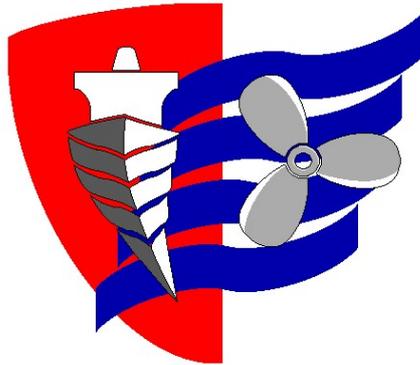


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Evaluación del Impacto de la Formación
de Biofouling en un Intercambiador de
Calor mediante Simulaciones CFD**

**Evaluation of the Impact of Biofouling
Formation on a Heat Exchanger
through CFD Simulations**

Para acceder al Título de Grado en

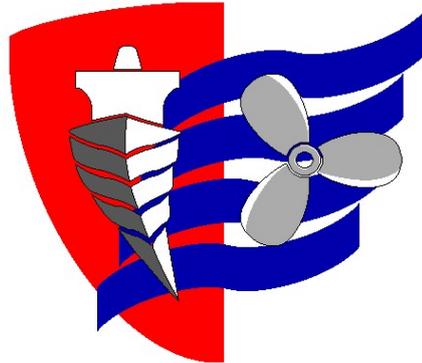
INGENIERÍA MARINA

Autor: Santiago Palacio Cano

Director: Sergio García Gómez

Junio 2024

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Evaluación del Impacto de la Formación
de Biofouling en un Intercambiador de
Calor mediante Simulaciones CFD**

**Evaluation of the Impact of
Biofouling Formation on a Heat
Exchanger through CFD Simulations**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARINA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivo y relevancia.....	4
1.4. Estado actual de los conocimientos.....	4
1.4.1. Biofouling: Que es, procesos de crecimiento, efectos y soluciones.	5
1.4.2. Ecuaciones de Conservación	11
1.4.3. Ecuaciones de Navier- Stokes.....	17
1.4.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	19
1.4.5 Teoría de la turbulencia en CFD	30
2. METODOLOGÍA	37
2.1 Planta piloto: Diseño y condiciones de simulación.....	37
2.2 Construcción de la capa de Biofilm	46
2.3 Modelo Turbulento $K - \epsilon$	48
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
Acoplamiento Presión-Velocidad.....	51
Condiciones y valoraciones previas	52
Valoración de datos obtenidos.....	57
Valoración de crecimiento de capa de Biofouling	61
4. CONCLUSIONES.	65
Bibliografía	67

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

<i>Índice de ilustraciones</i>	69
<i>Macros</i>	72
Macro (tipo) de Creación de archivos para implementar cambio de grosor.	72
Archivo Tipo de cambio de grosor.	73
Macro de creación de instalador de archivos en Fluent:.....	73
Instalador de Archivos en Fluent.....	73

RESUMEN

El empleo de la dinámica de fluidos computacional (CFD) es un método contemporáneamente usado de forma generalizada para realizar simulaciones y cálculos tanto en el área de las empresas privadas como en la investigación universitaria. Una de estas áreas de investigación son los graves efectos producidos en la eficiencia de, sobre todo, sistemas marinos debido al crecimiento de Biofouling al usar agua salada en el área de refrigeración de sistemas auxiliares y, obviamente, en todo tipo de intercambiador de calor que use agua de mar como refrigerante. La creación de capas de Biofouling altera de muy elevada magnitud el grado de intercambio de calor, por tanto, se quiso usar el método de los CFDs para realizar un análisis, usando datos obtenidos de forma experimental, para verificar el uso del programa ANSYS Fluent para futuros cálculos y simulaciones teóricas tanto en el área de crecimiento de capas de Biofouling como de biofouling en general, aparte de una comparación de resultados usando CFDs de diferentes programas, enfoques, métodos turbulentos y formas de simulación.

Este análisis es un proyecto en marcha, relativamente basto, pero suficientemente eficaz como para conformar y aportar datos más que suficientes para conformar un Trabajo Fin de Grado y poder continuar esta línea de investigación en un futuro.

Palabras Clave: Biofouling, CFD, ANSYS Fluent, Turbulencia, Intercambio de Calor.

ABSTRACT

The use of Computational Fluid Dynamics (CFD) is a contemporarily widespread method for simulations and calculations in both private industry and university research. One area of research involves the significant effects on the efficiency of marine systems, primarily, due to Biofouling growth when using seawater in the cooling systems of auxiliary systems and, obviously, in all types of heat exchangers that use seawater as a coolant. The formation of Biofouling layers significantly alters the heat exchange capacity. Therefore, the CFD method was chosen to conduct an analysis, utilizing experimentally obtained data, to validate the use of the ANSYS Fluent program for future calculations and theoretical simulations in the areas of Biofouling layer growth and Biofouling in general. This includes a comparison of results using CFDs from different programs, approaches, turbulent methods, and simulation forms.

This analysis is an ongoing, relatively simple, but effective enough to provide more than sufficient data for a bachelor's thesis and to continue this line of research in the future.

Key Words: Biofouling, CFD, Ansys Fluent, Turbulence, Heat Exchange.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

Un problema importante de las industrias que emplean equipos de intercambio de calor refrigerados con agua de mar en sus procesos industriales es el ensuciamiento biológico o biofouling. El biofouling adquiere una mayor relevancia cuando se desarrolla en el medio marino, debido a la elevada actividad biológica del agua de mar. En el diseño y funcionamiento de los intercambiadores de calor refrigerados con agua de mar ha de considerarse un coeficiente de ensuciamiento biológico que afecta a la eficiencia del equipo. Por ello es necesario disponer de herramientas de simulación que nos ayuden a diseñar intercambiadores para minimizar la pérdida de eficiencia térmica.

1.2. Justificación

Dentro de las investigaciones centradas en la caracterización del fenómeno del biofouling, se considera de crucial importancia la búsqueda de métodos eficaces para la simulación de la pérdida de eficiencia en un proceso de transferencia térmica como paso previo al diseño y construcción de un intercambiador en una instalación térmica. Este aspecto cobra un interés adicional si el fenómeno y los métodos aplicados para su control están directamente relacionados con el medio marino. No existen investigaciones relevantes en la simulación del crecimiento biológico en intercambiadores de calor, solamente simulaciones sesgadas y aproximadas que no incluyen todas las variables a tener en cuenta. Hoy en día, las herramientas informativas y los avances en la mecánica de fluidos computacional (CFD) abren una vía nueva para la simulación de procesos de crecimiento biológicos y otros métodos de mitigación antifouling que ayudarán a mejorar los diseños y equipos de transferencia térmica.

La situación descrita justifica el interés en profundizar en el conocimiento de la simulación con CFDs sobre la formación y el crecimiento de biopelículas en superficies en contacto con agua de mar, aspecto sobre el que se centrará este trabajo. Además, el conocimiento generado sobre los CFDs como mecanismo de simulación, puede aportar datos de indudable interés en la búsqueda de efectos complementarios, o incluso sinérgicos con otros métodos de control del fenómeno del biofouling.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

1.3. Objetivo y relevancia

El objetivo de este trabajo es la simulación mediante CFDs del fenómeno de crecimiento biológico en un tubo de un intercambiador de calor refrigerado por agua de mar, y evaluar la evolución del proceso térmico durante el tiempo de crecimiento de biofouling.

El desarrollo de un método eficaz de simulación de la pérdida de eficiencia de un intercambiador de calor ayudará a un mayor entendimiento de la problemática del biofouling en los procesos de transferencia térmica proporcionando una herramienta apropiada para el diseño de intercambiadores de calor y condensadores de plantas térmicas.

1.4. Estado actual de los conocimientos

En el ámbito de la ingeniería, la búsqueda de la eficiencia tecnológica en pos de una reducción de costes asociados a la producción es una constante. Esa búsqueda se centra en realizar análisis físicos de los procesos de producción en busca de un mayor rendimiento general. Para ello, no solo vale con centrarse en una investigación del elemento principal del proceso, sino que también hay que indagar en los sistemas auxiliares, pues afectan de forma sustancial en el funcionamiento.

Uno de estos sistemas auxiliares, en cualquier proceso funcional tecnológico, es la refrigeración, el cual altera la eficiencia del proceso general de forma drástica pues influye directa e indirectamente en el mismo. En el ámbito naval el estudio de la refrigeración es especialmente primordial, pues es uno de los sistemas con mayor prioridad ya sea en mantenimiento durante el funcionamiento, o en el propio diseño.

Al utilizar agua de mar en esos procesos de intercambio de calor, el desarrollo de biofouling es inevitable, (Railkin, 2005) en el cual las medidas para paliar las características nocivas en el proceso y la pérdida de eficiencia causada se estima en un 0,25% del producto interior bruto de los países industrializados, (Boullosa-Falces, Gomez-Solaetxe, Garcia, Trueba, & D., 2021) mientras que el 90% del total de los intercambiadores de calor industriales presentan un crecimiento de biofouling, (Muller-Steinhagen H, 2006) por lo que es necesario una mayor tolerancia para mantener las condiciones termales e hidráulicas de funcionamiento.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Para poder realizar un análisis más completo, se explicará uno de los métodos de análisis físico que ha ido aumentando significativamente su importancia en las últimas décadas, el de la simulación usando la dinámica de fluidos computacional. Se explicará y detallará genéricamente este método incidiendo en las características usadas en este análisis, al igual que los métodos y ecuaciones diferenciales usadas para realizar la simulación de la forma lo más exacta posible.

1.4.1. Biofouling: Que es, procesos de crecimiento, efectos y soluciones.

El Biofouling es un proceso de adherencia y acumulación organismos bióticos en una superficie artificial. Dependiendo del tamaño se crean dos grandes clasificaciones: micro-fouling y macro-fouling. (Telegdi, Trif, & Románszki, 2016)

Aunque la diversidad y prevalencia de los organismos incrustantes dependen de la ubicación geográfica, las variaciones estacionales y las diferentes interacciones, el micro-fouling incluye la formación de una película acondicionadora sobre la superficie sumergida, la adhesión de microorganismos principalmente bacterias y cianobacterias seguida por el desarrollo de biofilm.

A su vez, el macro fouling implica la adhesión y asentamiento de organismos tanto blandos como algas, corales, esponjas, anémonas y otros invertebrados marinos, así como organismos duros: percebes, mejillones, briozoos... (Romeu & Mergulhão, 2023).

Con la maduración de la capa de microfilm puede variar su espesor, pero según (Characklis, 1993), el espesor de la biopelícula en flujo turbulento rara vez excede los 1000 μm . Un biofouling de este tipo puede, si cubre el casco de un barco, retrasar su velocidad en un 20% o reducir el flujo en una tubería delgada (12,5 mm de diámetro) en un 50% (Lewin, 1984). La resistencia a la fricción aumenta en todos los sistemas cuando el espesor de la película supera la monocapa (McCoy, F., Robbins, & Costerton, 1981), es decir, se forma la capa de macrofouling. Esto provoca considerables caídas de presión, lo que exige mayores requisitos de bombeo.

Debido a que el biofilm consta de 98 a 99% de agua, su conductividad termal es similar a la del agua, mucho menor que el de los metales (Characklis, 1993). Por tanto, actúa como aislante, aumentando la resistencia a la transferencia de calor, especialmente en los intercambiadores de calor.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD
Procesos de formación de Biofouling.

La formación del biofouling viene dada por tres factores principales, los factores bióticos y abióticos y a la relación entre ellos. (Characklis, 1993) El factor biótico viene dado por las características naturales de los organismos, las diferentes especies que intervienen, su factor de crecimiento, su resiliencia a diferentes entornos, su reproducción etc.

En este trabajo, se explicarán estos términos aplicando un análisis general sobre los procesos de formación biótica en un sistema cerrado. Los factores abióticos vienen dados por las características materiales y de entorno del sistema: La utilización de diferentes materiales en la instalación, la temperatura y el flujo del fluido del sistema, el uso de recubrimientos formados por compuestos químicos interferirá directamente.

Según el análisis propuesto por Railkin, el proceso biótico por el cual se forma biofouling en superficies, ya sean naturales o artificiales, es cíclico e idéntico y se basa en la colonización (Railkin, 2005):

1. Transporte: Las especies de organismos bióticos que se encuentran en el proceso de biofouling tienen métodos de transporte similares, que se suelen basar en la liberación de formas de dispersión, generalmente llamados propágulos, al agua: microorganismos, larvas de animales y esporas de macroalgas, que son colonos potenciales una vez encuentren alguna superficie dura.
2. Asentamiento: Los propágulos de los organismos bióticos encuentran una superficie dura apta para establecerse. Los factores de superficie que afectan a esa disponibilidad generalmente se dividen en físicos y biológicos, y es sobre esta parte donde se incide más en el proceso de diseño, pues variaciones en las características físicas del material modificarán la eficacia colonial de esta fase.
3. Fijación: Una vez el organismo ha encontrado una superficie válida para su asentamiento, comienza la fase de fijación, donde se adhiere a la superficie, y es la última fase donde las propiedades físicas del material afectan cuantitativamente. La tasa de adhesión es, a su vez, directamente proporcional a la concentración de propágulos en el agua y la fracción de superficie que se encuentra libre de microorganismos.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

4. Desarrollo y crecimiento: El crecimiento es la etapa final en la colonización de superficies duras. Es un proceso que da como resultado el aumento de la biomasa de macroorganismos asentados y adheridos, y también la abundancia y biomasa de microorganismos. Uno de los mecanismos más importantes de estas concentraciones es asociado con el desarrollo de una estructura multicapa de comunidades: el crecimiento de los macroorganismos resulta en un aumento de su superficie, lo que puede luego ser colonizado por microorganismos. Esto permite un se concentre aún más biomasa en la superficie inicialmente limitada. Los parámetros que afectan el desarrollo de biofilms, enumerados y esquematizados por (Wolfaardt, 1990), son: temperatura ambiente y del sistema, que están relacionadas con la estación, clima, velocidad y caudal de agua que pasa por la superficie, disponibilidad de nutrientes, rugosidad del material superficial, un pH del agua aproximadamente neutro y óptimo para el crecimiento de la mayoría de las bacterias formadoras de biofilms y por último la eficacia de las medidas de control del biofouling.
5. Eliminación: Mientras el depósito de biofouling se encuentre adherido a una superficie que esté expuesta a un flujo de agua con una velocidad determinada, como es el caso de los intercambiadores de calor, el flujo desprenderá parcial o totalmente de la superficie y arrastrará el organismo biótico, reduciendo el aumento material de la colonia en si, pero aumentando su diseminación por el sistema.

Este modelo de formación de biofouling propuesto por Railkin tiene la ventaja de que aplica de misma forma tanto a micro como a macroorganismos, si se aprueban unas determinadas características, las cuales se dan en el análisis propuesto en este trabajo. (Railkin, 2005)

Efectos del Biofouling

Los efectos del biofouling en el mundo marino son tan diversos como perjudiciales; en este análisis se expondrán los efectos generales que tiene sobre todo en el funcionamiento y dimensionamiento de los intercambiadores de calor, pero también se mencionara su efecto general en el entorno marino.

El biofouling supone frecuentemente un problema grave para conseguir las condiciones óptimas de funcionamiento en los intercambiadores de calor. Estos se

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

pueden clasificar en dos grupos diferentes: dificultades relacionadas con el desempeño de los equipos de proceso y costos adicionales.

Según el análisis propuesto por Characklis (Characklis, 1993), las dificultades en el desempeño de las funciones normales de un intercambiador de calor vienen dadas por el desarrollo de biofilm en el contorno de tuberías, aumentando dramáticamente la resistencia a la fricción del fluido (y la turbulencia) para fluir, incluso en conductos de gran diámetro. El Biofouling afecta al flujo al menos de tres maneras: reduciendo el área de la sección transversal disponible para el flujo, aumentando la rugosidad de la superficie y aumentando la resistencia en virtud de sus propiedades viscoelásticas. Generalmente, el factor que más contribuye es el aumento de la rugosidad, que se ve magnificado por organismos filamentosos que se establecen en el biofilm. A medida que el biofilm se desarrolla en el conducto, sucederá que, a velocidad constante del fluido, la caída de presión aumentará y con una caída de presión constante, la velocidad del fluido disminuirá. Aun así, una velocidad constante del fluido se puede mantener en muchos sistemas de bombeo incluso aunque la caída de presión está aumentando, a costa de potencia de bombeo. Con el desarrollo del biofilm, el caudal disminuye y causa graves problemas operacionales, hasta el momento que llega a la fase de eliminación, donde los cambios no afectan significativamente al sistema.

Los costos adicionales, los cuales intentan paliar las consecuencias ocasionadas por la reducción de la eficiencia del primer problema, son más variados; según Thackery (Thackery, 1980):

1. El sobredimensionamiento de las superficies de intercambio para paliar el efecto del Biofouling puede variar sustancialmente, pero suele ser del 30%, costando un capital adicional del 25%.
2. Como resultado de la superficie adicional, los intercambiadores de calor se vuelven más grandes y pesados. Por lo tanto, se deben considerar los costos de superficies más sólidas donde se emplacen, espacio adicional y mayores costos de transporte e instalación.
3. Los costes de mantenimiento, en los cuales se cuentan el tiempo que el sistema este parado para realizar mantenimiento, conllevan: el coste de los productos químicos usados para destruir las capas, el coste per se de mantener sistema parado sin producir durante el tiempo de mantenimiento, los costes de personal cualificado para llevar a cabo el mantenimiento etc.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Alrededor del 15% de los costes de mantenimiento general podrían atribuirse a intercambiadores de calor y calderas y el 50% de ellos probablemente se debían al Biofouling. (Thackery, 1980).

El Biofouling en el entorno marino, además de los efectos específicos en el análisis llevado a cabo, tiene efectos más generales y de mucha importancia, cuestiones relacionadas con la salud humana, la ecología marina y el medio ambiente también son motivo de preocupación. El efecto del Biofouling en los ecosistemas acuáticos es importante ya que altera la riqueza de especies y la diversidad genética de las mismas. Aunque se discutan e implementen varias pautas para el manejo de especies marinas invasoras, la invasión de especies de diferentes áreas geográficas continúa presentando un impacto negativo en la biodiversidad global ya que se pueden generar nuevas interacciones entre especies exóticas y nativas, afectando el ciclo natural y los eventos naturales específicos de las especies endémicas.

Indirectamente, el biofouling afecta también en el cambio climático, la contaminación ambiental y el calentamiento global debido a la contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero promovidas por el aumento de la resistencia hidrodinámica, la fricción de embarcaciones y barcos y al aumento de la cantidad de fuel que se debe de usar. (Romeu & Mergulhão, 2023)

Soluciones propuestas

Se han ido utilizando varias estrategias para mitigar los efectos del biofouling. Estos enfoques pueden prevenir y/o retrasar el desarrollo de biofilms y la adhesión de macrofouling, que constan de: superficies antimicrobianas, antibiofilm y antifouling, o el control de biofilms y colonizaciones ya establecidas. Las metodologías de control implican el uso de bacteriófagos, enzimas, desinfectantes y tecnologías de limpieza. Se debe de evaluar una variedad de criterios para seleccionar la estrategia de antifouling más adecuada, incluida la efectividad, la seguridad, la bioprotección, la compatibilidad con los materiales de los dispositivos/equipos y la viabilidad. La efectividad implica evaluar la actividad y concentración de la actividad antifouling y el tiempo de exposición requerido. (Romeu & Mergulhão, 2023)

La estrategia antifouling debe ser segura para el medio ambiente, así como no exacerbar el riesgo de la liberación y establecimiento de especies no autóctonas. Además, la estrategia antifouling debe ser compatible con el propio equipo para evitar

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

dañar los sistemas u otros componentes de los equipos a la vez de ser rentable y cumplir con los requisitos de infraestructura. Dado que la adhesión celular y la formación de biofilms son pasos primordiales para el macrofouling, el enfoque más prometedor para mitigar el biofouling es retrasar y controlar los eventos de microfouling, sin embargo, los métodos para llevar este enfoque a la práctica todavía se están desarrollando para obtener la eficiencia necesaria en los intercambiadores de calor marinos.

El análisis de Maria João Romeu ofrece un gran repertorio de soluciones para el biofouling en el mundo naval, ofreciendo estrategias empleadas contemporáneamente, sus ventajas y limitaciones (Romeu & Mergulhão, 2023):

1. Superficies y/o recubrimientos antimicrobianos, antibiofilms y antifouling: Incluye compuestos (nanopartículas de cobre, zinc, plata, moléculas inmovilizadas que se activan al contacto, moléculas activadas por la luz) capaces de reducir el crecimiento de incrustaciones, disminuir la capacidad de formar y desarrollar biofilms y reducir la adhesión de organismos más contaminantes (antifouling). Probablemente represente el método más rentable contra el Biofouling marino.
2. Desinfectantes y/o tratamientos químicos: Los mecanismos de acción de los desinfectantes dependen del tipo, pero incluyen el daño y pérdida de la integridad estructural de la pared celular y de la colonia, la fuga de componentes intracelulares y la prohibición de la replicación celular.
3. Limpieza manual: comúnmente empleadas antes de otros tratamientos e incluyen la eliminación física mediante cepillado, raspado, limpieza a presión con chorro de agua y limpieza mecánica con paños. Es el método comúnmente más usado en intercambiadores de calor de placas marinas al poder realizarse en dique seco o navegando, y a la gran concentración de macrofouling que pueden presentar. Este método conlleva menos riesgos toxicológicos y ambientales, pero está asociado con reducción del tiempo de operación comercial de los sistemas y el casco de los barcos. No es del todo factible cuando se aplica a sensores con componentes sensibles.
4. Radiación UV: Este sistema usa LED de luz ultravioleta para eliminar microorganismos para evitar la contaminación biológica, aunque la radiación conduce a la formación de subproductos tóxicos tamaño micro y la

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

incorporación no ha sido práctica debido a los altos requisitos de energía. Es muy efectivo contra determinadas especies de bacteria y disminuye la masa de biofouling, aunque actualmente es más adecuado como tratamiento previo que como estrategia final contra el biofouling marino, (López-Galindo, Casanueva, & Nebot, 2010) siendo su uso mayoritario el tratamiento del agua de lastre de organismos.

5. Inversión de flujo: Tratamiento físico que consiste en cambiar el sentido de circulación del líquido con mayor flujo con el fin de remover el biofouling adherido a las paredes. Su efectividad radica en aplicar un esfuerzo cortante proveniente de la circulación en sentido contrario del flujo al que está habituado a sufrir el organismo, ya que en esta situación no está preparado para resistir la misma fuerza de la corriente. La instalación debe disponer de un sistema de válvulas y tuberías que permitan invertirlo. Es uno de los métodos más usados actualmente para combatir el biofouling en intercambiadores de calor de placas en barcos.

1.4.2. Ecuaciones de Conservación

Antes de comenzar con la derivación de las ecuaciones básicas que describen el comportamiento del fluido, puede ser conveniente aclarar qué significa el término "dinámica de fluidos": es la investigación del movimiento interactivo de un gran número de partículas individuales. Eso significa que asumimos que la densidad del fluido es lo suficientemente alta como para poder aproximarla como un continuo. Esto implica que incluso un elemento del fluido infinitamente pequeño (en el sentido del cálculo diferencial) todavía contiene un número suficiente de partículas, para las cuales podemos especificar la velocidad media y la energía cinética media. De esta forma, podemos definir velocidad, presión, temperatura, densidad y otras cantidades importantes en cada punto del fluido.

La derivación de las ecuaciones principales de la dinámica de fluidos se basa en el hecho de que el comportamiento dinámico de un fluido está determinado por las siguientes leyes de conservación, a saber:

1. la conservación de la masa
2. la conservación del momento
3. la conservación de la energía

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

La conservación de una cierta cantidad de fluido significa que su variación total dentro de un volumen arbitrario puede expresarse como el efecto neto de la suma de la cantidad que se transporta a través del límite, de cualquier fuerza y fuente interna, y de las fuerzas externas que actúan sobre el volumen. La suma de las cantidades que cruzan el contorno se llama flujo. El flujo se puede descomponer en general en dos partes diferentes: una debida al transporte convectivo del fluido y otra debida al movimiento molecular presente en el fluido en reposo. Esta segunda contribución es de naturaleza difusiva, es decir, es proporcional al gradiente de la cantidad considerada y desaparecerá en una distribución homogénea.

Ecuación de conservación la masa.

Si restringimos nuestra atención a los fluidos monofásicos, la ley de conservación de la masa expresa el hecho de que la masa no puede crearse ni puede desaparecer en el sistema.

Para derivar la ecuación de continuidad, considere el modelo de un volumen de control finito fijo en el espacio. En un punto de la superficie de control, la velocidad del flujo es \vec{v} , el vector normal unitario es \vec{n} , y dS denota un área de superficie elemental. La cantidad conservada en este caso es la densidad ρ . Para la variación temporal de la masa total dentro del volumen finito Ω tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega \quad (1)$$

El flujo másico de un fluido a través de alguna superficie fija en el espacio es igual al producto de densidad \times área de superficie \times componente de velocidad perpendicular a la superficie. Por lo tanto, la contribución del flujo convectivo a través de cada elemento de superficie dS se convierte en:

$$\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dS \quad (2)$$

Dado que si por convección, \vec{n} siempre apunta fuera del volumen de control, hablamos de entrada si el producto $(\vec{v} \cdot \vec{n})$ es negativo, y de salida si es positivo y por tanto la masa sale del volumen de control.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (3)$$

La ecuación 3 representa la forma integral de la ecuación de continuidad: la ley de conservación de masa.

Ecuación de conservación del momento

Se puede comenzar con la derivación de la ecuación de momento recordando la forma específica de la segunda ley de Newton, que establece que la variación del momento es causada por la fuerza neta que actúa sobre un elemento de masa. Esto se aplica al momento de una porción infinitesimal del volumen de control Ω :

$$\rho \vec{v} d\Omega \quad (4)$$

La variación en el tiempo del momento dentro del volumen de control es igual a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega \quad (5)$$

Por tanto, la cantidad conservada es el producto de la densidad y la velocidad, es decir:

$$\rho \vec{v} = [\rho u, \rho v, \rho w]^T \quad (6)$$

El tensor de flujo convectivo, encargado de describir la transferencia de momento a través del límite del volumen de control, está compuesto, en el sistema de coordenadas cartesianas, por las siguientes tres componentes:

Componente x: $\rho u \vec{v}$

Componente y: $\rho v \vec{v}$

Componente z: $\rho w \vec{v}$

La contribución del tensor de flujo convectivo a la conservación del momento se expresa mediante:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$- \oint_{\partial\Omega}^0 \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (7)$$

El flujo difusivo es nulo, ya que no hay difusión de momento posible para un fluido en reposo. Por lo tanto, la pregunta que queda es: ¿a qué fuerzas está expuesto el elemento de fluido? Se pueden identificar dos tipos de fuerzas que actúan sobre el volumen de control.

Fuerzas externas al volumen o fuerzas corporales, que actúan directamente sobre la masa del volumen. Estas incluyen, por ejemplo, fuerzas gravitatorias, de flotación, Coriolis o centrífugas. En ciertos casos, también puede haber fuerzas electromagnéticas presentes.

Fuerzas superficiales, que actúan directamente en la superficie del volumen de control, provienen únicamente de dos fuentes:

- La distribución de presión impuesta por el fluido que rodea el volumen,
- Las tensiones de corte y normales resultantes de la fricción entre el fluido y la superficie del volumen.

La contribución de la fuerza externa a la conservación del momento es:

$$\int_{\Omega}^0 \rho \vec{f}_e d\Omega \quad (8)$$

Por tanto, si ahora sumamos todas las aportaciones anteriores y donde $\bar{\tau}$ es el tensor de fuerzas viscosas, según la ley general de conservación:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega}^0 \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega}^0 \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \\ &= \int_{\Omega}^0 \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega}^0 \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega}^0 (\bar{\tau} \cdot \vec{n}) dS \end{aligned} \quad (9)$$

Se obtiene la expresión para la conservación del momento dentro de un volumen de control arbitrario que está fijo en el espacio.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Ecuación de conservación de la energía

El principio subyacente que se aplicará en la derivación de la ecuación de energía es la primera ley de la termodinámica. Aplicada al volumen de control, establece que cualquier cambio en el tiempo de la energía total dentro del volumen es causado por la tasa de trabajo de las fuerzas que actúan sobre el volumen y por el flujo neto de calor hacia él. La energía total por unidad de masa E de un fluido se obtiene sumando su energía interna por unidad de masa e a su energía cinética por unidad de masa $\frac{|\vec{v}|^2}{2}$.

Así, podemos expresar la energía total como:

$$E = e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \quad (10)$$

La cantidad conservada en este caso es la energía total por unidad de volumen, es decir, ρE . Su variación en el tiempo dentro del volumen Ω se puede expresar como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E \, d\Omega \quad (11)$$

Usando los mismos métodos que en la ecuación del momento, se puede especificar fácilmente la contribución del flujo convectivo como:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \quad (12)$$

A diferencia de las ecuaciones de continuidad y momento, ahora hay un flujo difusivo. Como ya se mencionó, es proporcional al gradiente de la cantidad conservada por unidad de masa. Dado que el flujo difusivo \vec{F}_D está definido para un fluido en reposo, solo la energía interna se vuelve efectiva y obtenemos:

$$\vec{F}_D = \gamma \rho \kappa \nabla e \quad (13)$$

Donde γ representa la relación de capacidades caloríficas específicas $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, donde C_p es la capacidad calorífica a presión constante y C_v es la capacidad calorífica a volumen constante y κ denota el coeficiente de difusividad térmica.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

El flujo de difusión representa una parte del flujo de calor hacia el volumen de control, es decir, la difusión de calor debido a la conducción térmica molecular (transferencia de calor debido a gradientes de temperatura). Por lo tanto, generalmente se expresa en forma de la ley de conducción del calor de Fourier:

$$\vec{F}_D = -k \nabla T \quad (14)$$

donde k es el coeficiente de conductividad térmica y T es la temperatura estática absoluta. La otra parte del flujo neto de calor hacia el volumen de control finito consiste en la diferencia térmica volumétrica debido a la absorción o emisión de radiación, o debido a reacciones químicas.

Se denominarán a las fuentes de calor, es decir, la tasa de transferencia de calor por unidad de masa, como q_h . Junto con la tasa de trabajo realizada por las fuerzas corporales \vec{F}_E , que se introducirán en la ecuación de momento, completa las entradas volumétricas:

$$Q_v = \rho \vec{F}_E \cdot \vec{v} + q_h \quad (15)$$

La última contribución a la conservación de la energía, que aún se debe de determinar, son las fuentes superficiales Q_s . Estas corresponden a la tasa de trabajo realizada por la presión, así como las tensiones de corte y normales sobre el elemento de fluido:

$$Q_s = -\rho \vec{v} + \vec{\tau} \cdot \vec{v} \quad (16)$$

Utilizando la siguiente relación general entre la entalpía total, la energía total y la presión:

$$H = h + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = E + \frac{p}{\rho} \quad (17)$$

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Organizando ahora todas las contribuciones y términos anteriores, obtenemos la expresión final para la ecuación de conservación de energía:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega}^0 \rho E \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega}^0 \rho H(\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \\
 = \oint_{\partial\Omega}^0 k(\nabla T \cdot \vec{v}) \, dS + \int_{\Omega}^0 (\rho \vec{F}_E \cdot \vec{v} + q_h) \, d\Omega \\
 + \oint_{\partial\Omega}^0 (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} \, dS
 \end{aligned} \tag{18}$$

Así, se han derivado formulaciones integrales de las tres leyes de conservación: la conservación de masa, de momento y de energía.

1.4.3. Ecuaciones de Navier- Stokes

Este set de ecuaciones derivadas con anterioridad conforma las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega}^0 \rho \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega}^0 \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega}^0 \rho \vec{v} \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega}^0 \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \\
 = \int_{\Omega}^0 \rho \vec{f}_e \, d\Omega - \oint_{\partial\Omega}^0 \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS + \oint_{\partial\Omega}^0 (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) \, dS \\
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega}^0 \rho E \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega}^0 \rho H(\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \\
 = \oint_{\partial\Omega}^0 k(\nabla T \cdot \vec{v}) \, dS + \int_{\Omega}^0 (\rho \vec{F}_E \cdot \vec{v} + q_h) \, d\Omega \\
 + \oint_{\partial\Omega}^0 (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} \, dS
 \end{aligned} \tag{19}$$

Con el propósito de unificar las leyes de Navier-Stokes, se aplicará la ley general de conservación para una cantidad vectorial y se introducirá dos vectores de flujo, denominados \vec{F}_C y \vec{F}_V siendo el primero el transporte convectivo de calor en el fluido. Suele denominarse vector de flujos convectivos, aunque para la ecuación de momento

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

y la ecuación de energía también incluye los términos de presión $\rho \vec{n}$ y $\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})$, respectivamente.

El segundo vector de flujo, llamado vector de flujos viscosos \vec{F}_V contiene las tensiones viscosas, así como la difusión de calor. Además, se define un término fuente \vec{Q} , que comprende todas las fuentes volumétricas debido a fuerzas internas y calentamiento volumétrico.

Usando las previas aplicaciones y realizando el producto escalar con el vector normal \vec{n} unitario:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{W} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{F}_C - \vec{F}_V) dS = \int_{\Omega} \vec{Q} d\Omega \quad (20)$$

Donde el vector de variables conservadoras \vec{W} consiste en:

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}$$

Y el vector de e flujos convectivos:

$$\vec{F}_C = \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + n_x p \\ \rho v V + n_y p \\ \rho w V + n_z p \\ \rho H V \end{bmatrix}$$

Con la velocidad contra variante V , la velocidad normal al elemento de superficie dS , definida como el producto escalar del vector de velocidad y el vector normal unitario:

$$V \equiv \vec{v} \cdot \vec{n} = n_x u + n_y v + n_z w \quad (21)$$

Para el vector de flujos viscosos:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$\vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ n_x \tau_{xx} + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz} \\ n_x \tau_{yx} + n_y \tau_{yy} + n_z \tau_{yz} \\ n_x \tau_{zx} + n_y \tau_{zy} + n_z \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

Y finalmente el término fuente:

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho f_{e,x} \\ \rho f_{e,y} \\ \rho f_{e,z} \\ \rho f_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h \end{bmatrix}$$

Esta ecuación representa la conservación de las variables conservativas (Ecuaciones de la conservación) en un dominio tridimensional $d\Omega$ en un instante de tiempo específico dS , usada generalmente en análisis de CFD. (Blazek, 2007) Para más información específica de los cálculos que realiza el programa ANSYS les remito a la metodología.

1.4.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Los fluidos y los fenómenos relacionados pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales parciales (o integro-diferenciales), que no pueden resolverse analíticamente excepto en casos especiales. Para obtener una solución numérica aproximada, debemos utilizar un método de discretización que aproxime las ecuaciones diferenciales mediante un sistema de ecuaciones algebraicas, que luego se puede resolver usando el poder computacional. Las aproximaciones se aplican a pequeños dominios en el espacio y/o el tiempo, por lo que la solución numérica proporciona resultados en ubicaciones discretas en el espacio y el tiempo. Así como la exactitud de los datos experimentales depende de la calidad de las herramientas utilizadas, la exactitud de las soluciones numéricas depende de la calidad de las discretizaciones utilizadas. (Ferziger, Street, & Perić, 2020)

Las ventajas del CFD están condicionadas a poder resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con precisión, lo cual es extremadamente difícil para la mayoría de los fluidos de interés en ingeniería. Si no se es capaz de obtener soluciones precisas para todos los flujos, tenemos que determinar qué podemos producir y aprender a analizar y juzgar los resultados. En primer lugar, se debe tener en cuenta que los resultados

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

numéricos siempre son aproximados. Hay razones para las diferencias entre los resultados calculados por CFD y la "realidad", es decir, surgen errores en cada parte del proceso utilizado para producir soluciones numéricas.

Cuando las ecuaciones gobernantes se conocen con precisión (las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos newtonianos incompresibles), en principio se pueden lograr soluciones con cualquier precisión deseada. Sin embargo, para muchos fenómenos (por ejemplo, turbulencia, combustión y flujo multifásico), las ecuaciones exactas no están disponibles o la solución numérica no es viable. Esto hace que sea necesaria la introducción de modelos. Incluso si resolvemos las ecuaciones exactamente, la solución no sería una representación correcta de la realidad, por lo que, para validar los modelos, debemos basarnos en datos experimentales. Incluso cuando el tratamiento exacto es posible, a menudo se necesitan modelos para reducir el costo.

Dentro del amplio campo de la dinámica de fluidos computacional se encuentran actividades que cubren el rango desde la automatización de métodos de diseño de ingeniería bien establecidos hasta el uso de soluciones detalladas de las ecuaciones de Navier-Stokes como sustitutos de la investigación experimental sobre la naturaleza de flujos complejos. La gama es tan amplia como el propio campo de la mecánica de fluidos, por lo que es imposible abarcar todo el CFD en un solo trabajo: la dinámica de fluidos computacional se ha abierto camino en la ingeniería mecánica, de procesos, química, civil, medioambiental y naval, y es un componente importante de todos los aspectos de la ciencia atmosférica, desde la previsión meteorológica hasta el cambio climático.

Breve explicación histórica del CFD

La historia de los CFDs comienza a principios de los años 1970. Por esa época, se convirtió en un acrónimo de la combinación de física, matemáticas numéricas y, hasta cierto punto, ciencias de la computación, todas empleadas para simular fluidos. Los inicios del CFD fueron provocados por la disponibilidad de poder computacional cada vez más avanzados, por ello los avances en el CFD están estrechamente vinculados a la evolución de la tecnología informática.

A principios de la década de 1980, se hicieron viables las soluciones de ecuaciones de Euler bidimensionales (2-D) y luego tridimensionales (3-D). Gracias al rápido aumento de la velocidad de las supercomputadoras y al desarrollo de una variedad de

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

técnicas de aceleración numérica, fue posible calcular flujos no viscosos. A mediados de la década de 1980, la atención comenzó a desplazarse hacia simulaciones significativamente más exigentes de flujos viscosos regidos por las ecuaciones de Navier-Stokes.

En los años 90, empresas dedicadas a la creación de software, como Fluent, STAR-CD, y CFX, comenzaron a ofrecer soluciones más robustas para la simulación de flujos. Estos programas proporcionaron interfaces de usuario más amigables y capacidades de modelado más avanzadas, lo que facilitó que se adoptaran los CFDs con más facilidad en más tipos de campos de la tecnología, por lo cual comenzaron a integrarse más completamente en el proceso de diseño de productos. Las simulaciones de fluidos se convirtieron en una etapa estándar para evaluar el rendimiento de diseños antes de la fabricación física. Esto ayudó a reducir costos y tiempos de desarrollo al permitir identificar y abordar problemas en las etapas iniciales del diseño.

Del 2000 en adelante, gracias a la enorme evolución de poder computacional y a su democratización en gran parte del mundo con la oferta de ordenadores, se han experimentado cambios notables en varios aspectos: se ha avanzado en la capacidad de realizar simulaciones multifísicas, que involucran la interacción de múltiples fenómenos físicos simultáneamente, optimización de la topología y la forma de los diseños utilizando las simulaciones para explorar diversas configuraciones y seleccionar aquellas que cumplen mejor con los criterios de rendimiento y eficiencia y, como curiosidad, los CFDs han encontrado aplicaciones en la simulación de flujos biológicos, como la sangre en vasos sanguíneos o el flujo de aire en los pulmones.

Debido a las crecientes exigencias en cuanto a complejidad y fidelidad de las simulaciones de fluidos, los métodos de generación de mallado se volvieron cada vez más sofisticados. El desarrollo comenzó primero con mallas estructuradas relativamente simples, construidas mediante métodos algebraicos o utilizando ecuaciones diferenciales parciales. Pero con la creciente complejidad geométrica de las configuraciones, los mallados tuvieron que dividirse en varios bloques topológicamente más simples. Más adelante en el trabajo se analizarán los mallados contemporáneos.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD
Componentes elementales de un análisis numérico

Modelo matemático

El punto de partida de cualquier método numérico es el modelo matemático: el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales o integro-diferenciales y condiciones de contorno. Se elige un modelo apropiado para la aplicación objetivo (incompresible, no viscoso, turbulento; bidimensional o tridimensional, etc.). Estos modelos incluyen simplificaciones de las leyes de conservación exactas y generalmente se diseña un método de solución para un conjunto particular de ecuaciones. Intentar producir un método de solución de propósito general, que sea aplicable a todos los flujos, es altamente impráctico, si no imposible, y, como ocurre con la mayoría de las herramientas de propósito general, generalmente no son óptimas para ninguna aplicación en particular.

Método de discretización

Después de seleccionar el modelo matemático, hay que elegir un método de discretización adecuado, un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales mediante un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en algún conjunto de ubicaciones discretas en el espacio y el tiempo.

Hay muchos enfoques, pero los más importantes son: métodos de diferencias finitas (FD), volúmenes finitos (FV) y elementos finitos (FE). Cada tipo de método produce la misma solución si la malla es muy fina. Sin embargo, algunos métodos son más adecuados para algunas clases de problemas que otros. La preferencia suele estar determinada por la elección del ingeniero.

Sistemas de coordenadas y vectores base

Las ecuaciones de conservación se pueden escribir de muchas formas diferentes, según el sistema de coordenadas y los vectores base utilizados. Por ejemplo, se pueden seleccionar sistemas de coordenadas cartesianos, cilíndricos, esféricos, curvilíneos, ortogonales o no ortogonales, que pueden ser fijos o móviles. La elección depende del flujo objetivo y puede influir en el método de discretización y el tipo de malla que se utilizará.

También hay que seleccionar la base en la que se definirán los vectores y tensores (fijos o variables). Dependiendo de esta elección, el vector de velocidad y el tensor de

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

tensión se pueden expresar en términos de, por ejemplo, componentes cartesianos, físicos o no físicos orientados a coordenadas.

Mallado

Las ubicaciones discretas en las que se calcularán las variables están definidas por la cuadrícula numérica que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el que se resolverá el problema. Divide el dominio de la solución en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.). Hay diversas formas de formar un mallado, pero con el fin de la concreción y de la brevedad, se explicará el más usado para los análisis numéricos de todo tipo, y el específico usado en este trabajo.

1. Mallado estructurado (Regular):

Esta es la estructura de mallado más simple, porque es equivalente a una cuadrícula cartesiana. Cada punto tiene cuatro vecinos más cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones. Esta conectividad simplifica la programación y la matriz del sistema de ecuaciones algebraicas tiene una estructura regular, que puede explotarse en el desarrollo de una técnica de solución.

La desventaja del mallado estructurado es que sólo pueden usarse para dominios de soluciones geoméricamente simples. Otra desventaja es que puede resultar difícil controlar la distribución de los puntos de la cuadrícula: la concentración de puntos en una región por razones de precisión produce espacios innecesariamente pequeños en otras partes del dominio de la solución y un desperdicio de recursos. Este problema se exagera en las geometrías 3D.

2. Mallado no estructurado

Para geometrías muy complejas, el tipo de mallado más flexible es aquel que puede ajustarse a un límite de dominio de solución arbitrario. En principio, estas cuadrículas podrían usarse con cualquier esquema de discretización, pero se adaptan mejor a los enfoques de volumen finitos y elementos finitos. Este mallado no está estructurado a lo largo de la pared, pero está estructurado y es casi ortogonal en la dirección normal de la pared, lo que permite una aproximación más precisa de la capa límite, otorgando mayor rendimiento y exactitud en los contornos. Para conservar los beneficios de la malla estructurada en la región cercana a la pared, la mayoría de las herramientas

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

modernas de generación de cuadrículas también pueden crear capas de prismas a lo largo de los límites.

Los elementos o volúmenes de control podrán tener cualquier forma pues tampoco existe una restricción en el número de elementos o nodos vecinos. En la práctica, las más utilizadas son cuadrículas formadas por triángulos, cuadriláteros o polígonos arbitrarios en 2D, y tetraedros, hexaedros o poliedros en 3D.

Con la disponibilidad de métodos automáticos de generación de mallas para geometrías complejas, las mallas no estructuradas se han convertido en la regla y no en la excepción.

Aproximaciones finitas

Tras la elección del tipo de malla, hay que seleccionar las aproximaciones que se utilizarán en el proceso de discretización. En un método de diferencias finitas, se deben seleccionar aproximaciones para las derivadas en los puntos de la cuadrícula. En un método de volúmenes finitos, hay que seleccionar los métodos de aproximación de integrales de superficie y de volumen. En un método de elementos finitos, hay que elegir las funciones de forma (elementos) y las funciones de ponderación. Hay muchas posibilidades para elegir.

La elección influye en la precisión de la aproximación a la vez que afecta la dificultad de desarrollar el método de solución, codificación, depuración y la velocidad del código. Aproximaciones más precisas involucran más nodos y dan matrices de coeficientes más completas. El uso de mallado más pequeño o fino conlleva un aumento de la demanda de memoria y de poder computacional, lo que contrarresta parcialmente la ventaja de una mayor precisión. Es necesario llegar a un equilibrio entre simplicidad, facilidad de implementación, precisión y eficiencia computacional.

Método de solución

La discretización produce un gran sistema de ecuaciones algebraicas no lineales. El método de solución depende del análisis. Para fluidos inestables se utilizan métodos basados en los utilizados en problemas de valores iniciales para ecuaciones diferenciales ordinarias, es decir, en cada paso de tiempo se debe resolver un problema elíptico. Los problemas de flujo estacionario generalmente se resuelven mediante “pseudo time-step” o un esquema de iteración equivalente.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Como las ecuaciones no son lineales, se utiliza un esquema de iteración para resolverlas. Estos métodos utilizan linealización sucesiva de las ecuaciones y los sistemas lineales resultantes casi siempre se resuelven mediante técnicas iterativas. La elección del solucionador depende del tipo de malla y del número de nodos involucrados en cada ecuación algebraica.

Criterios de convergencia

Finalmente, es necesario establecer los criterios de convergencia para el método iterativo. Por lo general, hay dos niveles de iteraciones: iteraciones internas, dentro de las cuales se resuelven las ecuaciones lineales, e iteraciones externas, que se ocupan de la no linealidad y el acoplamiento de las ecuaciones. Es importante decidir el proceso iterativo en cada nivel, tanto desde el punto de vista de la precisión como de la eficiencia.

Conservación

Debido a que las ecuaciones a resolver son leyes de conservación, el análisis numérico también debería respetar estas leyes, tanto a nivel local como global. Esto significa que, en estado estacionario y en ausencia de entradas y salidas, la cantidad de fluido que sale de un volumen cerrado es igual a la cantidad que entra en ese volumen.

Esta es una propiedad importante del método de solución, porque impone una restricción al error de solución. Si se garantiza la conservación de la masa, el momento y la energía, el error sólo puede distribuir incorrectamente estas cantidades en el dominio del análisis.

Si se utiliza la forma de conservación fuerte de las ecuaciones y un método de volúmenes finitos, la conservación está garantizada para cada volumen de control individual y para el análisis en su conjunto. Otros métodos de discretización pueden volverse conservadores si se tiene cuidado en la elección de las aproximaciones.

Los esquemas no conservadores pueden producir entradas y salidas artificiales, cambiando el equilibrio tanto a nivel local como global. Sin embargo, los esquemas no conservadores pueden ser consistentes y estables y por tanto solo conducir a soluciones correctas en el límite de mallas muy finas. Los errores debidos a la falta de conservación son, en la mayoría de los casos, apreciables sólo en mallados relativamente grandes: el problema reside en que es difícil saber en qué parte del

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

mallado estos errores son lo suficientemente pequeños. Por lo tanto, se prefieren los esquemas conservadores, como los métodos de volúmenes finitos.

Exactitud

Las soluciones numéricas de problemas de flujo de fluidos y transferencia de calor son sólo soluciones aproximadas. Además de los errores que puedan introducirse en el curso del desarrollo del algoritmo de solución, al programar o establecer las condiciones de contorno, las soluciones numéricas siempre incluyen tres tipos de errores sistemáticos:

- Errores de modelado, que se definen como la diferencia entre el caudal real y la solución exacta del modelo matemático.
- Errores de discretización, definidos como la diferencia entre la solución exacta de las ecuaciones de conservación y la solución exacta del sistema algebraico de ecuaciones obtenida discretizando estas ecuaciones.
- Errores de iteración, definidos como la diferencia entre las soluciones iterativas y exactas de los sistemas de ecuaciones algebraicas.

Es importante ser consciente de la existencia de estos errores, y más aún tratar de distinguir unos de otros. Varios errores pueden anularse entre sí, de modo que a veces una solución obtenida en una cuadrícula gruesa puede concordar mejor con el experimento que una solución obtenida en una cuadrícula más fina que, por definición, debería ser más precisa.

Los errores de modelado dependen de los supuestos hechos al derivar las ecuaciones de momento para las variables. Para flujos turbulentos, los errores de modelado pueden ser muy grandes: la solución exacta de las ecuaciones del modelo puede ser cualitativamente incorrecta.

Mallado: qué es y su uso

Para formar un mallado en el espacio donde se va a calcular el flujo, el espacio físico o geometría, se divide en una gran cantidad de elementos geométricos llamados celdas de cuadrícula. Este proceso se denomina generación de malla. También se puede considerar como colocar los primeros puntos de la cuadrícula (también llamados nodos o vértices) en el espacio físico y luego conectarlos mediante líneas rectas: líneas de mallado.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Una cuadrícula bidimensional (2-D) se compone normalmente de triángulos y/o cuadriláteros y en tres dimensiones (3D), suele estar construida con tetraedros, hexaedros, prismas o pirámides.

Los requisitos más importantes que se imponen a una herramienta de generación de mallado son que no debe haber agujeros entre las celdas de la cuadrícula, pero también que las celdas de la cuadrícula no se superpongan. Además, la malla debe ser fina, es decir, no debe haber cambios bruscos en el volumen de las celdas de la rejilla ni en la relación de estiramiento, y los elementos deben ser lo más regulares posible.

Si la malla se compone de cuadriláteros o hexaedros, no debería haber grandes dobleces en las líneas de la cuadrícula. De lo contrario, los errores numéricos aumentarían significativamente.

La malla se puede generar para seguir de cerca los límites del espacio físico, como se explicó previamente. La principal ventaja de este enfoque es que el flujo se puede resolver con mucha precisión en los límites, lo cual es esencial en el caso del análisis térmico de cuerpos sólidos. El precio a pagar es un alto grado de complejidad de las herramientas de generación de mallado, especialmente en el caso de geometrías reales. Para concluir, el mallado se utiliza para construir volúmenes de control y evaluar las integrales de flujo, o para aproximar las derivadas espaciales de las cantidades de flujo.

En un paso posterior, las ecuaciones dependientes del tiempo resultantes se avanzan en el tiempo partiendo de una solución inicial conocida con ayuda de un método adecuado. La otra posibilidad es cuando las variables de flujo no cambian con el tiempo, la solución en estado estacionario de las ecuaciones gobernantes se puede encontrar mediante un proceso iterativo.

Método de discretización de volúmenes Finitos

Al ser el método de discretización usado por el programa en cuestión del análisis, el ANSYS Fluent, se procederá a realizar una explicación breve de en qué consiste. Se detallará brevemente la explicación ofrecida por Jiri Blazek, (Blazek, 2007)

El método de volúmenes finitos utiliza directamente las leyes de conservación: la formulación integral de las ecuaciones de Navier-Stokes/Euler. Se empleó por primera vez para la simulación de fluidos no viscosos en 2-D.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

El método de volúmenes finitos discretiza las ecuaciones de gobierno dividiendo primero el espacio físico en un número de volúmenes de control poliédricos arbitrarios. Luego, se aproxima la integral de superficie de la ecuación de Navier-Stokes mediante la suma de los flujos que cruzan las caras individuales del volumen de control, por lo que la precisión creada de la discretización espacial depende del esquema particular con el que se evalúan los fluidos.

La principal ventaja del método de volúmenes finitos es que la discretización espacial se realiza directamente en el espacio físico. Por lo tanto, no hay problemas con ningún tipo de transformación entre el sistema de coordenadas físico y computacional, como en el caso del método de diferencias finitas. Una ventaja adicional del método de volúmenes finitos es que es muy flexible: puede implementarse con bastante facilidad tanto en cuadrículas estructuradas como no estructuradas. Esto hace que el método de volumen finito sea particularmente adecuado para la simulación de flujos en o alrededor de geometrías complejas.

Existen varias posibilidades para definir la forma y posición del volumen de control con respecto al mallado. Se pueden distinguir dos enfoques básicos:

- Esquema celda-centro: Aquí las cantidades de flujo se almacenan en los centroides de las celdas de la cuadrícula. Por tanto, los volúmenes de control son idénticos a las celdas de la cuadrícula.

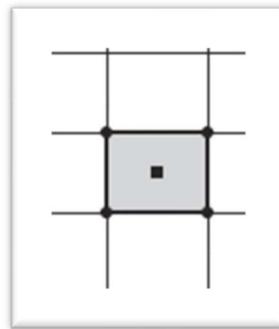


ILUSTRACIÓN 1: SE MUESTRAN LOS PUNTOS DEL MALLADO DONDE SE CALCULARÁN LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES. FUENTE: (BLAZEK, 2007)

- Esquema celda-vértice: Las variables de flujo se almacenan en los puntos de la cuadrícula. El volumen de control puede ser entonces la unión de todas las celdas que comparten el punto de la cuadrícula o algún volumen centrado alrededor del punto de la cuadrícula.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

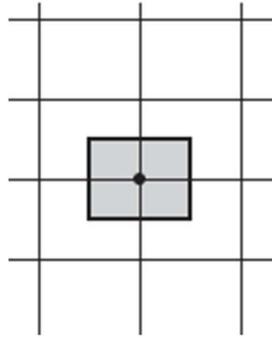


ILUSTRACIÓN 2: EN ESTE CASO, EL MALLADO FORMA LOS PUNTOS DONDE SE CALCULAN LAS ECUACIONES PERTINENTES. FUENTE: (BLAZEK, 2007)

En el primer caso hablamos de volúmenes de control superpuestos, en el segundo caso de volúmenes de control duales. En el análisis propuesto, solo se nombrará estas cualidades. En el caso de que se quiera profundizar y analizar en profundidad, les remito a la bibliografía. (Blazek, 2007)

Dado que el método del volumen finito se basa en la discretización directa de las leyes de conservación: masa, momento y energía también se conservan mediante el esquema numérico. Esto conduce a otra característica importante, a saber, la capacidad de calcular correctamente soluciones débiles de las ecuaciones gobernantes. Sin embargo, en el caso de la ecuación de Euler debe cumplirse una condición adicional conocida como condición de entropía.

La condición de entropía previene la aparición de características no físicas como choques de expansión, que violan la segunda ley de la termodinámica (por disminución de la entropía).

Debido a sus propiedades, el método de volúmenes finitos es hoy en día muy popular y de amplio uso en todos los programas de CFD.

ANSYS Fluent

Como breve introducción al programa, les cito el manual de ANSYS:

Fluent ofrece capacidades de modelado integral para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos, tanto incompresibles como compresibles, laminares y turbulentos. Se pueden realizar análisis en estado estacionario o transitorio. En ANSYS Fluent, se combinan una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de conducción (como transferencia de calor y reacciones químicas) con la capacidad de modelar

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

geometrías complejas. Ejemplos de aplicaciones de ANSYS Fluent incluyen flujos laminares no newtonianos en equipos de proceso; transferencia de calor conjugada en turbomáquinas y componentes de motores automotrices; combustión de carbón pulverizado en calderas de servicios públicos; aerodinámica externa; flujo a través de compresores, bombas y ventiladores; y flujos multifásicos. (ANSYS, 2022)

1.4.5 Teoría de la turbulencia en CFD

El programa ANSYS fluent utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes y las leyes de conservación previamente explicadas. Sin embargo, hay que hacer hincapié en como modela y simula el flujo turbulento, así como una explicación breve del mismo, pues altera de forma significativa el comportamiento físico de los fluidos.

La característica destacada de un flujo turbulento, en contraste con un flujo laminar, es que las moléculas se mueven de manera caótica a lo largo de trayectorias irregulares y complejas. (Ferziger, Street, & Perić, 2020) Este movimiento caótico provoca una intensa mezcla entre las diversas capas del fluido. Debido al aumento en el intercambio de momento y energía entre las moléculas y las paredes sólidas, el flujo turbulento provoca, en las mismas condiciones, una mayor fricción superficial y transferencia de calor en comparación con el flujo laminar.

Los efectos de la turbulencia actualmente son calculados y simulados de manera aproximada, habiendo sido desarrollados una amplia variedad de modelos de turbulencia, teniendo en cuenta el hecho de que no existe un solo modelo de turbulencia que pueda predecir de manera confiable todos los tipos de flujos turbulentos. Cada uno de los modelos tiene sus fortalezas y debilidades. Por ejemplo, si un modelo en particular funciona perfectamente en el caso de capas límites adheridas, puede fallar por completo en flujos multifásicos. (Ferziger, Street, & Perić, 2020) Un enfoque común de todos los modelos es promediar las ecuaciones que gobiernan el flujo, con el fin de centrarse en características del flujo a gran escala y no fluctuantes. Sin embargo, los efectos de las partes a pequeña escala y fluctuantes deben ser modelados también.

Con el fin de la brevedad, se explicarán las aproximaciones usadas por la mayoría de los modelos turbulentos y el modelo específico usado en el análisis. Primero, se deberán de reescribir las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, y, al ser este análisis de un fluido incompresible:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} &= -k \nabla^2 T \end{aligned} \quad (22)$$

con $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ siendo el coeficiente de viscosidad cinemática y ∇^2 denotando el operador Laplaciano. La ecuación para la temperatura T queda desacoplada de las ecuaciones de conservación de masa y momento, al no ejercer efectos de flotabilidad.

Aproximación de Reynolds

El primer enfoque para el tratamiento aproximado de flujos turbulentos fue presentado por Reynolds en 1895. La metodología se basa en la descomposición de las variables de flujo en una parte media y una parte fluctuante. Las ecuaciones gobernantes son entonces resueltas para los valores medios, que son los más relevantes para aplicaciones de ingeniería. Así, considerando un flujo incompresible, las componentes de velocidad y la presión en la ecuación 22 son sustituidas por:

$$\begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i + v'_i \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (23)$$

donde el valor medio se denota con una barra y las fluctuaciones turbulentas con un prime ('). Existen tres formas diferentes de aproximaciones de Reynolds:

1. Aproximación temporal: Aproximación para turbulencia estacionaria (turbulencia estadísticamente constante).

$$\bar{v}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_i dt \quad (24)$$

Como consecuencia, el valor medio v_i no varía en el tiempo, sino solo en el espacio.

2. Aproximación espacial: Apropiado para turbulencia homogénea.

$$\bar{v}_i = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} v_i d\Omega \quad (25)$$

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Siendo Ω un volumen de control. En este caso, v_i es uniforme en el espacio, pero se le permite variar en el tiempo.

3. Aproximación automática:

$$\bar{v}_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N v_i \quad (26)$$

El valor promedio \bar{v}_i sigue siendo una función del tiempo y de las coordenadas espaciales. Para los tres enfoques, el promedio de la parte fluctuante es cero, es decir, $\hat{v}_i = 0$.

Aproximación de Favre (masa)

En casos donde la densidad no es constante, es recomendable aplicar la aproximación ponderada por densidad (masa) o Aproximación de Favre a ciertas cantidades en la ecuación de Navier-Stokes en lugar de la aproximación de Reynolds. De lo contrario, las ecuaciones de gobierno aproximadas se volverían considerablemente más complicadas debido a correlaciones adicionales que involucran fluctuaciones de densidad. La manera más conveniente es emplear la aproximación de Reynolds para densidad y presión, y la aproximación de Favre para otras variables como velocidad, energía interna, entalpía y temperatura. (Favre, 1965)

Las cantidades promediadas de Favre, por ejemplo, las componentes de velocidad se obtienen a partir de la relación:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{\bar{\rho}} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \rho v_i dt \quad (27)$$

Donde $\bar{\rho}$ es la densidad promedio de Reynolds, Por lo tanto, la aproximación de Favre se expresa como:

$$v_i = \bar{v}_i + \hat{v}_i \quad (28)$$

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Donde \tilde{v}_i representa el valor promedio y \hat{v}_i la parte fluctuante de la velocidad v_i . Nuevamente, el promedio de la parte fluctuante es cero, es decir, $\overline{\hat{v}_i} = 0$. Se puede derivar las siguientes relaciones para una mezcla entre la aproximación de Favre y la de Reynolds:

$$\overline{\rho \tilde{v}_i} = \bar{\rho} \tilde{v}_i \quad ; \quad \overline{\rho \hat{v}_i} = 0 \quad (29)$$

RANS: Reynolds-averaged Navier-Stokes equations

Cuando se aplica la aproximación temporal o la Aproximación automática a las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtienen las siguientes relaciones de conservación de masa y momento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{\hat{v}_i \hat{v}_j}) \end{aligned} \quad (30)$$

Estas son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en Reynolds (RANS). El nuevo término se le denomina Tensor de esfuerzos de Reynolds

$$\tau^R_{ij} = -\rho \overline{\hat{v}_i \hat{v}_j} = \rho (\overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j) \quad (31)$$

El cual representa la transferencia de momento debido a fluctuaciones turbulentas. Las tensiones laminares viscosas se evalúan de acuerdo con

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu \bar{S}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (32)$$

La suma de las tensiones normales dividida por la densidad define la energía cinética turbulenta:

$$K = \frac{1}{2} \overline{\hat{v}_i \hat{v}_i} = \frac{1}{2} \left[\overline{(\hat{v}_1)^2} + \overline{(\hat{v}_2)^2} + \overline{(\hat{v}_3)^2} \right] \quad (33)$$

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

El problema fundamental de la modelización de la turbulencia basada en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en Reynolds es encontrar seis relaciones adicionales para resolver las ecuaciones RANS.

Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Favre y Reynolds

Según el análisis propuesto por Morkovin (Morkovin, 1964) La estructura de la turbulencia en una condición de contorno no se ve notablemente influenciada por las fluctuaciones de densidad si $\rho \ll \bar{\rho}$, lo cual se cumple en el análisis propuesto. Por lo tanto, se puede unir la aplicación de la aproximación de Reynolds a la densidad y la presión, y la aproximación de Favre a las variables restantes del flujo en las ecuaciones de Navier-Stokes en fluidos compresibles:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{v}_i) &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{v}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{v}_j \tilde{v}_i) &= -\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_j} (\tilde{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{v}_i \tilde{v}_j) \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{v}_j \tilde{H}) & \\
 &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \bar{\rho} \tilde{v}_j \tilde{h} + \tilde{v}_j \tau_{ij} - \bar{\rho} \tilde{v}_j K \right) \\
 &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\tilde{v}_i (\tilde{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{v}_i \tilde{v}_j) \right]
 \end{aligned} \tag{34}$$

Estas ecuaciones (34) se consideran las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Favre y Reynolds.

Para cerrar las ecuaciones promediadas de Favre y Reynolds, también se deben de proporcionar seis componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds aproximados por Favre y tres componentes del vector de flujo de calor turbulento.

Para más información específica de esta formulación, les remito a la bibliografía. (Wilcox, 2006)

Eddy Viscosity (Viscosidad Turbulenta)

Una de las contribuciones más significativas a la modelización de la turbulencia fue presentada en 1877 por Boussinesq (Boussinesq, 1897). Su análisis se basa en la

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

observación de que la transferencia de momento en un flujo turbulento está dominada por la mezcla causada por grandes torbellinos turbulentos energéticos. La hipótesis de Boussinesq asume que la tensión cortante turbulenta depende linealmente de la tasa de deformación media, como en un flujo laminar. El factor de proporcionalidad se denomina viscosidad turbulenta. La hipótesis de Boussinesq para el flujo compresible aproximado de Reynolds se expresa como:

$$\tau^R_{ij} = -\rho(\overline{v_i v_j}) = 2\mu_T \overline{S}_{ij} - \frac{2}{3} \rho K \delta_{ij} \quad (35)$$

Donde \overline{S}_{ij} es el tensor de velocidad de deformación aproximado de Reynolds, K es la energía cinética turbulenta y μ_T es la viscosidad turbulenta. A diferencia de la viscosidad molecular μ , la viscosidad turbulenta μ_T no representa ninguna característica física del fluido, sino que es una función de las condiciones locales del flujo. Además, μ_T también se ve fuertemente afectada por los efectos de la historia del flujo.

En el caso de las Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Favre y Reynolds, la hipótesis de viscosidad turbulenta de Boussinesq se expresa como:

$$\tau^F_{ij} = -\overline{\rho} \widetilde{v_i v_j} = 2\mu_T \overline{S}_{ij} - \left(\frac{2\mu_T}{3}\right) \frac{\partial \widetilde{v}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \overline{\rho} \widetilde{K} \delta_{ij} \quad (36)$$

Donde \overline{S}_{ij} y \widetilde{K} son la tasa de deformación aproximada de Favre y la energía cinética turbulenta. Sin embargo, el término $\frac{2}{3} \rho K \delta_{ij}$ se desprecia en relación con el modelo de turbulencia que se aplicará en el análisis.

Esta aproximación, que se utiliza comúnmente para la modelización del vector de flujo de calor turbulento, se basa en la clásica analogía de Reynolds (Reynolds, 1961):

$$\overline{\rho} \widetilde{v_j h} = -K_T \frac{\partial \widetilde{T}}{\partial x_j} \quad (37)$$

Siendo el coeficiente de conductividad térmica turbulenta K_T :

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$K_T = C_p \frac{\mu_T}{P_{r_T}} \quad (38)$$

La variable C_p es el coeficiente de calor específico a presión constante, y P_{r_T} es el número de Prandtl turbulento. En general, se asume que el número de Prandtl turbulento es constante en todo el campo de flujo.

Al aplicar este enfoque de viscosidad turbulenta a las ecuaciones de gobierno promediadas de Reynolds y Favre, el coeficiente de viscosidad dinámica μ en el tensor de esfuerzo viscoso se reemplaza por la suma de un componente laminar y un componente turbulento, es decir:

$$\mu = \mu_L + \mu_T \quad (39)$$

El concepto de viscosidad turbulenta de Boussinesq es muy atractivo ya que requiere únicamente la determinación de μ_T (la energía cinética turbulenta K necesaria para el término $\frac{2}{3} \rho K \delta_{ij}$ se obtiene ya sea como un subproducto del modelo de turbulencia o simplemente se omite). Una vez que conocemos la viscosidad turbulenta μ_T , se puede extender fácilmente las ecuaciones de Navier-Stokes para la simulación de flujos turbulentos mediante la introducción de variables de flujo promediadas y agregando μ_T a la viscosidad laminar. Por lo tanto, el enfoque de Boussinesq se convirtió en la base para una gran variedad de modelos de turbulencia de primer orden. Los modelos turbulentos de primer orden representan la forma más sencilla de aproximar los esfuerzos de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en Reynolds/Favre. En conclusión, la tarea de un modelo de turbulencia es calcular la viscosidad turbulenta μ_T .

Una mayor precisión en las predicciones se puede lograr mediante la aplicación de modelos de viscosidad turbulenta no lineales, pero dado que el análisis llevado a cabo y el modelo turbulento usado no lo requiere, no se explicará y solo se remitirá a la bibliografía. (Blazek, 2007).

2. METODOLOGÍA

2.1 Planta piloto: Diseño y condiciones de simulación.

La planta piloto se sitúa dentro de la Bahía de Santander, que contiene una zona portuaria, donde se está cargando y descargando mercancías buques mercantes de carga a granel, rodada y de pasaje. La zona contiene una gran variedad de fauna y flora acuáticas, lo que hace que sea un lugar idóneo para la generación de Biofouling, que, junto con los factores anteriormente descritos, agravan los efectos ocasionados en la infraestructura construida en la zona. (García Gomez, 2016).

2.1.1 Planta Piloto: Diseño

La geometría de los intercambiadores de calor tubulares consiste en un flujo a contraflujo de un solo paso, diseñado y fabricado de acuerdo con las pautas de la American Society of Mechanical Engineers (ASME VIII).

La carcasa externa tiene un diámetro externo de 0.140 m (espesor de 0.008 m) y se construyó según AISI 304 SS. La longitud de los tubos era de 3.1 m, con un diámetro interno de 0.010 m (espesor de 0.0015 m). Los tubos estaban hechos de AISI 316Ti y están dispuestos de forma lineal.

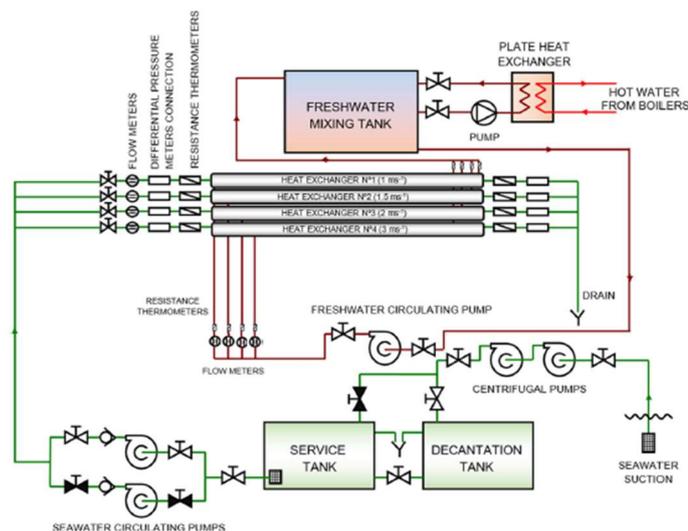


ILUSTRACIÓN 3: ESQUEMA-DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE LA CUAL SE HAN EXTRAÍDO LOS DATOS DEL ANÁLISIS. FUENTE: (BOULLOSA-FALCES, S. SANZ, GARCIA, TRUEBA CASTAÑEDA, & TRUEBA, 2022)

El agua de mar, utilizada como refrigerante, se extrae de la Bahía de Santander y posteriormente se filtra, decanta y bombea hacia los cuatro intercambiadores de calor

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

mediante bombas de circulación. La velocidad de flujo dirigida a los intercambiadores de calor se ajusta con válvulas de globo a velocidades de 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s y 3 m/s, utilizando dispositivos medidores de flujo de desplazamiento positivo. Entre la entrada y la salida de los tubos del intercambiador de calor se colocan termómetros de resistencia.

La tasa de circulación de agua dulce a través del lado de la carcasa se mantiene en $0.8 \frac{m^3}{h}$ mediante un medidor de flujo para todos los intercambiadores de calor. La temperatura de entrada del lado de la carcasa se mantiene a una temperatura constante de 36 °C gracias a un sistema de control automático proporcional-integral-derivativo. Este sistema actúa sobre una válvula de tres vías en el circuito primario, donde el agua a 80 °C proveniente de la sala de calderas libera calor en un intercambiador de calor de placas hacia el agua del circuito secundario. El agua dulce de salida es bombeada por una bomba centrífuga hacia un tanque de mezcla. Las temperaturas de entrada y salida del lado de la carcasa se miden mediante termómetros de resistencia. (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022).

El experimento se llevó a cabo durante 60 días durante la época del año en la que la actividad biológica era máxima (Garcia, Vega, Trueba, & Madariaga, 2016). Durante este período, las condiciones hidráulicas de los cuatro intercambiadores de calor se mantuvieron constantes. Los resultados experimentales obtenidos de pruebas de adhesión de biofilm utilizando la configuración experimental propuesta por (Garcia & Trueba, 2018) fueron usados para evaluar las diferencias entre el modelado CFD y los resultados experimentales, además de investigarse la transferencia de calor tanto mediante CFD usando el programa OpenFOAM como mediante la realización de experimentos en intercambiadores de calor reales. (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022)

2.1.2 Condiciones de simulación.

Los datos que ofrece este análisis experimental llevado a cabo en intercambiadores reales son los que se utilizarán para realizar una simulación del crecimiento de capas de Biofouling laminar en donde el proceso de crecimiento es simulado geoméricamente, es decir, la capa de Biofouling aumenta de grosor con el tiempo, lo que ofrece un modelo de simulación más acorde a la realidad.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Del análisis experimental de (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022), se obtendrán los datos reales de las capas de biofouling de resistencia termal $Rf \left(\frac{m^2k}{W} \right)$, conductividad termal $\gamma \left(\frac{W}{mk} \right)$ y grosor físico de la capa $t_n \left(\mu m \right)$.

Para la creación de la geometría de la simulación, se utilizó el CAD ofrecido por ANSYS: ANSYS Discovery, donde se construyeron únicamente dos cilindros concéntricos, con las medidas de la planta piloto, sin geometría solida entre ellos, uniando sus caras conjuntas formando una interfaz no geométrica:

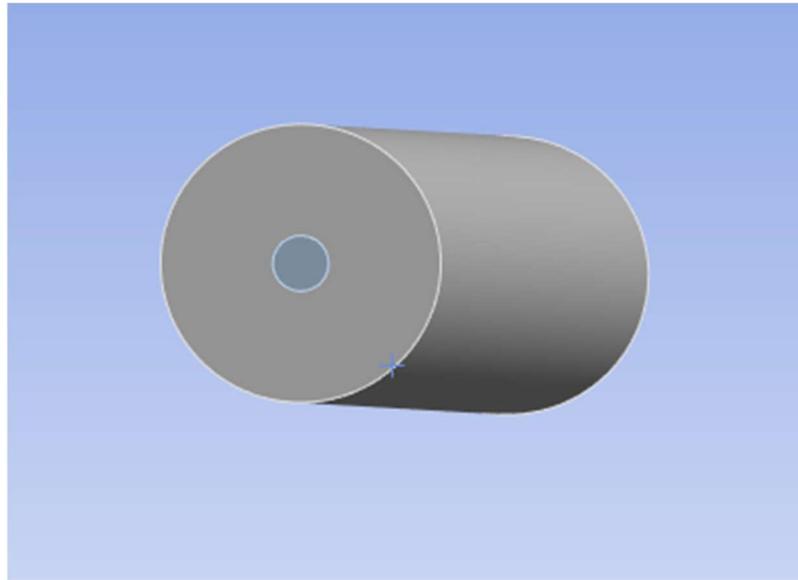


ILUSTRACIÓN 4: GEOMETRÍA USADA PARA LA SIMULACIÓN. EL CILINDRO INTERIOR ES AGUA DE MAR Y EL CILINDRO EXTERIOR AGUA DESTILLADA. FUENTE: PROPIA

Los cilindros formarán los espacios volumétricos de los flujos simulados, el interior formado por agua de mar y el exterior por agua destilada. La interfaz entre ellos se denominará “pared”.

Una vez realizado la simple construcción geométrica, se procederá a la creación del mallado con el programa ANSYS Spaceclaim:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

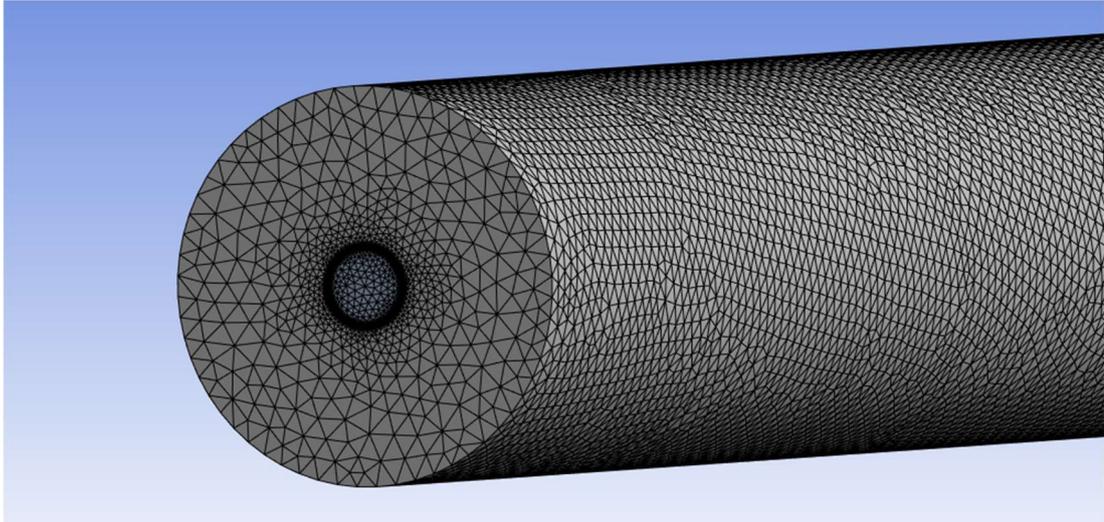


ILUSTRACIÓN 5: FORMA DEL MALLADO USADO. FUENTE: PROPIA

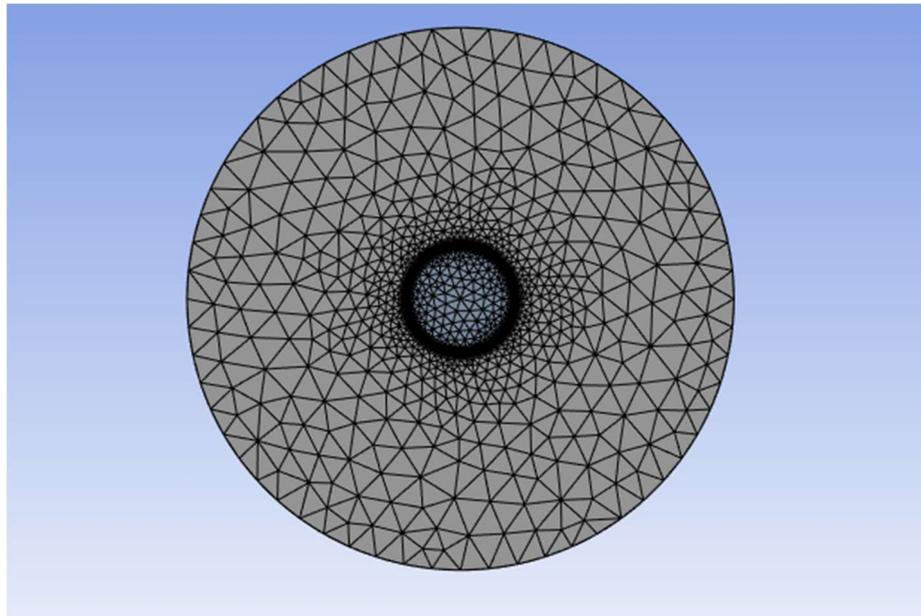


ILUSTRACIÓN 6: FORMA DEL MALLADO USADO. FUENTE: PROPIA

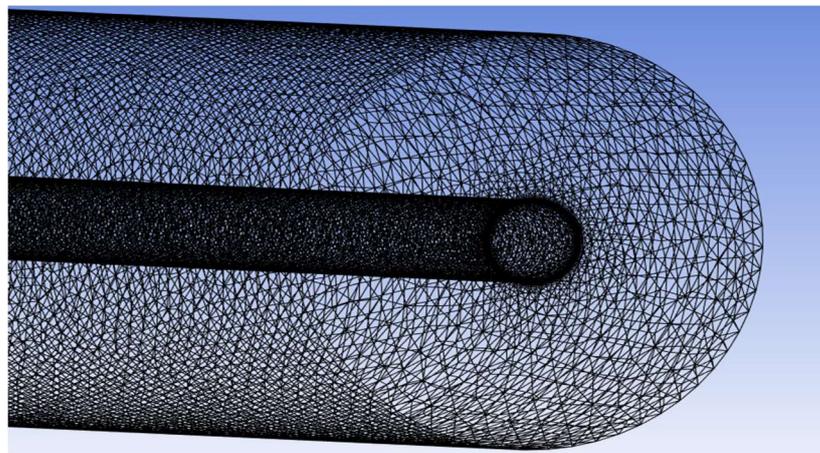


ILUSTRACIÓN 7: FORMA DEL MALLADO USADO, VISTA DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE MALLADO EN EL CILINDRO INTERIOR. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

En el mallado se decidió no crear una geometría sólida para simular el grosor de la tubería interior, pues al ser de un tamaño tan reducido (0.0015 m) en comparación con el tamaño de la geometría, la formación de un mallado útil computacionalmente que mantenga los valores adecuados de calidad ortogonal, oblicuidad y “*aspect ratio*” y que cumpla las condiciones de y^+ necesarias para realizar correctamente la simulación del modelo $K - \varepsilon$ es no solamente ineficaz, sino también absurdo, pues FLUENT ofrece un modelo de cálculo de interfaces por capas no geométricas que se explicará con atención más adelante.

Para obtener unos cálculos adecuados de intercambio de calor y de turbulencia en las condiciones de contorno, es necesario que el parámetro adimensional y^+ este en los valores adecuados, pues determina la precisión de la predicción del espesor de la capa límite. El programa FLUENT calcula este parámetro usando la siguiente formula:

$$y^+ = \frac{\mu_T y}{\nu} \quad (40)$$

Siendo μ_T la viscosidad turbulenta, y la distancia del centro de la celda a la capa límite, y ν la viscosidad cinemática. Previamente se explicó que el cálculo de la variable de viscosidad turbulenta es la tarea de los modos de turbulencia, por lo cual el parámetro adimensional y^+ solo se puede ajustar a los valores requeridos una vez se han realizado previos cálculos y simulaciones. Este método es tedioso, pues se debe de crear un mallado no tan fino como para que el poder computacional requerido para realizar los cálculos sea absurdo, a la vez que suficientemente fino como para que la simulación pueda calcular aceptablemente las ecuaciones de Navier-Stokes cerca de las condiciones de contorno y que los valores de calidad de mallado no se reduzcan de forma exponencial.

Para ello se utilizó el método de inflación, que crea celdas rectangulares próximas a la condición de contorno con un determinado coeficiente de transición, grosor de la capa y tasa de crecimiento. Para poder realizar los cálculos de intercambio de calor en la interfaz, el programa FLUENT requiere que el mallado en ambos lados de la interfaz sea conforme, es decir, igual. Por lo tanto, el método de inflación se usó con los mismos parámetros en ambas geometrías:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

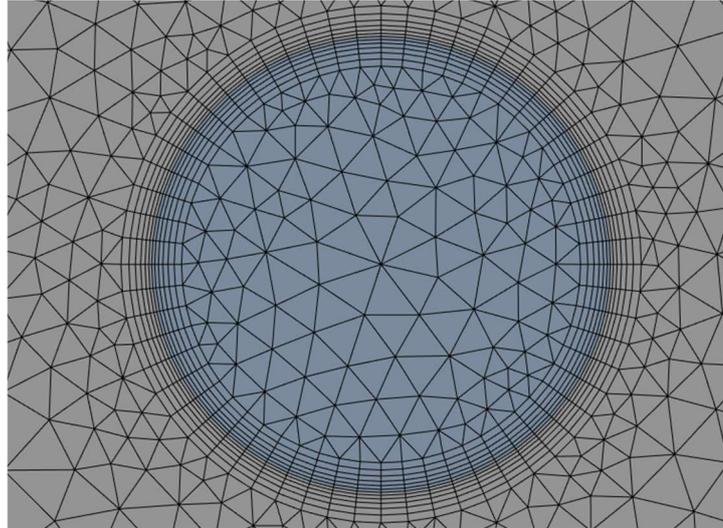


ILUSTRACIÓN 8: VISTA AMPLIADA DE LA CONFORMIDAD DE MALLADO EN LAS CERCANÍAS DE LA INTERFAZ ENTRE LAS DOS GEOMETRÍAS. FUENTE: PROPIA

Con esta formación de mallado, los valores de y^+ se encuentran en $y^+ \leq 30$ para las 4 simulaciones requeridas. Una vez se han conseguido los valores adecuados para que el modelo turbulento pueda calcularse de forma satisfactoria, se debe de revisar también los parámetros característicos de cualquier mallado dedicado a los CFDs:

Calidad ortogonal: Las celdas de peor calidad tendrán una calidad ortogonal cercana a 0, y las mejores celdas tendrán una calidad ortogonal más cercana a 1. La calidad media ortogonal del mallado es $\sim 0,8$ y es posible el análisis a partir de 0,2.

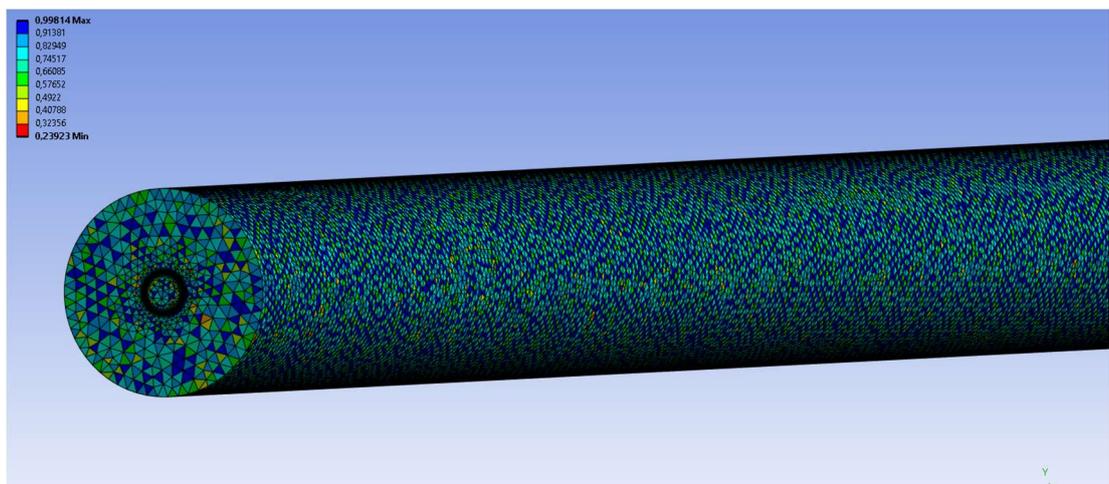


ILUSTRACIÓN 9: CALIDAD ORTOGONAL DE CADA CELDA DEL MALLADO USADO. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

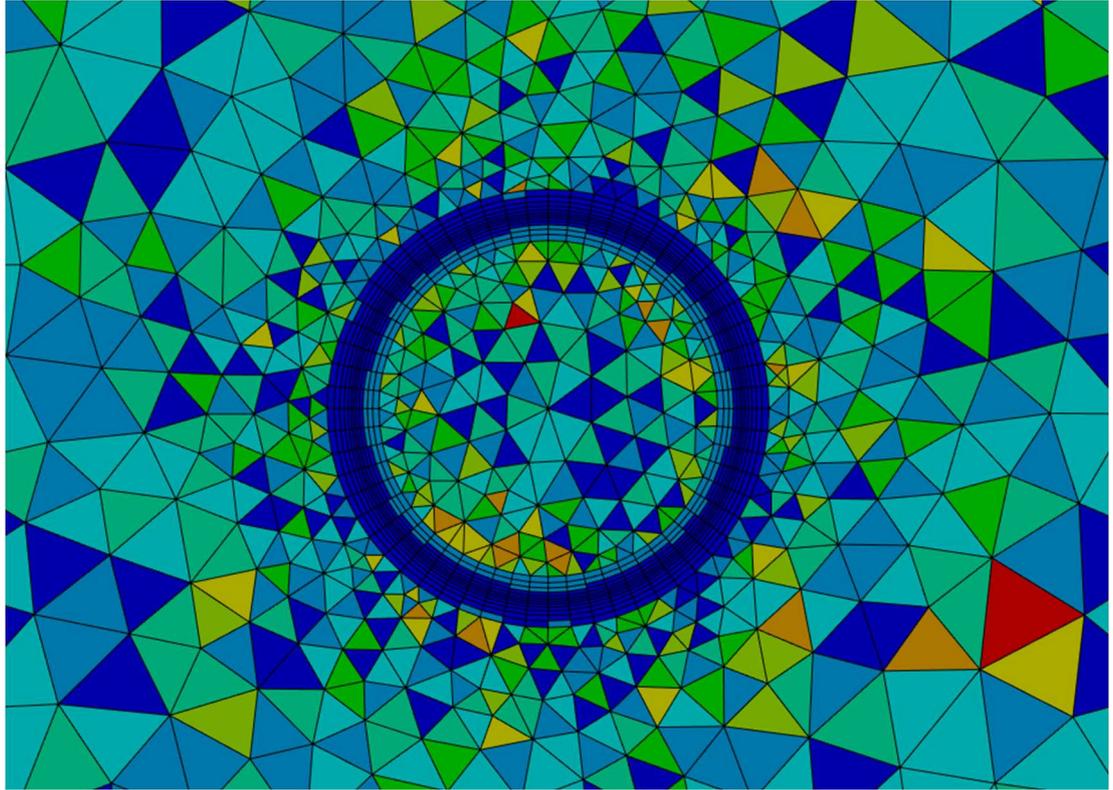


ILUSTRACIÓN 10: CALIDAD ORTOGONAL DE CADA CELDA DEL MALLADO USADO, AMPLIACIÓN DE LA INTERFAZ ENTRE LAS DOS GEOMETRÍAS. FUENTE: PROPIA

En las ilustraciones 9 y 10 se puede observar que la calidad ortogonal de las celdas más cercanas a la interfaz tiene la mayor calidad ortogonal, lo que otorga una mayor fuerza al cálculo de las ecuaciones de Navier-Stokes en las mismas.

Oblicuidad (Skewness): Disparidad entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas altamente asimétricas pueden reducir la precisión y desestabilizar la solución final.

Esta geometría y mallado se utilizaron en las 4 simulaciones para las diferentes velocidades, pues ofreció aceptables parámetros de y^+ en todas ellas.

2.1.3 Shell conduction (Conducción en capas)

FLUENT trata las paredes de espesor cero como si no presentara resistencia térmica al transferir calor a través de ellas. Si se especifica un espesor para las paredes, se impone la resistencia térmica correspondiente a través del espesor de la pared usando la conductividad térmica específica del material:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$Rf \left(\frac{m^2 k}{W} \right) = \frac{t (m)}{\gamma \left(\frac{W}{m k} \right)} \quad (41)$$

Aun así, la conducción se considera solo en la dirección normal de la pared. Sin embargo, para recrear una simulación lo más real posible, se debe de usar aplicaciones en las que la conducción en la dirección horizontal de la pared también forme parte, pues la conducción del calor en la realidad también existe entre las partículas del material. Para estas aplicaciones, puedes generar una malla para el espesor, lo cual no es posible en este análisis, o puedes utilizar el enfoque de conducción de capas (Shell conduction).

La conducción de capa se puede utilizar para modelar láminas delgadas sin la necesidad de generar un mallado para el espesor de la pared. Cuando se utiliza el enfoque de conducción de capas, tienes la capacidad de activar y desactivar fácilmente la transferencia de calor conjugada en cualquier pared.

Una vez se activa la conducción de capas por primera vez en cualquier superficie de la interfaz, Fluent genera las capas necesarias. Estas capas se numeran secuencialmente, comenzando por aquella más cercana a la superficie de la interfaz. Por lo tanto, se puede generar capas circulares en la interfaz sin geometría física ni mallado de forma satisfactoria con el grosor deseado, sin afectar de forma significativa al tiempo de simulación ni a la potencia computacional requerida:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

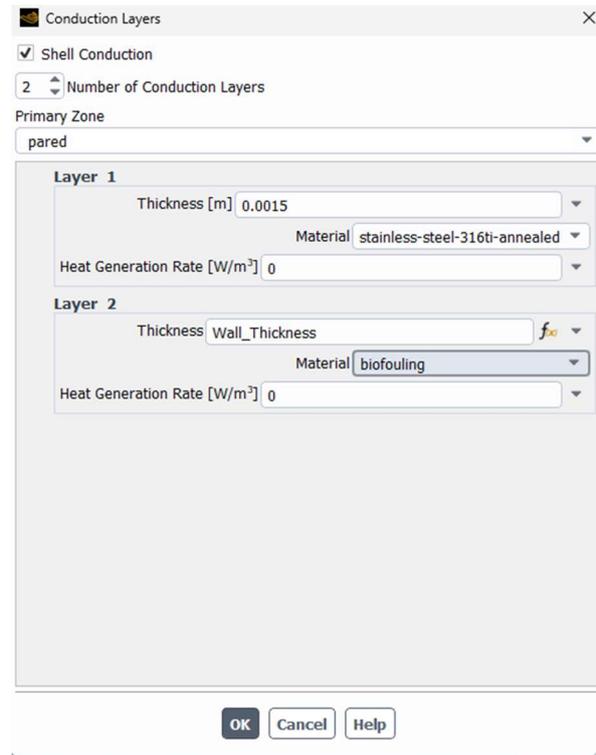


ILUSTRACIÓN 11: CAPAS SIMULADAS EN LA INTERFAZ DE "SHELL CONDUCTION" JUNTO CON SU GROSOR EN METROS Y SU MATERIAL CORRESPONDIENTE. FUENTE: PROPIA

Como se observa en la ilustración 11, la primera capa, que es la más cercana al agua destilada, tiene una capa de grosor de 0.0015m, que formaría el grosor de la tubería, y la segunda capa, cuyo material es el Biofouling, tiene incluida una expresión exponencial de curva de crecimiento logístico, o modelo de Verhulst, que simula el crecimiento de las capas de biofouling con el tiempo según el modelo de colonización explicado previamente:

$$Rf_{real} \left(\frac{m^2 k}{W} \right) = Rf_{Model} = \frac{Rf_{Max}}{v (1 + e^{-0.29(t-35)})} = \frac{t_n (m)}{\gamma \left(\frac{W}{m k} \right)} \quad (42)$$

Donde v es la velocidad del flujo, y los valores de Rf deben de ser iguales. Este modelo fue creado usando los valores reales de Rf , ya que, en el caso del análisis llevado a cabo, la conductividad térmica del Biofouling no se podía cambiar en función del tiempo y se ha debido de mantener constante. La variación de resistencia térmica formulada en el modelo de Verhulst, respecto a la original, tiene un coeficiente de correlación R^2 de 0.976295288 para 1 ms, 0.983973585 para 1.5 ms, 0.974204531 para 2 ms y 0.976475823 para 3 ms.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

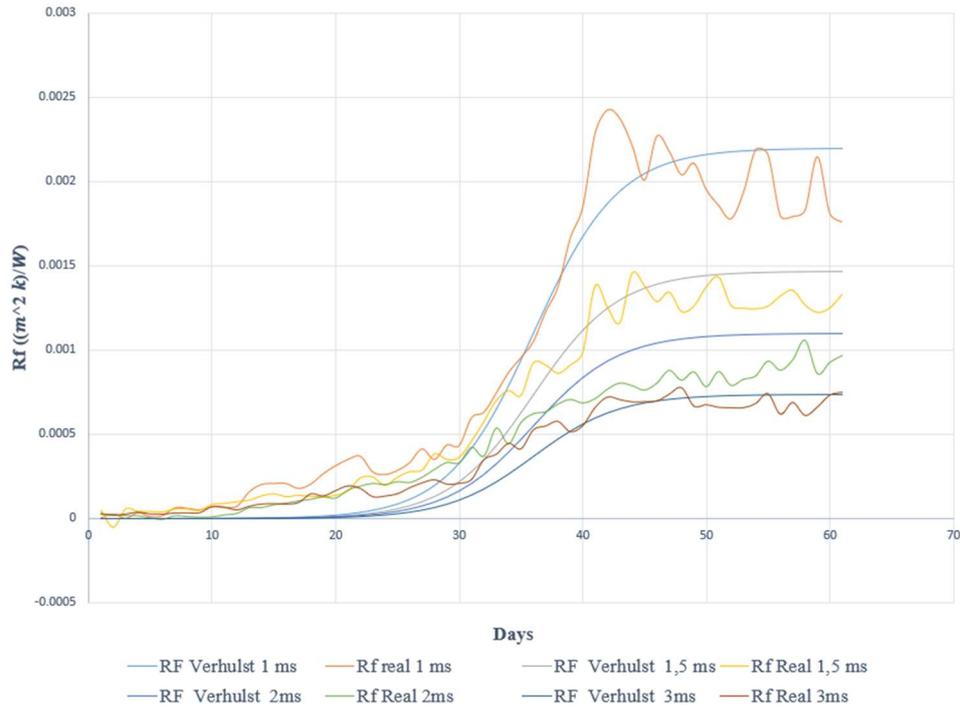


ILUSTRACIÓN 12: CURVAS EXPONENCIALES NATURALES DEL AUMENTO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA SIMULADA CON LOS DATOS REALES. FUENTE: PROPIA

2.2 Construcción de la capa de Biofilm

La decisión de usar los valores de Rf conseguidos experimentalmente para que durante el proceso de crecimiento, la capa de Biofouling simulada otorgue esos mismos valores, también se debe de tener en cuenta que los valores de la conductividad térmica no varían con el tiempo, pero deben de estar incluidos matemáticamente en el cálculo del crecimiento de la capa, es decir, los valores absolutos de crecimiento de la capa de Biofouling en la simulación no pueden ser los valores reales del experimento, pues estos últimos tienen, aparte de un crecimiento físico, un cambio en su conductividad termal propia. En este análisis esta variación de la conductividad termal no se ha podido realizar, pues requiere de unas características de aplicación de CFD bastante más avanzados de lo requerido para realizar este proyecto. Aun así, introduciendo el valor inicial de conductividad termal de la capa $\gamma = 0.625 \left(\frac{W}{m K} \right)$ como constante, y aumentando los valores del crecimiento del grosor de capa de Biofouling para que los valores de Rf de la simulación sean iguales en la media que los valores de Rf reales, se han podido obtener unos valores más que aceptables.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Usando los valores de Rf del modelo y con una conductividad térmica γ constante, los valores de Biofouling Wall_Thickness (Grosor de la capa de Biofouling) obtienen la siguiente forma:

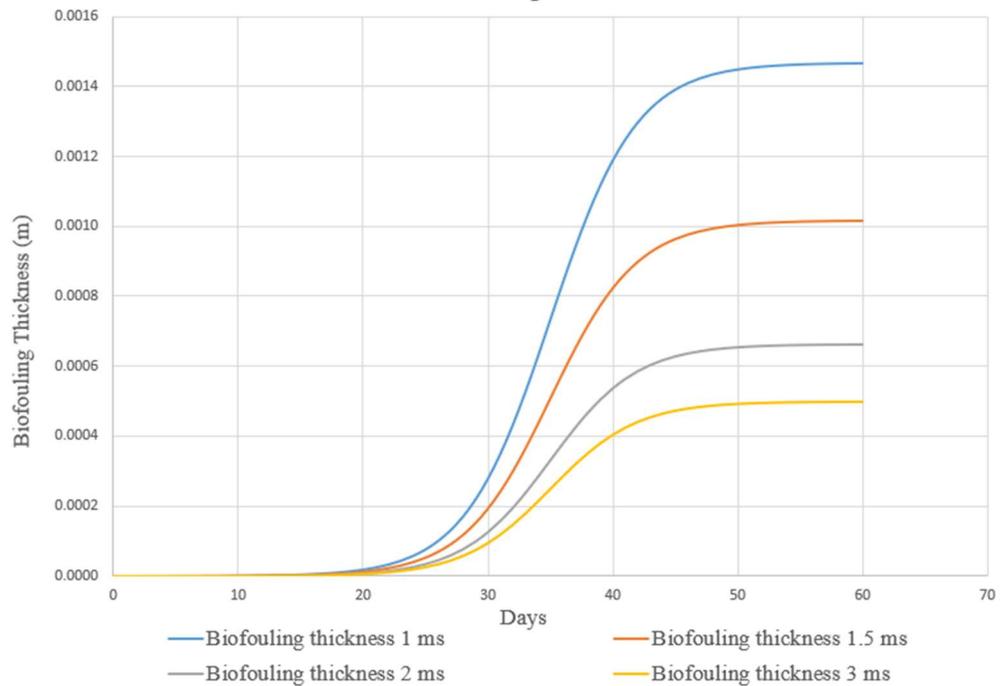


ILUSTRACIÓN 13: CURVAS EXPONENCIALES NATURALES SIGUIENDO EL MODELO DE VERHULST DE COLONIZACIÓN DE EL GROSOR A SIMULAR DE LA CAPA DE BIOFOULING. FUENTE: PROPIA

Cumpliendo el análisis de (Railkin, 2005) de colonización y proporcionando los mismos valores medios de Rf en la simulación que los obtenidos en los análisis experimentales.

Estas expresiones fueron introducidas en FLUENT por medio de 61 macros en cada una de las 4 simulaciones, donde se imponía en el “Shell conduction” el grosor de la capa de biofouling propio de cada día con los valores ofrecidos por las funciones de la ilustración 13, usando para la creación de esas macros una programación original en Python, que encontrarán al final del TFG junto con varios ejemplos de la morfología tipo de la macro usada. Este enfoque se hizo con el fin de poder sortear ciertos problemas de código del programa FLUENT que se debatirá con posterioridad, además de la falta de proyectos y análisis para validar esta perspectiva, pues en la actualidad no he encontrado ningún análisis ni proyecto llevado a cabo usando esta metodología.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

2.3 Modelo Turbulento $K - \varepsilon$

El modelo de turbulencia $K - \varepsilon$ es probablemente el modelo de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones más ampliamente utilizado. Se basa en la resolución de ecuaciones para la energía cinética turbulenta K y la tasa de disipación turbulenta ε .

Este modelo está basado en los trabajos iniciales de (Chou, 1945) y creado por (Launder & Jones, 1972). El modelo de turbulencia $K - \varepsilon$ requiere la adición de las llamadas funciones de amortiguación para ser válido a través de la subcapa viscosa del fluido hasta la pared. El objetivo de las funciones de amortiguación es asegurar un comportamiento límite adecuado de K y ε en la pared, es decir:

$$K \sim y^{+2} \quad y \quad \frac{\varepsilon}{K} \sim \frac{2\nu}{y^{+2}} \quad \text{si } y^+ \sim 0 \quad (43)$$

Siendo y^+ la distancia de la coordenada centro del elemento de mallado normal a la pared. Además, la tensión cortante turbulenta se asimila en:

$$\tau_{ij}^R \sim y^{+3} \quad \text{para } y^+ \sim 0$$

Las funciones de amortiguación dan lugar a ecuaciones de turbulencia con términos originales rígidos. Esto, junto con la necesaria alta resolución de la malla cerca de las paredes (para resolver la subcapa viscosa), requiere la utilización de esquemas de avance en el tiempo al menos parcialmente implícitos, o preferiblemente completamente implícitos, como el usado en el análisis.

Escrito en forma integral dependiente del tiempo para un volumen de control Ω con un elemento de superficie dS , el modelo de turbulencia $K - \varepsilon$ se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{W}_T d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{F}_{c,T} - \vec{F}_{v,T}) dS = \int_{\Omega} \vec{Q}_T d\Omega \quad (44)$$

Donde el vector de las variables conservadoras toma la forma,

$$\vec{W}_T = \begin{bmatrix} \rho K \\ \rho \varepsilon \end{bmatrix}$$

El vector de los flujos convectivos se define como:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

$$\vec{F}_{c,T} = \begin{bmatrix} \rho KV \\ \rho \varepsilon V \end{bmatrix}$$

Donde V denota la velocidad contra variante. El vector de los flujos viscosos está dado por:

$$\vec{F}_{v,T} = \begin{bmatrix} n_x \tau_{xx}^K & n_y \tau_{yy}^K & n_z \tau_{zz}^K \\ n_x \tau_{xx}^\varepsilon & n_y \tau_{yy}^\varepsilon & n_z \tau_{zz}^\varepsilon \end{bmatrix}$$

Donde $n_x n_y n_z$ representan los componentes del vector normal unitario dirigido hacia afuera de la superficie $\partial\Omega$. Los esfuerzos viscosos turbulentos normales siendo:

$$\begin{aligned} \tau_{xx}^K &= \left(\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \dots \\ \tau_{xx}^\varepsilon &= \left(\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{aligned} \tag{45}$$

El término fuente \vec{Q}_T se evalúa a partir de

$$\vec{Q}_T = \begin{bmatrix} P - \rho \varepsilon \\ (C_\varepsilon f_\varepsilon P - C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{K} + \Phi_\varepsilon \end{bmatrix} \tag{46}$$

Donde P forma el término de producción de la energía cinética turbulenta, definido como:

$$\begin{aligned} P &= \tau_{xx}^F \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yy}^F \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zz}^F \frac{\partial w}{\partial z} \\ &+ \tau_{xy}^F \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \tau_{xz}^F \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \tau_{yz}^F \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{47}$$

Donde $\tau_{xx}^F; \tau_{yy}^F \dots$ se calculan con la hipótesis de viscosidad turbulenta de Boussinesq. Las constantes, las funciones de amortiguamiento cerca de la pared, así como las especificaciones de termino de pared (Φ_ε) difieren entre los diversos modelos del modelo $K - \varepsilon$. Para más información, les remito a la bibliografía: (Patel, Rodi, & Scheurer, 1985).

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

2.2.1 Condiciones de Contorno e inicialización.

El enfoque más simple es inicializar K y ε con sus valores en el flujo libre. Una alternativa mejor consiste en prescribir perfiles para K y ε cerca de las geometrías sólidas. Sin embargo, esto requiere el conocimiento de y^+ , que pueden no estar fácilmente disponibles, como es el caso en mallas no estructuradas.

Las condiciones de contorno adecuadas en las paredes sólidas son $K = 0$; $\varepsilon = 0$, lo que también implica $\mu_T = 0$ en las paredes. En la frontera de entrada, es decir, las condiciones de contorno de entrada del fluido, K y ε pueden calcularse a partir de relaciones para la intensidad turbulenta y la escala de longitud turbulenta.

2.2.2 Condiciones de contorno en geometrías sólidas: y^+

El modelo $K - \varepsilon$ requiere de un mallado muy fino cerca de las fronteras físicas de la geometría. La condición estándar es que el primer nodo (o centro de celda en el mallado) debe estar ubicado a una distancia $y^+ \leq 1$ desde la pared.

Con el fin de reducir la rigidez de las ecuaciones de turbulencia y ahorrar un número de celdas en el mallado, se emplean mallas más gruesas con $1 \leq y^+ \leq 100$. Como es el caso de este análisis, el modelo de $K - \varepsilon$ se aplica sin las funciones de amortiguamiento y el término de pared $\Phi_\varepsilon = 0$. La distancia entre el primer nodo (centroide de la celda) y la pared debe de ser cubierta por las funciones de pared proporcionando los valores de K y ε en el centroide de la celda adyacente a la pared, consiguiendo que las ecuaciones de turbulencia no se resuelvan en la pared misma ni en la primera capa de las celdas.

La aplicación de las funciones de pared conduce (siempre que el mallado no sea demasiado grueso) a resultados razonablemente precisos para capas límite adheridas a geometrías sólidas. También permite la utilización de esquemas de paso de tiempo puramente explícitos (Blazek, 2007), como el usado en el análisis propuesto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acoplamiento Presión-Velocidad

En el análisis llevado a cabo, se utilizó el acoplamiento de presión-velocidad PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), el cual ofrece una gran estabilidad numérica en el cálculo de fluidos incompresibles transitorios, es decir, que la simulación tiene también en cuenta la variable del tiempo que los acoplamientos SIMPLE y SIMPLEX no emplean (Blazek, 2007) y se usa especialmente en casos donde la simulación tiene una gran duración temporal, en este caso de 60 días. Una de las limitaciones de los algoritmos SIMPLE y SIMPLEX en los cálculos temporales es que las nuevas velocidades y los flujos correspondientes formados por el paso del tiempo no satisfacen el equilibrio de momento después de resolver la ecuación de corrección de presión. Como resultado, el cálculo debe repetirse hasta que se satisfaga el equilibrio. Para mejorar la eficiencia de este cálculo, el algoritmo PISO realiza dos correcciones adicionales: la “Neighbor Correction” y “Skewness Correction”. (ANSYS, 2022). Estas correcciones ajustan los cálculos de las ecuaciones de la masa en cada celda volumétrica del mallado para proporcionar unos cálculos mas estables en celdas de mallado donde no se cumple de forma explícita las condiciones perfectas de cálculo, necesario en este análisis sobre todo en las velocidades de mayor magnitud.

El programa OpenFoam usado en los análisis propuestos por (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022) utilizan el método de acoplamiento de presión-velocidad PIMPLE, que combinan los acoplamientos SIMPLE y PISO. Este método funciona tal que, dentro de un único paso de tiempo, se busca una solución en estado estacionario, es decir, las ecuaciones usadas no tienen como variable el tiempo, mientras se aplica una estrategia de relajación de las ecuaciones. Después de encontrar la solución, avanzamos al siguiente paso de tiempo. Para lograr esto, se necesitan los llamados bucles de corrección externa para garantizar que todas las partes explícitas de las ecuaciones converjan. Después de alcanzar un criterio de tolerancia en el cálculo en estado estacionario, se sale del bucle de corrección externa y se avanza en el tiempo. Este proceso se repite hasta que se alcance el tiempo final de la simulación. (Holzmann, 2021)

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Sin embargo, estos criterios de tolerancia se pueden aplicar también en el programa ANSYS de forma explícita en cada ecuación de Navier-Stokes a calcular, es decir, puedes proponer un criterio de tolerancia en los cálculos solamente del flujo, y no de la energía o de la turbulencia, lo que estabiliza exponencialmente los cálculos de las ecuaciones de la energía y los efectos de la turbulencia mientras que relajas únicamente las ecuaciones del flujo, mucho menos interesantes en el análisis a realizar.

Condiciones y valoraciones previas

El método de usar como condición de contorno una interfaz sin mallado es propio y singular de este análisis, pues no es un método común en los análisis usando CFDs, y mucho menos la generación de un grosor con variable de tiempo dentro de esta interfaz. En las simulaciones propuestas por (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022), las geometrías físicas del grosor de la tubería y de la capa de biofouling se mantenían constantes y con un mallado singular no transitorio, pues es un enfoque mucho más sencillo de formar y que ofrece también resultados aceptables. Sin embargo, este análisis se enfocó en la simulación física de un crecimiento de una capa de biofouling durante el tiempo con el fin de realizar un análisis más similar al sucedido en la realidad. Este enfoque, relativamente original, conlleva realizar unas valoraciones de funcionalidad de dos elementos de máxima importancia en la simulación, el mallado volumétrico de los fluidos con especial interés en su interfaz conjunta y si la formación de turbulencia es acorde con el modelo turbulento usado junto con los comportamientos propios de la misma.

Antes de poder valorar los datos ofrecidos por la simulación, primero hay que hacer un estudio del comportamiento del mallado respecto al método turbulento, usando para ello los valores de y^+ previamente explicados, para que en la interfaz los cálculos de la transmisión de calor sean lo más exactos posibles. Este parámetro es calculado por Fluent para ambas partes de la interfaz, pues dependen de la turbulencia en el fluido, y por lo que serán valores diferentes para las 4 simulaciones a realizar:

Velocidad $\frac{m}{s}$	y^+ Interfaz Salada	y^+ Interfaz Destilada
1	4.3814957	1.1401577
1,5	6.2235934	1.1401632

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

2	8.0305913	1.140079
3	11.146548	1.140062

Como se ha explicado previamente, la interfaz sin mallado usando “Shell Conduction” no admite que ambos lados de la interfaz haya diferencias en el mallado contiguo, por lo tanto, con el fin de mantener unos cálculos numéricos estables y con un tiempo de cálculo admisible para la realización de este proyecto, se ha mantenido el mallado que ha ofrecido resultados más que admisibles, dado que y^+ todavía esta en el rango mínimo de $y^+ \leq 30$. El aumento de y^+ en la interfaz salada viene dada por el incremento proporcional del número de Reynolds (turbulencia) respecto a la velocidad.

Para valorar el comportamiento de la turbulencia, se puede observar fácilmente usando un diagrama x-y en una línea planar centrada en la entrada y la salida del agua de refrigeración, y visualmente con la intensidad turbulenta k usando contornos a la salida del agua de refrigeración para las 4 velocidades a simular:

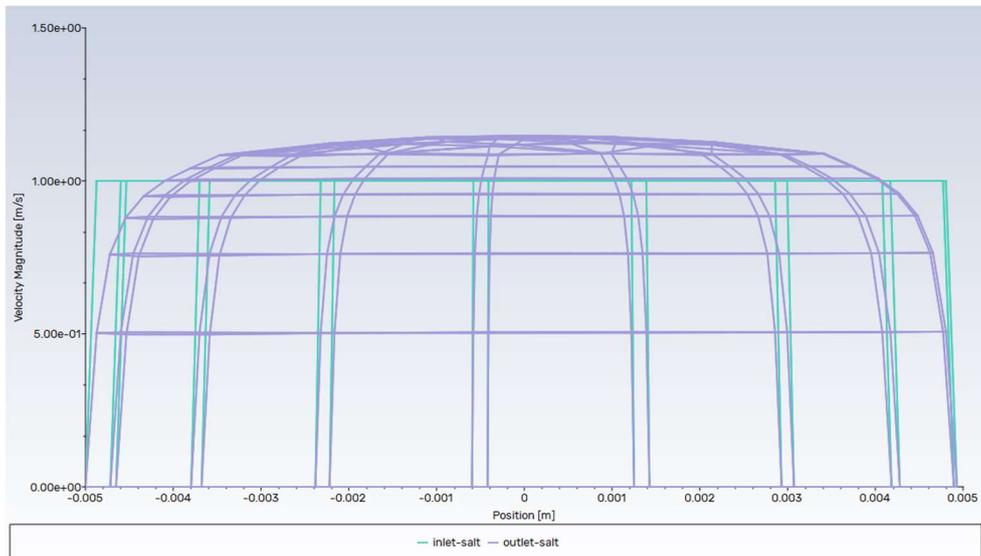


ILUSTRACIÓN 14: DIAGRAMA DE MAGNITUD DE VELOCIDAD (1 M/S) EN UNA LÍNEA DIAMETRAL CENTRADA EN LA ENTRADA Y LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

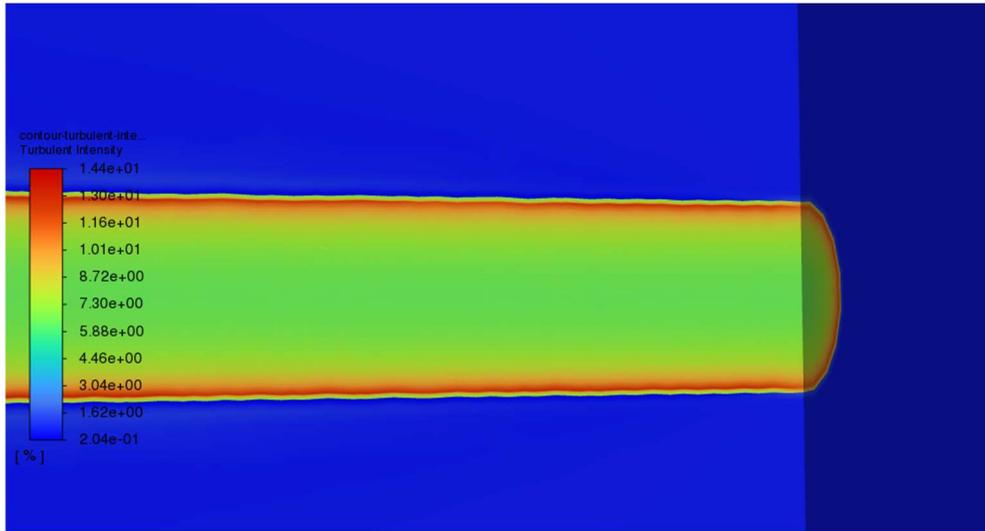


ILUSTRACIÓN 15: CONTORNOS DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA (1 M/S) UBICADO EN LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

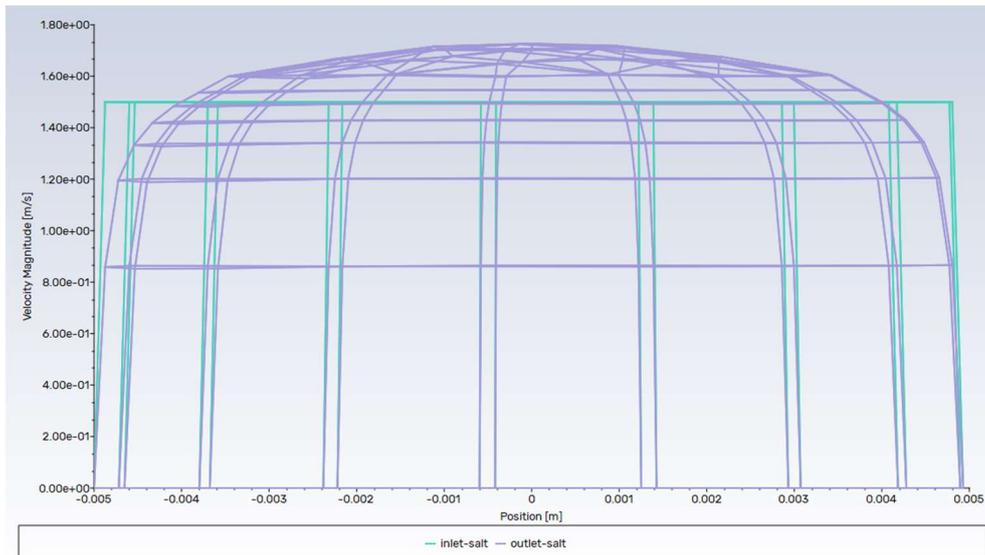
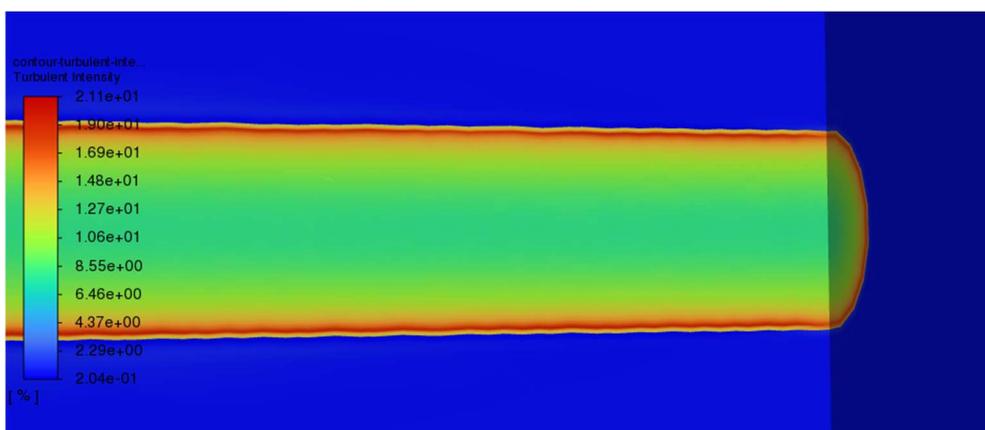


ILUSTRACIÓN 16: DIAGRAMA DE MAGNITUD DE VELOCIDAD (1.5 M/S) EN UNA LÍNEA DIAMETRAL CENTRADA EN LA ENTRADA Y LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA



Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

ILUSTRACIÓN 17: CONTORNOS DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA (1.5 M/S) UBICADO EN LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

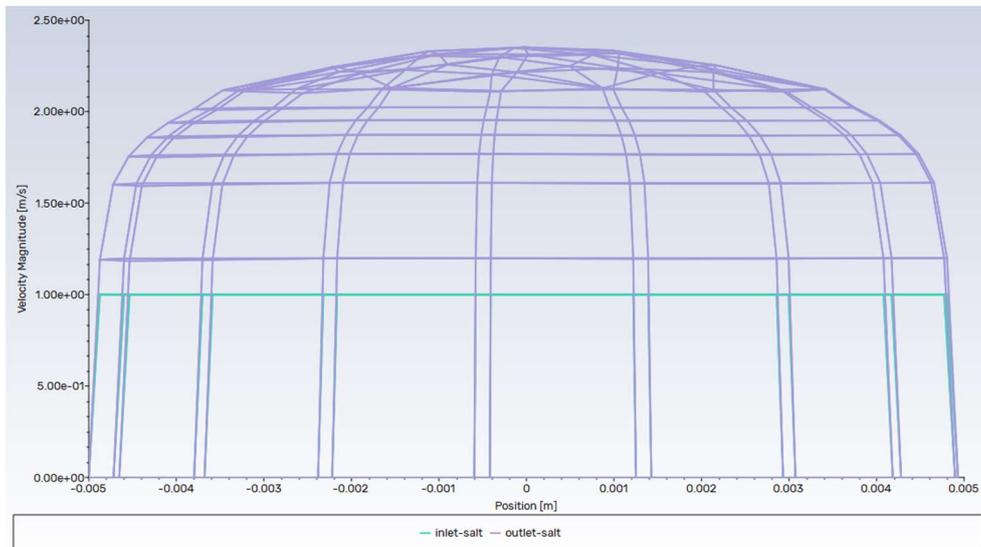


ILUSTRACIÓN 18: DIAGRAMA DE MAGNITUD DE VELOCIDAD (2 M/S) EN UNA LÍNEA DIAMETRAL CENTRADA EN LA ENTRADA Y LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

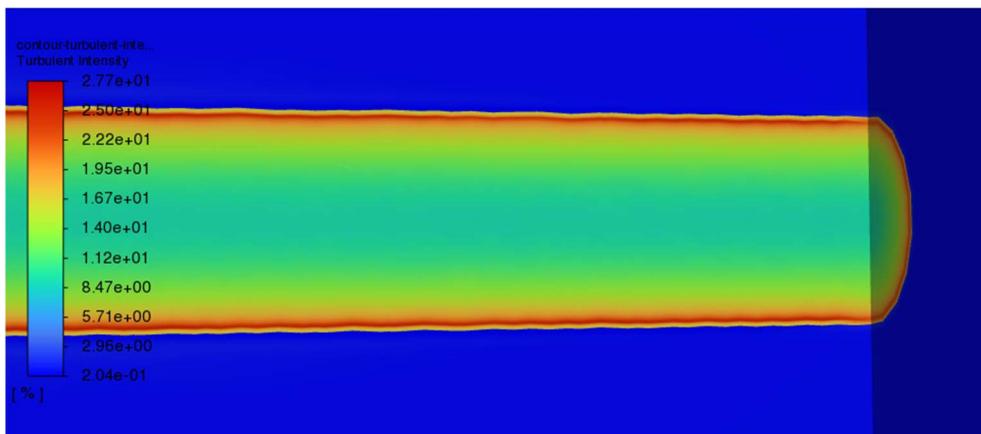


ILUSTRACIÓN 19: CONTORNOS DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA (2 M/S) UBICADO EN LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

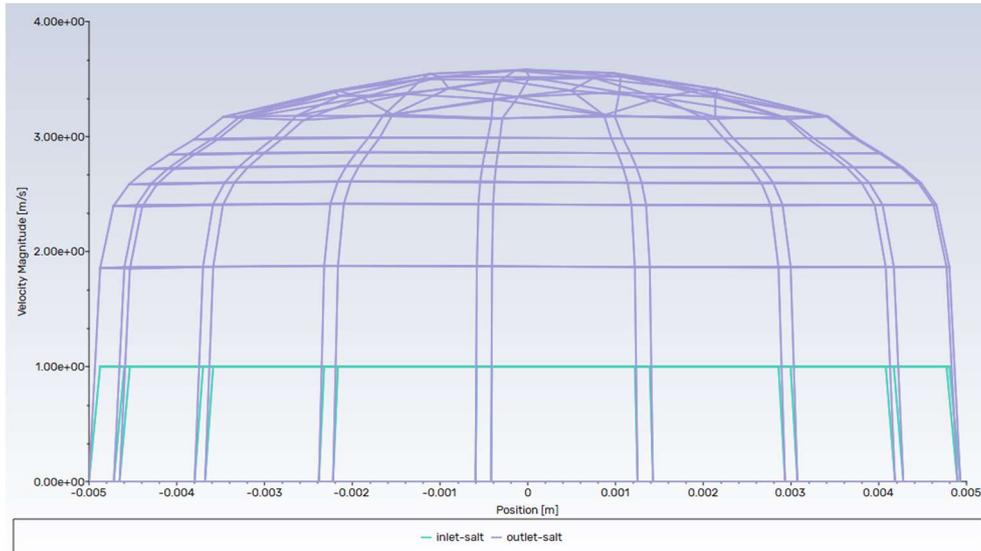


ILUSTRACIÓN 20: DIAGRAMA DE MAGNITUD DE VELOCIDAD (3 M/S) EN UNA LÍNEA DIAMETRAL CENTRADA EN LA ENTRADA Y LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

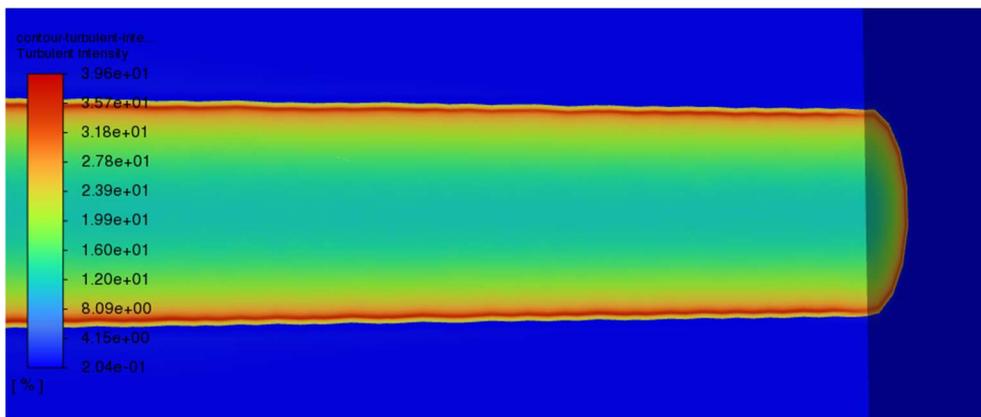


ILUSTRACIÓN 21: CONTORNOS DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA (3 M/S) UBICADO EN LA SALIDA DEL AGUA DE MAR. FUENTE: PROPIA

Como se puede observar en las ilustraciones de velocidad en la entrada y salida del agua de refrigeración, los valores de velocidad en los contornos es 0 y aumenta exponencialmente hasta el máximo de velocidad y turbulencia completamente desarrollada en el punto medio, a la vez que el parámetro de intensidad turbulenta y de energía cinética turbulenta K aumenta en los contornos mientras que disminuye en los valores más altos de velocidad, como se muestra en las imágenes de intensidad turbulenta. Por tanto, el comportamiento del modelo $K - \varepsilon$ es preciso en tanto en cuanto simula con precisión el comportamiento de la turbulencia en las diferentes partes del flujo y, por ende, ofrecerá resultados estables de intercambio de calor en las zonas turbulentas del flujo.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Valoración de datos obtenidos

Los datos para valorar en este análisis serán la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida en el tiempo respecto a los datos conocidos experimentales, entre otros, por su alta capacidad de compresión visual, y su coeficiente de correlación entre los datos reales y los datos obtenidos en la simulación.

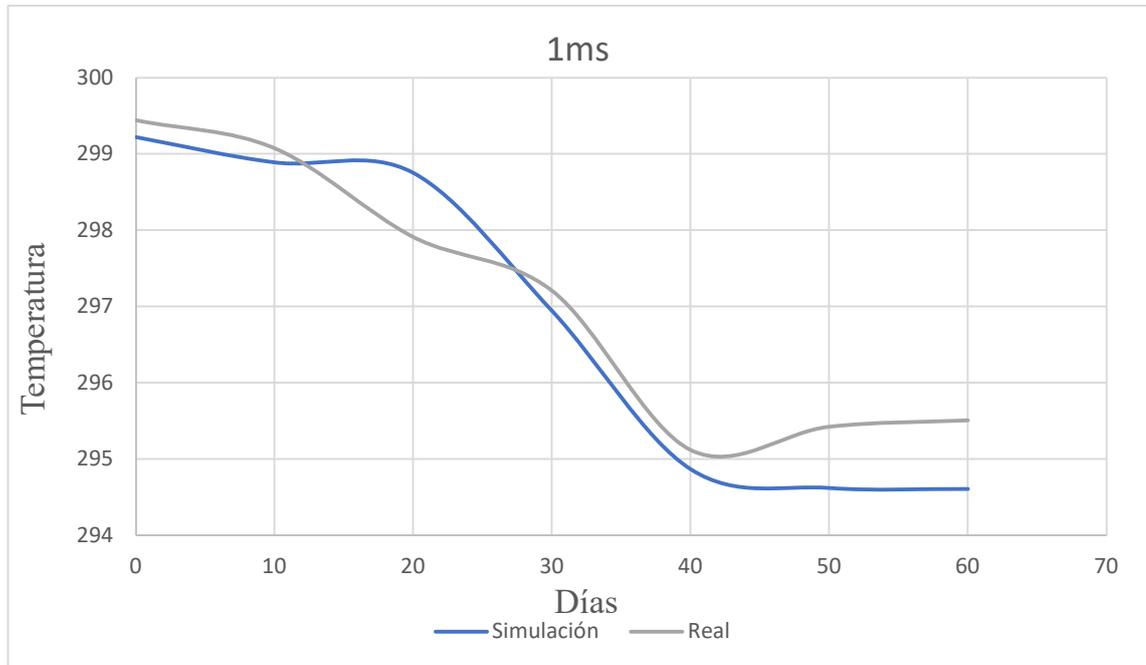


ILUSTRACIÓN 22: CAMBIO DE LA TEMPERATURA TOTAL EN EL TIEMPO A LA SALIDA DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN EN LA SIMULACIÓN (1 M/S) Y EN EL EXPERIMENTO. FUENTE: PROPIA

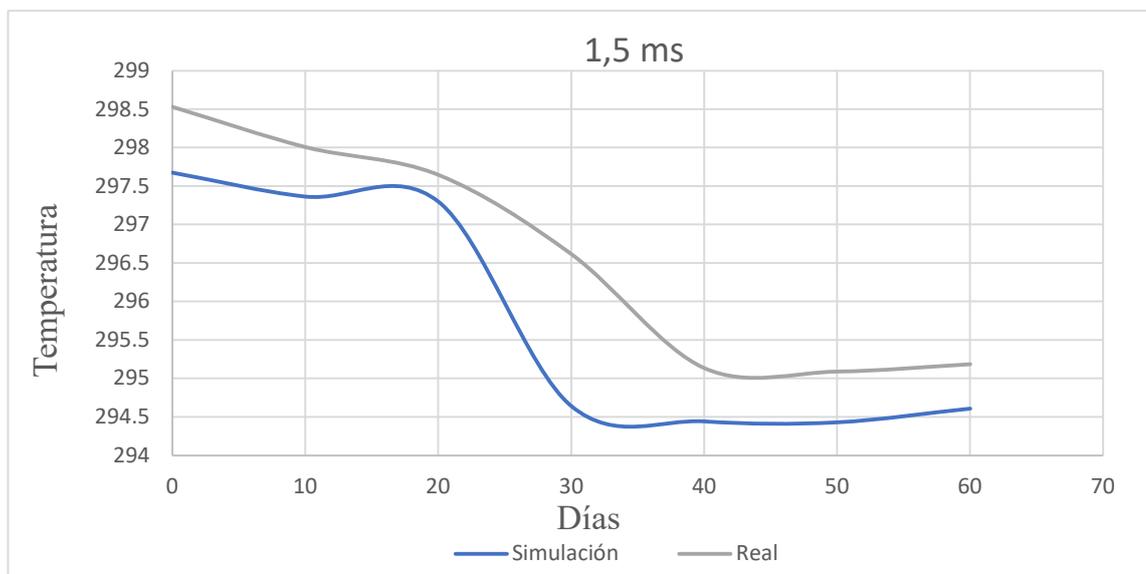


ILUSTRACIÓN 23: CAMBIO DE LA TEMPERATURA TOTAL EN EL TIEMPO A LA SALIDA DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN EN LA SIMULACIÓN (1.5 M/S) Y EN EL EXPERIMENTO. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

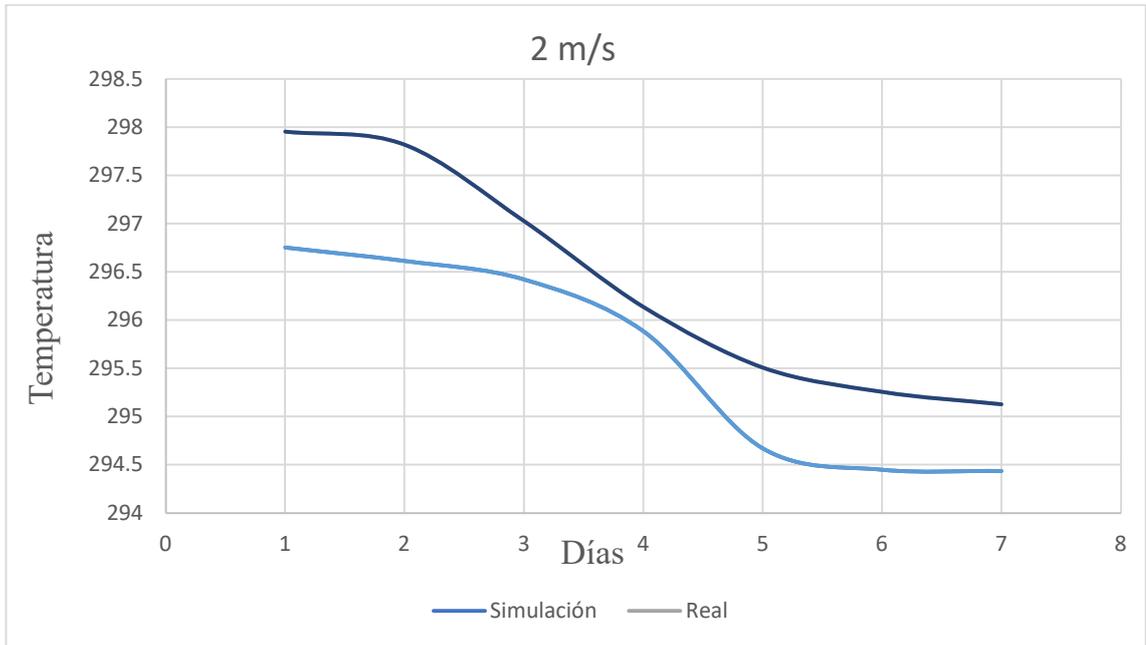


ILUSTRACIÓN 24: CAMBIO DE LA TEMPERATURA TOTAL EN EL TIEMPO A LA SALIDA DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN EN LA SIMULACIÓN (2 m/s) Y EN EL EXPERIMENTO. FUENTE: PROPIA

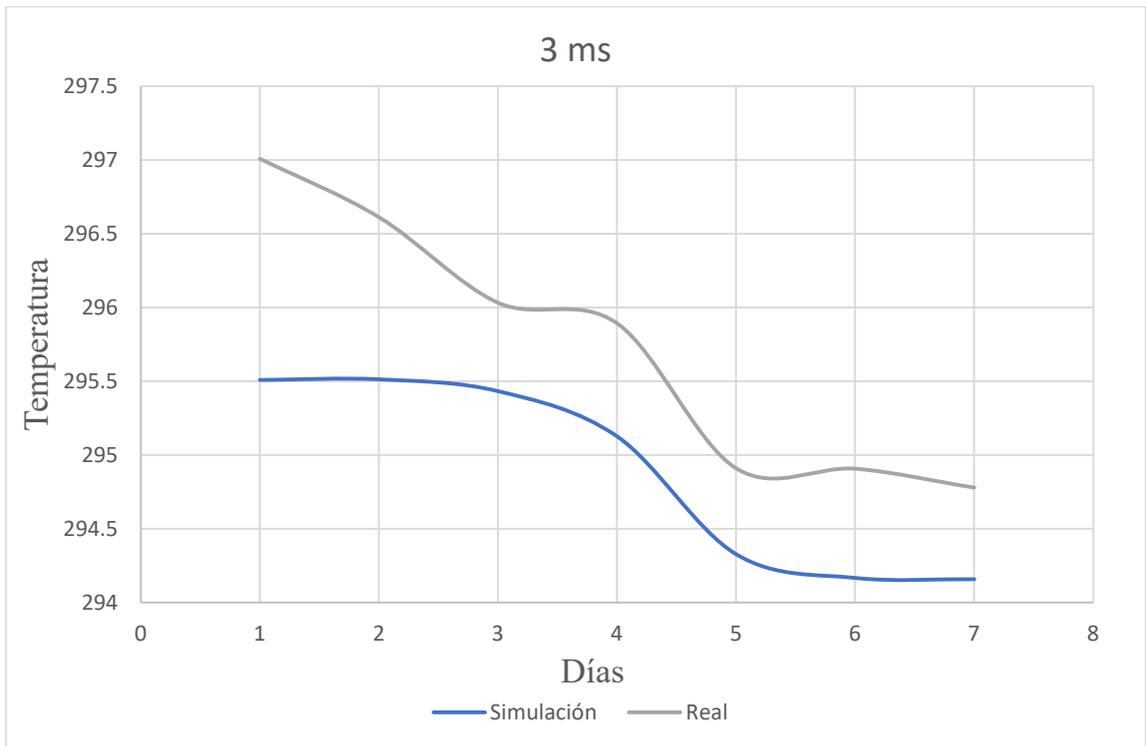


ILUSTRACIÓN 25: CAMBIO DE LA TEMPERATURA TOTAL EN EL TIEMPO A LA SALIDA DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN EN LA SIMULACIÓN (1.5 m/s) Y EN EL EXPERIMENTO. FUENTE: PROPIA

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Visto de forma más visual usando contornos de temperatura total en la salida del agua de refrigeración proporcionados por FLUENT:

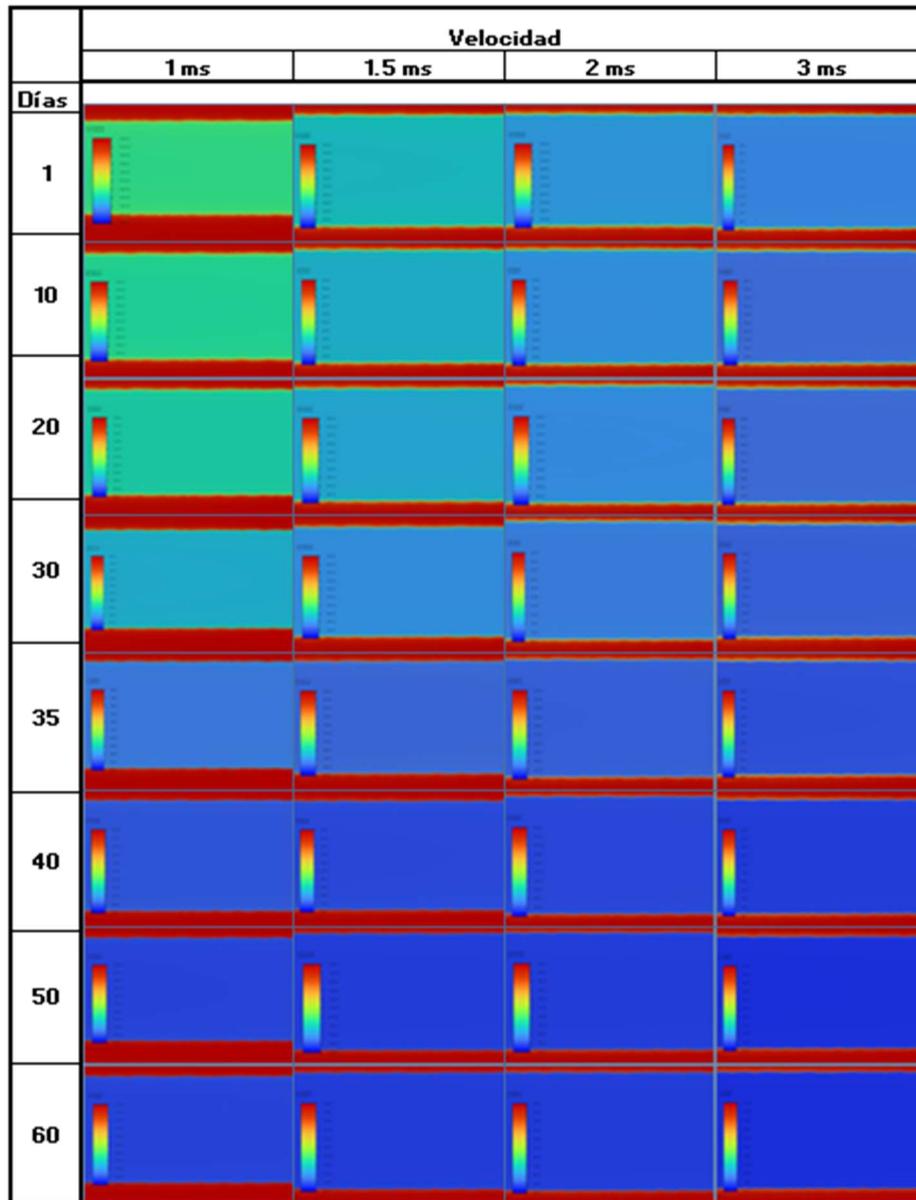


ILUSTRACIÓN 26: REPRESENTACIÓN VISUAL DE LOS CONTORNOS DE TEMPERATURA A LA SALIDA DEL AGUA DE MAR DURANTE EL TIEMPO DE LAS DIFERENTES SIMULACIONES. FUENTE: PROPIA

Como se ve en las gráficas e imagen previas, el modelo de Verhulst de colonización se valida a la perfección con el modelo de colonización ofrecido por (Railkin, 2005) y, a partir de los 60 días, donde el ciclo de desarrollo y eliminación se mantendrá constante en el crecimiento de capas de microfouling, otorgará valores de diferencia de temperatura de salida (Δt) del agua de refrigeración (salada) entre $t = 0$ y $t \geq 60$ días de $4,6^{\circ}\text{C}$ para $1 \frac{m}{s}$, 3°C para $1,5 \frac{m}{s}$, $2,3^{\circ}\text{C}$ para $2 \frac{m}{s}$ y $1,3^{\circ}\text{C}$ para $3 \frac{m}{s}$

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

en la simulación, sin tener en cuenta el cambio de la rugosidad de la capa de microfouling con el tiempo y la posible formación de macrofouling.

Además, se distingue a la perfección la acción de la velocidad en la formación de la capa de biofilm, siendo mucho menor a mayores velocidades por el aumento de la fricción del fluido con el material y su disminuida capacidad de adhesión en las superficies.

Los datos de las simulaciones y de la realidad de detallarán a continuación:

Datos simulación	Días						
m/s	1	10	20	30	40	50	60
1	299.21968	298.88812	298.75006	296.94298	294.86684	294.62229	294.60828
1.5	297.67402	297.36277	297.29796	294.64081	294.44204	294.43052	294.60828
2	296.75186	296.61198	296.42095	295.88381	294.67091	294.44969	294.43604
3	295.51013	295.51402	295.43431	295.12659	294.32762	294.16831	294.15837

Datos reales	Días						
m/s	1	10	20	30	40	50	60
1	299.44101	299.07248	297.91201	297.20685	295.12076	295.42571	295.50942
1.5	298.53077	298.00787	297.64663	296.61705	295.13745	295.08846	295.18543
2	297.95494	297.81172	297.02616	296.13754	295.50816	295.25492	295.12767
3	297.00965	296.61398	296.03414	295.89346	294.90953	294.9072	294.77993

Los datos tienen una variación en este análisis en el comienzo, pues se ha simulado el arranque del sistema en $t = 0$, por lo cual los datos que interesan de temperatura de agua en la salida en el análisis son en $t = 1$, donde la formación de la capa de microfouling es nula y el intercambio de calor solamente debe de tener en cuenta el grosor de la tubería de acero.

Los valores de correlación R^2 entre las temperaturas de salida reales y de simulación son los siguientes:

m/s	R^2 (∇T)
1	0.973325094
1.5	0.940651702
2	0.963718308
3	0.953720042

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Como se puede valorar en los datos de correlación, la obligación de mantener un mallado contiguo igual en ambas partes de la interfaz afecta a la estabilidad de los cálculos de intercambio de calor en tanto en cuanto los cálculos de turbulencia del modelo $K - \varepsilon$ pierden estabilidad al aumentar los valores de y^+ .

Transversalmente, la reducción del grosor de la capa durante el tiempo en las simulaciones de mayor velocidad y el método de aplicación por el uso de macros pueden haber afectado en el método iterativo del programa, que, añadiendo a lo propuesto con anterioridad, explicaría la reducción de la correlación de los datos en velocidades más altas.

Se podrían realizar simulaciones que diesen una correlación más exacta con los datos obtenidos de forma experimental aplicando otros enfoques de cambio de parámetros en el tiempo, como por ejemplo cambiando los valores de conducción térmica de la capa geométrica y completamente mallada de Biofouling, como se realizó en el estudio de (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022), o variando las propiedades completas del material con el tiempo para que asimile el crecimiento. Sin embargo, este análisis se enfocó en la simulación del crecimiento físico de la capa de Biofouling con el modelo turbulento $K - \varepsilon$ y la aplicación de “Shell Conduction” en interfaz no mallada, y los datos obtenidos son más que satisfactorios para poder aceptar esta aplicación.

Valoración de crecimiento de capa de Biofouling

Como ya se ha argumentado previamente en el apartado de metodología construcción de la capa de biofouling, este análisis usa varias configuraciones relativamente originales en el campo de los CFDs aplicados, y usando una versión contemporánea del programa ANSYS FLUENT, las expectativas originales del trabajo eran más sencillas, pues FLUENT ofrece una interfaz específica llamada “Expressions” donde el usuario puede introducir variables, expresiones y funciones matemáticas para modificar determinados parámetros físicos de todas las partes de la simulación, desde características físicas del material como un cambio de resistencia termal propia del material con un diferencial de temperatura a definir un cambio específico de la viscosidad de un fluido dependiendo de la velocidad, que en otros

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

programas como OpenFoam solo se pueden imponer usando UDFs: “User defined function”, programados en C++ y cuya complejidad es clara y su curva de aprendizaje es exponencial.

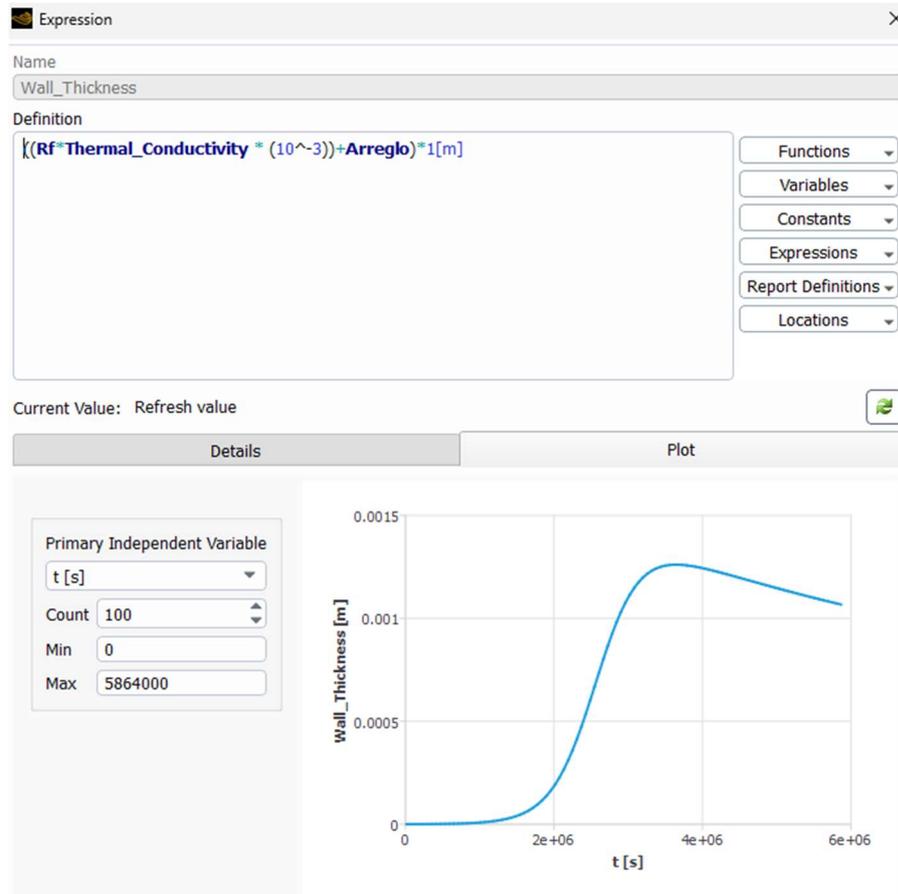


ILUSTRACIÓN 27: REPRESENTACIÓN DE LA EXPRESIÓN USADA PARA FORMAR EL CAMBIO DE GROSOR DE CAPA DE BIOFOULING EN EL TIEMPO. FUENTE: PROPIA

Al poder usar esas Expresiones, como así son denominadas en FLUENT, el análisis se volvía realizable. Sin embargo, al realizar las simulaciones el flujo de calor en la interfaz no cambiaba con el tiempo, como debería de suceder si aumenta la resistencia térmica (ecuación 41) debido al crecimiento de la capa y la conductividad térmica se mantenía constante:

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

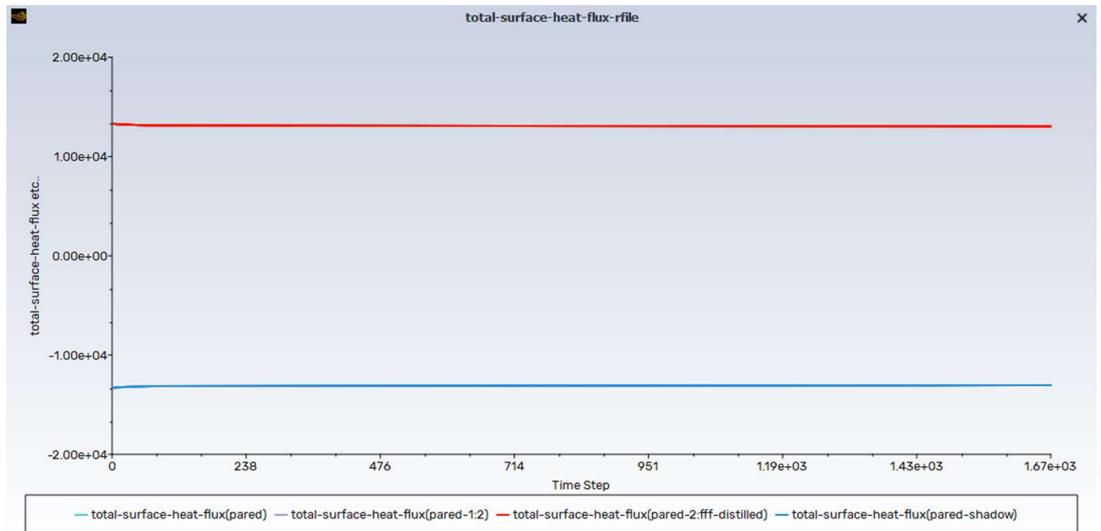


ILUSTRACIÓN 28: TRANSFERENCIA DE CALOR CUANDO LA EXPRESIÓN ERA IMPLEMENTADA PARA CAMBIAR EL GROSOR DE LA CAPA DE BIOFOULING. FUENTE: PROPIA

No obstante, si en la simulación proyectabas el crecimiento de la capa de biofouling con el tiempo usando la expresión, la función de crecimiento de Verhulst se construía a la perfección. Por lo tanto, se apostó por el enfoque de usar macros por cada paso de tiempo (1 día) de la simulación implementando por cada una de ellas una macro con los valores específicos de grosor en ese momento. Una vez se aplicó este enfoque, el flujo de calor a través de la interfaz se volvió:

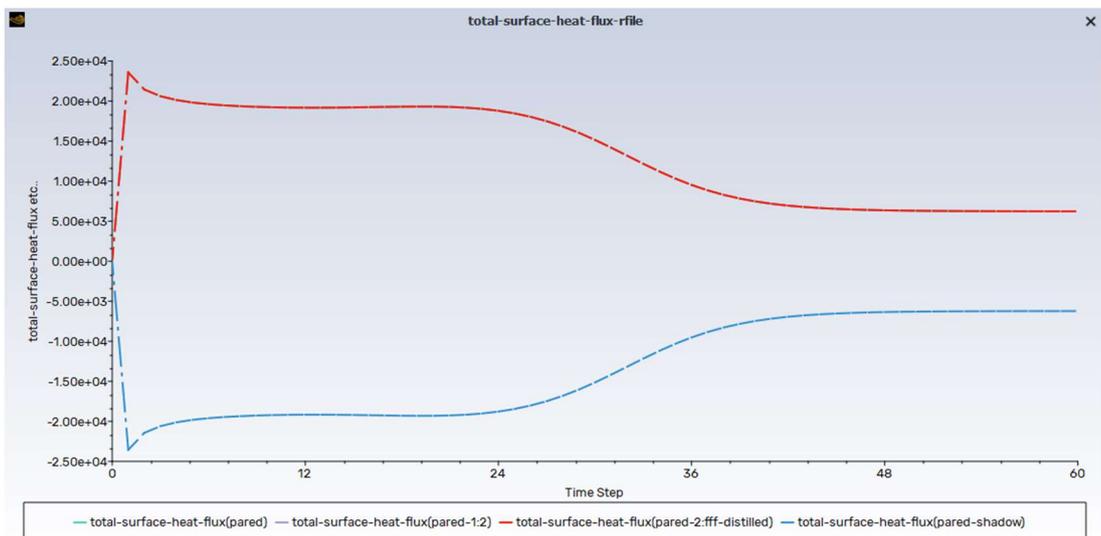


ILUSTRACIÓN 29: TRANSFERENCIA DE CALOR CUANDO LAS MACROS ERAN IMPLEMENTADAS PARA CAMBIAR EL GROSOR DE LA CAPA DE BIOFOULING. FUENTE: PROPIA

El flujo de calor en la imagen ofrece valores conformes con el crecimiento de la capa de biofouling sobre una tubería, pues conlleva una reducción exponencial

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

natural del mismo en el rango de tiempo de mayor crecimiento de capa de Biofouling, por lo cual este enfoque fue el usado para realizar las simulaciones.

La única razón existente a este comportamiento es que FLUENT construye a la perfección el modelo de crecimiento de la capa usando la expresión y, aunque debería, no consigue implementarlo en la interfaz durante la simulación para modular ese cambio de grosor, manteniendo los valores de la expresión en $t = 0$. Según el manual de ANSYS y el servicio técnico del programa, este fallo en el código del programa no debería de ocurrir, habiéndose detallado ya con los miembros correspondientes esta falla.

Sin embargo, esta apuesta de aplicar macros que cambien el grosor manualmente cada paso de tiempo en la simulación, como ya se ha detallado con anterioridad, no hay mucha literatura que lo ampare. Por tanto, este análisis en tanto en cuanto verifica el modelo turbulento $K - \varepsilon$ en simulaciones usando FLUENT sin geometrías físicas ni mallado en la interfaz de los fluidos usando “Shell Conduction” con crecimiento real de capas de Biofouling comparando datos reales y datos simulados de forma más simple y diferente con el programa OpenFoam, también aporta claridad en la veracidad del programa FLUENT en aplicar cambios de condiciones de contorno de grosor de pared manualmente durante una simulación transitoria (con variable de tiempo) usando macros y su aplicación más que aceptable en el proceso de iteración de las ecuaciones de Navier-Stokes, aparte de mostrar una deficiencia en la programación del programa FLUENT en su implementación de las expresiones dentro de simulaciones transitorias.

4. CONCLUSIONES.

Los análisis realizados confirman la correcta aplicación del programa ANSYS FLUENT en el ámbito del crecimiento biológico de capas de microfouling en intercambiadores de calor.

El modelo turbulento $K - \varepsilon$ en su versión estándar ofrece cálculos estables y simulaciones turbulentas reales en flujos interiores en condiciones imperfectas de mallado con gran número de Reynolds.

Los datos obtenidos de la planta piloto otorgan una correlación más que aceptable con los datos simulados para poder adaptar las prácticas usadas de este análisis en otros proyectos.

La simulación del crecimiento real del grosor de capa de microfouling ofrece datos aceptables para poder realizar estudios puramente teóricos usando este enfoque.

La aplicación de interfaz no física entre dos flujos usando “Shell Conduction” simula de forma más real el intercambio de calor entre fluidos, pero sus complicaciones en la aplicación lo convierten en una apuesta problemática.

El crecimiento natural de Verhulst y su expresión matemática es acorde a la realidad y su implementación ofrece valores aceptables, especialmente en flujos completamente turbulentos.

Este análisis puede confirmarse como estudio previo para dimensionar un intercambiador de calor tipo usando agua de mar teniendo en cuenta el desarrollo de capas de Biofilm.

Este enfoque ofrece una visión intuitiva de los graves efectos del Biofouling en la eficacia de los sistemas de intercambio de calor, especialmente de los Intercambiadores de calor del mundo marino.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Como forma de mejorar y especificar este análisis en el futuro para obtener datos más específicos y producir una investigación, se podrá introducir la forma turbulenta usando UDFs desde la entrada del agua de mar, en vez de formarse durante los primeros momentos de la simulación y que la turbulencia sea constante por toda la longitud de la geometría. Aparte, una introducción de la variación los datos reales de conducción térmica de la capa de Biofouling, aplicando también los datos reales de crecimiento del grosor de la capa, formarían el análisis comparativo ideal para poder confirmar exactamente el método de CFDs para analizar el crecimiento biológico de microfouling simulado físicamente en el análisis. Transversalmente, se podría aplicar este mismo análisis en un análisis real de un intercambiador completo, simulando el crecimiento de la capa en todas las superficies en contacto con el agua salada, y obtener datos completos de variación de temperatura a la salida y la entrada de un intercambiador de calor específico.

Bibliografía

- ANSYS. (2022). *Fluent Theory Guide*. ANSYS.
- Blazek, J. (2007). *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: Principles and Applications*. Sankt Augustin, Germany: Joe Hayton.
- Boullosa-Falces, D., Gomez-Solaetxe, M., Garcia, S., Trueba, A., & D., S. (2021). Biofouling control in heat exchangers by statistical techniques. *Delopments in maritime technology and Engineering*, 737–742. doi:doi:10.1201/9781003216582
- Boullosa-Falces, D., S. Sanz, D., Garcia, S., Trueba Castañeda, L., & Trueba, A. (2022). Predicting tubular heat exchanger efficiency reduction caused by marine biofilm adhesion using CFD simulations. *Biofouling*, 663-673.
- Boussinesq, J. (1897). *Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section*. Paris: Gauthier-Villars.
- Characklis, W. G. (1993). Process analysis in microbial systems: Biofilms as a case study. *In Mathematics in Microbiology*, 171-234.
- Chou, P. Y. (1945). ON VELOCITY CORRELATIONS AND THE SOLUTIONS OF THE EQUATIONS OF TURBULENT FLUCTUATION. *Quarterly of Applied Mathematics*, 38–54.
- Favre, A. J. (1965). *THE EQUATIONS OF COMPRESSIBLE TURBULENT GASES*. Marsella: INST DE MECANIQUE STATISTIQUE DE LA TURBULENCE.
- Ferziger, J. H., Street, R. L., & Perić, M. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer Nature Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-99693-6
- García Gomez, S. (2016). *Aplicación de campos electromagnéticos en la eliminación y control de la película biológica en intercambiadores de calor tubulares refrigerados por agua de mar*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Garcia, S., & Trueba, A. (2018). Influence of the Reynolds number on the thermal effectiveness of tubular heat exchanger subjected to electromagnetic field-

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

based antifouling treatment in an open once-through seawater cooling system . *Applied Thermal Engineering*, 531-541.

- Garcia, S., Vega, L., Trueba, A., & Madariaga, E. (2016). Impact of the surface roughness of AISI 316L stainless steel on biofilm adhesion in a seawater-cooled tubular heat exchanger-condenser. *Biofouling*, 1185–1193.
- Holzmann, T. (2021). *Mathematics, numerics, deviations and OpenFoam*. Holzmann CFD. doi:10.13140
- Launder, B., & Jones, W. (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *Int J Heat Mass Transfer*, 301-314.
- Lewin, R. (1984). Microbial adhesion is a sticky problem. *Science*, 375-377.
- López-Galindo, C., Casanueva, J. F., & Nebot, E. (2010, October). Efficacy of different antifouling treatments for seawater cooling systems. *Biofouling*, 923–930. doi:doi: 10.1080/08927014.2010.531464.
- M. Trafczynski, M. M. (2021). Estimation of thermal effects of fouling growth for application in the scheduling of heat exchangers cleaning. *182*. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116103
- McCoy, W., F., B. J., Robbins, J., & Costerton, J. W. (1981). Observations of fouling biofilm formation. *Can. J. Microbiol*, 910-917.
- Morkovin, M. (1964). *Effects of compressibility on turbulent flow*. New York: The mechanics of Turbulence.
- Muller-Steinhagen H, M. M. (2006). Fouling of Heat Exchangers-New Approaches to Solve an Old Problem. *Heat Transfer Eng.*, 26: 1-4. doi:doi:1080/01457630590889906
- Patel, V., Rodi, W., & Scheurer, G. (1985). Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows. *AIAAJ*, 11308-1319.
- Railkin, A. I. (2005). *Marine biofouling : colonization processes and defenses*. St. Petersburg: Taylor & Francis e-Library.
- Reynolds, O. (1961). *On the extent and action of the heating surface for steam boilers*. Manchester: International Journal of Heat and mass transfer.

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

- Romeu, M. J., & Mergulhão, F. (2023). Development of Antifouling Strategies for Marine Applications. *Microorganisms*, 1-3.
- T.Eugene Cloete, V. S. (1992). Practical aspects of biofouling control in industrial water systems. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 29, 299-341. doi:10.1016/0964-8305(92)90050-X
- Telegdi, J., Trif, L., & Románszki, L. (2016). Smart anti-biofouling composite coatings for naval applications. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 123-155. doi:doi.org/10.1016/B978-1-78242-283-9.00005-1
- Thackery, P. (1980). The cost of fouling in heat exchanger plant. *Efluent and Water Treatment Journal*.
- Wilcox, D. A. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada: DCW Industries, Inc.
- Wolfaardt, G. (1990). *Techniques for Studying Biofouling and Aspects Influencing Biofouling in Industrial Water Systems*. Pretoria, South Africa: University of Pretoria.

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Se muestran los puntos del mallado donde se calcularán las ecuaciones de Navier-Stokes. Fuente: (Blazek, 2007)</i>	28
<i>Ilustración 2: En este caso, el mallado forma los puntos donde se calculan las ecuaciones pertinentes. Fuente: (Blazek, 2007)</i>	29
<i>Ilustración 3: Esquema-Diseño de la planta piloto de la cual se han extraído los datos del análisis. Fuente: (Boullosa-Falces, S. Sanz, Garcia, Trueba Castañeda, & Trueba, 2022)</i>	37
<i>Ilustración 4: Geometría usada para la simulación. El cilindro interior es agua de mar y el cilindro exterior agua destilada. Fuente: Propia</i>	39
<i>Ilustración 5: Forma del mallado usado. Fuente: Propia</i>	40
<i>Ilustración 6: Forma del mallado usado. Fuente: Propia</i>	40

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

- Ilustración 7: Forma del mallado usado, vista de la reducción de tamaño de mallado en el cilindro interior. Fuente: Propia* 40
- Ilustración 8: Vista ampliada de la conformidad de mallado en las cercanías de la interfaz entre las dos geometrías. Fuente: Propia* 42
- Ilustración 9: Calidad ortogonal de cada celda del mallado usado. Fuente: Propia* 42
- Ilustración 10: Calidad ortogonal de cada celda del mallado usado, ampliación de la interfaz entre las dos geometrías. Fuente: Propia* 43
- Ilustración 11: Capas simuladas en la interfaz de "Shell conduction" junto con su grosor en metros y su material correspondiente. Fuente: Propia* 45
- Ilustración 12: Curvas exponenciales naturales del aumento de la resistencia térmica simulada con los datos reales. Fuente: Propia* 46
- Ilustración 13: Curvas exponenciales naturales siguiendo el modelo de Verhulst de colonización de el grosor a simular de la capa de biofouling. Fuente: Propia* 47
- Ilustración 14: diagrama de magnitud de velocidad (1 m/s) en una línea diametral centrada en la entrada y la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 53
- Ilustración 15: Contornos de intensidad de turbulencia (1 m/s) ubicado en la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 54
- Ilustración 16: diagrama de magnitud de velocidad (1.5 m/s) en una línea diametral centrada en la entrada y la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 54
- Ilustración 17: Contornos de intensidad de turbulencia (1.5 m/s) ubicado en la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 55
- Ilustración 18: diagrama de magnitud de velocidad (2 m/s) en una línea diametral centrada en la entrada y la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 55
- Ilustración 19: Contornos de intensidad de turbulencia (2 m/s) ubicado en la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 55

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

- Ilustración 20: diagrama de magnitud de velocidad (3 m/s) en una línea diametral centrada en la entrada y la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 56
- Ilustración 21: Contornos de intensidad de turbulencia (3 m/s) ubicado en la salida del agua de mar. Fuente: Propia* 56
- Ilustración 22: Cambio de la temperatura total en el tiempo a la salida del agua de refrigeración en la simulación (1 m/s) y en el experimento. Fuente: Propia* 57
- Ilustración 23: Cambio de la temperatura total en el tiempo a la salida del agua de refrigeración en la simulación (1.5 m/s) y en el experimento. Fuente: Propia* 57
- Ilustración 24: Cambio de la temperatura total en el tiempo a la salida del agua de refrigeración en la simulación (2 m/s) y en el experimento. Fuente: Propia* 58
- Ilustración 25: Cambio de la temperatura total en el tiempo a la salida del agua de refrigeración en la simulación (1.5 m/s) y en el experimento. Fuente: Propia* 58
- Ilustración 26: Representación visual de los contornos de temperatura a la salida del agua de mar durante el tiempo de las diferentes simulaciones. Fuente: Propia* 59
- Ilustración 27: Representación de la expresión usada para formar el cambio de grosor de capa de biofouling en el tiempo. Fuente: Propia* 62
- Ilustración 28: Transferencia de calor cuando la expresión era implementada para cambiar el grosor de la capa de biofouling. Fuente: Propia* 63
- Ilustración 29: Transferencia de calor cuando las macros eran implementadas para cambiar el grosor de la capa de biofouling. Fuente: Propia* 63

Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Macros

Macro (tipo) de Creación de archivos para implementar cambio de grosor.

```
thickness_values = [  
    0.0000000573471048, 0.0000000766392398, 0.0000001024209873,  
    0.0000001368750092, 0.0000001829177855, 0.0000002444461069,  
    0.0000003266661919, 0.0000004365329898, 0.0000005833363143,  
    0.0000007794824536, 0.0000010415356739, 0.0000013916046551,  
    0.0000018591856343, 0.0000024836083139, 0.0000033172738268,  
    0.0000044299273082, 0.0000059142708114, 0.0000078932928604,  
    0.0000105297611033, 0.0000140383770291, 0.0000187010921586,  
    0.0000248859705316, 0.0000330696445140, 0.0000438626765729,  
    0.0000580357545337, 0.0000765422885533, 0.0001005293414296,  
    0.0001313238850236, 0.0001703759292053, 0.0002191365852113,  
    0.0002788525621857, 0.0003502759759917, 0.0004333249474531,  
    0.0005267813076206, 0.0006281525855836, 0.0007338164838159,  
    0.0008394803820482, 0.0009408516600112, 0.0010343080201787,  
    0.0011173569916400, 0.0011887804054460, 0.0012484963824204,  
    0.0012972570384265, 0.0013363090826082, 0.0013671036262022,  
    0.0013910906790784, 0.0014095972130980, 0.0014237702910589,  
    0.0014345633231177, 0.0014427469971002, 0.0014489318754731,  
    0.0014535945906027, 0.0014571032065285, 0.0014597396747713,  
    0.0014617186968204, 0.0014632030403236, 0.0014643156938049,  
    0.0014651493593179, 0.0014657737819974, 0.0014662413629767,  
    0.0014665914319579  
]  
  
fluent_version = "Fluent Version 22.2, Build ID xxxxx"  
for i, thickness in enumerate(thickness_values):  
    filename = f"archivo_{i + 1}.csv"  
    with open(filename, mode='w', newline='') as file:  
        file.write(fluent_version + '\n')  
        header = "Zone ID, Zone Name, Enable-Shell? (1/0), Layer  
Number, Material, Layer Thickness (m), Heat Generation Rate (w/m3)"  
        file.write(header + '\n')  
        file.write("4, pared, 1, 1, stainless-steel-316ti-  
annealed, 0.0015, 0\n")  
        file.write(f"4, pared, 1, 2, aluminum, {thickness}, 0\n")
```


Evaluación del Impacto de la Formación de Biofouling en un Intercambiador de Calor mediante simulaciones CFD

Aviso responsabilidad UC

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”