

INDEPENDENCIA DE MALLA EN TUBOS TORSIONADOS PARA INTERCAMBIO DE CALOR: CASO DE ESTUDIO^a

MESH INDEPENDENCE IN TWISTED TUBES FOR HEAT EXCHANGE: CASE STUDY

J. G. ARDILA MARÍN^b, D. A. HINCAPIÉ ZULUAGA^b, J. A. SIERRA DEL RIO^b

Recibido 18-11-2015, aceptado 21-04-2016, versión final 24-06-2016.

Artículo Investigación

RESUMEN: La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluids Dynamics - CFD) ha sido útil para la predicción del desarrollo dinámico y térmico en intercambiadores de calor de tubos curvados y torsionados, tal como lo hizo Záchar en 2010 cuando investigó la doble mejora del curvado y una vena corrugada helicoidal que simulaba la inserción de un resorte al interior del tubo, pero geometrías comerciales como Turbotec® no han sido investigadas. Además, varias herramientas comerciales para la generación de malla están disponibles, sin embargo, el efecto que la calidad y el número de elementos tienen en la solución y el aumento del costo de cómputo, obliga a equilibrar la precisión con los recursos computacionales disponibles. Esta investigación buscó la discretización del volumen de control de intercambiadores mejorados realistas, para su posterior uso en el desarrollo numérico de correlaciones para dimensionamiento y selección. Luego de una evaluación del estado del arte y del desarrollo geométrico de los volúmenes de control con las herramientas CAD SolidEdge® y DesignModeler®, se empleó la herramienta Meshing® de ANSYS Workbench® para el mallado, evaluando los métodos y las configuraciones globales y locales de malla, para su generación y la verificación de métricas; se desarrollaron estudios de independencia de malla para dos geometrías de intercambiadores, evaluando la incidencia de la calidad y el número de elementos en la convergencia del Número de Nusselt, y se validaron con resultados experimentales disponibles en la literatura. Como resultado principal se seleccionaron las mejores mallas para el estudio numérico de cada geometría y se validó la metodología propuesta. Los resultados de simulación son influenciados por la calidad del mallado, entre otros parámetros; todos deben ser evaluados antes de emplear dichos resultados en la toma de decisiones, y es necesario usar resultados experimentales para dicha validación.

PALABRAS CLAVE: Análisis numérico, convergencia, Ingeniería asistida por computador, mallado, modelado 3D.

^aArdila Marín, J. G., Hincapié Zuluaga, D. A. & Sierra del Rio, J. A. (2016). Independencia de malla en tubos torsionados para intercambio de calor: caso de estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (1), 124-140. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231>

^bDepartamento de Electromecánica y Mecatrónica, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 75 No 75 – 101 Medellín - Colombia. juanardila@itm.edu.co

ABSTRACT: CFD packages were used to predict dynamic and thermal development in twisted coiled tubes heat exchangers, but with simplified geometries that are far from reality. In addition, several commercial tools for mesh generation are available, however, the effect that quality and elements number have on solution and computation cost increase, requires precision balance with available computational resources. This research sought to control volume discretization of improved realistic exchangers, for later use in numerical development of correlations for sizing and selection. Following an assessment of state of the art, and geometric development of control volumes with CAD tools: SolidEdge® and DesignModeler®, the ANSYS Workbench® tool: Meshing® was used for evaluating methods, and global and local settings of mesh, for its generation and metrics verification. Grid independence studies were developed for two exchanger geometries, assessing quality and elements number impact in Nusselt number convergence, and validated with experimental results available in literature. As a main result the best mesh for numerical study of each geometry were selected, and validated proposed methodology. The simulation results are influenced by mesh quality, and other parameters; all must be evaluated before using these results in decision making, and it is necessary to use experimental results for such validation.

KEYWORDS: 3D modelling, computer aided engineering, convergence, mesh generation, Numerical analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La simulación de los procesos productivos ha tomado importancia en la industria, se ofertan herramientas de ingeniería asistida por computador que resuelven rápidamente y con alta calidad a bajo costo, exigiendo sistemas de gran capacidad; recientemente ha aumentado el desarrollo de métodos sin malla para la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales como el método de reproducción del núcleo de partículas, el método Galerkin de elemento libre, o el método del punto finito. Sin embargo, considerando la precisión y estabilidad de los resultados analíticos, el método de volúmenes finitos sigue siendo una de las alternativas más populares y prácticas disponibles, que a diferencia de los métodos sin malla requiere una geometría apropiadamente discretizada para cualquier análisis (Wang & Moriwaki, 2003). Varias herramientas comerciales para la generación de malla están disponibles, incluso las hay de código abierto y gratuitas, utilizando diferentes algoritmos, cada enfoque de discretización genera mallas con diferentes propiedades; sin embargo, ciertas propiedades de la malla son deseables en la resolución de cada problema; así que la forma de los elementos afecta directamente el algoritmo de mallado así como la calidad de la solución de una simulación numérica, pero una forma buena de un elemento de malla depende de las características de la geometría (Rudolf *et al.*, 2014). Una cuestión de fundamental importancia es el efecto que la calidad y el número de elementos de la malla tienen en la solución de un problema, un compromiso entre un alto nivel de precisión y un gran número de elementos implica el aumento del costo de cómputo necesario para llevar a cabo la simulación, el usuario debe determinar el nivel de resolución necesario y equilibrar esto con los recursos computacionales disponibles (Harewood & McHugh, 2006).

Meshing® es un software de mallado que se ha construido sobre los puntos fuertes de herramientas líderes en su clase, haciendo sencillo el generar mallas tetraédricas, hexaédricas, con capa de inflación prismática o hexaédrica, o de núcleo hexaédrico; diferentes comandos permiten cambiar de método o usar múltiples métodos en un mismo modelo, además la malla se mantiene conectada automáticamente. Diferentes físicas requieren diferentes enfoques de mallado, CFD requiere de muy alta calidad, tanto en forma de los elementos y como en la suavidad de los cambios de tamaños, Meshing® tiene una opción de preferencia física para asegurar la malla adecuada para cada simulación (ANSYS, Inc., 2014).

Este artículo presenta la discretización del volumen de control de intercambiadores de calor de tubo curvado y torsionado, los diferentes métodos de mallado aplicados según la necesidad para análisis CFD, y resultados de estudios de independencia de malla realizados, donde se evaluó la incidencia de la calidad y el número de elementos en la búsqueda de la convergencia del Número de Nusselt.

2. ESTADO DEL ARTE

Vimal Kumar, y otros, en 2006, estudiaron el desarrollo de flujo y térmico en un intercambiador de calor de tubo en espiral helicoidal concéntrico con ANSYS Fluent®, hicieron un estudio de refinamiento de malla para determinar una adecuada distribución, modelaron tres densidades de malla diferentes (cantidad de celdas dividido por el volumen), la menor densidad era 24 celdas/ cm^3 , seguido por una densidad media de 31 y una alta densidad de 38. Los resultados se compararon entre sí, se utilizó el error en la transferencia de calor, la Figura 1 muestra la malla de densidad media y la relación entre el error y la densidad de malla, se puede ver que a partir de una densidad mayor que 31 celdas/ cm^3 el error se convirtió en mínimo, razón por la cual se utilizó el modelo de densidad media ya que produce resultados precisos y convergentes en menos tiempo e iteraciones que el modelo de alta densidad. Además, también se llevó a cabo el estudio de independencia cerca de la pared para verificar su efecto en la transferencia de calor, los resultados se compararon con resultados experimentales disponibles en la literatura para validarlos en condiciones de temperatura de pared constante (condición de Dirichlet); escogieron un tamaño cerca de la pared con el que el número de Nusselt fue casi igual y tuvo buen acuerdo con las predicciones de Roger & Mayhew de 1964 (Kumar *et al.*, 2006).

Rennie & Raghavan en 2006, estudiaron numéricamente la transferencia de calor de un intercambiador de calor de doble tubo helicoidal para determinar el efecto de las propiedades térmicas de fluido en la transferencia de calor con PHOENICS 3.3®, reportaron la utilización de un sistema cilíndrico de coordenadas polares ($r - \theta - z$) con un tamaño de malla de $30 \times 40 \times 80$ elementos en dirección axial (θ), horizontal (r), y vertical (z), respectivamente (Rennie & Raghavan, 2006). Huminic & Huminic en 2011, replicaron el estudio de Rennie & Raghavan utilizando nanofluidos con

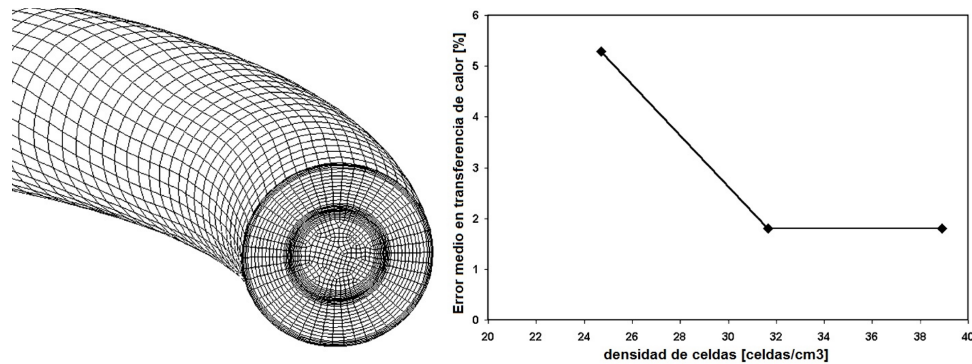


Figura 1: Malla de densidad media usada por Vimal Kumar y relación entre error y densidad de malla. Fuente: Kumar et al (2016).

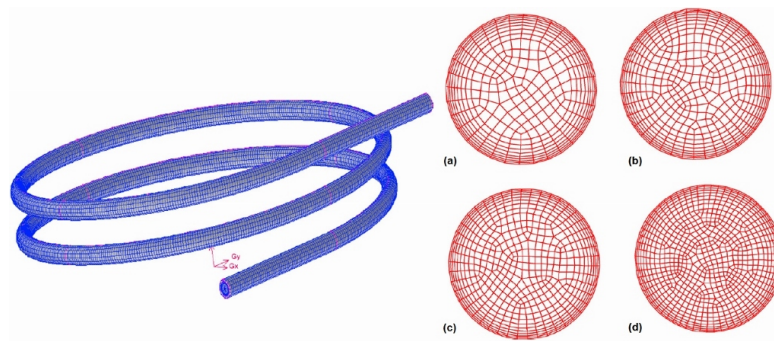


Figura 2: Malla usada por J.S. Jayakumar. Fuente: Jayakumar et al (2008)

ANSYS CFX® y reportaron las dimensiones de la malla como 2.308.992 de nodos, para 6.280.905 de elementos (Huminic & Huminic, 2011).

J.S. Jayakumar, y otros, en 2008, realizaron la estimación experimental y CFD de la transferencia de calor en intercambiadores de bobina helicoidal, las mallas usadas en su estudio se presentan en la Figura 2, aseguran que antes de llevar a cabo el análisis real, estudiaron la dependencia de la solución de la malla, las utilizadas se muestran también en la Figura 2, (c) fue elegida debido a que un mayor refinamiento no resultó en la reducción de errores de masa y energía. La geometría y la malla se crearon utilizando GAMBIT® del paquete Fluent® cuando eran independientes, hoy GAMBIT® es una de las herramientas que fortaleció al Meshing®; la independencia de la solución se estudió para densidades desde 0.3celdas/cm³ hasta 1.2, encontrando que después de 1.0 no disminuyen los errores de energía y masa de manera apreciable, reportando que este tamaño es aproximadamente 30 veces menor al utilizado por Kumar en 2006, la malla óptima fue elegida con 873.760 nodos, para 1.915.833 elementos (Jayakumar *et al.*, 2008)

Zhenxing Zhao, y otros, en 2011, estudiaron numéricamente el flujo y la transferencia de calor en un intercambiador de bobina helicoidal con membrana, con Fluent®; usaron una malla no es-

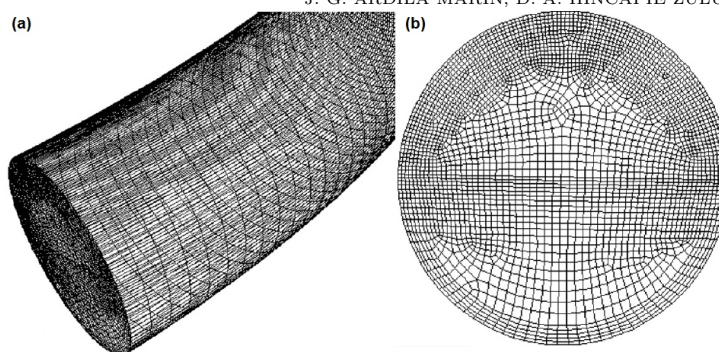


Figura 3: Malla usada por Vashisth & Nigam. Fuente: Vashisth & Nigam (2009).

estructurada del dominio computacional 3D; con el fin de obtener soluciones satisfactorias se evaluó la independencia de malla con 650.000, 900.000, 1.350.000, y 1.750.000 elementos, indicando que 1.350.000 elementos aseguran una solución satisfactoria y convergente, esto se verifica por el hecho de que la diferencia de temperatura del fluido a la salida y la tasa de transferencia de calor están dentro del 0,5 % entre 1.350.000 y 1.750.000 elementos (Zhao *et al.*, 2011).

Por su parte, Conté & Peng, en 2009, realizaron investigaciones numéricas y experimentales del rendimiento de intercambiadores con bobina rectangular, la malla se densifica sobre los tubos y es refinada gradualmente para evitar los errores que pueden ocurrir cuando volúmenes de control adyacentes difieren demasiado de tamaño, investigaron ocho mallas tanto para el interior como para el exterior de la tubería, con números de elementos de 111.000; 400.000; 770.000 y 1.100.000 para el lado del tubo y 800.000; 1.000.000; 1.200.000 y 1.500.000 para el lado de la carcasa. Las tasas de transferencia de calor globales obtenidos a partir de los ocho conjuntos no mostraron ninguna diferencia clara, sin embargo, con mayor número de celdas computacionales, el costo de cómputo se incrementará debido a la dificultad para alcanzar convergencia y estabilidad, así como el aumento de memoria y tiempo de CPU, por lo tanto, eligieron la segunda malla de cada lado como un nivel de densidad de retícula apropiado para su investigación (Conte & Peng, 2009).

Vashisth & Nigam, en 2009, predijeron los perfiles de flujo bifásico para tubos en bobina helicoidal en Fluent®, y reportaron su prueba de independencia, en la Figura 2 puede apreciarse la malla escogida, esta fue refinada en la pared, la prueba de refinamiento se llevó a cabo para utilizar una malla apropiada para el desarrollo de flujo; las dimensiones de las mallas evaluadas, medidas en dirección axial \times sección transversal, fueron: 2000 \times 640, 2000 \times 720, 3200 \times 640, 3200 \times 1000 y 4000 \times 1200, se realizó una comparación de los resultados predichos encontrando que 3200 \times 640 daba resultados satisfactorios para los perfiles de velocidad y el factor de fricción local; cálculos con mallas más finas no mostraron ninguna diferencia, los resultados computacionales se han validado frente a datos experimentales (Vashisth & Nigam, 2009)

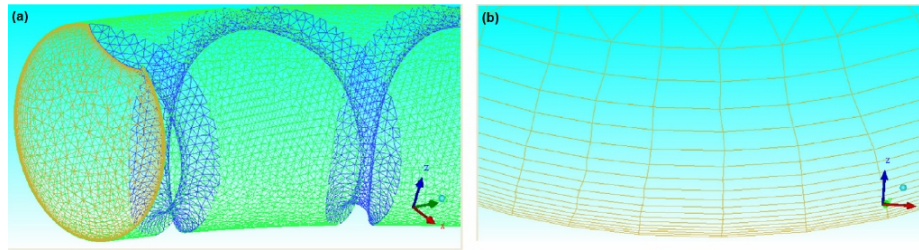


Figura 4: Malla usada por András Zachár. Fuente: Zachár (2010).

Di Piazza & Ciofalo (2010), predijeron numéricamente el flujo turbulento y la transferencia de calor en tubos en bobina helicoidal usando CFX®, llevaron a cabo un cuidadoso estudio de independencia de malla con el fin de proporcionar resultados coherentes, usaron cinco mallas del tipo estructurado multi-bloque, y encontraron una tendencia asintótica de los valores globales con el refinamiento de malla, tanto el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, como el número de Nusselt convergen, con diferencias de menos del 0,5 % entre malla y malla, también evaluaron el tiempo de CPU (Di Piazza & Ciofalo, 2010).

András Zachár en 2010, estudió la mejora en la transferencia de calor en intercambiadores de tubo en espiral helicoidal con el torsionado mediante un nervio corrugado helicoidal que induce movimiento de remolino adicional al flujo secundario característico de la curvatura; compara los resultados calculados con CFX® contra fórmulas empíricas y pruebas experimentales existentes para investigar la validez de los resultados numéricos. Las mallas aplicadas se han generado con ICEM®, la malla seleccionada puede verse en la Figura 4, es fuertemente no uniforme cerca de la pared del tubo para resolver los efectos de contorno. Ha utilizado la temperatura promedio de salida, la caída de presión y el número de Nusselt para probar la independencia de malla de los resultados; para el caso de tubos lisos de una vuelta empleó seis diferentes redes con las siguientes cantidades de celdas: 146.000, 298.099, 766.865, 1.953.825, 2.562.182, y 4.488.476, calculando el error relativo al comparar con los resultados de la malla más fina; para el caso de tubo torsionado en espiral helicoidal de una vuelta estudió mallas con: 6.355.483, 7.775.475, 13.224.881, y 20.143.807. Concluyó que las resoluciones de 2.500.00 y 7.750.000 en cada caso son suficiente para producir resultados físicamente realistas independientes de la red numérica aplicada. Para tubos con dos vueltas se duplicó el número total de celdas. En la Figura 4 (b) puede apreciarse la zona inferior de la salida, allí generó 17 capas de inflación donde las cantidades físicas (campos de velocidad y temperatura) tienen grandes gradientes normales a la pared (Zachár, 2010).

3. METODOLOGÍA

En el presente estudio de caso se validó la simulación de flujos internos de intercambiadores de calor suponiendo temperaturas constantes en la pared (condición de Dirichlet). La discretización

del volumen de control que es atravesado por dichos flujos, se llevó a cabo con la herramienta ANSYS Meshing® siguiendo la metodología propuesta por los desarrolladores del software, que consiste en la especificación de los métodos globales y locales a usar, su configuración, la generación de la malla y el chequeo de sus parámetros de calidad (ANSYS, Inc., 2014); para cada una de las geometrías se llevó a cabo un estudio de independencia de malla con diferentes criterios de comparación.

3.1. Desarrollo geométrico CAD

El desarrollo CAD del volumen de control que es atravesado por dichos flujos, se llevó a cabo con la herramienta SolidEdge® de Siemens haciendo uso de los comandos de protrusión por barrido que requiere definir la trayectoria por la que desea pasar la sección transversal para construir la operación, y definir el perfil de dicha sección transversal para mostrar el aspecto que tendrá la operación y construirla, después permite editarla. Al finalizar, las geometrías fueron convertidas al formato .igs para ser exportadas al software DesignModeler® de ANSYS donde fueron reparadas para el posterior proceso de discretización (Ardila & Hincapié, 2014). La Tabla 1 presenta los parámetros que describen las geometrías y pueden apreciarse en la Figura 5.

Tabla 1: Parámetros de las geometrías desarrolladas en el presente estudio (Ardila & Hincapié, 2014).

Consecutivo simulación	Radio Helicoidal [mm]	Paso Helicoidal [mm]	Número de vueltas	Longitud [mm]	Diámetro Hidráulico [mm]	Paso Torsional [mm]
1	185	40.0	1	1163	20.00	N/A
2	185	40.0	1	1163	19.25	46.52

3.2. Método de mallado

Meshing® ofrece seis métodos de mallado para geometrías 3D (ver Figura 6): (1) Tetraedros (de parche conforme o independiente), (2) barrido (prismas o hexaedros), (3) zonas múltiples (principalmente hexaédricos), (4) Hexaédrico dominante, (5) Malla CutCell cartesiana, o (6) Automático (Combina tetraedros de parche conforme con barrido según la complejidad de la geometría). Para los diferentes casos de estudio de simulación del presente estudio se empleó el método automático, combinando tetraedros, prismas y hexaedros de manera selectiva y automática.

3.3. Especificación de los controles globales de mallado

Para la definición de la configuración global de malla se procedió de la siguiente manera: (a) Establecimiento de la física a resolver, CFD para el presente estudio, y se estableció la preferencia de solucionador en CFX® o Fluent® según el caso, aunque resulta indiferente entre ellos. (b) Para el dimensionamiento se especificaron las funciones de tamaño: curvatura, proximidad, tamaños

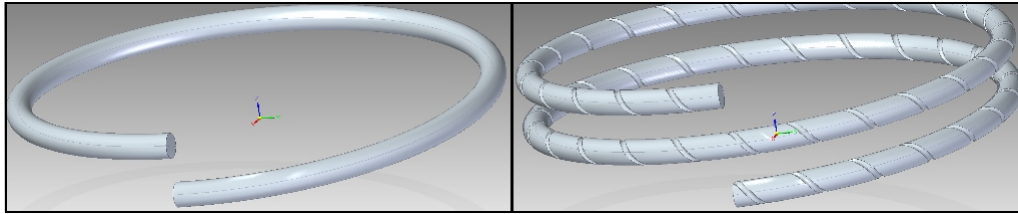


Figura 5: Geometrías de la fase de validación - flujos internos. Fuente: Ardila & Hincapié (2014).

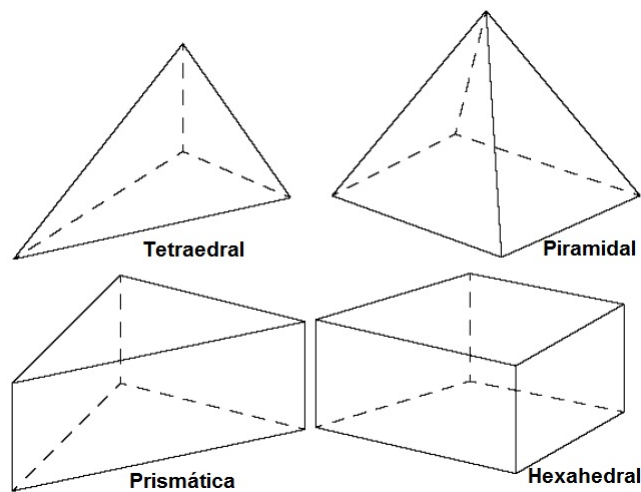


Figura 6: Métodos de mallado. Fuente: ANSYS, Inc. (2014).

de malla, tasa de crecimiento, etc., dejando inicialmente la función de curvatura activada y los valores por defecto y modificando solamente los tamaños cuando se procedió a los refinamientos, dicha modificación de tamaños siempre respetó la relación 100:1 entre el tamaño máximo de cara y el tamaño mínimo, y 2:1 entre el tamaño máximo de elemento y el tamaño máximo de cara, disminuyendo progresivamente el tamaño mínimo permitido por debajo de la opción por defecto inicial, generando así el incremento en el número de elementos. La relación descrita es la relación existente entre dichos parámetros por defecto, la recomendación general es que el tamaño mínimo debe ser menor o igual que el tamaño máximo de cara, el cual a su vez debe ser menor o igual que el tamaño máximo de elemento, y que deben ser diferentes de cero (ANSYS, Inc., 2014), y la experiencia muestra que conservar dicha relación genera mallas apropiadas para las diferentes físicas. (c) La configuración global de la inflación permite, entre otras opciones, modificar la tasa de crecimiento de las capas prismáticas, la cual se dejó siempre por defecto en 1.2. (d) Las opciones de ensamble, parche conforme, avanzadas, y la opción para ignorar pequeñas características en la geometría buscando mejorar la calidad de la malla, fueron dejadas en sus valores por defecto.

3.4. Especificación de los controles locales de mallado

Se utilizan para controlar la malla a nivel local por la determinación del alcance de las siguientes opciones a entidades geométricas (cuerpos, caras, aristas) según se requiera: dimensionamiento, dimensionamiento de contacto, refinamiento, mallado de cara mapeada, control de ajuste, pinch, e inflación. El único control local que fue empleado durante el presente estudio fue la inflación que se utiliza para generar capas prismáticas aplicadas a bordes o caras, la inflación extruye caras normales a una cara para aumentar la resolución de malla para resolver la capa límite viscosa en CFD (interés puntual de la presente investigación), resolver los espacios de aire delgados en el análisis electromagnético, o resolver regiones con alta concentración de esfuerzos en estructuras, las capas de inflación pueden ser generadas desde mallas superficiales de triángulos o cuadriláteros, la inflación permite combinar con otros métodos de mallado, y presenta una variedad de opciones para controlar el crecimiento y la calidad de las capas. Los controles permiten cinco opciones de inflación: transición suave, espesor de la primera capa, espesor total, primera relación de aspecto, o última relación de aspecto; el presente estudio empleó la transición suave que mantiene el crecimiento volumétrico suave entre cada una de las cinco capas adyacentes, opción conservada por defecto, de manera que el espesor total depende de la variación de tamaños de malla de la superficie base.

3.5. Chequeo de parámetros de calidad

La calidad de la malla es buena cuando las métricas están dentro del rango correcto, es válida para la física estudiada, la solución es independiente de ella y los detalles importantes de la geometría son bien capturados; la mala calidad puede inducir dificultades de convergencia, mala descripción de la física, o una solución difusa, por lo que se deben comprobar las métricas y mejorar la malla si es necesario, pensar el modelo y el algoritmo de solución antes de generar la malla, y realizar el estudio de independencia; las métricas de la malla muestran información de nodos y elementos, listan los criterios de calidad mostrando su valor mínimo, máximo, promedio y su desviación estándar, diferentes físicas y diferentes algoritmos de solución tienen diferentes requisitos de calidad, las métricas disponibles en Meshing® incluyen calidad del elemento, relación de aspecto, jacobiano, factor de distorsión, desviación paralela, máximo ángulo de esquina, oblicuidad, y calidad ortogonal (ANSYS, Inc., 2011).

La calidad ortogonal (OQ - Orthogonal Quality) para una celda es el mínimo del cálculo de la ecuación 1, para cada cara i , ver Figura 7.

$$\frac{A_i f_i}{|\vec{A}_1| |\vec{f}_1|}, \text{ ó } \frac{A_i c_i}{|\vec{A}_1| |\vec{c}_1|} \quad (1)$$

donde:

A_i : Vector normal a la cara

f_i : Vector desde el centroide de la celda hasta el centroide de la cara i

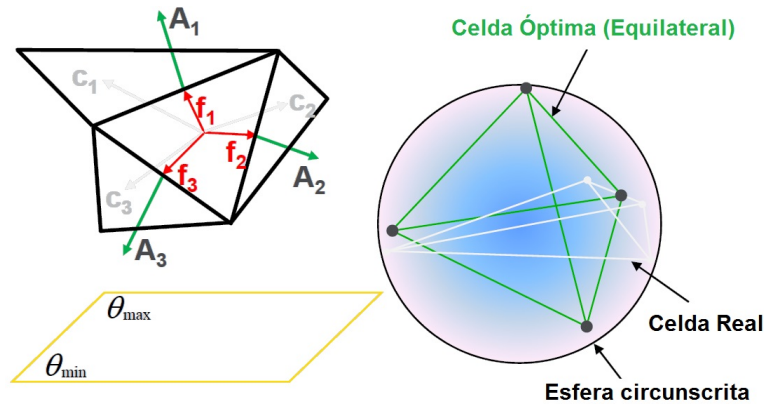


Figura 7: Definición de los parámetros de calidad. Fuente: ANSYS, Inc. (2011).

c_i : Vector desde el centroide de la celda hasta el centroide de la celda adyacente

En las paredes límites o internas se ignora en los cálculos de OQ.

La oblicuidad se puede determinar por dos métodos: (a) desviación equilátera de volumen (aplica sólo para triángulos y tetraedros) como en la ecuación 2, ver Figura 7.

$$Oblicuidad = \frac{\text{Tamaño de celda óptimo} - \text{Tamaño de celda real}}{\text{Tamaño de celda óptimo}} \quad (2)$$

Ó (b) desviación normalizada del ángulo (aplica a todas las formas de celdas y caras, hexaedrales, prismáticas y piramidales) como en la ecuación 3, ver Figura 7.

$$Oblicuidad = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_{\theta}}{180 - \theta_{\theta}}, \frac{\theta_{\theta} - \theta_{min}}{\theta_{\theta}} \right] \quad (3)$$

donde:

θ_{θ} : 60 para tetraedros y triángulos, y 90 para hexaedros y cuadrados

Las recomendaciones de calidad de malla indican valores de oblicuidad altos y OQ bajos, tratar de mantener la OQ mínima > 0.1 , ó la oblicuidad máxima < 0.95 (ANSYS, Inc., 2011). Los desarrolladores del software proponen un espectro de calidad para las métricas descritas, en términos generales, puede observarse en la Figura 8. En el presente estudio se empleó la oblicuidad como principal criterio de decisión sobre la calidad de las mallas generadas, procurando mallas aceptables, en algunos estudios también se evaluó la OQ.

3.6. Estudios de independencia de mallas

El número de Nusselt proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie, según la ecuación 4 debe ser alguna función universal del número de Dean y del número de Prandtl, si se conociera esta función podría encontrarse el coeficiente convectivo

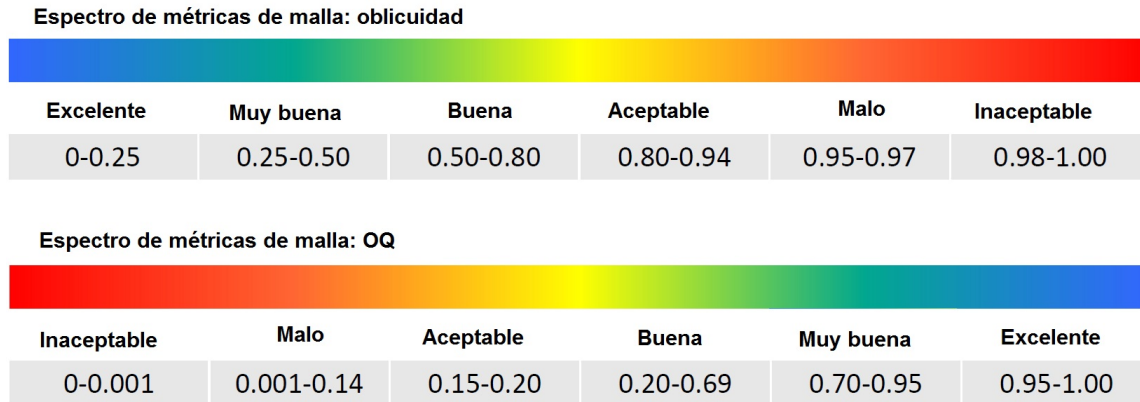


Figura 8: Espectro de calidad de métricas. Fuente: ANSYS, Inc. (2011).

$$N_u = \frac{hD}{k_f} = f(De, Pr) \quad (4)$$

donde:

N_u : Número de Nusselt

k_f : Conductividad del fluido

De : Número de Dean, definido en la ecuación 6

Pr : Número de Prandtl, definido en la ecuación 5

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_f} \quad (5)$$

$$De = \frac{\rho V D}{\mu} \sqrt{\frac{r}{R}} \quad (6)$$

donde:

μ : Viscosidad del fluido

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad media del flujo

r : Radio del tubo

R : Radio de curvatura de la espira

El proceso de validación del método numérico empleó dos proyectos de simulación para los cuales se desarrollaron geometrías diferentes cuyos volúmenes fueron discretizados en mallas cuya independencia fue probada, en ellos el error fue evaluado contra valores publicados como resultados experimentales o numéricos alcanzados en investigaciones reconocidas, y también se probaron evaluando el error al comparar con los valores resultado de la malla más fina, se estudiaron flujos internos sometidos a condición de Dirichlet. El cálculo de los errores se hizo aplicando el modelo empleado por Andrés Zachár en 2010, presentado en la ecuación 7 (Zachár, 2010)

$$Error[\%] = 100 \left(\frac{N_{ua} - N_{ui}}{N_{ui}} \right) \quad (7)$$

donde:

Los subíndices a e i se refieren a valor actual e ideal, respectivamente, donde los ideales fueron descritos en el párrafo anterior: se consideró ideal al resultado obtenido con la malla más fina y con mayor consumo de tiempo de cómputo.

En el primer caso de estudio se comparó el flujo interno en un intercambiador de tubo en espiral helicoidal liso simulado contra los resultados obtenidos al usar la correlación dada en la expresión (8) de Xin & Ebdian de 1997 (Naphon & Wongwises, 2002):

$$N_u = (2.153 + 0.318De^{0.643})Pr^{0.177} \quad (8)$$

para:

$$20 < De < 2000; 0.7 < Pr < 175; 0.0267 < \frac{r}{R} < 0.0884 \quad (9)$$

donde:

De: Número de Dean

$\frac{r}{R}$: Razón del radio de tubo al radio de curvatura.

En el segundo caso de estudio, el flujo interno a través de un tubo en espiral helicoidal simulado con una vena corrugada helicoidal se comparó contra la correlación numérica dada en la ecuación (10) desarrollada por Zachár en 2010 (Zachár, 2010):

$$N_u = 0.5855De^{0.6688}Pr^{0.408} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.166} \left(\frac{p}{d} \right)^{-0.192} \quad (10)$$

para:

$$30 \leq De \leq 1400; 3Pr \leq 30 \quad (11)$$

donde:

h : Profundidad de la vena corrugada

p : Paso helicoidal de la vena corrugada

d : Diámetro del tubo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del mallado y del estudio de independencia de malla del primer caso de estudio de simulación en la fase de validación se presentan a continuación la Tabla 2 reporta las métricas de

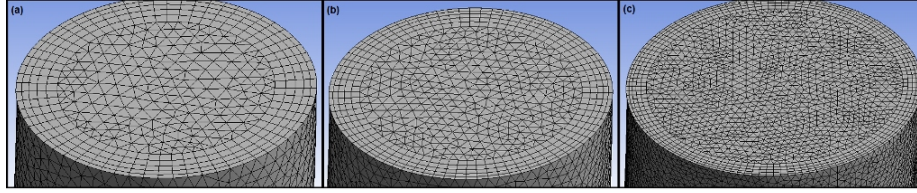


Figura 9: Mallas empleadas en estudio de independencia para tubo liso flexionado: (a) malla 2, (b) malla 4, y (c) malla 6. Fuente: Elaboración propia.

las mallas empleadas, nótese como la reducción del tamaño mínimo permitido para los elementos causa la densificación del mallado, y aunque no puede afirmarse categóricamente que la densificación mejore la calidad, si se evidencia un mejoramiento inicial y el sostenimiento de una calidad aceptable que permita la convergencia de la solución y la obtención de resultados cada vez más independientes.

Tabla 2: Métricas en estudio de independencia para tubo liso flexionado. Autoría propia.

Consecutivo malla	Tamaño mínimo de elemento [mm]	Número de elementos	Oblicuidad Máxima	OQ mínima	Calidad de malla
1	Por defecto	170.405	0.9643	0.1154	Mala
2	0.0100	1.789.450	0.8601	0.1986	Aceptable
3	0.0090	2.356.598	0.8446	0.1953	Aceptable
4	0.0080	2.985.084	0.8484	0.1998	Aceptable
5	0.0065	5.258.944	0.8427	0.1844	Aceptable
6	0.0050	10.257.384	0.8496	0.1688	Aceptable

En la Figura 9 se presentan tres de las mallas evaluadas desde (a) hasta (c) se evidencia el refinamiento y la densificación del mallado.

En la Figura 10 (a) se presenta la evolución del error relativo a la correlación experimental seleccionada como resultado ideal de la simulación, se compararon los resultados para tres regímenes diferentes dentro del dominio de aplicación de la correlación y se nota un comportamiento similar: la disminución o el aumento paulatino del error dentro del dominio, lo anterior significa que el resultado de las simulaciones tiende a ser el mismo con el refinamiento (independencia de malla) y dicho valor se acerca al ideal siendo mayor para alto Dean dentro del dominio, o se aleja del ideal siendo menor para Dean medio. Nótese que para la velocidad media, la malla por defecto arrojó un resultado igual al experimental, pero la convergencia se dio hacia un valor diferente, mostrando que alcanzar los resultados experimentales a través del refinamiento de malla no quiere decir que los resultados de la simulación bajo esas condiciones garanticen igualdad con la realidad, solo puede confiarse en el resultado de simulación cuando el error relativo se estabiliza. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 10 (b) que muestra la comparación entre las correlaciones experimental y numérica. En la Figura 10 (c) se presenta la evolución del error relativo a la malla más fina,

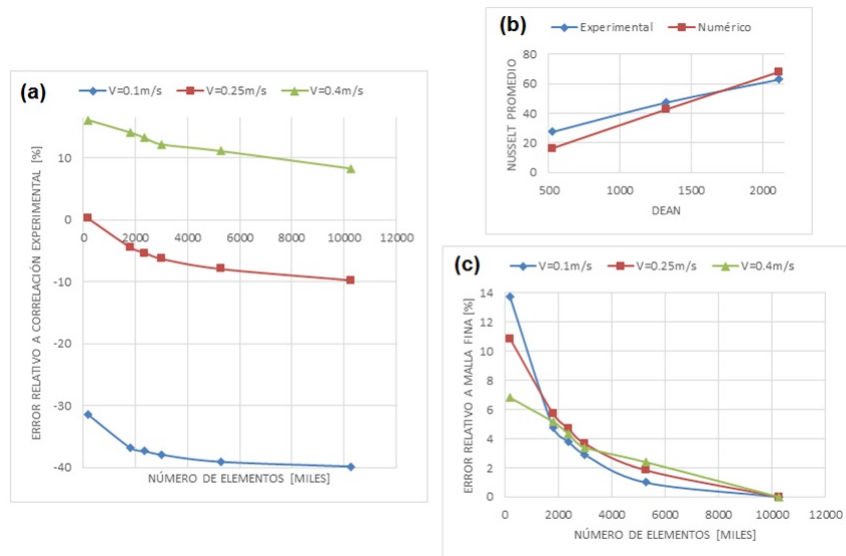


Figura 10: Estudio de independencia para tubo liso flexionado: (a) Error relativo a resultados experimentales, (b) Comparación de Nusselt, y (c) Error relativo a malla más fina. Fuente: Elaboración propia.

necesaria para verificar la independencia de malla y seleccionar la malla adecuada para este tipo de estudio. Se seleccionó la malla 5 que presentó errores entre 1 y 2.4% al compararse con la más fina y consumió la mitad del costo computacional.

Los resultados del mallado y del estudio de independencia de malla del segundo caso de estudio de simulación en la fase de validación se presentan a continuación, la Tabla 3 reporta las métricas de las mallas empleadas. En la Figura 11 se presenta una de las mallas evaluadas, la malla 7 dimensionada por defecto, sin refinamiento.

Tabla 3: Métricas en estudio de independencia para tubo liso flexionado. Fuente: Elaboración propia.

Consecutivo malla	Tamaño mínimo de elemento [mm]	Número de elementos	Oblicuidad Máxima	OQ mínima	Calidad de malla
7	Por defecto	280.904	0.9432	0.1367	Mala
8	0.0100	2.177.608	0.8596	0.1804	Aceptable
9	0.0085	2.961.170	0.8636	0.1867	Aceptable
10	0.0070	4.324.501	0.8406	0.2419	Aceptable
11	0.0055	7.426.189	0.8815	0.1382	Mala
12	0.0040	15.518.771	0.885	0.134	Mala

En la Figura 12 (a) se presenta la evolución del error relativo a la correlación numérica de Záchar, seleccionada como resultado ideal para este caso de estudio de simulación, se compararon los resultados para tres regímenes diferentes dentro del dominio de aplicación de la correlación y se

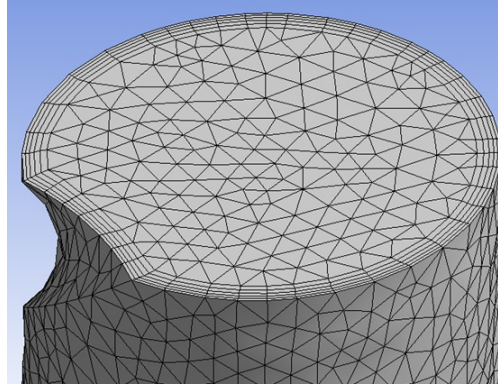


Figura 11: Malla 7, por defecto, empleada en estudio de independencia para tubo torsionado flexionado. Fuente: Elaboración propia.

nota un comportamiento similar al del primer caso de estudio, pero en este caso el valor se acerca al ideal siendo menor para alto Dean dentro del dominio, o se aleja del ideal siendo menor para Dean medio. En la Figura 12 (b) que muestra la comparación entre las correlaciones numérica de Záchar en 2010 y la propia. En la Figura 10 (c) se presenta la evolución del error relativo a la malla más fina, necesaria para verificar la independencia de malla y seleccionar la malla adecuada para este tipo de estudio. Se seleccionó la malla 11 que presentó errores entre 1.3 y 2.8 % al compararse con la más fina y consumió menos de la mitad del costo computacional, aunque presentó malas métricas según la Tabla 3.

5. CONCLUSIONES

Se seleccionó una estrategia de densificación de mallado basada en la disminución del tamaño de los elementos en el rango en el que ocasiona el incremento en el número de los mismos, pero no representa, necesariamente, una mejora de la calidad o de las métricas, pero se ratifica como indebido trabajar en el rango de inaceptabilidad de las métricas por los problemas de convergencia que presentan las soluciones.

Es indispensable la ejecución de estudios de independencia de malla en cualquier caso de estudio de simulación, y aunque este estudio seleccionó un nivel de densificación para varios tratamientos (caudales) como el ideal, se notó que el error varía para cada uno en un rango de aceptabilidad pero sin permitir la homologación del criterio, dejando claro que para cada tratamiento debe seleccionarse la malla más apropiada, errores del 2.4 y 2.8 % que fueron aceptados en este estudio podrían ser inaceptables en otras investigaciones.

Los resultados del primer caso de estudio mostraron una tendencia muy clara, evidenciando correlación entre los parámetros número de elementos, calidad de malla y error relativo, pero no fue

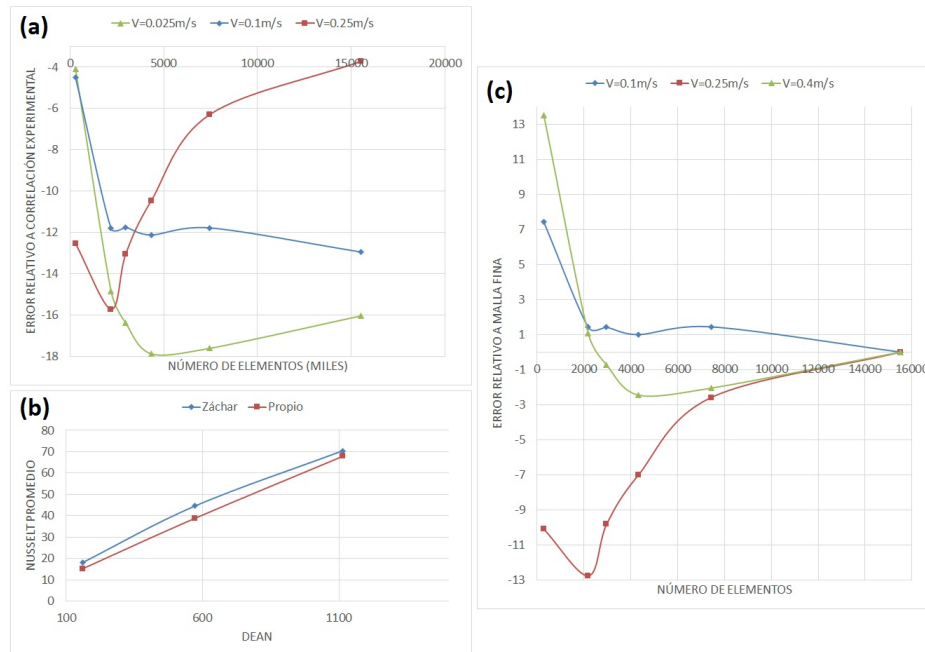


Figura 12: Estudio de independencia para tubo torsionado flexionado: (a) Error relativo a resultados experimentales, (b) Comparación de Nusselt, y (c) Error relativo a malla más fina. Fuente: Elaboración propia.

así para el segundo caso de estudio. En algunos casos podría estudiarse dicha correlación y probar hipótesis sobre la posible predicción de mallas ideales a partir de criterios de densificación definidos.

Los resultados de simulación son influenciados por la calidad del mallado, entre otros parámetros, como la selección del modelo o el valor de las propiedades termo-dependientes; todos deben ser evaluados antes de emplear dichos resultados en la toma de decisiones, y es necesario usar resultados experimentales para dicha validación.

Referencias

- ANSYS, Inc. (2014). ANSYS Meshing. (ANSYS, Inc.) Recuperado el 2014, de ANSYS Meshing: <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS+Meshing>
- ANSYS, Inc. (2011). MeshIntro_14.0_L07_Mesh_Quality. En Introduction to ANSYS Meshing.
- Ardila Marín, J. G., & Hincapié Zuluaga, D. A. (2014). Modelado geométrico de intercambiadores de calor de tubo en espiral helicoidal torsionado. *Revista Politécnica*, 18.
- Conte, I., & Peng, X. F. (2009). Numerical and experimental investigations of heat transfer performance of rectangular coil heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1799–1808.

- Di Piazza, I., & Ciofalo, M. (2010). Numerical prediction of turbulent flow and heat transfer in helically coiled pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 653–663.
- Harewood, F., & McHugh, P. (2006). Investigation of finite element mesh independence in rate dependent materials. *Computational Materials Science*, 37, 442–453.
- Huminic, G., & Huminic, A. (2011). Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4280–4287.
- Jayakumar, J., Mahajani, S. M., Mandal, J., Vijayan, P. K., & Bhoi, R. (2008). Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. *Chemical engineering research and design*, 86, 221–232.
- Kumar, V., Saini, S., Sharma, M., & Nigam, K. (2006). Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, 61, 4403–4416.
- Naphon, P., & Wongwises, S. (2002). An experimental study on the in-tube convective heat transfer coefficients in a spiral coil heat exchanger. *International Communications of Heat and Mass Transfer*, 29(6), 797–809.
- Rennie, T. J., & Raghavan, V. G. (2006). Numerical studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1266–1273.
- Rudolf, F., Weinbub, J., Rupp, K., & Selberherr, S. (2014). The meshing framework ViennaMesh for finite element applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 166–177.
- Vashisth, S., & Nigam, K. (2009). Prediction of flow profiles and interfacial phenomena for two-phase flow in coiled tubes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 452–463.
- Wang, L., & Moriwaki, T. (2003). A novel meshing algorithm for dynamic finite element analysis. *Precision Engineering*, 27, 245–257. doi:10.1016/S0141-6359(03)00005-9
- Zachár, A. (2010). Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3928–3939.
- Zhao, Z., Wang, X., Che, D., & Cao, Z. (2011). Numerical studies on flow and heat transfer in membrane helical-coil heat exchanger and membrane serpentine-tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*.