos favoritos de 5.1 y 6.8 grados para los modos que representan el 1.0132 y 1.0167 % de la energía total del sistema, evaluados a una altura de la pared de $Y/R = 0.15$. La característica general de estos movimientos es la de células rodantes (J. R. Baltzer et al., 2012). Las conclusiones a las que llegan sobre estos modelos energéticos es que su forma y efectos sobre la turbulencia son más importantes tomando en cuenta el efecto que hacen por medio de la capa logarítmica (huella o rastro que dejan los VLSM), pero que no se debe dejar de tomar en cuenta la contribución del resto de estructuras, porque su efecto será igual o más significativo, al igual que cambiara su forma helicoidal. La persistencia que tienen en el tiempo sugiere que las celular rodantes asociadas con las rachas muy largas que también influyen largos volúmenes podrían jugar un rol importante en la organización de los movimientos de escalas más pequeñas. Lo más importante que destacan en su publicación es que tales modos pueden ser la agencia que desarrolla la organización de los LSMs en VLSMs. Tal como las estructuras crecen desde la pared, pueden ser organizadas bajo los efectos de los movimientos de mayor escala. Otros investigadores también encontraron asociación con la modulación del flujo cerca de la pared como Hutchins & Marusic (2007b) y Mathis et al. (2009).

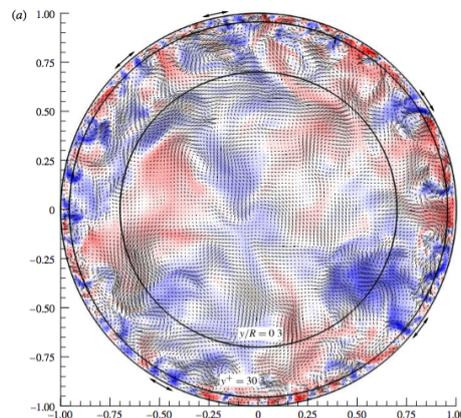
Este trabajo propone diseñar estructuras aerodinámicas para su uso en los ductos cilíndricos y someterlos a simulaciones computacionales de flujo turbulento. De esta forma estudiar el efecto sobre las velocidades estacionarias del flujo turbulento debido a los perfiles. Para el diseño de los perfiles se toma en cuenta los estudios revisados.

METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

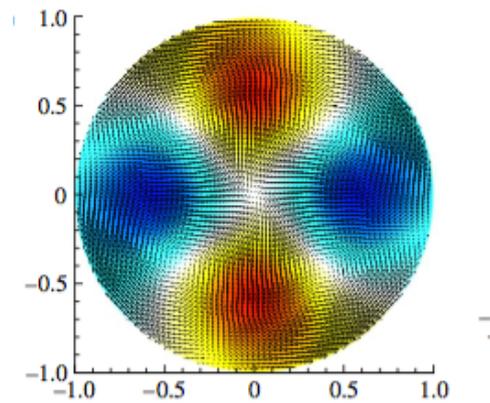
Diseño de estructuras

Importancia de movimientos Q2 para el diseño.

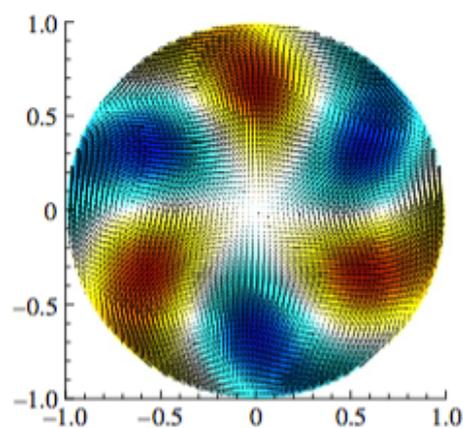
Los flujos tipo Q2, que elevan aglomerados de fluido con velocidades relativamente bajas desde zonas cercanas a la pared del ducto circular, son provocados por vórtices con rotaciones contrarias entre ellos, que aparecen cerca de la pared (J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu, 2012). Un plano perpendicular al eje de flujo de un ducto circular se puede ver en la Figura 8a. En este se muestra los vectores velocidad paralelos al plano como flechas y las fluctuaciones de velocidad en el eje de flujo, con colores; este grafico se reprodujo de la publicación de J.R Baltzer, R. J. Adrian & Xiaohua Wu, 2012.



a)



b)



c)

Figura 8: a) Representación de campo vectorial de velocidades para un plano perpendicular al eje de flujo. b) Campo vectorial para modo $n=1$ ($i_x = 1, i_\theta = 2$) mostrando el patrón de giro de los vectores. Altura de vórtices $Y/R=0.43$ c) Campo vectorial para modo $n=1$ ($i_x = 2, i_\theta = 3$) mostrando el patrón de giro de los vectores. Altura de vórtices $Y/R=0.31$.

En la figura se puede observar zonas de fluctuaciones negativas de velocidad de color azul que despegan de la pared del tubo para llegar hasta el centro del tubo cilíndrico. El efecto que tienen tales movimientos es de interponer el libre flujo en el centro del tubo, es por ello que su eyección fuera de la pared es acompañada de fluctuaciones de velocidad negativa, en el sentido de flujo (J. R. Baltzer, R. J. Adrian & Xiaohua Wu, 2012). Los movimientos se extienden por sobre una altura de $Y/R=0.3$, aunque por debajo de este límite se ha observado que las fluctuaciones de velocidad tienen mucha más

actividad, dentro de esta zona se observó mucha mezcla de aglomerados de velocidades, lo que hizo pensar a J. R. Baltzer, R. J. Adrian & Xiaohua Wu (2012) que crecimiento azimutal significativo toma parte en esta zona. Es por esta razón que ellos delimitan el tope de la escala logarítmica en este límite, $Y/R=0.3$. Otra de las características importantes que se destaca de estos movimientos es que produjeron correlaciones débiles en separaciones azimutales grandes, es decir que la existencia de un evento tipo Q2 conlleva la presencia de dos regiones similares separadas por ángulos de 115° aproximadamente.

Organización energética del flujo

Existe una relación estrecha entre los movimientos LSM & VLSM y su mecanismo de alineación con la organización energética dentro del fluido. Se puede pensar en esta relación como el mecanismo de formación de VLSM basado en la formación de LSM por perturbaciones creadas cerca de la pared del ducto. Una vez que los VLSM's son creados, estos presentan inclinaciones helicoidales preferenciales por las que fluyen, de esta forma concentran energía cinética turbulenta y organizan, en estructuras, a las velocidades del fluido. Los movimientos tipo Q2 se presentan como interferencias al fluir continuo de estos modos y sobre todo del flujo libre en el centro del tubo cilíndrico.

Para encontrar la manera en que las estructuras de velocidad se organizan, dentro de todo el dominio estudiado, J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu (2012) realizaron un estudio POD para encontrar que las estructuras más energéticas se organizan como una

hélice dentro del fluido con ángulos helicoidales preferidos; ángulo el cual se gobierna por la ecuación:

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{(R-y)2\pi i_x}{L_x i_\theta}\right] \quad (2)$$

Donde φ es el ángulo helicoidal, i_x y i_θ representan los índices del modo $n=1$ del estudio POD, L_x es la longitud del dominio de $30R$, R es el radio del ducto cilíndrico & y representa la distancia de la pared del tubo hacia la localización en cuestión (distancia entre la pared y el eje del ducto). Las estructuras más energéticas para el modo $n=1$ junto con sus inclinaciones referenciales se presentan en la siguiente tabla:

i_x	i_θ	Energía [%]	Y/R 0.43	Y/R 0.31	Y/R 0.215	Y/R 0.15	Y/R 9.6875E-3	Ángulo Azimutal
1	2	1.0132	3.416°	4.133°	4.7°	5.0866°	5.921°	6°
1	3	0.6884	2.279°	2.758°	3.14°	3.396°	3.956°	4°
2	3	1.0167	4.55°	5.503°	6.255°	6.768°	7.872°	8°

Tabla 1: Ángulos helicoidales de los 3 modos más energéticos, evaluado a diferentes alturas respecto de la pared del ducto.

En su totalidad, el modo $n=1$ representa el 90% del total de la energía disponible en el flujo turbulento (J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu, 2012). Las estructuras más energéticas de $n=1$ contribuyen $\approx 2.7\%$ del 90% total de energía en el sistema, lo que significa que su influencia sobre el flujo es considerable, tomando en cuenta que ninguna otra estructura consigue un porcentaje mayor al 0.2%. Las tres estructuras presentadas en la tabla son las más energéticas dentro de la turbulencia. Los ángulos azimutales que la tabla muestra son los ángulos a los que se inclinan las estructuras a diferentes alturas respecto de la pared. Cada estructura tiene una inclinación independiente de las demás

estructuras, pero se puede pensar en que cantidad de energía se aporta para cada inclinación. Sin considerar la estructura $i_x = 1$, $i_\theta = 3$ por su ángulo de 4° , muy alejado de las estructuras más energéticas, y su poca contribución energética respecto a las otras estructuras; se establece un ángulo de inclinación preferencial de 7° que favorece a la contribución de energía de ambas estructuras restantes al flujo. Cada estructura energética aporta influencia importante sobre el fluido, es por ello que ninguna se puede excluir, alcanzando una energía contribuida alrededor de 2%. El flujo se ve favorecido a fluir por tales estructuras. El 98% restante de la energía disponible en el fluido, para este modo, se verá disipada dentro de la turbulencia debido a los ya descritos movimientos tipo Q2 que se generan y que afectan la estructura del fluido predominantemente en zonas dentro de la capa logarítmica delimitada por $Y/R=0.3$, también existe la posibilidad de que energía se disipe por la interacción entre estructuras y su interferencia, consecuentemente creando más caso dentro del flujo turbulento. Es por esta razón que el diseño de perfiles aerodinámicos que influyan sobre el fluido para organizar las estructuras energéticas más significativas resulte tan importante de investigar.

Una importante característica de las estructuras organizadoras del flujo es que no tienen solo un ángulo positivo azimutal. Pueden existir estructuras similares con ángulos helicoidales negativos, produciendo estructuras que fluyen de la misma forma helicoidal pero como un espejo, el efecto de esto es que producirán interferencia entre ellos en los puntos donde se crucen las estructuras y por lo tanto turbulencia y pérdida de energía de la estructura que se disipa en el fluido. En el estudio realizado por J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu, se concluye que campos instantáneos de velocidades en

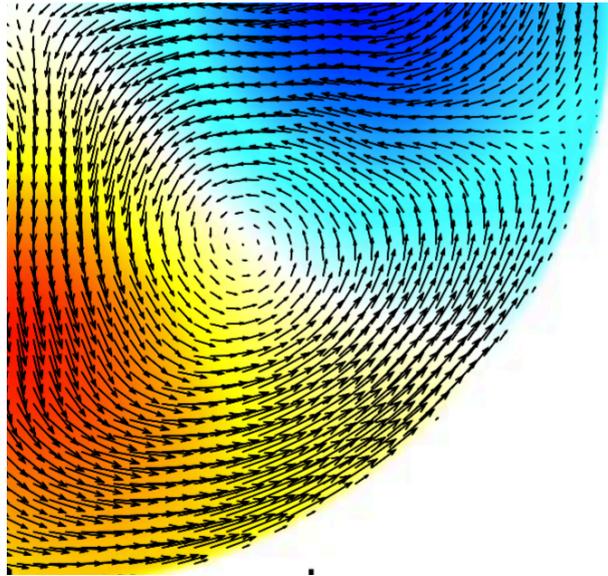
$Y/R=0.15$ muestran fluctuaciones negativas de velocidad típicamente de $-0.25U_{bulk}$. Mientras que para las estructuras energéticas mostradas se presentan picos de fluctuación de velocidad negativa de $-0.014U_{bulk}$ y $-0.011U_{bulk}$ (J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu, 2012). Lo que indica una reducción considerable en las velocidades adversas dentro de las estructuras energéticas organizadoras del flujo, es decir que dentro de la estructura energética la velocidad se reduce menos en comparación a todo el fluido. Por último es importante reconocer que las estructuras presentan la característica de ser células rodantes, es decir que poseen movimiento helicoidal alrededor del eje del ducto cilíndrico, pero también que las moléculas atrapadas en su flujo poseen traslación y rotación, tal como un vórtice. Se puede observar el centro de estos vórtices, y por lo tanto el eje de rotación en la figura 8. El centro de estas estructuras tipo células rodantes, o como vórtices, para $i_x = 1$, $i_\theta = 2$ y $i_x = 2$, $i_\theta = 3$ son $Y/R=0.43$ & $Y/R=0.31$ respectivamente. La figura 8.a, mostrada anteriormente, obtenida del trabajo de J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu (2012) muestra los vectores en plano y las fluctuaciones de velocidad con colores.

De esta forma se facilita la comprensión de las estructuras energéticamente activas que influyen en la organización del flujo. Aunque se debe notar que no son la única forma en que se organiza y dispersa la energía del sistema, existe tanta cantidad de otras estructuras pequeñas que también influyen en la organización del fluido.

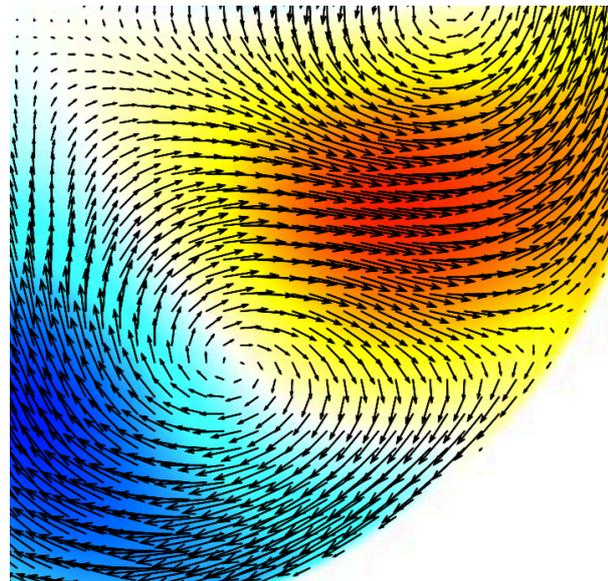
Diseño en Inventor y medición

Para producir un diseño adecuado de estructuras aerodinámicas se deben tomar en cuenta las características descritas sobre el fluido y el mecanismo de formación de los movimientos de gran escala y muy gran escala que conllevan a la formación de los flujos tipo Q2, se debe tener en cuenta la zona en que son más influyentes. El ángulo azimutal elegido es importante cuando se simule el tubo. La zona de picos de fluctuaciones de velocidad y fuerza de los modos energéticos también se toman en cuenta. Todas estas, características que se han descrito hasta este punto.

Sobre todas estas características, se destaca la necesidad de justificar la forma del perfil principal de las estructuras aerodinámicas, los cuales son proporcionados, para los modos $i_x = 1, i_\theta = 2$ & $i_x = 2, i_\theta = 3$, por las formas que dibujan las fluctuaciones de velocidades mostradas en la figura 8.b y 8.c, específicamente la forma que dibujan las zonas donde la fluctuación de velocidad es cero, dentro de las células rodantes, que se destacan por los vectores que forman circuitos circulares semejjando un vórtice; estas zonas se aprecian mejor en la Figura 9. Esta zona se muestra como una zona blanca que se extiende desde la pared del ducto circular hasta el centro de la célula rodante, donde se muestran muy finas. Para $Y/R=0.31$ se puede observar que existe presencia de 6 células rodantes semejantes esparcidas en ángulos iguales y centradas en cercanías de $Y/R=0.31$ de la pared del tubo, Figura 8b. Para $Y/R=0.43$ solamente 4 células rodantes se esparcen en ángulos iguales, pero conservan la característica de centrarse en distancias alejadas del tubo de $Y/R=0.43$, Figura 8c.



a)



b)

Figura 9: Extracto de imágenes de las mostradas en la figura 8 para una sección del ducto circular, donde se muestra claramente la sección de cero fluctuación de velocidad en color blanco extendiéndose desde el centro del vórtice hasta la pared del ducto. a) $Y/R=0.43$ b) $Y/R=0.31$

Ya que todos los valores dados en el trabajo de J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu (2012) son adimensionales, el trabajo de medición de tales perfiles se lo realizó a mano, imprimiendo a color las imágenes de la publicación en un tamaño adecuado y midiendo

los valores que los caracterizan, del mismo modo adimensional que la publicación mencionada. De esta forma, cada valor característico quedó expresado en base al radio del ducto. El único parámetro que caracteriza las dimensiones de las estructuras aerodinámicas es el radio del ducto circular.

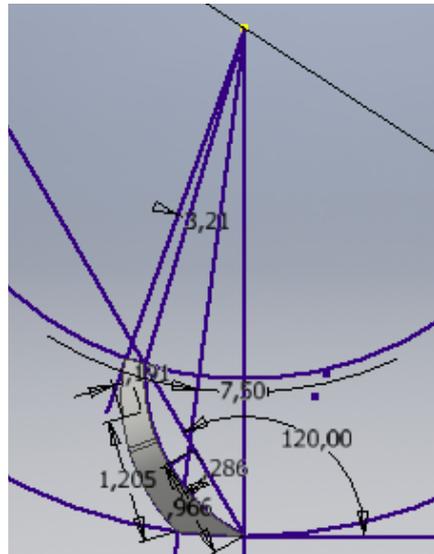


Figura 10: Plano de perfil con altura $Y/R=0.31$ extraído de planos vectoriales como los de la Figura 9.

Se ha elegido un ducto circular de radio igual a 0.125 metros. Lo que significa que las medidas presentan valores iguales a los mostrados en la siguiente tabla. De esta forma se pueden dibujar los perfiles principales de las estructuras aerodinámicas que forman parte de la simulación principal.

	Y/R=0.31	Y/R=0.43
R	0.125	0.125
r	0.08625	0.07125
OD=OA	2.4175E-3	2.44125E-3
\angle CPB	7.5°	10°
AB	0.0533	0.0586
CD	0.0484	0.0557
\angle B	120°	107.5°
\angle α	3.212°	3.93°
EF	7.2675E-3	8.78875E-3
GH	4.845E-3	5.859375E-3
AE	0.02665	0.027835
EB	0.02665	0.030765
CG	0.03291	0.026618
DG	0.01549	0.028591

Tabla 2: Datos para diseño de perfiles aerodinámicos.

En la publicación de J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu (2012) no se muestra un plano perpendicular al flujo de vectores para modos energéticos POD $n=1$ con alturas $Y/R=0.15$, pero por el motivo de comparación de resultados se lo ha tomado en cuenta. La forma en que el perfil aerodinámico se modeló para esta altura fue basándose en una perfil de altura $Y/R=0.31$ pero recortando la altura en exceso, dejando una altura de $Y/R=0.15$.

El perfil principal de las estructuras aerodinámicas es dado por los campos vectoriales mostrados, su altura está dada por los mismos y por el hecho que el punto más alto de la estructura aerodinámica debe tocar el punto donde se centra el vórtice de las estructuras energéticas de fluido. Por otra parte, el diseño de la longitud de las estructuras sigue un criterio diferente. Se debe pensar en el mecanismo de formación de los movimientos del

fluido. El mecanismo dicta que las estructuras energéticas se forman de VLSM que a su vez son formados por LSM desapegados de la pared del ducto pero que en su origen crecieron en la pared cuando unos se apegaron de forma azimutal a otros LSM creando estructuras suficientemente fuertes, estables y largas como para emerger a distancias mayores de la pared del tubo. Tomando en cuenta que los LSM tienen longitudes entre $1R$ y $2R$, se toma esta medida como referencia para el diseño de las estructuras aerodinámicas. Por otro lado, se debe pensar en el perfil de velocidades de flujos internos, en este caso de un ducto circular.

Es claro, según se puede ver en la figura 2, que el perfil de velocidades turbulento presenta una velocidad máxima menor que en caso laminar. Se entiende que los efectos viscosos son responsables de este efecto, pero en ambos casos el centro del ducto presenta la velocidad máxima con la menor obstrucción; además la velocidad aumenta mientras se aleja de la pared del ducto, donde hay presencia de velocidades mínimas cercanas a cero. Para que los perfiles mantengan su característica aerodinámica se los ha diseñado de forma que mientras más altos sean, por ejemplo que su relación Y/R sea más cercana a 1, sean más cortos de longitud y más delgados en puntos más cercanos al centro del ducto.

Es por esta razón que los perfiles $Y/R = 0.43$ son más cortos que los $Y/R=0.31$, mientras que los perfiles $Y/R=0.15$ son más largos. La siguiente tabla muestra las longitudes de las estructuras aerodinámicas.

Estructura	Longitud [m]
Y/R=0.43	R=0.125
Y/R=0.31	1.5R=0.1875
Y/R=0.15	2R=0.25

Tabla 3: Longitudes de los distintos perfiles aerodinámicos diseñados

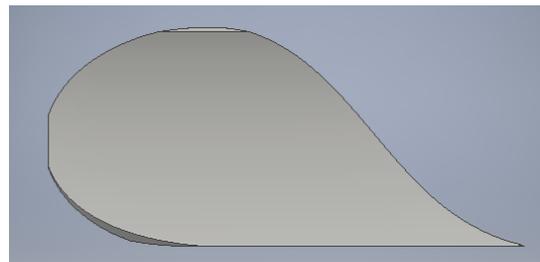


Figura 11: Perfil Y/R=0.43.



Figura 12: Perfil Y/R=0.31.



Figura 13: Perfil Y/R=0.15.

Se ensamblaron las estructuras sobre un tubo de $R=0.125$ [m] mediante el software de diseño. Haciendo uso de las herramientas de Inventor se copió y extrajo la parte de las estructuras aerodinámicas de los ductos para construir el dominio que será usado para las simulaciones.

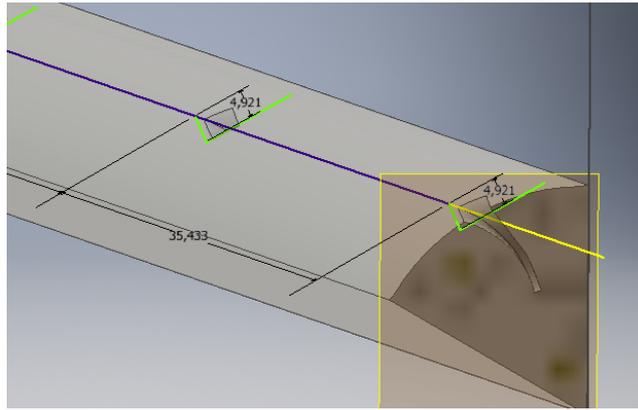


Figura 14: Dominio para $Y/R=0.43$ – D07.

La construcción de los dominios resulta de una serie de pruebas y errores al momento de integrarlos con el paquete computacional COMSOL. La forma de interpretar los objetos 3D de COMSOL resulta ser muy básica de modo que moldear cualquier forma compleja resultante del proceso de modelado en Inventor es un esfuerzo vano; toda forma u operación compleja es pobremente interpretado por COMSOL. Del mismo modo las aristas resultantes de extrusiones o cortes realizados sobre el modelo 3D, así como splines y todo tipo de ensamblajes con grados de detalle muy pequeños son mal interpretados por COMSOL. La forma más fácil para que COMSOL reconozca y manipule con competencia, los objetos 3D es apuntar al diseño más simple. Esta limitante no permitió que los perfiles construidos sean completamente aerodinámicos; como se puede ver en las Figuras C.2, C.4 y C.6 del Anexo C, las partes frontales de los perfiles aerodinámicos son muy gruesas y presentan aristas con ángulos rectos, lo que provocará gradientes de presión adversos para el flujo y por lo tanto causará turbulencia y separación de la capa límite de flujo en esos puntos, provocando efectos no deseados.

Se han modelado tres tipos distintos de perfiles aerodinámicos, para alcanzar tres diferentes alturas relativas al ducto y estudiar sus efectos. Para cada estructura se han

ensamblado diferentes ductos con una misma longitud de tubería, pero la diferencia radica en la separación existente entre cada estructura en el ensamble, medido en metros: 0.9, 0.85, 0.8, 0.75. Una separación menor que 0.75 metros resulta ineficiente, al igual que una mayor a 0.9 metros, debido a los efectos adversos observados en el campo de velocidades del flujo.

Abogando por el buen uso de recursos computacionales: Memoria RAM y velocidad de procesamiento (6.7 Hz – Intel core i7); se ha optado por usar un dominio menor al completo espacio de ducto. Se ha separado al dominio del ducto en seis partes, de modo que solamente 1/6 del tubo se simule. Es decir solamente el dominio que comprende 60° del círculo que conforma el cilindro se usó para simular en COMSOL. Esta decisión se basó en que se puede dar uso a la herramienta “periodic flow” de COMSOL, la cuál obtiene los valores de las variables dependientes que salen de un límite y las usa como valores de entrada para el otro límite, de forma que se puede simular solo 1/6 del dominio inicial sabiendo que los efectos sobre el flujo debido a cada estructura aerodinámica se representarían por ser estructuras periódicas.

El problema que surge al usar esta simplificación es que no se puede reproducir el efecto de giro helicoidal de las dichas estructuras aerodinámicas, ya que por este efecto las estructuras deberían ser colocadas unas consecutivamente delante de otras presentando un ángulo azimutal. Bajo la simplificación mencionada, el estudio de los efectos de las estructuras aerodinámicas sobre los perfiles de velocidades del flujo son solo aproximados a los fines esperados, limitados solo por los recursos computacionales disponibles.

Diseño del problema en COMSOL

La plataforma usada para simular el flujo por tubería interna que se ha usado es COMSOL, un paquete computacional multipropósito, para modelar y simular problemas en el ámbito de la física (Comsol, 2016). Basado en cálculos matemáticos de elementos finitos, este software es capaz de resolver un amplio rango de problemas físicos desarrollando la simulación pertinente; dando uso a sus herramientas de animación asistida por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) se pueden construir dominios en donde ocurrirá la simulación física y haciendo uso de sus características puede conseguir resultados parecidos a los reales. Tiene la capacidad de acceder a cada aspecto del modelo de la simulación mediante “Model Builder” el cual permite unir diferentes interfaces de simulación física.

El módulo de cada “física” disponible permite optimizar los cálculos de las simulaciones para cada caso. Por ejemplo, el módulo CFD permite simular tanto para flujos internos como externos. De igual forma permite simular flujos laminares como turbulentos. Para simular los flujos turbulentos, COMSOL presenta una serie de interfaces para diferentes casos en que la turbulencia se ha categorizado. Entre las cuales encontramos al modulo $k - \omega$ el cual simula flujos con numero de Reynolds grandes en una sola fase que presente la característica de ser incompresibles en números Mach menores a 0.3. En las paredes, simula el flujo mediante funciones de pared (Wall functions). Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para calcular la conservación del momento y la ecuación de la continuidad para conservación de masa. Y puede ser usado para problemas tipo dependientes del tiempo o estacionarios (Comsol, 2016). La ventaja de resolver la

simulación usando el módulo k-w es que los resultados obtenidos son más confiables cuando se resuelven flujos internos ya que se resuelve el modulo para las variables k (energía cinética turbulenta) y w (disipación por unidad de energía cinética turbulenta). El módulo CFD hace uso del modelo K-w Wilcox revised. Por otra parte, existen dos desventajas importantes por conocer cuando se usa este modo: La primera es que puede presentar gran sensibilidad a los valores de w (disipación por unidad de energía cinética turbulenta) del flujo libre de entrada, por lo que variaciones pequeñas de la “disipación por unidad de energía cinética turbulenta” en la entrada podrían afectar los resultados finales fácilmente. La segunda desventaja que se presenta es que el modelo k-w es numéricamente menos robusto que el modelo k-e. (Comsol, 2016)

Existe la posibilidad de usar el modelo SST para resolver el dominio, pero este modelo, a diferencia de $k - \omega$, si resuelve el flujo cerca de las paredes y no ocupa funciones de pared, ocupa más recursos computacionales y tiempo de procesamiento. Es por esta razón que los beneficios del modelo SST son limitados. Aunque resultaría muy acertado resolver el dominio mediante este modelo, existe una gran posibilidad de no convergencia de resultados es por ello que se resuelven inicialmente los modulos $k - \epsilon$ (épsilon) y $k - \omega$ (omega) para dar buenas condiciones iniciales para su rápida convergencia (Comsol, 2016). De todas formas, el tiempo de convergencia es muy grande y no ha permitido su uso para la investigación.

Para la construcción de la simulación se han importado los dominios que han sido modelados en Inventor. Los modelos representan un sexto del total del dominio de la

tubería. Se ha asignado el material “agua” al dominio ya que este es el que se usará para la simulación. La física seleccionada es Turbulent flow, k-w y dentro de este nodo se pueden ingresar las propiedades que se muestran en la siguiente tabla; que son los parámetros en los que trabajara el fluido.

Parámetro	Nodo	Valor
Density [ρ]	Fluid Properties	997.86 [kg/m ³]
Dynamic viscosity [μ]	Fluid Properties	0.000955 [Pa•s]
Equivalente sand roughness height [k_{seq}]	Wall	50 [μ m]
Normal inflow velocity [U_{∞}]	Inlet 1	0.23 [m/s]
Turbulent intensity [I_t]	Inlet 1	0.040444 [I]
Turbulence length scale [L_t]	Inlet 1	0.0175 [m]

Tabla 4: Parámetros de trabajo para el fluido simulado.

Tomando en cuenta el diámetro de la tubería que es de $D=0.25$ [m] y las propiedades del fluido de la tabla, se puede esperar un número de Reynolds de:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = 60000 \quad (3)$$

Valor que se ha escogido por haber arrojado los resultados más significativos en comparación a un valor de 25000 propuesto por J. R. Baltzer, R. J. Adrian and Xiaohua Wu para modelar las propuestas estructuras turbulentas LSM & VLMS. Por otro lado, la presión en la salida del dominio se ha establecido en cero pascales debido a dos razones: la primera, COMSOL puede resolver el dominio basándose en presiones absolutas o relativas, en este caso se tomaran las soluciones de presiones como relativas; la segunda es que muchos modelos propuestos si se ven afectados por una variación en la presión de salida por lo que se ha establecido una referencia base sobre la cual basar los resultados que se han obtenido.

Debido a que se está simulando solamente un sexto del dominio total de un ducto cilíndrico se ha utilizado una herramienta de COMSOL llamada “periodic-flow condition faces”, la cual permite simular un ducto completo tomando en cuenta que todos los efectos que una de las caras del dominio presenta, se reproducen en la otra. De ese modo, el dominio que es solo de 60 grados puede representar completamente a un ducto circular. La figura 15 muestra las caras del dominio que presentan la condición de flujo periódico.

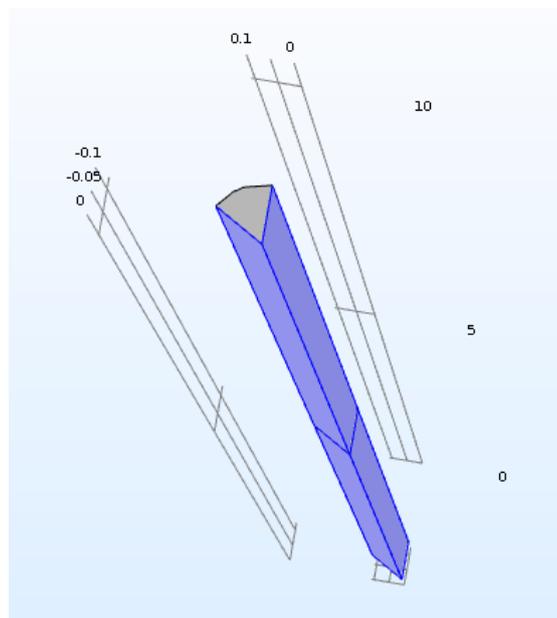


Figura 15: Caras del dominio que presentan “Periodic-flow condition”.

Las herramientas que el software COMSOL presenta pueden ser explotadas por completo dependiendo de la complejidad de estudio que se quiera resolver y de la capacidad de cómputo con la que se cuente para ello. Un factor decisivo al tomar en cuenta la complejidad del modelo es el tamaño de grano o el tamaño de los elementos en los que se van a discretizar el dominio que se quiere resolver. Para este estudio se han elegido los siguientes valores de la tabla 5 para el mallado de todos los dominios. Se debe tomar en

cuenta que se han elegido dos diferentes formas de elementos para este caso: el tetragonal, que se ha usado en todo el dominio de los ductos; y el cuadrangular, que fue utilizado exclusivamente en las superficies del ducto y los perfiles aerodinámicos. Esta decisión se tomo en base a que es muy importante conocer el efecto que tienen las superficies sobre el flujo, sobre todo si la superficie presenta rugosidad, como en el caso de este estudio que modela superficies complejas.

Parámetros de mallado	
Maximun element size	0,0105[m]
Minimun element size	0,0055[m]
Maximun element growth rate	1,1
Curvature factor	0,2
Resolution of narrow regions	1,2
Handling of sharp edges	Trimming
Number of boundary layers	10
Boundary layer streaching factor	1,1
Thickness adjustment factor	0,7

Tabla 5: Parámetros para la construcción del mallado usando herramientas del software COMSOL.

Hacer uso de mallados con elementos más pequeños indudablemente resulta en datos más certeros que toman mucho más en cuenta los efectos pequeños de la turbulencia sobre el fluido, pero inevitablemente consumirán cada vez cantidades más grandes de recursos computacionales. Por otro lado, mallados con elementos más grandes entregaran resultados erróneos y muchas veces no resolverán el dominio. Es por ello que un tamaño adecuado de elementos es importante.

Tener certeza de la veracidad de los resultados obtenidos mediante simulación es muy importante, sobre todo cuando aun no se ha experimentado físicamente y la

comprobación de datos aun no es posible. Sin embargo, se pueden hacer cálculos extensivos de errores que comprueben la independencia de los resultados: de la forma del mallado, y de la tolerancia iterativa de los cálculos elegida para las soluciones. Para cumplir estos objetivos, se obtuvieron los valores de los errores para los diferentes grados de libertad (U_x , U_y , U_z , P , K , ω) bajo diferentes tamaños de mallado y diferentes tolerancias, de forma de poner a prueba los resultados que se obtuvieron de la simulación. Los tamaños de grano para las dos mallas consecutivas que se ocuparon en el cálculo de los errores se muestran en la tabla 6, y difieren del tamaño de malla mostrado en la tabla 5 en un 10% más y menos, es por esta razón que se los ha llamado fina y gruesa, mientras que al mallado base, normal.

Tamaño de mallado	Tamaño máximo	Tamaño mínimo
Gruesa	0,01155 [m]	0,00605 [m]
Normal	0,0105 [m]	0,0055 [m]
Fina	0,00945 [m]	0,00495 [m]

Tabla 6: Tamaño de granos para los diferentes mallados

De igual forma, el tipo de estudio que se elija afectará al consumo de recursos computacionales. El estudio seleccionado para resolver todos los modelos fue un estudio en estado estacionario, que a diferencia de un estudio transitorio, no consume tanta capacidad de cómputo ni tanto tiempo para resolver los dominios.

En base a estas especificaciones se han obtenido resultados para todos los dominios o modelos, sobre velocidad, presión energía cinética turbulenta, tasa específica de disipación de energía cinética, tasa de cortante y vorticidad. Datos los cuales fueron procesados y analizados en la siguiente sección de este trabajo.

ANÁLISIS DE DATOS

Mediante el análisis de los datos obtenidos usando el software COMSOL se ha podido estudiar el comportamiento de flujo turbulento bajo la influencia de perfiles aerodinámicos dentro del ducto circular por el que fluye. La basta cantidad de datos en todo el dominio de las 12 simulaciones realizadas ha sido procesada basándose en una cantidad de aproximadamente 336 nodos tomados a lo largo de todo el dominio de cada simulación.

Se obtuvieron los parámetros de velocidad, energía cinética turbulenta, tasa específica de disipación de energía cinética, tasa de cortante y vorticidad para los diferentes puntos seleccionados. Estos puntos en los que se evaluaron las propiedades mencionadas fueron tomados para tres radios distintos: 0,9 cm, 8,3 cm y 11,1 cm, representados por R0009, R0083 y R0111 respectivamente; y en tales radios, en su intersección con planos radiales que presentaban inclinaciones angulares de 20, 30, 40 y 50 grados de inclinación con respecto a una de las caras de los modelos de secciones de ductos circulares, siendo 30 grados el plano radial que cruzaría por medio de los perfiles aerodinámicos en los modelos de simetría de 60 grados. Los planos con ángulos menores a 30 grados representan la parte más izquierda del ducto si se observara al modelo desde su centro hacia su pared límite, y los planos con ángulos mayores a 30 representan la parte más derecha del ducto bajo la misma perspectiva. El flujo va a lo largo del eje x, el cuál está en el plano con inclinación de 30 grados y siempre es paralelo al mismo. El flujo es tal que si se mantiene la misma perspectiva de ver al ducto desde su centro a la pared límite, se puede observar que los planos con ángulos menores a 30 se encuentran a su izquierda,

mientras que los planos con ángulos mayores se encuentran a su derecha. De este modo se pudieron caracterizar los campos generados por las soluciones de las 12 simulaciones.

Perfiles de velocidades convencionales y no convencionales.

De las 12 simulaciones realizadas, cada una varía de las demás por su perfil aerodinámico o por su separación entre perfiles aerodinámicos. Cada simulación produjo diferentes perfiles de velocidad en su punto más desarrollado: 10,25 [m]. En este punto se obtuvieron los valores de la magnitud de velocidad entregados por COMSOL, de los puntos que caen en una línea radial con una inclinación de 30 grados respecto a una de sus caras, para todos los modelos. Los resultados en modo de gráficos se pueden observar en las Figuras 16, 17 y 18.

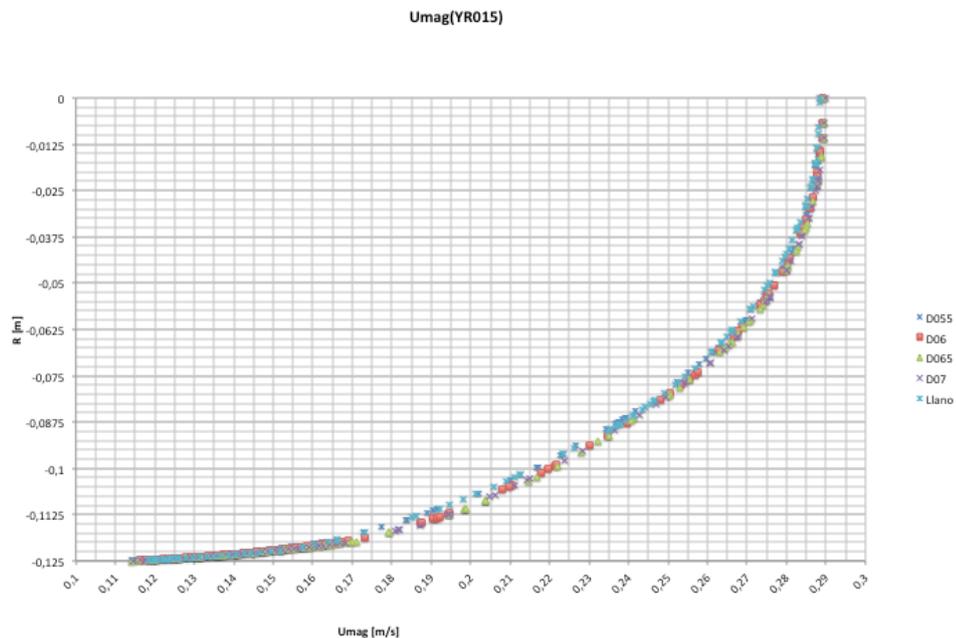


Figura 16: Magnitud de velocidad vs. Radio, para el perfil YR015 bajo distintas separaciones entre perfiles.

Se puede observar en la Figura 16 que para el perfil aerodinámico YR015 no hay variación en su perfil de velocidad con respecto al modelo de comparación de ducto con pared llana, para ninguna de sus separaciones. Mientras que para YR031, se puede observar que para la separación D06 el perfil de velocidad varía entregando velocidades mayores a las del perfil de velocidad de ducto llano, como se puede observar en la Figura 17. Del mismo modo se pueden observar que para la separación D07, el perfil aerodinámico YR031 muestra un perfil de velocidad no convencional que presenta velocidades iguales al caso de ducto llano tanto en el centro del ducto como cerca de la pared, pero muestra una reducción de velocidades en la zona intermedia es decir entre 8cm y 12cm de radio respecto al centro del ducto. Para las separaciones D065 y D055 se tienen efectos interesantes por mencionar. En el caso de las separaciones D065 y D055, los perfiles de velocidad se pueden observar iguales en la pared mientras que en el centro del ducto sus velocidades son mayores.

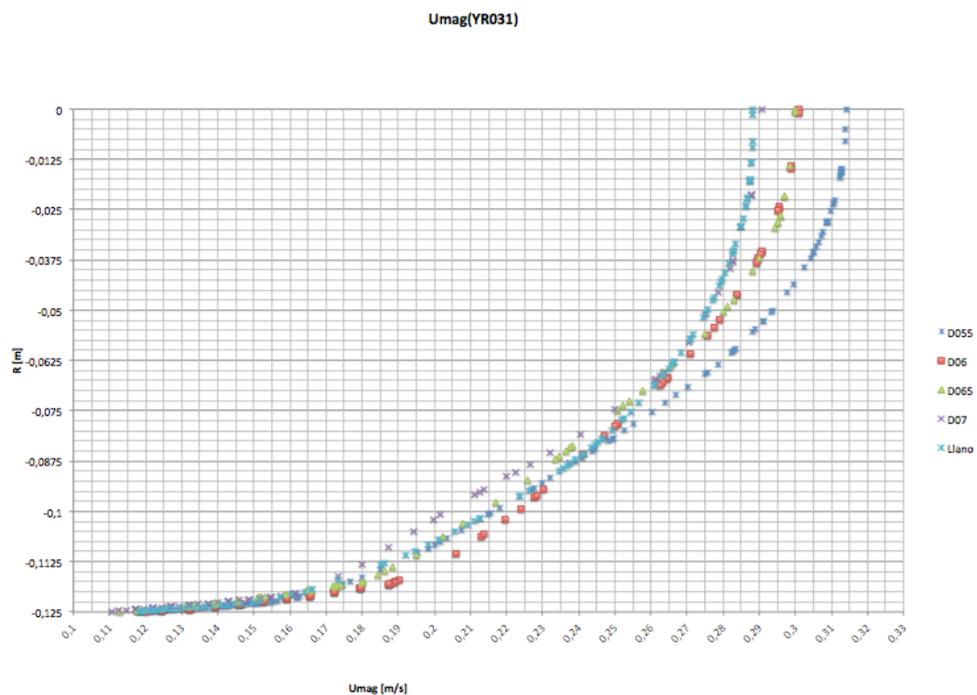


Figura 17: Magnitud de velocidad vs. Radio, para perfil YR031 bajo distintas separaciones entre perfiles.

En el caso del perfil aerodinámico YR043, se tienen perfiles de velocidad con velocidades mayores respecto al caso de ducto llano para separaciones de D07 y D065, como se puede ver en la figura 18. En el caso de las separaciones D055 y D06, sus perfiles de velocidades presentan características interesantes. El D055 presenta velocidades iguales al caso del ducto llano cerca de la pared, hasta un radio de 11,2 cm desde donde decrece su velocidad, en comparación al ducto llano, hasta un radio de 4,4 cm, desde donde su velocidad es mayor hasta el centro del ducto. La separación D06, por otro lado, presenta velocidades superiores al caso de ducto llano en su perfil de velocidad en zonas cercanas a la pared, hasta un radio de 9,6 cm, desde donde su velocidad es menor hasta llegar al centro del ducto.

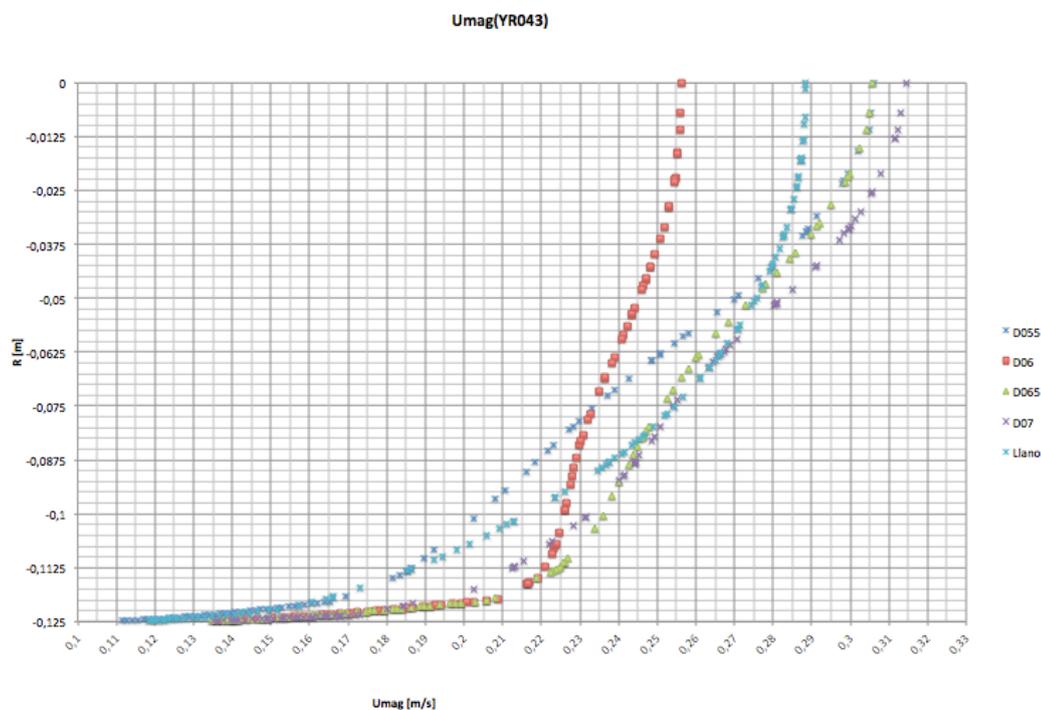


Figura 18: Magnitud de velocidad vs. Radio, para perfil YR043 bajo distintas separaciones entre perfiles.

El estudio de los perfiles de velocidad se lo ha tomado bajo dos perspectivas: manteniendo el perfil aerodinámico fijo y variando las separaciones entre perfiles, y del otro modo, manteniendo una separación entre perfiles constante y variando los perfiles. Independiente de la perspectiva de estudio, el análisis de los datos nos llevan a los mismos resultados. Los gráficos de perfiles de velocidad para el caso de separaciones variables se han descrito anteriormente. Para el de distancias constantes y perfiles aerodinámicos variables, los gráficos se muestran en el anexo A.

Caracterización de campos turbulentos en estado estable

La variación del perfil de velocidades de cada modelo simulado se analizará bajo la perspectiva de las variables obtenidas para un estudio turbulento en estado estable de COMSOL, es decir: energía cinética turbulenta, tasa específica de disipación de energía cinética, tasa de cortante y vorticidad. Cada variable tiene un símbolo y un significado físico que se denota a continuación:

- Energía cinética turbulenta (k): “Es una medida de la intensidad de la turbulencia, el valor de la energía cinética turbulenta directamente representa la fuerza de la turbulencia en el flujo” (Šalvi, 2012).
- Tasa específica de disipación de energía cinética (ω): “Tasa a la cual la energía cinética turbulenta es transformada en energía térmica interna por unidad de volumen y tiempo” (CFDWiki, 2016).
- Tasa de cortante (S_r): Es la tasa a la cual una deformación en cortante progresiva es aplicada a un material. Puede ser definida también como el

gradiente de velocidad en un material que fluye (Brookfieldengineering.com, 2016).

- Vorticidad (Vort): Es un concepto que está muy relacionado con la rotacionalidad del fluido y con la velocidad angular que presenta (White, 2011).

Mediante los valores de estas variables y su comparación respecto al modelo de tubo llano, se pueden caracterizar los diferentes fluidos mediante el uso de los promedios de los valores de las variables para la sección del ducto que presenta perfiles aerodinámicos.

Hay que tomar en cuenta que por la naturaleza del estudio, por ser una simulación computacional, los valores o estados finales que presentan los flujos son aproximaciones de lo que podemos esperar en la realidad por lo que el efecto real de los perfiles aerodinámicos sobre el fluido puede variar o ser diferente que los mostrados por las simulaciones. Para sobrellevar este efecto se realizaron cálculos de errores de tolerancia iterativa (L2) e independencia de la malla (R2) para asegurar la validez de los resultados obtenidos.

Para evaluar la calidad de las soluciones en el campo del flujo, se puede realizar un estudio de error normal, L2, (Landázuri, 2016). Un error L2 menor que el 5% sobre todo los grados de libertad, o soluciones del campo de flujo, es el criterio que Landázuri (2016) acepta como adecuado para tener una malla resuelta adecuadamente, a una tolerancia suficientemente baja de error global de solución (GSE, por sus siglas en inglés: Global Solution Error). Para calcular este error se ocupa la siguiente ecuación:

$$L_2 = \frac{[\sum(x_i - x_{i-1})^2]^{0.5}}{[\sum(x_i)^2]^{0.5}} \quad (4)$$

Donde, bajo una misma malla, x_i y x_{i-1} representan los valores de los grados de libertad (U_x, U_y, U_z, P, K, om) para dos grados de tolerancia consecutivos, siendo x_{i-1} el de mayor tolerancia.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para el cálculo de este error.

Malla	GSE	Uy	Ux	Uz	P	k	om
Fina	$10^{-3} \& 10^{-4}$	0,01051	0,08174	0,05122	0,00691	0,19925	0,03767
Fina	$10^{-4} \& 10^{-5}$	0,00271	0,02055	0,01428	0,00527	0,02276	0,00425
Normal	$10^{-3} \& 10^{-4}$	0,01120	0,08453	0,05728	0,00789	0,17409	0,03680
Normal	$10^{-4} \& 10^{-5}$	0,0040	0,03472	0,02770	0,00720	0,02310	0,00492
Gruesa	$10^{-3} \& 10^{-4}$	0,01145	0,09925	0,07465	0,01256	0,16076	0,02748
Gruesa	$10^{-4} \& 10^{-5}$	0,00462	0,04195	0,03415	0,00877	0,02542	0,00667

Tabla 7: Error normal relativo %L2 (valores en porcentaje).

El cálculo del error para independencia de malla de las soluciones, o error R2, se lo realizó para tres mallas de diferente tamaño, bajo un mismo grado de tolerancia o GSE. Su resultado aceptable representa valores solución del modelo en un grado de independencia alto con respecto a la forma del mallado, es decir soluciones independientes de la malla. Para calcularlo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$R_2 = \frac{\|e_{mid,fine}\|^2}{\|e_{coarse,mid}\|^2} \quad (5)$$

$$\|e\|^2 = \sqrt{\sum e_{j,k}^2} \quad (6)$$

Donde $e_{j,k}$ representa la diferencia entre los valores del mismo grado de libertad (U_x, U_y, U_z, P, K, om) de dos mallas diferentes de la misma tolerancia; es decir, dos mallas distintas para un mismo GSE, o tolerancia. Los resultados para este error son aceptables

siempre y cuando su valor se encuentre entre 0 y 1. R_2 es aceptable cuando: $0 < R_2 < 1$. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

GSE	Uy	Ux	Uz	P	k	om
10^{-3}	25,9097	2,09991	1,33686	6,32657	1,88929	1,14580
10^{-4}	0,70666	1,22887	1,14112	0,77689	0,58557	0,79240
10^{-5}	0,70795	1,22876	1,14100	0,77629	0,58539	0,79179

Tabla 8: Tasa de convergencia para tres mallas, R_2 .

Es en base a estos criterios sobre los cuales se realiza la caracterización de los campos turbulentos que presentan los modelos de ductos con perfiles aerodinámicos añadidos. Se han comparado y estudiado los valores de los 12 modelos en base a datos obtenidos para el cálculo de los errores antes mencionados. Se caracterizaron los campos turbulentos tomando en cuenta 3 radios distintos dentro del ducto representados por R0009, R0083 y R0111, tanto para la sección de tubo llano como con perfiles aerodinámicos. Por lo tanto, existen 3 zonas que diferencian el comportamiento del flujo dentro del ducto. Dependiendo de los valores promedio de los grados de libertad en la sección de tubo con perfiles aerodinámicos, para estos radios, se estudiaron y caracterizaron los flujos que los modelos presentan. Todos los datos promedio de los resultados de los modelos para todos los grados de libertad se presentan en el anexo B.

Analizando los datos se puede observar que tanto los modelos con perfiles de velocidad mayores a la comparación de tubo llano, como los de menor velocidad, tienen características semejantes entre ellos; desde ahora llamados perfiles de velocidad superiores y adversos respectivamente. El listado de los modelos dependiendo de su velocidad en comparación con el modelo de referencia, o tubo llano, se presenta en la

tabla 9. Se debe notar que los modelos con perfiles aerodinámicos YR015 no se han tomado en cuenta debido a que el perfil de velocidades que generan no cambia con respecto al modelo de tubo llano.

Casos de perfiles de velocidad	
Perfiles de velocidad adversos	Perfiles de velocidad superiores
YR031-D07	YR031-D065
YR043-D055	YR031-D06
YR043-D06	YR031-D055
	YR043-D07
	YR043-D065

Tabla 9: Clasificación de los modelos dependiendo de su perfil de velocidad.

Perfiles de velocidades adversos

Este tipo de perfiles de velocidades son representativos de los modelos simulados: YR031-D07, YR031-D06, YR043-D055, YR043-D06. Se caracterizan por tener velocidades menores a las de un perfil de velocidades convencional, o de tubo llano. Sus valores de energía cinética turbulenta (k) son muy altos, en comparación a la referencia, en zonas cercanas a la pared, es decir R0111. De igual forma la tasa específica de disipación de energía cinética (Ω_m) es muy alta, la tasa de cortante (S_r) y vorticidad en el plano perpendicular al flujo (MV_{ortYZ}) son igualmente muy altos en zonas cercanas a la pared. Lo mismo ocurre con la velocidad en el plano perpendicular al flujo (MV_{elYZ}); esta variable representa la velocidad perpendicular al radio de giro que las partículas presentan en el campo de flujo en el plano YZ, que es un plano perpendicular al flujo. Mientras que para zonas más lejanas, R0083 y R0009, los valores de estas variables varían afectando directamente al comportamiento de las velocidades. En la tabla 10 se ha

resumido la variación descriptiva de las variables en comparación al modelo de referencia.

Resultados comparativos de velocidades inferiores						
		k	Om	Sr	MVelyZ	MVortYZ
YR031-D07	R0009	1,36E-5	2,050	0,118	89,32E-5	0,1086
	R0083	6,9E-5	7,91	2,11	0,01358	1,7924
	R0011	51,78E-5	118,21	37,92	0,01227	37,57
YR043-D055	R0009	2,086E-5	1,873	0,1093	102,74E-5	0,0797
	R0083	14,055E-5	16,197	3,786	0,02302	3,594
	R0111	20,43E-5	29,22	5,632	0,02303	3,616
YR043-D06	R0009	13,93E-5	0,773	0,0711	16,55E-5	0,0591
	R0083	3,125E-5	7,392	2,099	0,0234	1,348
	R0011	35,56E-5	57,553	14,108	0,0137	13,76

Tabla 10: Resultados comparativos de modelos con perfiles de velocidades adversos.

Perfiles de velocidades superiores

Este tipo de perfiles de velocidades son representativos de los modelos simulados: YR031-D065, YR031-D06, YR031-D055, YR043-D07, YR043-D065. Se caracterizan por tener velocidades mayores a las de un perfil de velocidades convencional, o de tubo llano. Sus valores de (k) son siempre menores o iguales en comparación a la referencia de tubo llano, en zonas del centro del tubo, R0009 y R0083; mientras que para zonas cercanas a la pared del ducto los valores de (k) no superan por mucho a su comparación de ducto llano; en algunos casos superan ese valor pero no lo hacen por mucho a diferencia de los modelos con perfiles de velocidades adversos, los cuales si muestran valores de (k) altísimos, en comparación. Los valores de (Om) son muy variados para todos los modelos. En todos los dominios se tiene tazas de cortante (Sr) mayores, de igual forma que para los valores de ($MVelyZ$). Una característica importante de resaltar, es que en zonas cercanas al centro del ducto, R0009, la magnitud de la vorticidad ($MVortYZ$) es

baja para todos los modelos que caen en esta categoría. El resumen comparativo descriptivo de las propiedades se muestra en la tabla 11.

Resultados comparativos de velocidades superiores						
		k	om	Sr	MVelyZ	MVortYZ
YR031-D065	R0009	1,95E-5	1,6455	0,1044	61,47E-5	0,0779
	R0083	5,72E-5	4,488	1,279	0,01295	1,0553
	R0111	12,65E-5	10,73	2,442	0,01745	21,652
YR031-D06	R0009	1,897E-5	1,6417	0,1342	70,96E-5	0,0237
	R0083	5,99E-5	4,632	1,9561	0,0195	1,1396
	R0111	19,4E-5	19,549	5,105	0,01365	24,279
YR031-D055	R0009	2,561E-5	1,1101	0,09896	31,85E-5	0,07737
	R0083	13,588E-5	12,203	3,4946	0,01336	3,0707
	R0111	39,67E-5	89,366	27,771	0,01115	26,691
YR043-D07	R0009	1,567E-5	1,857	0,1368	111,08E-5	0,1121
	R0083	7,877E-5	12,292	2,8202	0,0211	2,50
	R0111	10,37E-5	16,578	3,084	0,02012	2,975
YR043-D065	R0009	2,352E-5	1,8029	0,1337	109,74E-5	0,0984
	R0083	6,668E-5	5,898	1,6534	0,0229	1,3654
	R0111	15,193E-5	17,354	4,7115	0,02035	7,25

Tabla 11: Resultados comparativos de modelos con perfiles de velocidades superiores

Perfiles de velocidades especiales

En esta categoría recaen modelos que presentan perfiles de velocidad semejantes al modelo de referencia en una sección, mientras que el resto del perfil es variado, es decir que puede presentar velocidades mayores o menores. Se han tomado en cuenta para esta categoría los modelos: YR031-D055, YR031-D065, YR031-D07, YR043-D055 y YR043-D06.

Para el caso de los modelos YR031-D055 y YR031-D065 se puede notar, por su perfil de velocidades, que son iguales al caso de referencia en zonas cercanas a la pared. Para zonas cercanas al centro del ducto, los dos modelos presentan velocidades mayores en

comparación al modelo de referencia. En el caso del modelo YR031-D055, las velocidades mayores se disponen dentro de un radio de 8,75 cm hasta el centro del ducto. Para el modelo YR031-D065, las velocidades mayores están dentro de la zona delimitada por un radio de 6,25 cm.

Comparación entre valores de modelos YR031-D055 y YR031-D065						
		k	om	Sr	MVelyZ	MVortYZ
YR031-D055	R0009	2,561E-5	1,1101	0,09896	31,85-5	0,07737
	R0083	13,588E-5	12,203	3,4946	0,01336	3,0707
	R0111	39,67E-5	89,366	27,771	0,01115	26,691
YR031-D065	R0009	1,95E-5	1,6455	0,1044	61,47E-5	0,0779
	R0083	5,72E-5	4,488	1,279	0,01295	1,0553
	R0111	12,65E-5	10,73	2,442	0,01745	21,652
Tubo llano	R0009	2,396E-5	0,8664	0,04262	1,136E-5	0,413
	R0083	14,055E-5	4,0205	1,2893	6,533E-5	1,2841
	R0111	12,13E-5	6,112	1,904	6,578E-5	1,9079

Tabla 12: Resultados de modelos YR031-D055 y YR031-D065

Tomando en cuenta las variables que caracterizan al campo de flujo, se puede notar que los dos modelos son similares para zonas cercanas a la pared con la diferencia que el modelo YR031-D065 presenta menor intensidad de turbulencia (k) y menor tasa de cortante (Sr). En el caso de zonas más cercanas al centro del ducto, R0083, se puede notar que (k) es menor en los dos casos pero es mucho menor para YR031-D065, mientras que sus valores para (Om), (Sr) y ($MVortYZ$) son semejantes o iguales al modelo de tubo llano; lo contrario para con YR031-D055, que muestra valores mayores para esas variables. En el caso del radio R0009, los dos modelos presentan menor vorticidad ($MVortYZ$), y (k) baja, pero YR031-D065 muestra un valor de (k) aun más bajo. Los valores de (Om) y (Sr) son altos para YR031-D065, mientras que para YR031-D055 (Om) es

mayor y (Sr) es igual al modelo de referencia. Los valores de estas variables y las del modelo de tubo llano se pueden comparar en la tabla 12.

Para el caso de los modelos YR043-D055 y YR031-D07, los dos presentan perfiles de velocidad que son menores al caso de referencia en zonas cercanas a la pared del ducto.

Para el modelo YR043-D055 las velocidades se presentan mayores al caso de referencia para zonas dentro de un radio igual a 3,75cm; mientras que para el modelo YR031-D07 las velocidades igualan al caso de referencia dentro del radio 6,25cm.

Comparación entre valores de modelos YR043-D055 y YR031-D07						
		k	om	Sr	MVelYZ	MVortYZ
YR043-D055	R0009	2,086E-5	1,873	0,1093	102,74E-5	0,0797
	R0083	14,055E-5	16,197	3,786	0,02302	3,594
	R0111	20,43E-5	29,22	5,632	0,02303	3,616
YR031-D07	R0009	1,36E-5	2,050	0,118	89,32E-5	0,1086
	R0083	6,9E-5	7,91	2,11	0,01358	1,7924
	R0111	51,78E-5	118,21	37,92	0,01227	37,57
Tubo llano	R0009	2,396E-5	0,8664	0,04262	1,136E-5	0,413
	R0083	14,055E-5	4,0205	1,2893	6,533E-5	1,2841
	R0111	12,13E-5	6,112	1,904	6,578E-5	1,9079

Tabla 13: Resultados de modelos YR043-D055 y YR031-D07

Claramente se puede notar, observando los datos de la tabla 13, que en radios cercanos a la pared del ducto, R0111, los valores de las variables que caracterizan al campo de flujo son mayores en comparación al caso de referencia. En radios R0083 existe una diferencia fundamental, el modelo YR043-D055 presenta un valor de (MVortYZ) mayor que el caso de referencia y un valor de (k) semejante, mientras que sus valores de (Sr) y (Om) son mayores que el modelo YR031-D07. Por otro lado, YR031-D07 presenta valores de (k) y (MVortYZ) menores al caso de referencia. En radios más pequeños, R0009, el

comportamiento de los dos modelos es muy parecido, sus valores de (MVortYZ) y (k) son menores al caso de referencia; solamente diferenciados por el modelo YR043-D055 que presenta mucho menor valor de (MVortYZ) y el modelo YR031-D07 que presenta menor (k).

El modelo que presentó el perfil de velocidades más extraño fue el YR043-D06 el cuál presenta velocidades mayores en comparación al caso de referencia en zonas cercanas a la pared del ducto, pero velocidades mucho menores en zonas dentro del radio 10,0 cm.

El perfil de velocidades que este modelo desarrolla se puede observar en la figura 18.

Valores de modelo YR043-D06						
		k	om	Sr	MVelYZ	MVortYZ
YR043-D06	R0009	13,93E-5	0,773	0,0711	16,55E-5	0,0591
	R0083	3,125E-5	7,392	2,099	0,0234	1,348
	R0111	35,56E-5	57,553	14,108	0,0137	13,76
Tubo llano	R0009	2,396E-5	0,8664	0,04262	1,136E-5	0,413
	R0083	14,055E-5	4,0205	1,2893	6,533E-5	1,2841
	R0111	12,13E-5	6,112	1,904	6,578E-5	1,9079

Tabla 14: Resultados de modelo YR043-D06

La característica de este modelo en R0111 es tener valores mayores a la referencia. Para zonas más céntricas, R0083 y R0009, se puede observar que los valores de (Om) y (MVortYZ) son menores a la referencia, mientras que (k) y (Sr) son mayores.

En base a los estudios realizados sobre las estructuras coherentes en la turbulencia, encontrados por varios autores, como son LSM & VLSM, se ha diseñado y puesto a prueba tres tipos de perfiles aerodinámicos en diferente configuraciones; como se ha descrito anteriormente. Los perfiles aerodinámicos se diseñaron para que sean capaces de captar el flujo más energético, que es descrito en el primer capítulo de este trabajo.

Los resultados de las simulaciones muestran que es posible manipular los perfiles de velocidades solamente haciendo uso de las correctas configuraciones de perfiles aerodinámicos y separación entre ellos; se pueden obtener perfiles con velocidades mayores al caso de tubo llano, o menores, como se ha mostrado en las Figuras 16, 17 y 18. La tabla 9 muestra una clasificación de los modelos simulados en base al perfil de velocidades obtenido de los mismos.

Haciendo uso de los datos obtenidos mediante las simulaciones en COMSOL, se ha podido observar que los modelos con perfiles de velocidades superiores (de velocidades mayores al caso de referencia de tubo llano) muestran valores menores de (k) , en todos sus radios (R0009, R0083 y R0111), en comparación a los modelos con perfiles de velocidades adversos (de velocidades menores al caso de referencia de tubo llano). Es decir que la intensidad de la turbulencia generada por los perfiles aerodinámicos disminuye para todo el campo de flujo; como se puede observar de las tablas 10 y 11. Los valores para la disipación (O_m) son siempre menores en el caso de modelos con perfiles de velocidad superiores, a excepción del modelo YR043-D06 el cuál muestra menor (O_m) para los radios R0009 y R0083, aun siendo clasificado como un modelo con perfil adverso, pero este efecto se puede explicar haciendo notar que su valor de disipación (O_m) es muchísimo mayor en zonas cercanas a la pared y que esto afecta notablemente a su perfil de velocidades; hay que notar que el perfil de velocidades de este modelo es el más extraño de todos. Del mismo modo, los modelos con perfiles de velocidad superiores muestran valores de tasa de cortante (S_r) siempre menores en comparación a los modelos con perfiles de velocidades adversos, aun en zonas cercanas a la pared, a

excepción del modelo YR031-D055 que muestra un valor de (S_r) comparable a los modelos con perfiles de velocidad adversos, en R0111. Este efecto se puede explicar notando en la figura 17 que el perfil de velocidades presenta similitudes al caso de referencia de tubo llano en zonas cercanas a la pared, y que presenta valores de (k) , (O_m) y $(MVortYZ)$ altos en ese mismo radio. Otros modelos como YR031-D055, YR031-D06 y YR031-D065 muestran características similares en R0111 y sus perfiles de velocidades son parecidos, con velocidades iguales al caso de referencia en zonas cercanas a la pared, mientras que en zonas más cercanas al centro del ducto sus velocidades se presentan superiores. Esta comparación hace notar que los modelos con perfiles de velocidad superior, que tienen velocidades comparables al modelo de referencia en zonas cercanas a la pared, muestran un comportamiento similar en esas zonas, es decir en R0111, que son: (k) altos, (S_r) altos, (O_m) altos y $(MVortYZ)$ altos; pero sus valores no son tan altos como en los casos de modelos con perfiles de velocidades adversos. En el caso de $(MVortYZ)$, es importante notar que los modelos con perfiles de velocidades adversos muestran valores menores en comparación a modelos con perfiles de velocidad superiores. En el caso del resto de modelos con perfiles de velocidad superior (YR043-D07, YR043-D065), se puede notar que los valores para (O_m) , (S_r) y $(MVortYZ)$ son menores, y es interesante ver los perfiles de velocidad de estos modelos, porque son los perfiles con mayores velocidades de todos los modelos.

Es entonces cuando se puede notar la influencia de las estructuras LSM. Al hacer uso de perfiles aerodinámicos, estas estructuras turbulentas se aglomeran en zonas cercanas a la pared para crear una zona de alta turbulencia $(MVortYZ)$ que funciona como

mecanismo de transferencia de momento a zonas cercanas al centro del ducto. En los casos de YR031-D055, YR031-D06 y YR031-D065, este mecanismo se limita a reducir la turbulencia en radios pequeños, R0009, y aumentar la velocidad en esas zonas. En el caso de YR043-D07, YR043-D065, este mecanismo supera las expectativas y reduce la energía cinética turbulenta, turbulencia, cortante y disipación en todo el dominio, produciendo las condiciones propicias para que las velocidades aumenten considerablemente.

Este mismo mecanismo actúa adversamente para los modelos con perfiles de velocidad adverso, de tal forma que aumenta los valores de energía cinética turbulenta, turbulencia, cortante y disipación en zonas cercanas a la pared del ducto, haciendo que este efecto disminuya las velocidades en esta zona, aun cuando los valores de las mismas variables se vean positivas en zonas cercanas al centro del ducto. Es decir, el mecanismo funciona para transmitir momento y mejora las condiciones en el centro del tubo para que las velocidades aumenten, pero su condición en zonas cercanas a tubo es mala y esto retrasa las velocidades; teniendo un efecto global adverso para las velocidades. Con condiciones malas me refiero a valores altos de cortante y alta disipación como se pueden notar de la tabla 10.

Haciendo referencia al estudio como tal, la disposición de los perfiles se presenta lineal en este caso; los perfiles están en fila uno tras otro bajo cierta distancia entre ellos. Esta simplificación fue necesaria debido a las limitaciones computacionales que se presentaron durante el desarrollo del trabajo. La disposición óptima de los perfiles aerodinámicos hubiera sido variando su desplazamiento azimutal alrededor del

perímetro del ducto, lo cual no pudo ser posible. Esta simplificación redujo considerablemente el espectro del estudio y el resultado ideal al que se estimaba llegar.

Aun así, los resultados que se obtuvieron de los modelos muestran que existen formas de alterar el comportamiento de la turbulencia haciendo uso de perfiles aerodinámicos insertados en la estructura del ducto. El mecanismo de transferencia de momento puede ser estudiado con mayor profundidad tomando en cuenta las variables que se han mencionado y posiblemente construyendo modelos reales para su estudio.

CONCLUSIONES

Se ha podido simular correctamente los fenómenos turbulentos y sus estructuras características. Se concluye que la turbulencia se puede estudiar bajo la perspectiva de las estructuras LSM & VLSM. En otras palabras, estos son responsables de la turbulencia. El ordenamiento o causalidad de las estructuras turbulentas, debido a la acción de los perfiles aerodinámicos, se puede evidenciar por el aumento en las velocidades, especialmente en radios internos de los modelos, que es donde aumenta su velocidad la mayoría de modelos que presentan perfiles de velocidad superiores. No hay que dejar de mencionar los modelos que aumentan su velocidad en todo su rango y que se presentan como los modelos que mejor usaron los LSM para mejorar sus velocidades.

El modelo k y ω funcionó muy bien para estudiar y caracterizar la turbulencia en los modelos, haciendo uso adecuado de los recursos computacionales y simulando correctamente los flujos internos de las estructuras de los modelos. Las variables que COMSOL entrega después de resuelto el modelo en estado estable, fueron suficientes para caracterizar el campo de flujo que los modelos presentan y entender el comportamiento del mismo en base a la teoría de los movimientos de gran escala y de muy gran escala (LSM & VLSM).

Resolver los modelos mediante simulaciones computacionales en COMSOL no resultó ser una tarea fácil, sobrellevar los problemas de convergencia o de falta de información en los modelos, así como de tamaño de mallado y falta de recursos computacionales, resultó en una inversión alta de tiempo y costo computacional elevado, es por ello que se ha

simulado modelos que presentan un sexto del total del ducto y también perfiles aerodinámicos dispuestos en fila; simplificaciones que no se tomaron en cuenta en un comienzo.

El objetivo de obtener perfiles de velocidad para los modelos se cumplió satisfactoriamente y por completo. Los perfiles de velocidad fueron indispensables al momento de estudiar y comprender el campo de flujo de todo los modelos simulados. El efecto que tienen las variables del campo de flujo sobre las velocidades finales alcanzadas por el fluido son importantes de mencionar. Este estudio determinó que existe un mecanismo de transferencia de momento que se genera en zonas cercanas a la pared el cuál merece un estudio más profundo. Este mecanismo se presenta como responsable directo de creación y manipulación de las estructuras LSM las cuales afectan directamente al comportamiento de los perfiles de velocidades del fluido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, R. J. (2007). *Wall-bounded flows: questions, answers and more questions*. 11 julio 2016, The American Institute of Aeronautics and Astronautics. Sitio web: https://info.aiaa.org/tac/ASG/FDTC/Awards/Adrian/Adrian_Miami_07.pdf
- Bailey, S. C. C., & Smits, A. J. (2010). *Experimental investigation of the structure of large- and very-large-scale motions in turbulent pipe flow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 651, 339-356. Sitio web: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112009993983>
- Baltzer, J. R., Adrian, R. J., & Wu, X. (2013). Structural organization of large and very large scales in turbulent pipe flow simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 720, 236-279. Sitio web: <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2012.642>
- Brookfieldengineering.com. (2016). *Glossary section on Viscosity Terms*. 16 diciembre 2016. Sitio web: http://www.brookfieldengineering.com/education/viscosity_glossary.asp
- CFDWiki, P. (2016). *Specific turbulence dissipation rate -- CFD-Wiki, the free CFD reference*. 26 diciembre 2016, Cfd-online.com. Sitio web: https://www.cfd-online.com/W/index.php?title=Specific_turbulence_dissipation_rate&oldid=12981
- Chima, R. V. . (2002). *Computational modeling of vortex generators for turbomachinery*. 16 julio 2016, de NASA Glenn Research Center Sitio web: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/5810/rvc/docs/Chima-vortex-generators.pdf>
- Comsol.com. (2016). *Multiphysics Simulation Software - Platform for Physics-Based Modeling*. 12 diciembre 2016. Sitio web: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- Guala, M., Hommema, S. E., & Adrian, R. J. (2006). *Large-scale and very-large-scale motions in turbulent pipe flow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 554, 521-542. Sitio web: <http://search.proquest.com/docview/210887076?accountid=36555>
- J. Hassan and Zhang Hua, *Effects of vortex generator on junction flow*, 12 julio 2015 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, 2015, pp. 449-452.
- Liu, G. Y., Wang, R. B., Zhang, C. R., Chen, F., Xie, J. Y., & Ma, S. (2013). *Numerical investigation on boundary layer flow control with vortex generators*. *Applied Mechanics and Materials*, 432, 351.

Lögberg, O. (2006). *Vortex generators and boundary layer separation control*. Stockholm, Sweden: KTH Mechanics.

Šavli, M. (2012). *Seminar: 4th class - Turbulence Kinetic Energy TKE*.

White, F. (2011). *Fluid mechanics*. New York, N.Y.: McGraw Hill.

Wu, X., & Moin, P. (2008). *A direct numerical simulation study on the mean velocity characteristics in turbulent pipe flow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 81-112. doi:<http://dx.doi.org/10.1017/S0022112008002085>

ANEXO A: PERFILES DE VELOCIDAD DE DISTANCIAS CONSTANTE

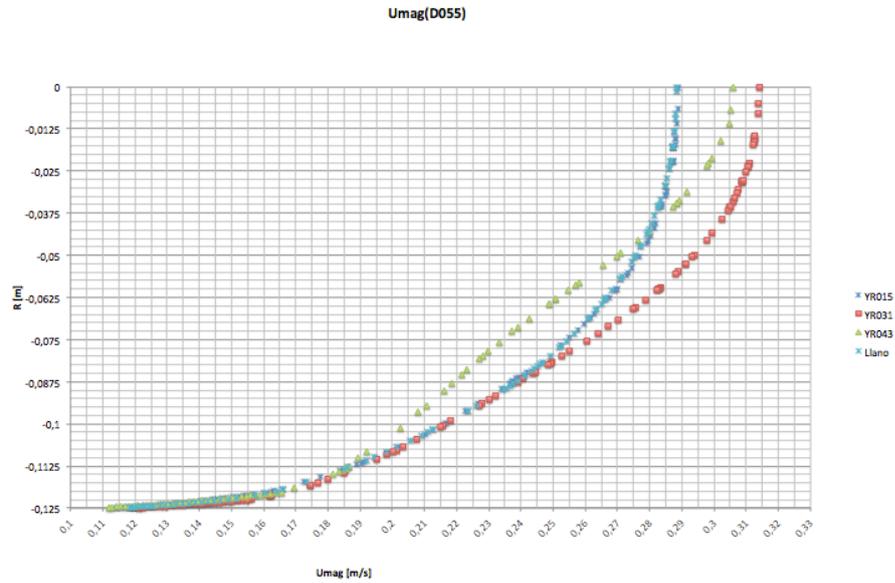


Figura A.1: Radio vs. Magnitud de velocidad para distintos perfiles aerodinámicos con separación de 55 cm entre perfiles

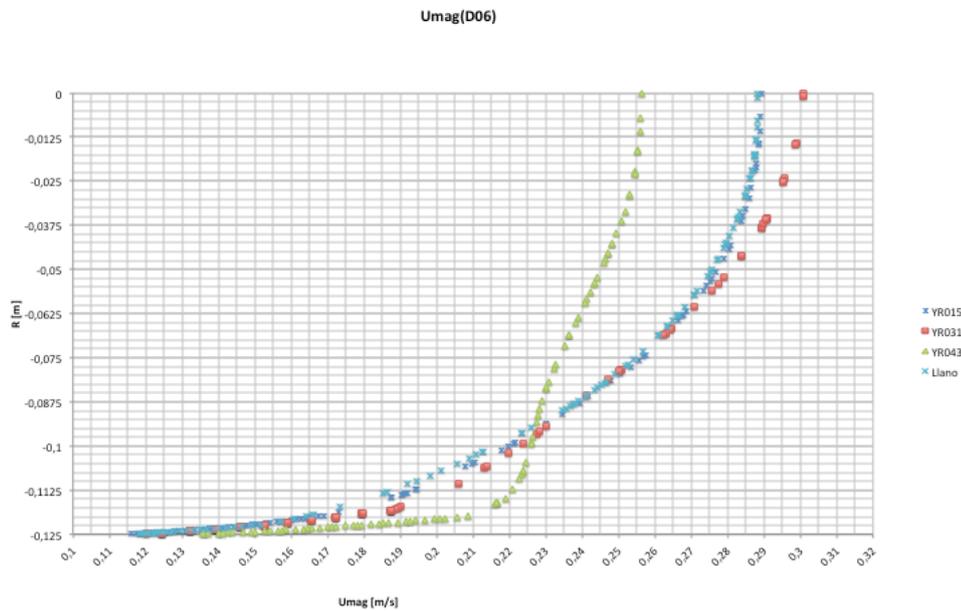


Figura A.2: Radio vs. Magnitud de velocidad para distintos perfiles aerodinámicos con separación de 60 cm entre perfiles

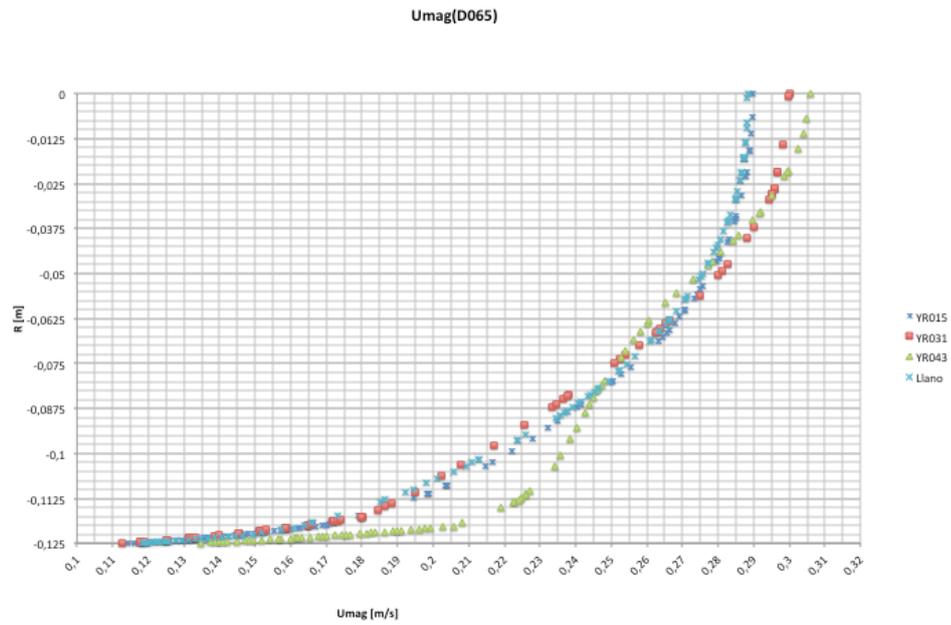


Figura A.3: Radio vs. Magnitud de velocidad para distintos perfiles aerodinámicos con separación de 65 cm entre perfiles

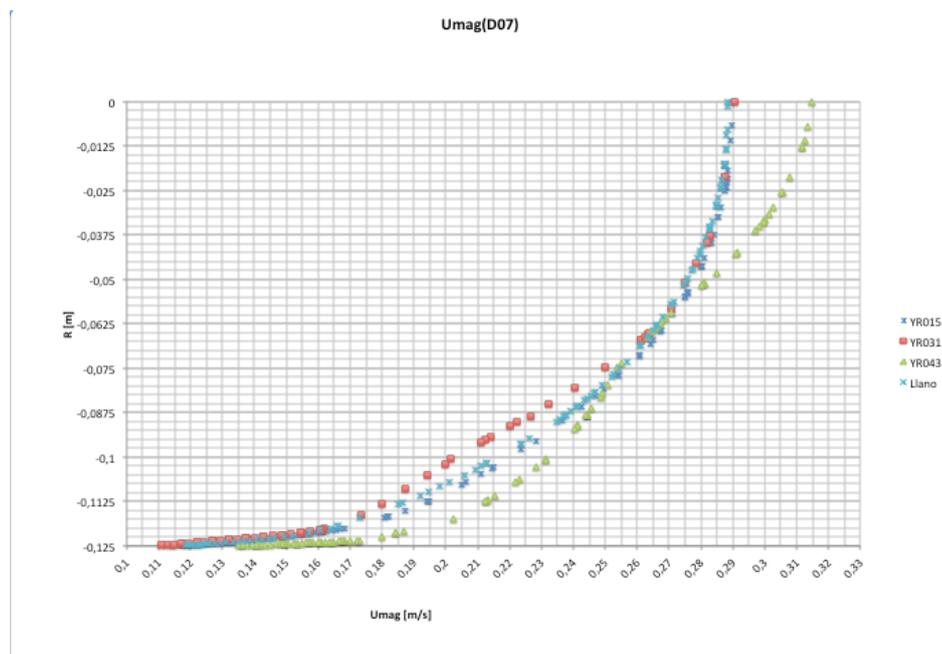


Figura A.4: Radio vs. Magnitud de velocidad para distintos perfiles aerodinámicos con separación de 70 cm entre perfiles

ANEXO B: VALORES DE RESULTADOS PROMEDIO DE LOS MODELOS

YR015 – D055			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,847E-5	7,355E-5	34,0E-5
Om [1/s]	1,1454	3,9412	73,8774
Sr [1/s]	0,0314	1,1373	24,7632
MV _{el} YZ	9,243E-5	0,00382	0,01457
DV _{el} YZ [grados]	36,3	24,5	29
MV _{ort} YZ [m/s]	0,0237	1,1396	24,279

Tabla B.1: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR015-D055

YR015 – D06			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,902E-5	7,465-5	38,5E-5
Om [1/s]	1,16	3,9298	85,3571
Sr [1/s]	0,04261	1,1099	22,9023
MV _{el} YZ	11,53E-5	0,00339	0,01558
DV _{el} YZ [grados]	36,3	24,5	69
MV _{ort} YZ [m/s]	0,0268	1,1768	21,754

Tabla B.2: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR015-D06

YR015 – D065			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,83E-5	7,3E-5	34,093E-5
Om [1/s]	1,1343	3,8922	75,428
Sr [1/s]	0,033	1,079	22,7235
MV _{el} YZ	9,158E-5	0,00419	0,01303
DV _{el} YZ [grados]	36,3	24,5	28,5
MV _{ort} YZ [m/s]	0,0221	1,055	19,874

Tabla B.3: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR015-D065

YR015 – D07			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,803E-5	7,217E-5	14,066E-5
Om [1/s]	1,1450	3,919	12,151
Sr [1/s]	0,02652	1,1119	3,5013
MV _{el} YZ	8,383E-5	0,00431	0,01104
DV _{el} YZ [grados]	36,3	24,5	28,5
MV _{ort} YZ [m/s]	0,0208	1,076	2,985

Tabla B.4: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR015-D07

YR031 – D055			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	2,561E-5	13,588E-5	39,67E-5
Om [1/s]	1,1101	12,203	89,366
Sr [1/s]	0,09896	3,4946	27,771
MVelyZ	31,85-5	0,01336	0,01115
DVelyZ [grados]	30	26,5	30,2
MVortYZ [m/s]	0,07737	3,0707	26,691

Tabla B.5: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR031-D055

YR031 – D06			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,897E-5	5,99E-5	19,4E-5
Om [1/s]	1,6417	4,632	19,549
Sr [1/s]	0,1342	1,9561	5,105
MVelyZ	70,96E-5	0,0195	0,01365
DVelyZ [grados]	30	26,5	53
MVortYZ [m/s]	0,0237	1,1396	24,279

Tabla B.6: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR031-D06

YR031 – D065			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,95E-5	5,72E-5	12,65E-5
Om [1/s]	1,6455	4,488	10,73
Sr [1/s]	0,1044	1,279	2,442
MVelyZ	61,47E-5	0,01295	0,01745
DVelyZ [grados]	30	26,5	28,4
MVortYZ [m/s]	0,0779	1,0553	21,652

Tabla B.7: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR031-D065

YR031 – D07			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,36E-5	6,9E-5	51,78E-5
Om [1/s]	2,050	7,91	118,21
Sr [1/s]	0,118	2,11	37,92
MVelyZ	89,32E-5	0,01358	0,01227
DVelyZ [grados]	30	26,5	28,4
MVortYZ [m/s]	0,1086	1,7924	37,57

Tabla B.8: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR031-D07

YR043 – D055			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	2,086E-5	14,055E-5	20,43E-5
Om [1/s]	1,873	16,197	29,22
Sr [1/s]	0,1093	3,786	5,632
MVelyZ	102,74E-5	0,02302	0,02303
DVelyZ [grados]	27	26,5	29,33
MVortYZ [m/s]	0,0797	3,594	3,616

Tabla B.9: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR043-D055

YR043 – D06			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	13,93E-5	3,125E-5	35,56E-5
Om [1/s]	0,773	7,392	57,553
Sr [1/s]	0,0711	2,099	14,108
MVelyZ	16,55E-5	0,0234	0,0137
DVelyZ [grados]	-84,7	64,85	53,3
MVortYZ [m/s]	0,0591	1,348	13,76

Tabla B.10: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR043-D06

YR043 – D065			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	2,352E-5	6,668E-5	15,193E-5
Om [1/s]	1,8029	5,898	17,354
Sr [1/s]	0,1337	1,6534	4,7115
MVelyZ	109,74E-5	0,0229	0,02035
DVelyZ [grados]	27	26,5	29,33
MVortYZ [m/s]	0,0984	1,3654	7,25

Tabla B.11: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR043-D065

YR043 – D07			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	1,567E-5	7,877E-5	10,37E-5
Om [1/s]	1,857	12,292	16,578
Sr [1/s]	0,1368	2,8202	3,084
MVelyZ	111,08E-5	0,0211	0,02012
DVelyZ [grados]	27	26,5	29,33
MVortYZ [m/s]	0,1121	2,50	2,975

Tabla B.12: Resultados promedio en sección de perfiles para modelo YR043-D07

Tubo llano			
	R0009	R0083	R0111
K [m ² /s ²]	2,396E-5	14,055E-5	12,13E-5
Om [1/s]	0,8664	4,0205	6,112
Sr [1/s]	0,04262	1,2893	1,904
MVelyZ	1,136E-5	6,533E-5	6,578E-5
DVelyZ [grados]	-	-	-
MVortYZ [m/s]	0,413	1,2841	1,9079

Tabla B.13: Resultados promedio para modelo de referencia (tubo llano)

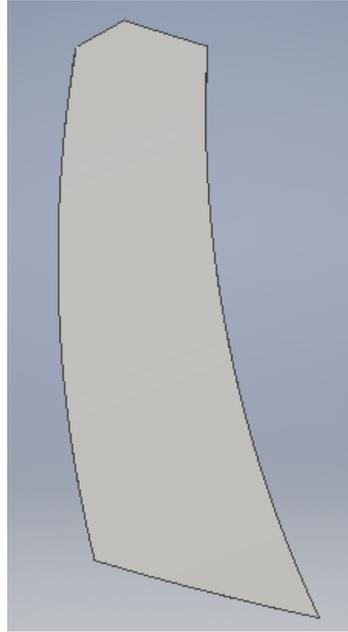
ANEXO C: FIGURAS DE LOS PERFILES AERODINÁMICOS

Figura C.1: Cara frontal de perfil aerodinámico YR015

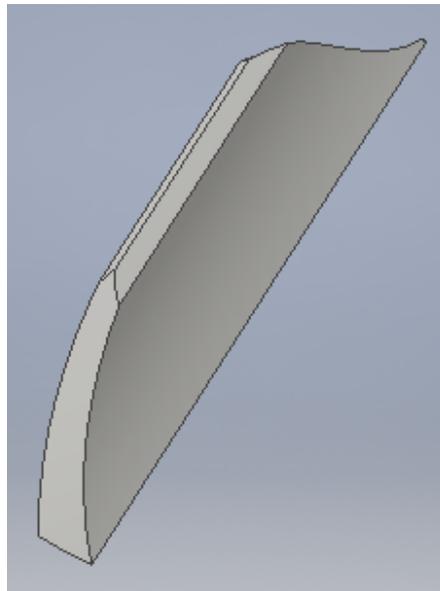


Figura C.2: Isometría de perfil aerodinámico YR015

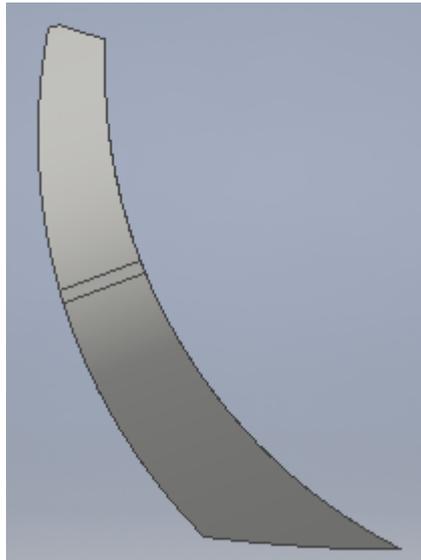


Figura C.3: Cara frontal de perfil aerodinámico YR031

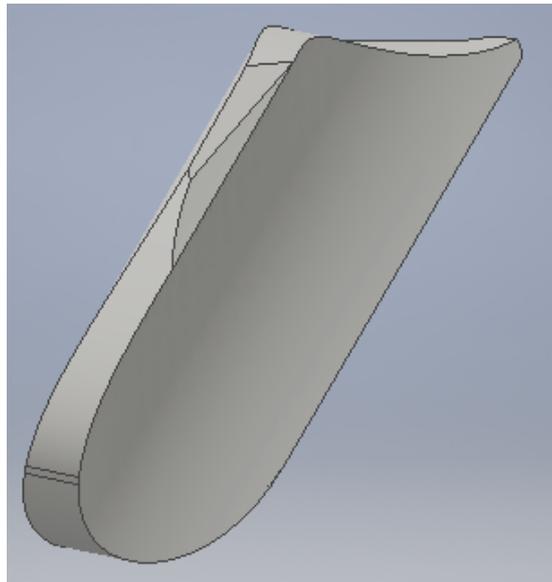


Figura C.4: Isometría de perfil aerodinámico YR031

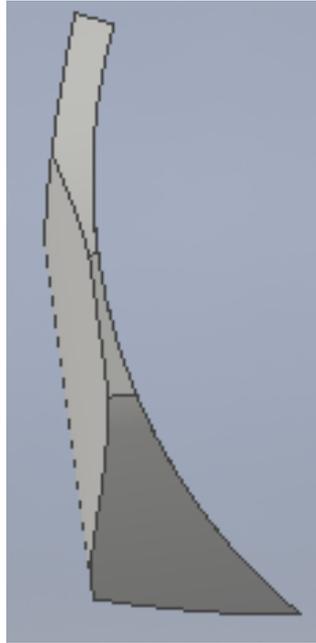


Figura C.5: Cara frontal de perfil aerodinámico YR043

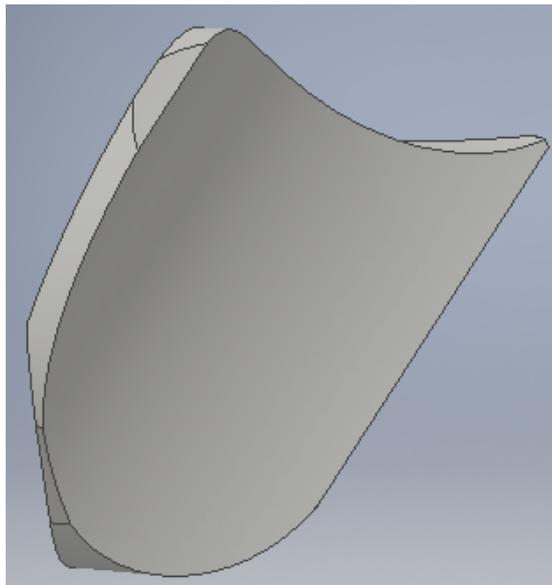


Figura C.6: Isometría de perfil aerodinámico YR043