

Análisis Termodinámico en ANSYS del Llenado con Hidrógeno de un Cilindro de Almacenamiento Tipo III

Thermodynamic Analysis in ANSYS of Hydrogen Filling in a Type III Storage Cylinder

Johan Sebastián Ramírez Carrascal¹

¹ Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Parque Tecnológico UIS Guatiguará, km 2 vía El Refugio, Piedecuesta, Colombia.

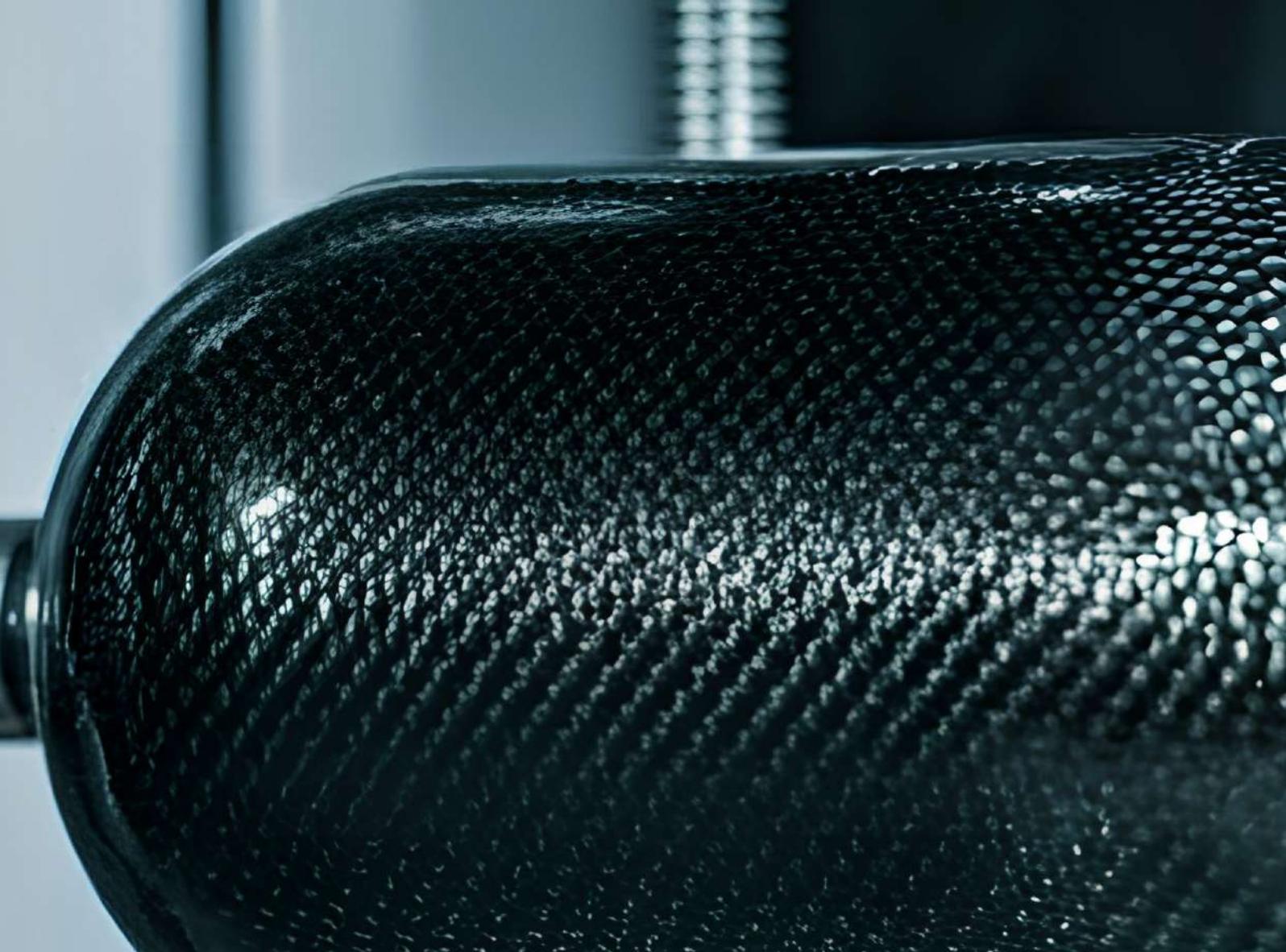
ingenierojohanramirez@hotmail.com

Resumen

En la actualidad, la transición energética es un proceso global en el que países e industrias están adaptando sus sistemas de producción y consumo hacia fuentes más limpias, sostenibles y renovables. El hidrógeno (H_2) ha surgido como una alternativa para reducir las emisiones de carbono, siendo su uso en mezcla con gas natural un tema de gran interés. En este contexto, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, a través de su Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE), está desarrollando un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, el cual se centra en la evaluación de la adición de hidrógeno en mezcla con gas natural, aplicado a los sistemas de almacenamiento y estaciones de llenado de gas natural vehicular (GNV).

En este artículo se presenta una simulación 2D realizada en ANSYS del proceso de llenado de un cilindro de almacenamiento de hidrógeno con énfasis en la distribución térmica. Se realizó un mallado a la geometría del cilindro, se utilizó como fluido de llenado el hidrógeno y se asignaron parámetros específicos de cada material.

Los resultados permitieron analizar el comportamiento termodinámico del cilindro de almacenamiento durante el proceso de llenado con hidrógeno. Se logró observar la distribución de la temperatura en el cilindro, así como el perfil de presión durante el llenado.



Abstract

Currently, the energy transition is a global process in which countries and industries are adapting their production and consumption systems toward cleaner, more sustainable, and renewable sources. Hydrogen has emerged as an alternative to reduce carbon emissions, with its use in *blending* with natural gas being a topic of great interest. In this context, the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico Del Gas, through its Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE), is developing a project funded by the Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, focused on evaluating the addition of hydrogen blended with natural gas, applied to storage systems and CNG filling stations.

This article presents a 2D simulation performed in ANSYS of the hydrogen storage tank filling process, with an emphasis on thermal distribution. A mesh suitable for working with hydrogen was used, along with parameters for each specific material and certain initialization conditions

The results allowed the analysis of the thermodynamic behavior of the storage tank during the hydrogen filling process. The temperature distribution in the cylinder, as well as the pressure profiles during filling, can be observed.

Palabras clave

Hidrógeno, simulación 2D, distribución térmica, llenado de cilindro, mezcla.

1. Introducción

Lograr reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha llevado a las industrias a contemplar el uso de soluciones más limpias y sostenibles a largo plazo. Una de éstas es el uso del hidrógeno en mezcla con gas natural, para así lograr, de cierta manera, reducir la huella de carbono. Se espera que el uso de concentraciones variables de H_2 en mezcla con gas natural haga que la transición sea más gradual y eficiente, y permita aprovechar el modelo de distribución y la infraestructura existente de gas natural, como las redes de distribución y las estaciones de servicio de llenado de GNV, sin tener que modificar de manera significativa los modelos de operación e infraestructura actuales del GNV.

Durante el proceso de llenado de los cilindros de GNV, se presentan cambios de temperatura los cuales dependen de la composición de la mezcla. Por lo tanto, es relevante observar si la adición de hidrógeno al gas natural afecta la evolución de la temperatura del cilindro. Diversas propiedades termodinámicas son función de la composición; por consiguiente, al añadir hidrógeno al gas natural, estas varían. Por ejemplo, el hidrógeno tiene una energía interna alta, una densidad muy baja y un coeficiente Joule-Thomson negativo, por lo cual el gas se calienta al momento de expandirse al pasar por la boquilla de entrada del cilindro al inicio del llenado y continúa calentándose debido a la compresión. En contraste, el gas natural tiene una densidad alta y un coeficiente Joule-Thomson positivo, por lo cual el gas se enfría al expandirse a través de la boquilla de entrada del cilindro al principio del llenado y, posteriormente, se calienta debido a la compresión, y las temperaturas que alcanza durante el proceso de llenado son relativamente más bajas. Por ello, es importante

realizar simulaciones y pruebas experimentales para conocer los perfiles de presión y temperatura durante el llenado y poder así evitar riesgos al momento de operatividad.

Las condiciones de operación de los cilindros tipo III en uso con H_2 se encuentran en un rango de presión de 35 a 70 MPa y en un rango de temperatura de -40 a 65 °C. Los cilindros tipo III son cilindros con revestimiento metálico, usualmente fabricado en aluminio y reforzados con material compuesto, como fibra de vidrio o fibra de carbono. Se caracterizan por ser livianos, resistir altas presiones y tener resistencia al impacto. Además, están compuestos por diferentes materiales, como el revestimiento de aluminio, que facilita la transferencia de calor y actúa como una barrera para evitar fugas y proteger las otras capas del cilindro; la fibra de carbono, que soporta presiones altas y aporta una mayor resistencia a la tensión y la compresión, lo cual aumenta la vida útil del cilindro; y la fibra de vidrio, que es un material ligero y tiene buenas propiedades mecánicas, por lo que proporciona resistencia y soporte estructural.

Estudios previos han realizado análisis del comportamiento termodinámico en cilindros de almacenamiento aptos para hidrógeno, como los trabajos de Li *et al.* (2012) [1], Kheir *et al.* (2023) [2] y Kesana *et al.* (2023) [3], los cuales presentan simulaciones 2D que permitieron analizar la variación termodinámica durante el proceso de llenado con hidrógeno en diferentes periodos de tiempo.

El trabajo realizado tiene como objetivo principal la simulación termodinámica del llenado de un cilindro de almacenamiento apto para hidrógeno, con el fin de observar cómo varía la temperatura durante las etapas del llenado. Para ello, se diseñó un esquema

2D de un cilindro de almacenamiento tipo III en ANSYS, sobre el cual se realizó una simulación para modelar el comportamiento del hidrógeno durante proceso de llenado.

2. Metodología

La metodología se divide en cuatro etapas, las cuales son, la construcción de la geometría, la definición del mallado, la delimitación de zonas y la asignación de propiedades de los materiales junto a la definición de parámetros de inicialización.

2.1 Construcción de la geometría del cilindro

Para este estudio, se realizó mediante diseño asistido por computadora, la construcción de un cilindro compuesto tipo III. El cilindro se construyó en ANSYS con una longitud de 1420 mm, un radio de 217.5 mm y compuesto por tres capas, una de fibra de vidrio con espesor de 1 mm, una de fibra de carbono con espesor de 8 mm y una de revestimiento de aluminio con espesor de 3 mm. Para este caso, se muestra el bosquejo realizado en ANSYS donde se detallan las capas que componen el cilindro, como se observa en la Figura 1.

2.2 Definición del mallado

El mallado es el proceso de segmentar una geometría en elementos más pequeños conectados por nodos. Es importante establecer un mallado que permita la fluidez de la simulación, ya que, si el mallado no es compatible o los pasos de tiempo son muy grandes, podrían presentarse problemas al momento de simular.

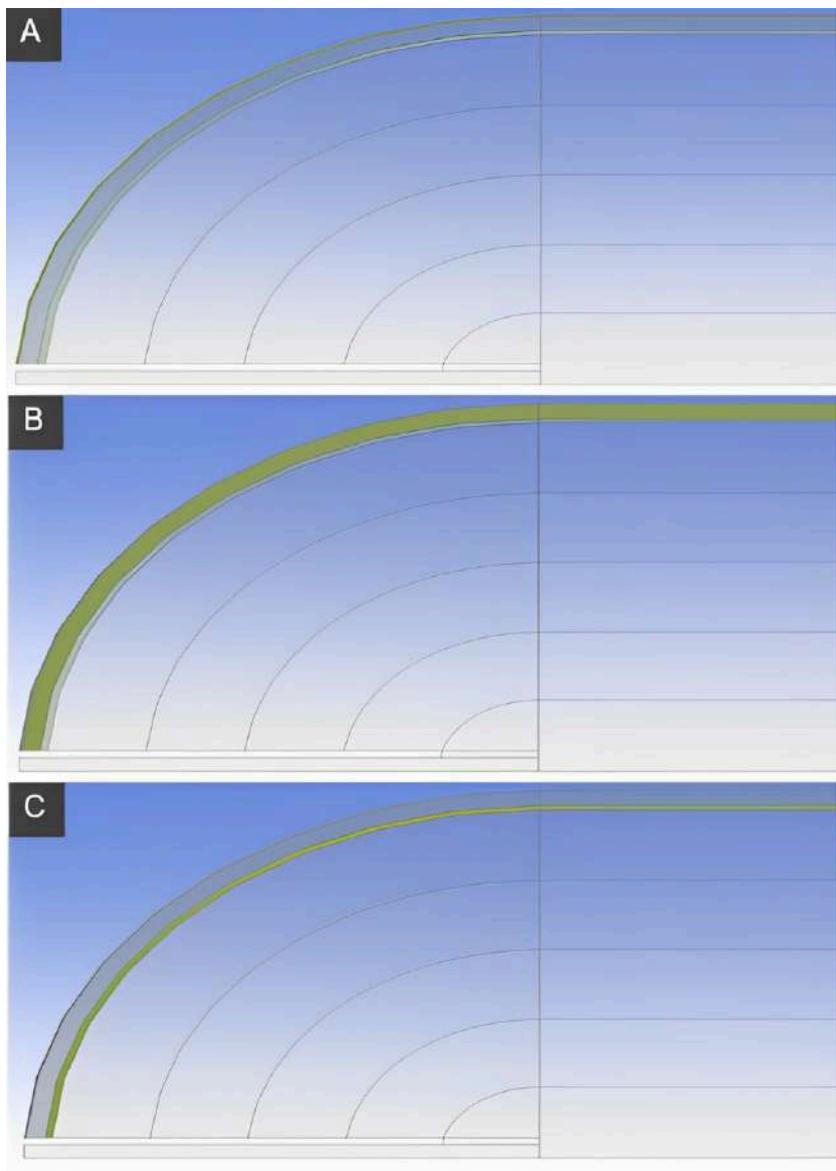


Figura 1. Estructura del cilindro compuesto tipo III. [A] Capa de fibra de vidrio de 1 mm de espesor. [B] Capa de fibra de carbono de 8 mm de espesor. [C] Revestimiento de aluminio de 3 mm de espesor.



Figura 2. Seccionamiento de la geometría del cilindro en varias divisiones.

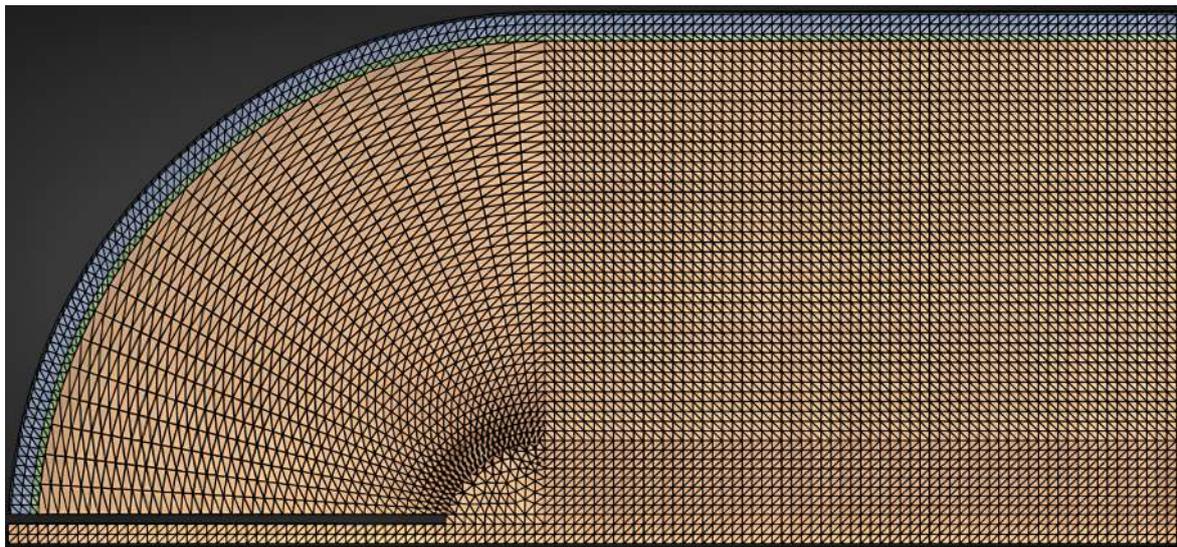


Figura 3. Mallado con método triangular de 4 mm x 4 mm.

El mallado se realizó en ANSYS, seccionando la geometría del cilindro en varias divisiones, como se muestra en la Figura 2. El tamaño de la malla se basó en el modelo descrito en el artículo de Li *et al.* (2012) [1]. En este estudio, el seccionamiento se hizo con el comando *facesplit*, y se utilizó una metodología de mallado triangular con un tamaño de malla de 4 mm x 4 mm, como se muestra en la Figura 3.

2.3 Zonas de frontera

Debido a que la geometría del cilindro es simétrica, se definió un eje de simetría para simular solamente la mitad del cilindro, lo que permite un ahorro de

recursos computacionales. Además, se definieron las condiciones de frontera, como la entrada del flujo másico, que es la zona por donde ingresa el hidrógeno al cilindro durante el llenado; la pared de frontera, que representa los límites físicos del cilindro; y la pared adiabática, que es un límite térmicamente aislado donde el flujo de calor es cero.

La distribución de las zonas se muestra en la Figura 4.

2.4 Zonas de contacto

Para este proceso, el flujo de energía térmica iría desde el hidrógeno hacia el revestimiento de aluminio, desde el



Figura 4. Zonas de referencia. Inlet (A) es la entrada de flujo másico, Axis (B) es el eje de simetría, Wall (C) es la pared de frontera y Adiabatic wall (D) es la pared adiabática.

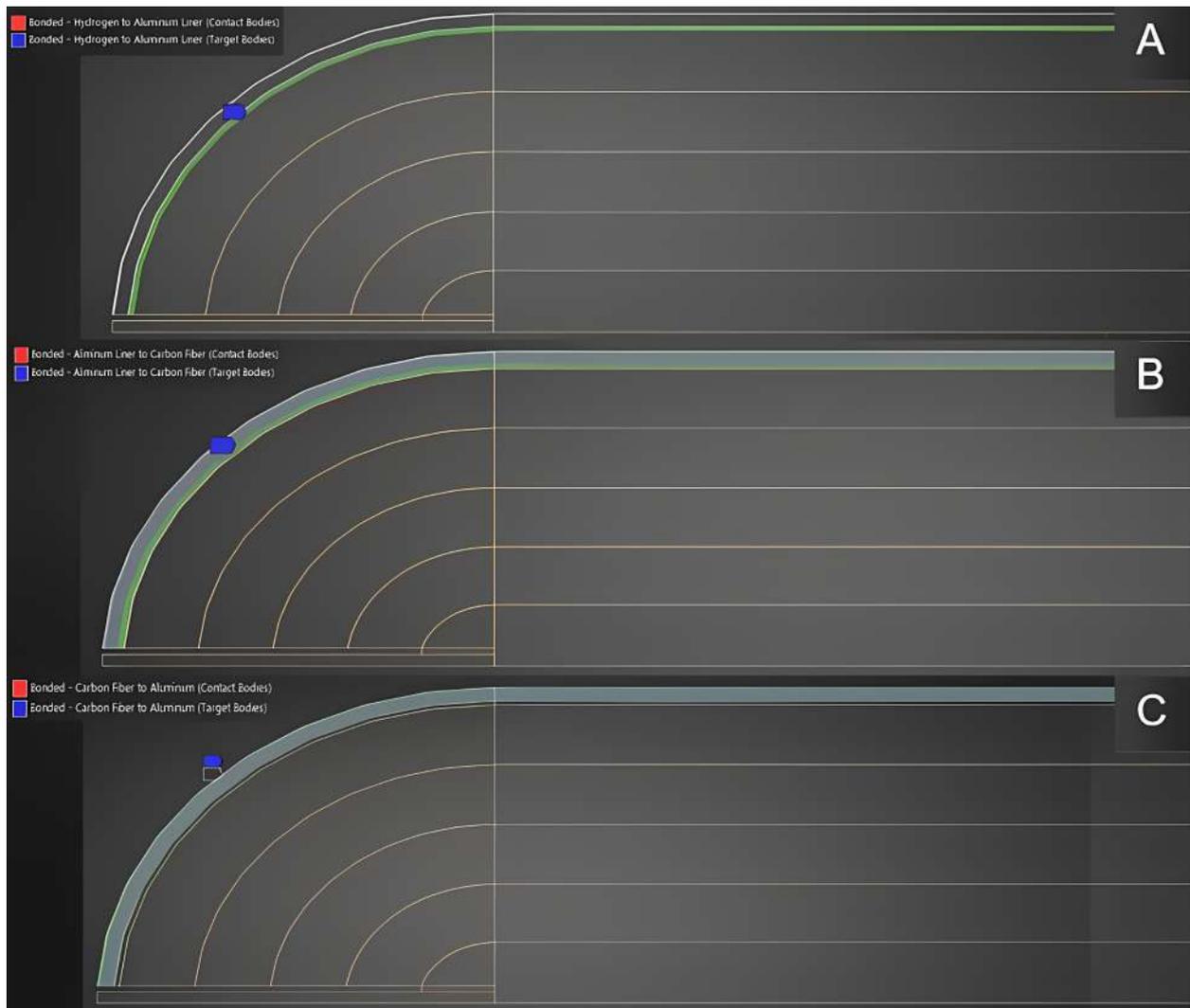


Figura 5. Zonas de contacto. [A] Zona de contacto entre el hidrógeno y el revestimiento de aluminio. [B] Zona de contacto entre el revestimiento de aluminio y la fibra de carbono. [C] Zona de contacto entre la fibra de carbono y la fibra de vidrio.

revestimiento de aluminio hacia la fibra de carbono y desde la fibra de carbono hacia la fibra de vidrio. Por lo tanto, la pared interior es la zona donde se modela la transferencia de calor del hidrógeno al revestimiento de aluminio, la zona de contacto revestimiento de aluminio - fibra de carbono modela la interacción térmica entre la capa de revestimiento de aluminio y la capa de fibra de carbono, y la zona de contacto fibra de carbono - fibra de vidrio modela la interacción térmica entre la capa de fibra de carbono y la capa de fibra de vidrio.

Las zonas de contacto se muestran en la Figura 5.

2.5 Asignación de propiedades de propiedades de los materiales y definición de parámetros de inicialización

En este caso, se simuló el llenado con hidrógeno de un cilindro de almacenamiento tipo III, introduciendo H₂ a una presión de 24.82 MPa y una temperatura de 300 K, como se muestra en la Tabla 1. Se consideró el sistema como adiabático, transitorio y turbulento. No se tuvo en consideración la transferencia de calor con el ambiente.

Los valores utilizados para las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 2 [1].

Tabla 1. Condiciones iniciales.

Variable	Valor	Unidades
Flujo másico	0.0118914	kg/s
Temperatura de entrada del hidrógeno	298.15	K
Presión de entrada del hidrógeno	24.82113	MPa
Presión inicial del cilindro	0.101325	MPa
Temperatura inicial del cilindro	298.15	K

Tabla 2. Propiedades de los materiales [1].

Material	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kg*mol]	Conductividad Térmica [W/mK]
Revestimiento de aluminio	2700	902	238
Fibra de carbono	1513	920	3.72
Fibra de vidrio	2050	878.4	0.133

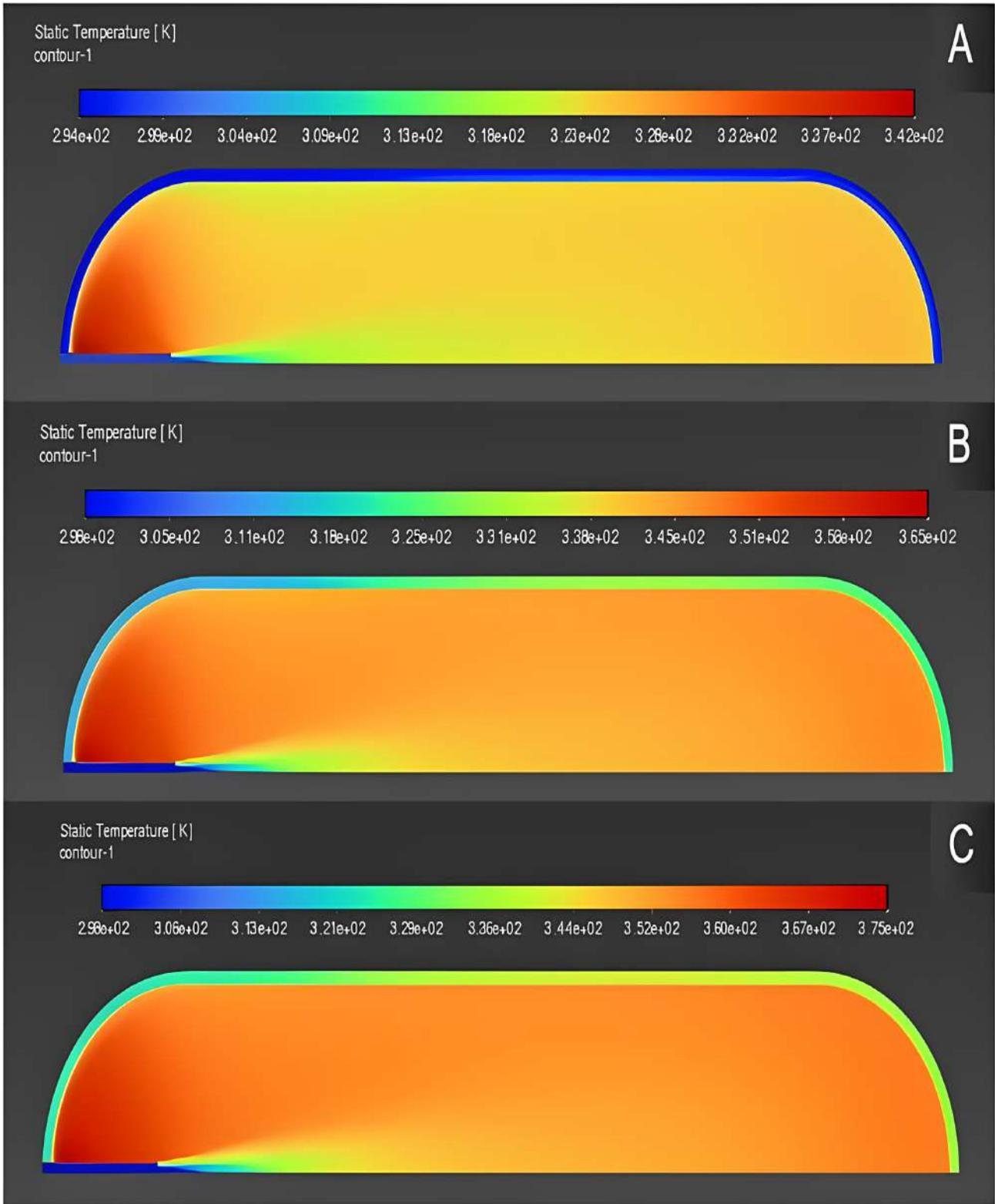


Figura 6. Distribución de temperatura en el cilindro en diferentes valores de tiempo transcurrido. [A] 10 segundos. [B] 120 segundos. [C] 185 segundos.

3. Resultados

La Tabla 3 muestra la evolución de la presión y la temperatura en función del tiempo durante el proceso de llenado.

Al analizar el comportamiento termodinámico, se logra observar que, al final del llenado, la temperatura del hidrógeno presenta un aumento de alrededor de 73.6 K debido a la compresión que va sufriendo el

hidrógeno a medida que ingresa más cantidad de fluido al cilindro.

La capa de revestimiento de aluminio, al estar en contacto directo con el hidrógeno, es la superficie que experimenta mayor variación de temperatura en comparación con las capas de fibra de carbono y fibra de vidrio.

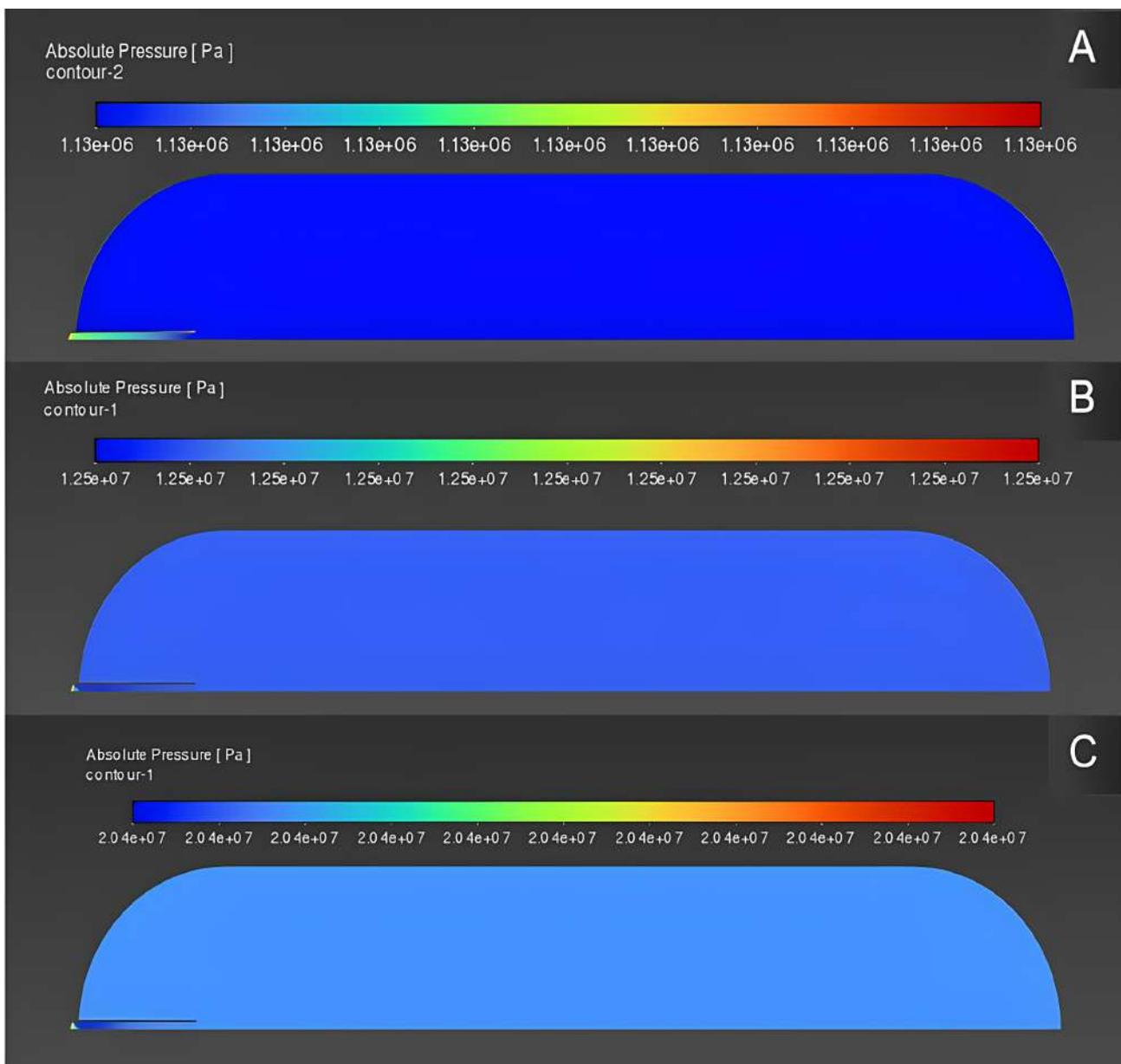


Figura 7. Distribución de presión en el cilindro en diferentes valores de tiempo transcurrido. [A] 10 segundos. [B] 120 segundos. [C] 185 segundos.

Tabla 3. Toma de datos de la variación de la presión y la temperatura en diferentes pasos de tiempo durante el llenado con H₂ del cilindro

Tiempo de llenado	Presión máxima [MPa]	Temperatura máxima [K]
0	0.101325	298.15
10	1.20937	341.99
60	6.06741	353.90
120	12.4941	362.53
185	20.5352	371.76

4. Conclusiones

Para la simulación realizada, se observa que el proceso de llenado del cilindro hasta 20.4 MPa tardó 185 segundos y tuvo un aumento en la temperatura de 73.61 K.

La capa del revestimiento de aluminio presenta la mayor variación de temperatura, lo que indica que cumple la función de disipar el calor y proteger a las capas externas.

Para este caso, el modelo se desarrolló bajo parámetros simplificados considerando el sistema como adiabático y sin tener en cuenta la transferencia de calor hacia el ambiente. Por ello, es importante realizar estudios donde sí se consideren los parámetros anteriores para poder tener una aproximación lo más cercana posible a cómo sería el comportamiento real al momento de realizar un llenado utilizando hidrógeno.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, con recursos del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la

Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas, y hace parte de la ejecución del programa "Manejo integral del hidrógeno en mezcla con gas natural como medio para facilitar la transición energética hacia energías renovables", co-ejecutado por el CDT de Gas, la Corporación para la Investigación de la Corrosión, la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, la Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil) y Promigas S.A. E.S.P.

Referencias

- [1] Li Q., Zhou J., Chang Q., Xing W. 2012. Effects of geometry and inconstant mass flow rate on temperatures within a pressurized hydrogen cylinder during refueling. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(7): 6043-6052. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.020
- [2] Kheir A., Mounir H., Lafdaili Z., Rajad O., Lagrat I. 2023. Modeling and analysis of laminate structures of a pressurized hydrogen tank. *E3S Web of Conferences* 469: 00022. doi: 10.1051/e3sconf/202346900022
- [3] Kesana N. R., Welahettige P., Hansen P. M., Ulleberg Ø., Vågsæther K. 2023. Modelling of fast fueling of pressurized hydrogen tanks for maritime applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(79): 30804-30817. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.142