



Simulación numérica de la convección natural turbulenta en torno a esferas

Numerical simulation of turbulent natural convection around spheres

Rubén Arévalo-Ramírez ¹, Juan Carreño-Suárez ²

¹ Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Correo electrónico: ruben.arevalo@uach.cl

² Laboratorio de Investigación en Termofluidos, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela. Correo electrónico: juan.carreo@unet.edu.ve

Recibido: 29 abril, 2020. Aceptado: 7 agosto, 2020. Versión final: 19 octubre, 2020.

Resumen

La mayor parte de las investigaciones que se han realizado sobre la convección natural han abordado su estudio en la región laminar y no se ha dirigido mucha atención a la convección natural turbulenta que suele presentarse cuando el número de Rayleigh supera un cierto valor crítico. Estudios recientes han mostrado que las correlaciones existentes para esta región suelen ser poco precisas. Por otra parte, el tratamiento numérico de este problema presenta dificultades relacionadas con el modelo de turbulencia usado, ya que se está en presencia de una capa límite laminar-turbulenta en un entorno laminar, por lo cual, el modelo laminar subestimarán la transferencia de calor, mientras los modelos turbulentos la sobreestimarán. Modelos transicionales y otras opciones están disponibles, pero están diseñados para entornos turbulentos. El presente trabajo plantea la solución numérica mediante el programa computacional Ansys Fluent de la convección laminar turbulenta en torno a esferas sin modelo de turbulencia (modelo laminar) y usando un modelo de turbulencia k- ϵ para bajos números de Reynolds. El trabajo permitió caracterizar los números de Rayleigh a partir de los cuales empieza a ocurrir el cambio de capa límite laminar a turbulenta, así como la posición del desprendimiento de la capa límite. Los valores obtenidos para la transferencia de calor con el modelo laminar muestran muy buena concordancia con experimentos y correlaciones para bajos números de Rayleigh, pero pierde precisión a partir de cierto valor de Rayleigh, aspecto que pudo corregirse satisfactoriamente incorporando el modelo de turbulencia utilizado.

Palabras clave: transferencia de calor; convección natural; capa límite; región laminar; región turbulenta; transición; número de Rayleigh; número de Nusselt; esfera; modelo laminar; modelo de turbulencia; modelo k- ϵ ; Ansys Fluent.

Abstract

Most of the research that has been done on natural convection has focused its study on the laminar region and not much attention has been focused on the turbulent natural convection, that usually occurs when the Rayleigh number exceeds a certain critical value. Recent studies have shown that the correlations identified for this region are often imprecise. On the other hand, the numerical treatment of this problem presents difficulties related to the turbulence model used, since it is in the presence of a laminar-turbulent boundary layer in a laminar environment, therefore, the laminar model will underestimate the heat transfer, while the turbulent models will overestimate it. Transitional models and other options are available but are designed for turbulent environments. The present work proposes the numerical solution using the Ansys Fluent computer program of turbulent laminar convection around spheres without a turbulence model (laminar model) and using a k- ϵ turbulence model for low Reynolds numbers. The work should characterize the

Rayleigh numbers from which the change from boundary layer to turbulent begins to change, as well as the position of the boundary layer detachment. The values obtained for the heat transfer with the laminar model showed very good agreement with experiments and correlations for low Rayleigh numbers, but lost precision from a certain Rayleigh value, an aspect that could be successfully corrected by incorporating the used turbulence model.

Keywords: heat transfer; natural convection; boundary layer; laminar zone; turbulent zone; transition; Rayleigh number; Nusselt number; sphere; laminar model; turbulence model; k-ε model; Ansys Fluent.

1. Introducción

La convección natural alrededor de cuerpos esféricos ha sido objeto de numerosas investigaciones analíticas, experimentales y numéricas, no solo por ser la esfera una de las geometrías fundamentales en la convección natural, sino porque su transferencia de calor es indispensable en muchas aplicaciones de ingeniería, tales como tanques esféricos que contienen fluidos a altas o bajas temperaturas, lámparas eléctricas esféricas, lechos empacados de cuerpos esféricos para reactores catalíticos, tanques de almacenamiento de energía térmica, entre otros.

Unas de las correlaciones más conocidas y utilizadas para estimar el número de Nusselt (Nu) en este tipo de situaciones, son las propuestas por Churchill [1] para capa límite laminar (número de Grashof, Gr, menor a 10^9) y para capa límite con transición a turbulenta (Gr mayor a 10^9), ecuaciones (1) y (2), respectivamente:

$$\text{Nu} = 2 + \frac{0.589\text{Ra}_D^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (1)$$

$$\text{Nu} = 2 + \frac{0.589\text{Ra}_D^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \times \left(1 + \frac{7.44 \times 10^{-8}\text{Ra}_D}{\left[1 + \left(\frac{0.73}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{16/9}}\right) \quad (2)$$

donde Ra_D es el número de Rayleigh basado en el diámetro de la esfera y Pr es el número de Prandtl.

Como se observa, la ocurrencia de la transición y el cambio de la capa límite de laminar a turbulenta, provoca que el comportamiento del número de Nusselt sea notablemente distinto que cuando la capa límite es solamente laminar y crea la necesidad de usar correlaciones distintas para cada caso.

La mayor parte de los trabajos experimentales en esta área, y así lo comenta Kitamura et al. [2], han abordado el estudio de la convección natural laminar, y no se ha dirigido mucha atención a la convección natural

turbulenta, debido a las dificultades para obtenerla experimentalmente.

Uno de los estudios experimentales realizados en convección libre con bajos y altos números de Rayleigh es el de Amato y Tien [3], quienes propusieron una correlación empírica aplicable para agua que representa muy bien el comportamiento de los experimentos en la zona laminar (Ra_D entre 3×10^5 y 8×10^8), ecuación (3), pero que no puede aplicarse en la zona turbulenta, debido a que los datos muestran una dispersión considerable para números de Rayleigh superiores a 8×10^8 .

$$\text{Nu} = 2 + 0.50\text{Ra}_D^{1/4} \quad (3)$$

Por otra parte, Kitamura et al. [2] reportan que sus números de Nusselt medidos experimentalmente están acordes con la correlación de Churchill dentro de la región laminar, pero muestran una considerable desviación cuando ocurre transición a capa límite turbulenta. Proponen dos correlaciones empíricas para cuando ocurre transición de flujo laminar a turbulento para agua y aire, ecuaciones (4) (Ra_D entre 1×10^9 y 4×10^{10}) y (5) (Ra_D entre 8×10^8 y 4×10^9), respectivamente.

$$\text{Nu} = 0.20\text{Ra}_D^{0.30} \quad (4)$$

$$\text{Nu} = 0.06\text{Ra}_D^{0.35} \quad (5)$$

Con la evolución de la capacidad computacional moderna, las limitantes de los experimentos físicos como el tiempo de diseño, costo monetario de realización y otros, pueden ser complementadas con las simulaciones numéricas a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Hoy en día es posible abordar problemas numéricos que antes era imposible, por su alto costo computacional, como es el caso de la convección natural turbulenta.

Uno de los principales problemas en la simulación de la convección natural turbulenta es el modelo de turbulencia utilizado, ya que la capa límite que se forma tiene una zona laminar inicial y luego una región turbulenta, en un entorno laminar lejos de la superficie. Usar un modelo laminar llevará a subestimar la transferencia de calor, mientras utilizar un modelo de

turbulencia estándar, como $k-\varepsilon$ [4] o $k-\omega$ [5], resultará en una sobrestimación. Algunas opciones las representan, por ejemplo, modificaciones de los modelos estándar para aplicarlos a flujos con bajos números de Reynolds o modelos de turbulencia más modernos como $k-\omega$ SST [6] o Transition SST [7], que permiten dar un mejor tratamiento a la capa límite para casos como estos, pero hay que considerar que están diseñados para trabajar en entornos turbulentos lejos de la superficie. En resumen, es difícil encontrar un único modelo de turbulencia que permita tratar adecuadamente la convección natural turbulenta.

En este sentido, se han realizado diversos estudios numéricos de la convección natural, algunos de los cuales se comentan a continuación. Dmitriev et al. [8] considera diferentes modelos de turbulencia para simular varios problemas de convección natural turbulenta presentes en la industria, para los cuales se dispone de resultados experimentales, reportando que en la medida que se incrementa el Ra , crecen los errores en la determinación numérica de las características termohidráulicas del problema. Filippov [9] usa el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ para estudiar numéricamente la convección natural turbulenta en una piscina de corio fundido ante un eventual accidente en un reactor nuclear, y reporta que sus resultados muestran buena concordancia con datos experimentales encontrados en la literatura. Yang et al. [10] realizan un estudio numérico transitorio de la convección natural laminar en torno a una esfera isotérmica, encontrando que en la parte superior de la esfera se forma un penacho con forma de hongo que se desplaza hacia arriba en la medida que avanza el tiempo, y que sus resultados para el número de Nusselt están acordes con los reportados en la literatura.

Por otra parte, Abir y Emin [11] realizan un estudio comparativo de cuatro modelos de turbulencia para bajos números de Reynolds (Launder-Sharma, Lam-Bremhorst, Chien y Abe-Kondoh-Nagano) para el caso de flujo periódico completamente desarrollado en ductos y reportan que todos los modelos sobreestimaron los números de Nusselt locales, pero el modelo que presenta predicciones más realistas es el de Abe-Kondoh-Nagano. Se han realizado otros trabajos numéricos sobre la convección natural, la mayoría de ellos dando un tratamiento laminar a la capa límite [12-14].

Por lo anteriormente expuesto y dado el nivel de incertidumbre aún existente en relación con la temática mencionada, el presente trabajo pretende aportar una solución numérica al problema de la convección natural turbulenta (altos números de Rayleigh) mediante el programa Ansys Fluent, sin usar modelo de turbulencia (modelo laminar) y usando el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$

modificado para bajos números de Reynolds de Abe-Kondoh-Nagano [15], que pueda ser contrastada con los trabajos experimentales y las correlaciones existentes, y así comprobar el desempeño de estos modelos en este tipo de situaciones.

2. Metodología de simulación

2.1. Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones gobernantes del campo de flujo a ser resueltas son las de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento (Navier-Stokes) y de la energía, para condiciones de estable y para un análisis axisimétrico.

Para el cálculo de las fuerzas de flotación, que son las responsables del movimiento por convección libre, se utiliza el modelo de Boussinesq, el cual trata la densidad como un valor constante en todas las ecuaciones, excepto en el término de flotación en las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, en las cuales la densidad es modelada por la ecuación 6.

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (6)$$

Con relación a la turbulencia, se utiliza un modelo de dos ecuaciones $k-\varepsilon$ modificado para bajos números de Reynolds, el cual permite hacer una mejor predicción de la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε) para flujos en transición. Estos modelos agregan funciones a las ecuaciones de transporte del modelo $k-\varepsilon$ para permitir una mejor predicción del campo de flujo. Se utiliza específicamente el modelo para bajos números de Reynolds de Abe-Kondoh-Nagano.

2.2. Casos de estudio

Se realizan simulaciones para dos fluidos distintos: agua y aire. Para el caso del agua, se consideran diámetros de esferas de 50, 100, 200, 300 y 500 mm, y números de Rayleigh comprendidos entre 5×10^6 y 4×10^{10} ; y para el caso del aire, diámetros de 100, 200, 300, 500 y 1000 mm, y números de Rayleigh entre 2×10^5 y 5×10^9 . En cuanto al tratamiento de la turbulencia, se resolvieron los casos de dos formas: mediante el modelo laminar (sin activar modelo de turbulencia) y a través del modelo $k-\varepsilon$ para bajos números de Reynolds desarrollado por Abe, Kondoh y Nagano, con la intención de poder apreciar la respuesta de cada uno de ellos.

En relación a las propiedades de los fluidos, puede señalarse que la variación de la densidad con la temperatura para propiciar las corrientes de convección

natural, se modeló a través de la aproximación de Boussinesq, usándose para el caso del agua una densidad de referencia de 997.41 kg/m^3 , una conductividad térmica de $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, un calor específico de $4181 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, una viscosidad de $896.6 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ y un coeficiente de expansión térmica de $311 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; y para el caso del aire una densidad de referencia de 1.16489 kg/m^3 , una conductividad térmica de $0.023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, un calor específico de $1006.43 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, una viscosidad de $1.836 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ y un coeficiente de expansión térmica de $3.35705 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

En cuanto a los modelos numéricos, para el acoplamiento de las ecuaciones de presión-velocidad se usó el algoritmo SIMPLEC, para la discretización de los gradientes espaciales se empleó el modelo de Mínimos Cuadrados Basado en Celdas (Least Square Cell Based), para la discretización de la presión se utilizó el modelo PRESTO y para la discretización de la continuidad, la cantidad de movimiento y la energía se recurrió al esquema Aguas Arriba de Segundo Orden (Second Order Upwind). Se definió como valor de convergencia cuando los residuos alcanzan un valor de 10^{-4} .

2.3. Casos de estudio modelo geométrico y mallado

El dominio seleccionado, mostrado en la Figura 1, es bidimensional, rectangular, con un eje de simetría en la cara derecha para generar así la geometría esférica. El tamaño del dominio se ajustó en función del diámetro de la esfera y fue lo suficientemente grande para evitar efectos de pared. La superficie esférica tuvo una condición de borde de pared a la temperatura constante del caso de estudio. La pared izquierda fue seleccionada como pared isotérmica a 298 K . Para los casos estudiados con el modelo laminar, las caras superior e inferior tuvieron esta misma condición, pero para los casos con modelo de turbulencia, fue necesario, para garantizar convergencia, establecer una entrada en la superficie inferior a una velocidad muy baja (0.001 m/s y 298 K) y una salida a la atmósfera en la superficie superior. El mallado utilizado fue estructurado, de forma de poder generar una forma y tamaño adecuado de los elementos en la cercanía de la esfera, análogo al usado por los autores en trabajos de simulación previos con geometrías de este tipo [16-18].

Se realizaron estudios de sensibilidad de malla, tanto para el agua como para el aire, así como con el modelo laminar y el modelo de turbulencia, lo que permitió obtener el menor número de elementos necesarios para garantizar precisión en la solución de cada uno de estos cuatro casos. La variable de control utilizada fue el flujo de calor transferido de la esfera al fluido. El número de elementos de las mallas seleccionadas para las distintas situaciones

ya mencionadas estuvo entre 80000 y 120000 , y el tamaño del elemento más pequeño entre 0.34 y 0.16 mm .

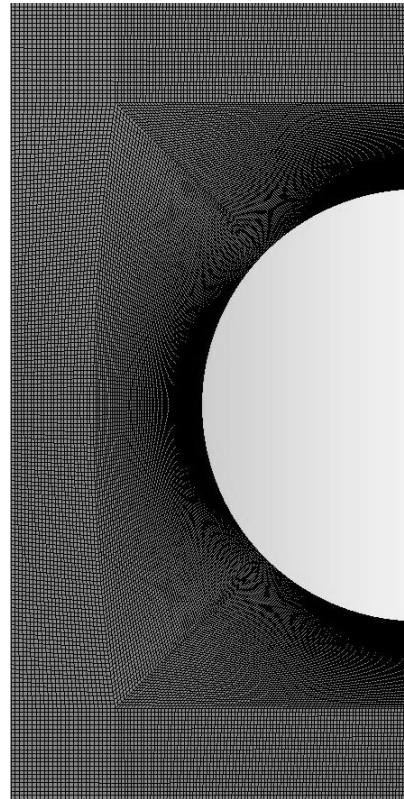


Figura 1. Geometría y mallado.

3. Resultados

3.1. Transferencia de calor

Para los casos con agua, los números de Nusselt obtenidos con el modelo laminar para números de Rayleigh menores a 10^9 mostraron muy buena coincidencia con las correlaciones de Kitamura, de Churchill y de Amato, con diferencias menores a 6, 3 y 9%, respectivamente. Para valores de Rayleigh mayores a 10^9 los resultados de las simulaciones con el modelo laminar comienzan a diferir considerablemente de los resultados experimentales de Kitamura, diferencia que va incrementándose a medida que aumenta el número de Rayleigh, y que llega a 24% para un Ra de 3.5×10^{10} , mientras que las simulaciones utilizando el modelo turbulento presentan diferencias menores al 5%. La correlación de Churchill para régimen turbulento hace una sobrepredicción del número de Nusselt de alrededor del 45%, con relación a Kitamura y simulaciones. La información descrita anteriormente puede observarse en la Figura 2. Los casos con aire muestran un

comportamiento similar y el resumen de los resultados se aprecia en la Figura 3.

3.2. Campos y perfiles de velocidad

En la Figura 4 se muestran los contornos de velocidad para uno de los casos simulados, donde se observan las características y valores de velocidad dentro de la capa límite en torno a la esfera, notándose cómo el fluido se mueve en sentido ascendente siguiendo la curvatura de la superficie esférica hasta su desprendimiento, el cual ocurre en una determinada posición o ángulo ubicado hacia la parte superior de la misma.

Por otra parte, en la Figura 5, se observan los perfiles de velocidad dentro de la capa límite para otro caso estudiado, viéndose como en un principio estos perfiles tienen forma parabólica, característico del flujo laminar, y como ya hacia la parte superior de la esfera toman forma más aplanada, lo que identifica al flujo turbulento, lo que evidencia que en este caso ocurrió la transición en el régimen de flujo dentro de la capa límite.

Otro aspecto importante que puede observarse es que en la medida que aumenta el número de Rayleigh, el desprendimiento de la capa límite ocurre en una posición más baja de la esfera.

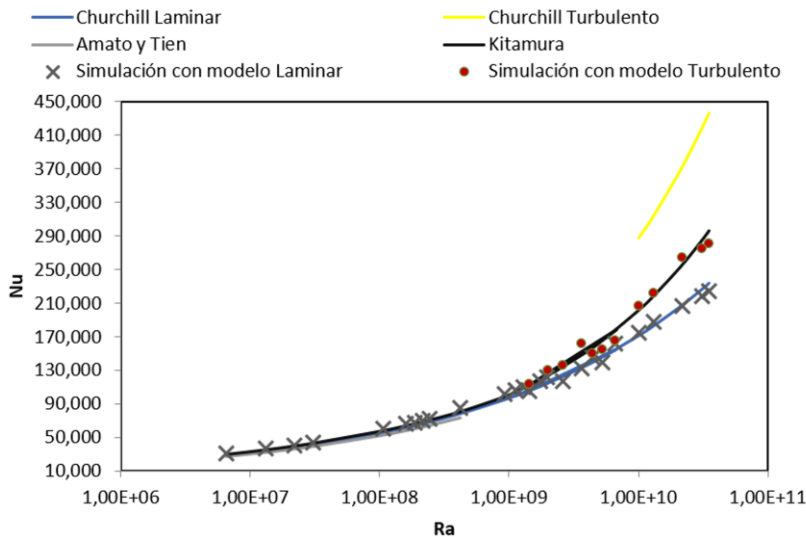


Figura 2. Comparación de los resultados del número de Nusselt de las simulaciones con agua con las correlaciones existentes.

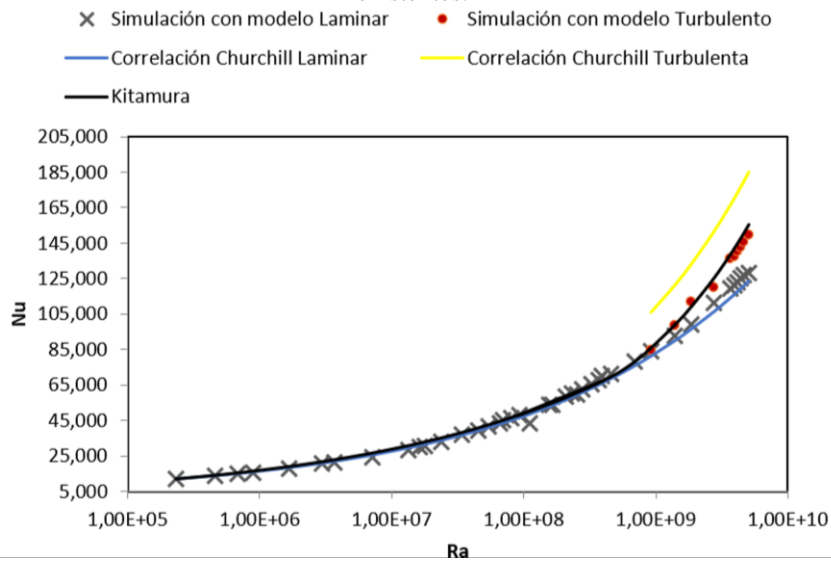


Figura 3. Comparación de los resultados del número de Nusselt de las simulaciones con aire con las correlaciones existentes.

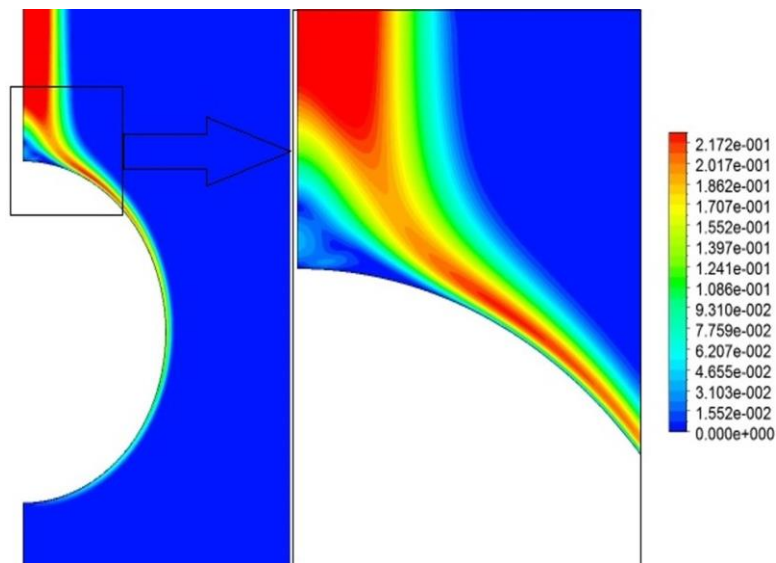


Figura 4. Contornos de velocidad (m/s) sobre la esfera con $d = 1$ m, $\Delta T = 5$ K, $Ra_D = 4.6 \times 10^8$ con modelo laminar y aire como fluido.

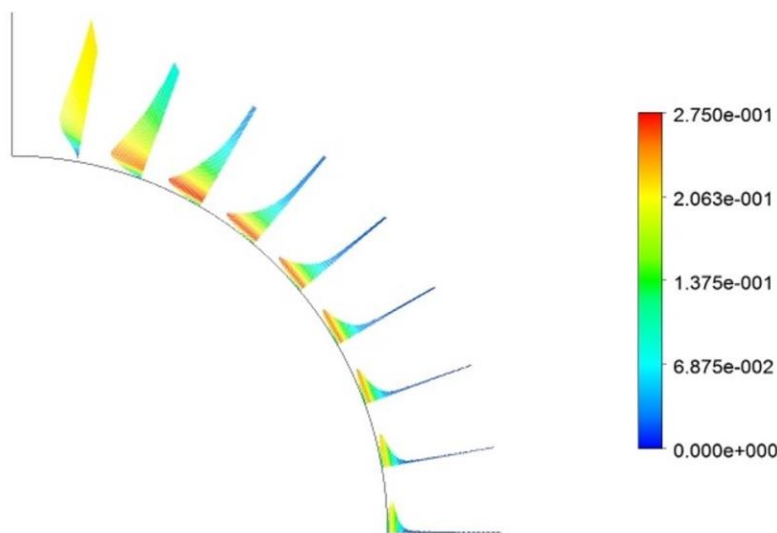


Figura 5. Perfiles de velocidad (m/s) en la capa límite alrededor de la esfera con $d = 1$ m, $\Delta T = 10$ K, $Ra_D = 9.21 \times 10^8$, con modelo turbulento y aire como fluido.

En la Figura 6 se muestra una comparación entre las posiciones de desprendimiento obtenidas experimentalmente por Kitamura et al. [2] y las halladas con las simulaciones, apreciándose como con el modelo laminar hay buena concordancia para Ra bajos (cuando la capa límite es laminar), pero pierde precisión para Ra altos (cuando la capa experimenta transición); mientras que al utilizar el modelo turbulento para Ra altos se consiguen resultados cercanos a los experimentales.

4. Conclusiones

La obsolescencia es el factor que más influye sobre el ciclo de vida de los activos digitales. En este artículo se

propone gestionar la obsolescencia de acuerdo con la norma existente, enfocándose en el proceso de evaluación de la probabilidad de obsolescencia y el impacto que genera en activos del sector eléctrico, ya existen deficiencias acerca de cómo proceder a esta evaluación. Gestionar la obsolescencia permite tomar decisiones y planificar actividades acordes a la necesidad del activo para cumplir con los objetivos de la organización.

Este documento sirve como guía para implementar el modelo propuesto en compañías de cualquier sector, cada empresa debe hacer ajustes de acuerdo con sus políticas, recursos, entorno y objetivos.

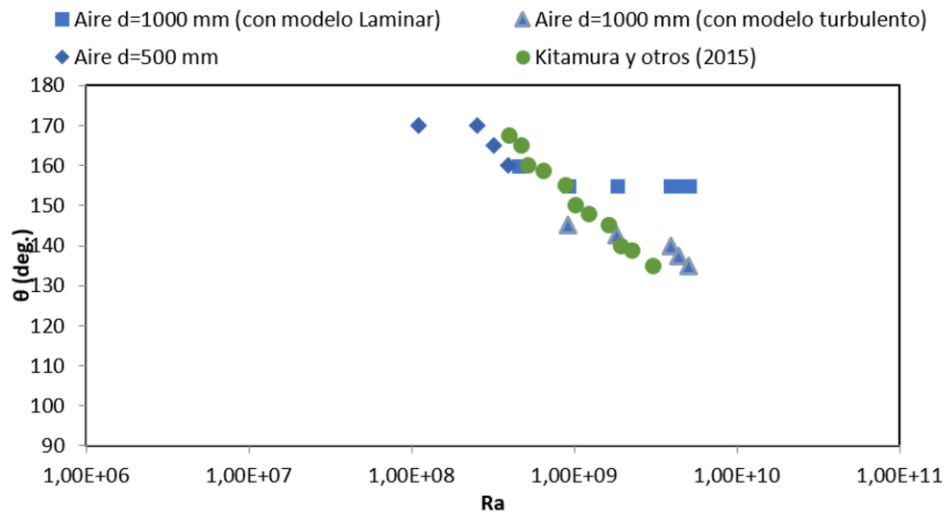


Figura 6. Posiciones de desprendimiento de la capa límite para el aire obtenidas en las simulaciones y comparadas con las experimentales.

El modelo laminar puede utilizarse con muy buena precisión en simulaciones de convección natural siempre y cuando se tenga seguridad de que la capa límite presente es laminar, es decir, por debajo del número de Rayleigh crítico de transición. La ocurrencia de la transición de la capa límite a turbulenta provoca que este modelo pierda precisión, siendo más impreciso mientras mayor es el número de Rayleigh. En los casos de capa límite turbulenta, se hace necesario utilizar un modelo de turbulencia, encontrándose en esta investigación que el modelo $k-\epsilon$ para bajos números de Reynolds desarrollado por Abe-Kondoh-Nagano, permitió obtener resultados satisfactorios para los casos estudiados.

La simulación numérica de la convección natural permite visualizar la ocurrencia de la transición de la capa límite de laminar a turbulenta mediante la diferenciación de la forma de los perfiles de velocidad que caracteriza cada régimen de flujo.

El incremento del número de Rayleigh provoca la anticipación del desprendimiento de la capa límite desde la superficie esférica.

5. Recomendaciones

Como trabajo futuro, se recomienda la comparación de los resultados del presente trabajo con los obtenidos mediante otros modelos de turbulencia, especialmente aquellos que permiten predecir la ocurrencia de la transición de capa laminar a turbulenta, como es el caso, por ejemplo, del modelo de cuatro ecuaciones "Transition SST". Así mismo, extender el presente a trabajo a otras geometrías.

Agradecimiento

Al Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira y a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral de Chile.

Referencias

- [1] S. Churchill, "Comprehensive, theoretically based, correlating equations for free convection from isothermal spheres," *Chemical Engineering Communications*, vol. 24, pp. 4-6, 1983.
- [2] K. Kitamura, A. Mitsuishi, T. Suzuki, T. Misumi, "Fluid flow and heat transfer of high-Rayleigh-number natural convection around heated spheres," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 86, pp. 149-157, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.081
- [3] W. Amato, C. Tien, "Free convection heat transfer from isothermal spheres in water," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 2, pp. 327-339, 1972, doi: 10.1016/0017-9310(72)90078-6
- [4] B. Launder, D. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269-289, 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
- [5] D. Wilcox, "Formulation of the $k-\omega$ turbulence model revisited," *AIAA Journal*, vol. 46, pp. 2823-2838, 2008, doi: 10.2514/1.36541

- [6] F. Menter, "Two-equation Eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 1598-1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149
- [7] R. Lantry, "A correlation-based transition model using local variables for unstructured parallelized CFD code," Tesis doctoral, Universidad de Stuttgart, Alemania, 2006.
- [8] S. Dmitriev, A. Kozelkov, A. Kurkin, N. Tarasova, V. Efremov, V. Kurulin, R. Shamin, M. Legchanov, "Simulation of turbulent convection at high Rayleigh numbers," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2018, pp. 1-12, 2018, doi: 10.1155/2018/5781602
- [9] A. Filippov, "Numerical simulation of experiments on turbulent natural convection of heat generating liquid in cylindrical pool," *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 20 no. 1, pp. 64-76, 2011, doi: 10.1134/S1810232811010061
- [10] S. Yang, V. Raghavan, G. Gogos, "Numerical study of transient laminar natural convection over an isothermal sphere," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 821-837, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.08.004
- [11] A. Abir, M. Emin, "A comparative study of four low-Reynolds-number $k-\epsilon$ turbulence models for periodic fully developed duct flow and heat transfer," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 69, no. 3, pp. 234-248, 2016, doi: 10.1080/10407790.2015.1097141
- [12] Q. Wang, W. Li, Z. Chen, D. Kukulka, "Numerical analysis on natural convection in various enclosures," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 77, no. 4, pp. 391-408, 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.018
- [13] F. Mebarek, R. Bessaih, "Numerical simulation of natural convection heat transfer of copper-water nanofluid in a vertical cylindrical annulus with heat sources," *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 26, pp. 325-334, 2019, doi: 10.1134/S0869864319030028
- [14] Q. Yu, C. Zhang, Y. Wu, B. Sunden, "Experimental and numerical study of natural convection in bottom-heated cylindrical cavity filled with molten salt nanofluids," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, pp. 1207-1219, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-09112-9
- [15] K. Abe, T. Kondoh, Y. Nagano, "A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – I. flow field calculations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 139-151, 1994, doi: 10.1016/0017-9310(94)00252-Q
- [16] R. Arévalo, A. Abánades, L. Rebollo, "Numerical research of film boiling heat transfer around a vertical short cylinder flat or hemispherical ends," *Journal of Heat Transfer*, vol. 138, pp. 1-7, 2016, doi: 10.1115/1.4033094
- [17] R. Arévalo, D. Antúnez, L. Rebollo, A. Abánades, "Estimation of radiation coupling factors in film boiling around spheres by means of computational fluid dynamics (CFD) tools," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 84-89, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.063
- [18] A. Abánades, R. Arévalo, L. Rebollo, "Numerical prediction of the mean temperature of the vapor film in film boiling heat transfer," *Computational Thermal Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2016, doi: 10.1615/ComputThermalScien.2015014392