



Estudio CFD para la determinación de los perfiles de temperatura en el transporte de crudo pesado

CFD study for the determination of temperature profiles in the transportation of heavy crude oil

Estudo CFD para determinação de perfis de temperatura no transporte de petróleo bruto pesado

José Cabrera Escobar^I

omar.cabrera@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0197-5163>

Carlos Bejarano Naula^{II}

cbejarano@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-1767-9239>

Gabriela Serrano Torres^{III}

gabriela.serrano@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0005-7448-7610>

Ángel Silva Conde^{IV}

alberto.silva@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1811-3340>

Correspondencia: omar.cabrera@unach.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 05 de enero de 2024 * **Aceptado:** 22 de enero de 2024 * **Publicado:** 25 de febrero de 2024

- I. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.
- II. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.
- III. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.

Resumen

La investigación aborda el estudio de bombeo superficial de crudo pesado, específicamente de un crudo con gravedad API de 16.8, bajo las condiciones atmosféricas particulares del oriente ecuatoriano. El principal objetivo del estudio es determinar los perfiles de temperatura del crudo en un tramo de 70 metros de tubería SCH-80, con 4 pulgadas de diámetro, utilizado para el transporte de crudo extrapesado. Para lograr este objetivo, se empleó la simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD), una herramienta clave para predecir el comportamiento térmico del crudo en interacción con el ambiente. A través de esta metodología, se busca entender cómo el crudo extrapesado pierde temperatura. Esto con el objetivo de poder determinar cuáles van a ser las pérdidas de temperatura en tramos de tubería mayores. Con estos datos, se podrían realizar investigaciones futuras para evaluar tecnologías de calefacción potenciales que faciliten el transporte del crudo pesado. Este enfoque abriría la puerta a la exploración de soluciones innovadoras destinadas a mejorar la eficiencia y la efectividad en la manipulación del crudo pesado, abordando así uno de los desafíos principales en su transporte: la gestión de su alta viscosidad.

Palabras Clave: Crudo pesado; CFD; simulación.

Abstract

The research addresses the study of surface pumping of heavy crude oil, specifically crude oil with an API gravity of 16.8, under the particular atmospheric conditions of eastern Ecuador. The main objective of the study is to determine the temperature profiles of the crude oil in a 70-meter section of SCH-80 pipe, with 4 inches in diameter, used for the transportation of extra-heavy crude oil. To achieve this objective, computational fluid dynamics (CFD) simulation was used, a key tool to predict the thermal behavior of crude oil in interaction with the environment. Through this methodology, we seek to understand how extra-heavy crude oil loses temperature. This is with the objective of being able to determine what the temperature losses will be in larger pipe sections. With this data, future research could be conducted to evaluate potential heating technologies that facilitate the transportation of heavy crude oil. This approach would open the door to the exploration of innovative solutions aimed at improving the efficiency and effectiveness in the handling of heavy crude oil, thus addressing one of the main challenges in its transportation: the management of its high viscosity.

Keywords: Heavy oil; CFDs; simulation.

Resumo

A pesquisa aborda o estudo do bombeamento superficial de petróleo bruto pesado, especificamente petróleo bruto com densidade API de 16,8, sob as condições atmosféricas específicas do leste do Equador. O objetivo principal do estudo é determinar os perfis de temperatura do petróleo bruto em um trecho de 70 metros de tubo SCH-80, com 4 polegadas de diâmetro, utilizado para o transporte de petróleo bruto extrapesado. Para atingir este objetivo, foi utilizada a simulação computacional de dinâmica de fluidos (CFD), uma ferramenta fundamental para prever o comportamento térmico do petróleo bruto em interação com o meio ambiente. Através desta metodologia, procuramos compreender como o petróleo bruto extrapesado perde temperatura. Isto tem o objetivo de poder determinar quais serão as perdas de temperatura em seções maiores de tubos. Com estes dados, pesquisas futuras poderão ser conduzidas para avaliar potenciais tecnologias de aquecimento que facilitam o transporte de petróleo bruto pesado. Esta abordagem abriria portas à exploração de soluções inovadoras que visassem melhorar a eficiência e eficácia no manuseamento de crude pesado, respondendo assim a um dos principais desafios do seu transporte: a gestão da sua elevada viscosidade.

Palavras-chave: Óleo pesado; CFDs; simulação.

Introducción

El crudo pesado es un crudo de alta densidad y viscosidad, este tipo de crudo se encuentra en la parte inferior del espectro de clasificación de los petróleos, de acuerdo con la medida API [1]. La explotación y transporte de crudo pesado constituyen desafíos significativos para la industria petrolera, especialmente en regiones con condiciones ambientales únicas, como el oriente ecuatoriano. El crudo extrapesado, requiere de tecnologías especializadas para su manejo eficiente, siendo la pérdida de temperatura durante su transporte uno de los principales obstáculos a superar [2]. La viscosidad del crudo, directamente relacionada con su temperatura, influye significativamente en la eficacia y el coste del bombeo a través de las tuberías [3].

Cazorla et al [4] investigaron el impacto en la producción y el factor de recobro en yacimientos de crudo extrapesado mediante la aplicación de ondas electromagnéticas en pozos horizontales. El objetivo principal fue estudiar cómo el calentamiento electromagnético puede contribuir a aumentar la producción de hidrocarburos viscosos, específicamente en la Faja Petrolífera del Orinoco en Venezuela. Se realizó una simulación numérica para analizar el comportamiento del

yacimiento y la eficacia de esta tecnología en la reducción de la viscosidad del crudo, lo que podría llevar a mejoras significativas en la extracción de estos recursos.

Tolentino et al [5] implementaron una novedosa tecnología de calentamiento de yacimientos petrolíferos mediante cápsulas de reacción nuclear. Se llevó a cabo una simulación térmica en estado estacionario de un yacimiento petrolífero similar a Cerro Negro, utilizando el software COMSOL Multiphysics con el Método de Elementos Finitos. Se diseñó una cápsula de reacción nuclear con dimensiones específicas para calentar el medio poroso, y se distribuyeron 11 cápsulas en el yacimiento para mejorar la extracción de crudo pesado y extra pesado, demostrando así la viabilidad y eficacia de esta innovadora tecnología.

Ramírez et al [3] llevaron a cabo la predicción de perfiles de temperatura y viscosidad en pozos productores de petróleo pesado implementando un calentador de inducción en el fondo del pozo. El estudio se centra en el impacto del calentamiento eléctrico en la viscosidad del petróleo pesado, con el objetivo de mejorar la movilidad del crudo y la eficiencia del pozo. Se desarrolla un modelo CFD para simular el comportamiento térmico y de viscosidad del petróleo pesado en el pozo, demostrando una disminución significativa de la viscosidad dinámica del crudo con el calentamiento eléctrico. Los resultados validan la efectividad del calentamiento por inducción en la reducción de la viscosidad del petróleo pesado, lo que puede tener implicaciones importantes para la producción de petróleo en pozos de crudo pesado.

Ante este panorama, el presente estudio se centra en la simulación del bombeo superficial de crudo pesado con una gravedad API de 16.8, con las condiciones atmosféricas específicas del oriente ecuatoriano. Mediante el uso de CFD, esta investigación busca analizar la pérdida de temperatura en un tramo de tubería de 70 metros, además de determinar cuál es el coeficiente convectivo con el que pierde el calor el fluido, sabiendo que el mecanismo principal por el que pierde la temperatura el crudo pesado es por convección con el medio ambiente.

Esta introducción al problema y al enfoque metodológico adoptado sienta las bases para una discusión más amplia sobre las soluciones potenciales y las implicaciones prácticas de los hallazgos, con el fin último de avanzar hacia un manejo más eficiente y económicamente viable del crudo extrapesado.

[1] II. Materiales y métodos

La simulación CFD es ampliamente utilizada en la industria debido a sus múltiples ventajas, entre las que destacan los bajos costes en comparación con la técnica experimental y la posibilidad de simular fenómenos físicos complicados, la simulación CFD debe validarse experimentalmente para confirmar que la configuración de los modelos y parámetros son los adecuados para el caso de estudio [6], CFD se ha utilizado ampliamente en el estudio de procesos en los existe transferencia de masa y calor en el aire [7],[8].

El modelo utilizado en la simulación tiene las mismas dimensiones que la tubería en la realidad, en la Figura 1, se puede observar el modelo utilizado en la simulación, para facilidad en la simulación se ha trabajado con un modelo 2D, las propiedades de la tubería como del crudo extrapesado se puede observar en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

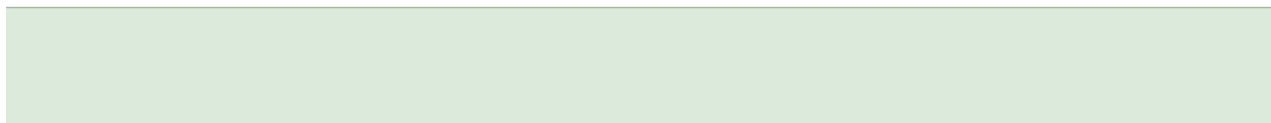


Figura1. Modelo utilizado en la simulación

Tabla 1. Propiedades térmicas de la tubería

	Tubería SCH-
Propiedades del material	80
Densidad (kg/m ³)	7850

Conductividad térmica (W/(m.k))	53
Calor específico (J/(Kg.k))	0.49

Tabla 2. Propiedades térmicas del crudo pesado

Propiedades del fluido	Crudo pesado
Densidad (Kg/m ³)	954.15
Calor específico (J/Kg.K)	1880
Conductividad térmica (W/m.K)	0.12
Viscosidad (Kg/m.s)	0.045

Para el mallado se utilizan elementos Tetrahedrons tal como se lo puede ver en la Figura 2, para medir la calidad de la malla se utiliza la métrica Orthogonal Quality, en la simulación se utilizaron 5200 elementos, este es el número óptimo de elementos ya que, a partir de este número, en la Figura 3, se puede ver que la variable analizada temperatura se estabiliza.

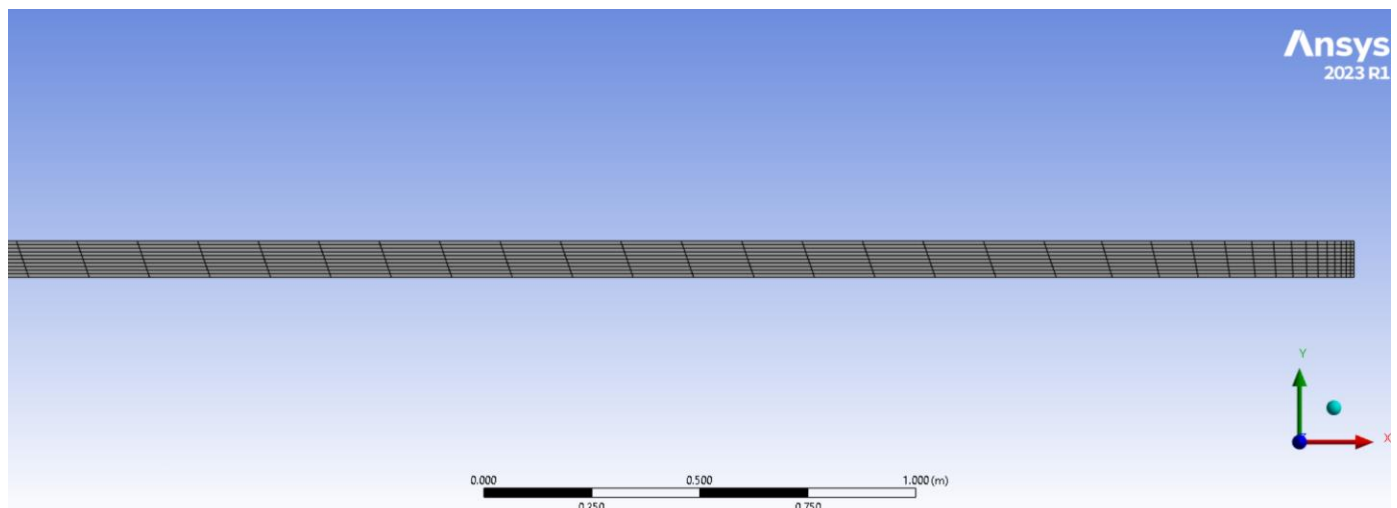


Figura 2. Modelo mallado

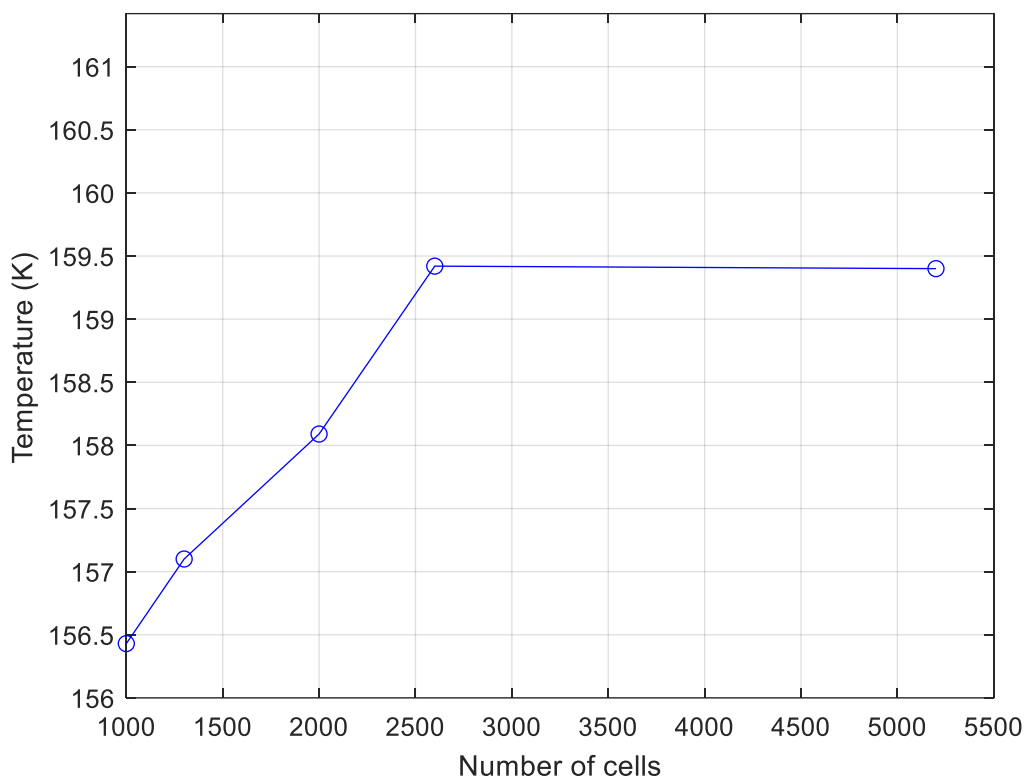


Figura 3. Tamaño de malla óptimo

Los fenómenos analizados en la simulación CFD son expresados con fórmulas matemáticas que usualmente son ecuaciones en derivadas parciales, para el análisis del bombeo superficial del crudo extrapesado se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento del fluido, considerándole al fluido como incompresible se tiene la ecuación de continuidad (1) y ecuación de momento (2)

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (2)$$

donde ρ es densidad del fluido, \vec{v} es el campo de velocidad, p es presión, μ es la viscosidad dinámica del fluido y \vec{f} son las fuerzas externas.

Para modelar la transferencia de calor del fluido que circula dentro de la tubería con el ambiente, considerando el fluido como incompresible y sin reacciones químicas se tiene la ecuación (3).

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_T \quad (3)$$

donde c_p es el calor específico a presión constante, T es la temperatura, k es la conductividad térmica, Φ representa la generación de calor por disipación viscosa y S_T es un término fuente adicional que puede incluir efectos como la transferencia de calor por radiación o fuentes de calor internas o externas.

El algoritmo que se utiliza para la simulación numérica de las ecuaciones es el SIMPLE [9], para la discretización espacial de la presión el método utilizado es el PRESTO [10], el flujo de crudo extrapesado que circula por la tubería se considera laminar ya que el número de Reynolds es menor a 2000, la ecuación utilizada es la (4).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

donde V es velocidad y D es el diámetro de la tubería.

Dada la exposición de la tubería al ambiente, resulta imperativo efectuar la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección. Para este fin, se recurre al número de Nusselt, una magnitud adimensional que cuantifica el transporte de calor por convección. La correlación entre el número de Nusselt y el coeficiente convectivo se establece a través de la ecuación (5):

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (5)$$

Donde Nu es el número de Nusselt, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, L es la longitud de la tubería y k es la conductividad térmica de la tubería.

Las condiciones de frontera utilizadas son las siguientes:

Entrada: el fluido ingresa a una velocidad de 1.19 m/s, esto debido a que el pozo analizado tiene una producción de 3625 barriles y el diámetro interior de la tubería utilizada es de 0.0848 m, la temperatura a la que ingresa es de 171 F, este dato fue tomado en el campo.

Salida: para facilidad en la simulación y considerando que el objetivo es calcular la temperatura del fluido a la salida, esta se considera que está expuesta a la presión atmosférica.

Exterior de la tubería: el exterior de la tubería se encuentra expuesto a una temperatura ambiente de 70.2 F.

[2] III. RESULTADOS

Para la corroboración de la precisión y fiabilidad de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), se procedió a la comparación de los resultados simulados con datos obtenidos experimentalmente. Específicamente, se utilizó la temperatura de salida registrada experimentalmente, la cual fue de 161 °F, y la predicción de temperatura de salida obtenida a través de la simulación CFD, que fue de 159.40 °F. La discrepancia entre estos valores se cuantificó utilizando el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE, por sus siglas en inglés), resultando en un valor de 0.993%.

Este indicador de error se sitúa considerablemente por debajo del umbral del 2%, establecido como criterio para la aceptación de simulaciones en este contexto. La presencia de un MAPE inferior al 2% indica una alta correlación entre los resultados simulados y los experimentales, lo que demuestra una adecuada precisión de la simulación CFD para representar las dinámicas térmicas del sistema bajo estudio. Este nivel de exactitud subraya la idoneidad de la metodología de simulación empleada para la predicción de parámetros críticos en procesos de transporte de fluidos, reafirmando su valor como herramienta confiable para la planificación, diseño, y optimización en ingeniería de procesos[11], [12].

En la Figura 4, se puede observar los residuales que son una herramienta crucial utilizada para evaluar la convergencia de las simulaciones numéricas, los residuales son básicamente la diferencia entre los valores calculados y los esperados de las variables de flujo, en este caso se trabaja con un convergence absolute criteria de 1e-06.

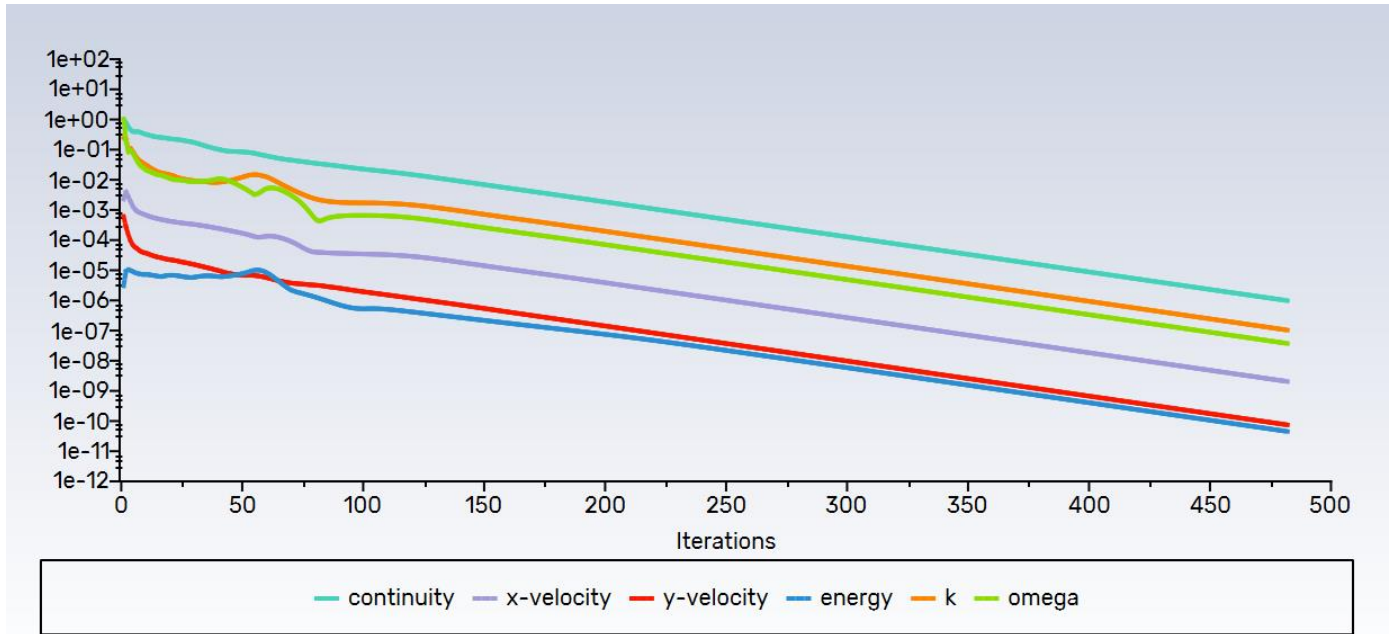


Figura 4. Curvas de residuales de la simulación

En la Figura 5, se puede observar la curva de temperatura promedio a la salida de la tubería, se puede observar que la temperatura a la que converge la simulación es de 159.40 F, misma que se encuentra en la iteración 477.

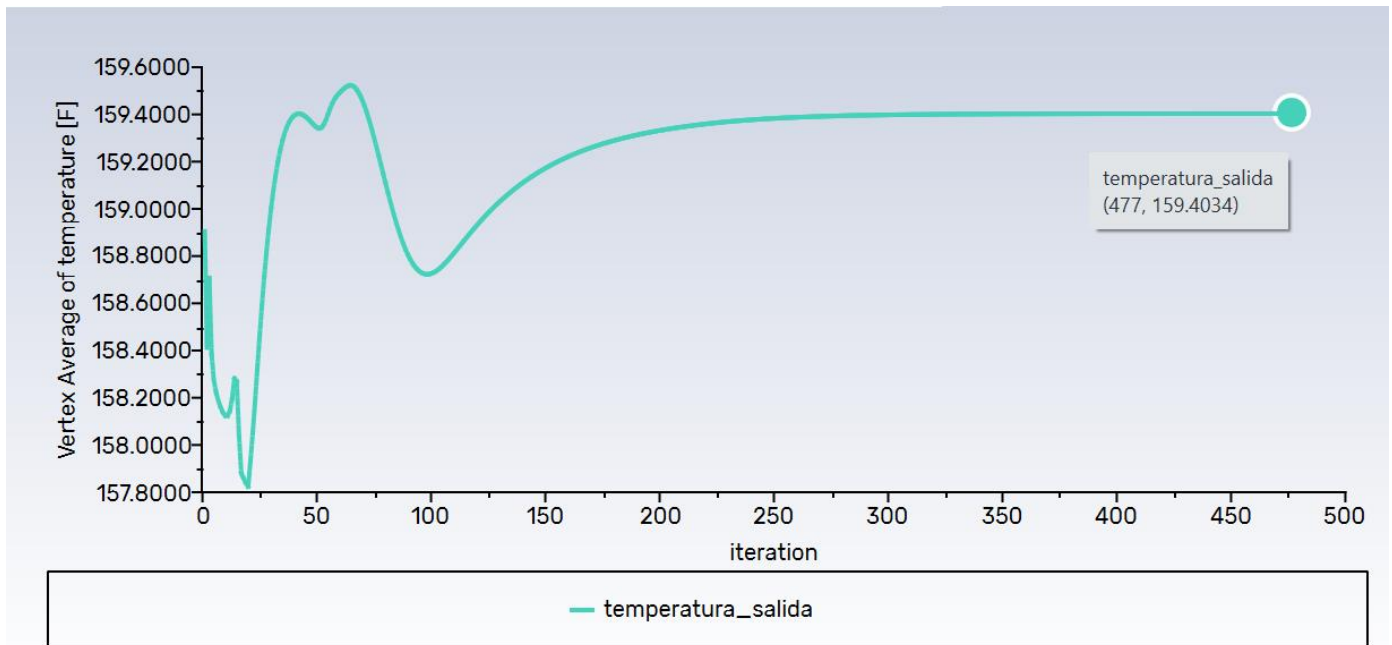


Figura 5. Temperatura a la salida de la tubería

En la Figura 6, se puede observar el perfil de temperaturas a la entrada de la tubería, que es donde la temperatura es máxima para esta simulación.

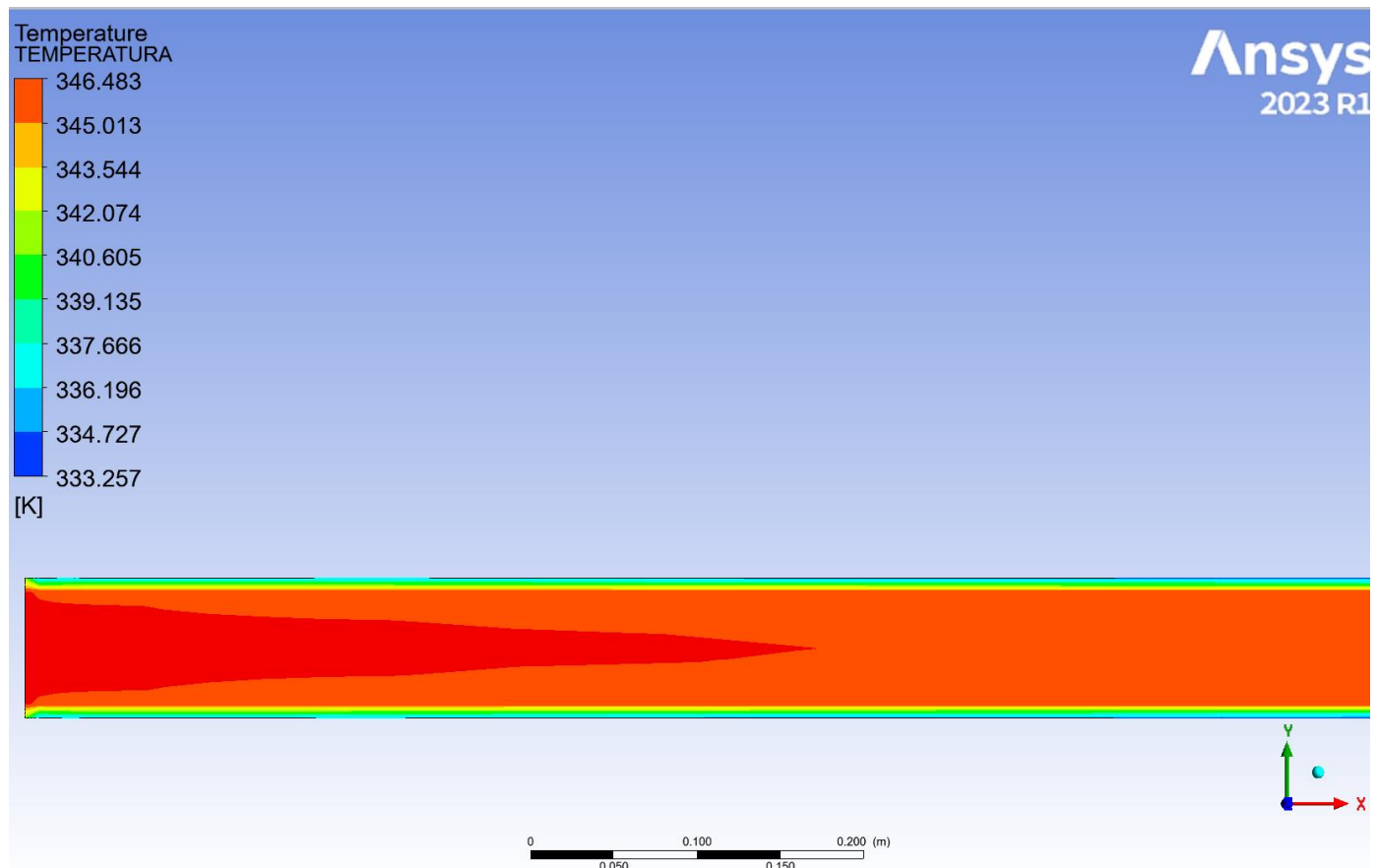


Figura 6. Perfil de temperatura a la entrada de la tubería.

En la Figura 7, se puede observar el perfil de temperaturas a la salida de la tubería.

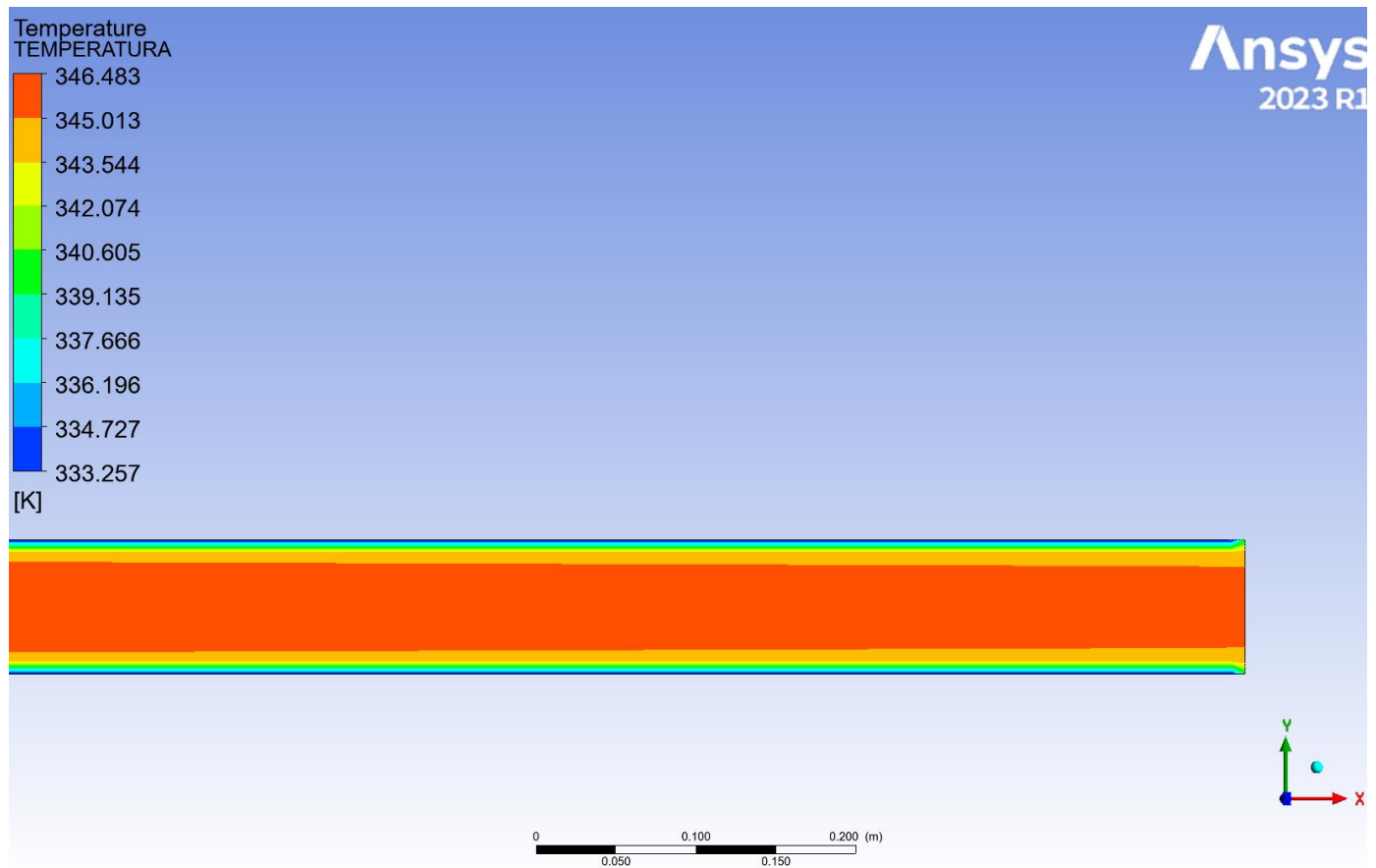


Figura 7. Perfil de temperatura a la salida de la tubería.

[3] IV. DISCUSIÓN

A partir de la integración y análisis de los datos adquiridos tanto de experimentos en condiciones controladas como de simulaciones computacionales, se evidencia una notable disminución térmica a lo largo del conducto de transporte de crudo, específicamente, una reducción de temperatura desde 171 °F en el punto de inicio hasta 159.07 °F en el extremo final del segmento evaluado de 70 metros. Este fenómeno de disminución térmica puede atribuirse primordialmente a la interacción térmica con el medio ambiente circundante, el cual registra una temperatura de 70.2 °F.

Este comportamiento térmico observado sugiere una transferencia de calor significativa entre el fluido transportado y el entorno, mediada por la infraestructura de la tubería. Dicha transferencia es indicativa de las complejas dinámicas de intercambio térmico que ocurren en sistemas de transporte de fluidos, especialmente cuando estos se encuentran expuestos a diferencias

sustanciales de temperatura ambiental. La comprensión detallada de estos procesos es vital para el desarrollo de estrategias de aislamiento y mantenimiento térmico que busquen minimizar las pérdidas energéticas y optimizar la viscosidad del crudo pesado, asegurando así un flujo eficiente y estable a través de la infraestructura de transporte.

Además, los resultados subrayan la importancia de considerar las condiciones ambientales externas en el diseño y la operación de sistemas de tuberías para crudos pesados. Las implicaciones de estos hallazgos son amplias, abarcando desde el diseño ingenieril hasta la implementación de tecnologías avanzadas para la gestión térmica, lo cual es crucial para mejorar la eficiencia energética y operativa en el transporte de hidrocarburos.

[4] V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación de técnicas avanzadas de dinámica de fluidos computacional (CFD) facilitó la cuantificación precisa de las variaciones térmicas a lo largo de un tramo de tubería de 70 metros utilizado en el transporte de crudo pesado. Este riguroso análisis permitió elucidar con gran detalle los perfiles de temperatura y las complejas interacciones térmicas subyacentes, elementos cruciales para la optimización de los procedimientos de transporte y la preservación de la integridad operativa del sistema. Los hallazgos adquiridos proporcionan insights fundamentales para el diseño y refinamiento de estrategias de mantenimiento térmico, aportando de manera significativa a la eficacia y seguridad en la gestión del traslado de crudo extrapesado.

Estos resultados constituyen un pilar fundamental para futuras investigaciones enfocadas en el desarrollo de tecnologías de calentamiento para crudo extrapesado, buscando mantener su viscosidad dentro de rangos que optimicen la eficiencia del transporte. Este enfoque promete no solo mejorar la viabilidad técnica del proceso de transporte sino también incrementar la sostenibilidad operacional a través de la implementación de soluciones innovadoras para el manejo de crudos de alta viscosidad.

Referencias

- [1] J. G. Speight, “Chapter 1-occurrence and formation of crude oil and natural gas,” *Subsea and Deepwater Oil and Gas Science and Technology*, pp. 1–43, 2015.
- [2] C. Zou, “Heavy oil and bitumen,” *Unconventional petroleum geology*, pp. 345–370, 2017.

- [3] J. Ramírez, A. Zambrano, and N. Ratkovich, “Prediction of Temperature and Viscosity Profiles in Heavy-Oil Producer Wells Implementing a Downhole Induction Heater,” *Processes*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/pr11020631.
- [4] Cazorla and J. J., “Evaluación de la producción y el factor de recobro en yacimientos de crudo extra pesado a través de la aplicación de ondas electromagnéticas en pozos horizontales,” Sep. 2013, Accessed: Feb. 18, 2024. [Online]. Available: <http://saber.ucv.ve/handle/10872/4261>
- [5] S. L. Tolentino, S. Caraballo, Á. Duarte, and J. Mendoza, “Calentamiento de yacimientos petrolíferos mediante cápsulas de reacción nuclear,” *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 20, no. 79, pp. 58–68, 2016, Accessed: Feb. 18, 2024. [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212016000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [6] Q. Tu, Z. Ma, and H. Wang, “Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 452, p. 139200, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139200>.
- [7] E. Getahun, M. A. Delele, N. Gabbiye, S. W. Fanta, P. Demissie, and M. Vanierschot, “Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review,” *Solar Energy*, vol. 220, pp. 88–110, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.049>.
- [8] P. D. Tegenaw, M. G. Gebrehiwot, and M. Vanierschot, “On the comparison between computational fluid dynamics (CFD) and lumped capacitance modeling for the simulation of transient heat transfer in solar dryers,” *Solar Energy*, vol. 184, pp. 417–425, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.024>.
- [9] A. Benhamza, A. Boubekri, A. Atia, T. Hadibi, and M. Arıcı, “Drying uniformity analysis of an indirect solar dryer based on computational fluid dynamics and image processing,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101466, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101466>.
- [10] ANSYS, *Ansys Fluent Theory Guide*, 2023 R1. Canonsburg, 2023.
- [11] F. Hussain, M. Jaskulski, M. Piatkowski, and E. Tsotsas, “CFD simulation of agglomeration and coalescence in spray dryer,” *Chem Eng Sci*, vol. 247, p. 117064, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117064>.

- [12] J. Cabrera-Escobar, D. Vera, F. Jurado, and R. Cabrera-Escobar, “CFD investigation of the behavior of a solar dryer for the dehydration of olive pomace,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, no. 1, pp. 902–917, Dec. 2024, doi: 10.1080/15567036.2023.2292242.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).