

Diseño paramétrico de un tanque para almacenamiento de hidrógeno

Parametric design of a hydrogen storage tank

Martín Said Pérez Rodríguez¹, Ana Lucía León Razo¹, Miguel Ernesto Gutiérrez Rivera¹

¹División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, C.P. 36885, Salamanca, Guanajuato, México.
ms.perezrodriguez@ugto.mx (M.S.P.R.), al.leonraza@ugto.mx (A.L.L.R.), miguel.gutierrez@ugto.mx (M.E.G.R.)

Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño paramétrico y la optimización estructural de un recipiente a presión tipo II destinado al almacenamiento de hidrógeno. El objetivo principal del proyecto es minimizar la masa del recipiente, sin comprometer su resistencia mecánica. Para ello, se implementa un enfoque de optimización basado en algoritmos genéticos multiobjetivo, mediante el programa comercial ANSYS Workbench, utilizando como condición de carga la presión de estallamiento. El diseño óptimo obtenido es validado mediante simulaciones numéricas a través del método de elemento finito, concluyendo que éste soporta la presión de estallamiento y que su masa es baja.

Palabras clave: Recipientes a presión; modelo de elemento finito; optimización; almacenamiento de hidrógeno.

Introducción

En la actualidad, el cambio climático es un tema de preocupación creciente a nivel global. Este fenómeno se debe, en gran medida, al aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, especialmente del dióxido de carbono (CO_2). La principal causa de este incremento es el uso excesivo de los combustibles fósiles, impulsado por el crecimiento industrial y poblacional. Las tendencias indican que el cambio climático afectará más a los países en desarrollo, debido a su limitada capacidad de adaptación (Andrade et al., 2016).

En este sentido, resulta fundamental analizar los sectores que más contribuyen a dichas emisiones. Los combustibles fósiles tienen como principal aplicación el sector del transporte, donde se utilizan para impulsar motores de combustión interna. Otra de sus funciones relevantes es la generación de energía eléctrica. México se encuentra entre los principales productores y exportadores de electricidad, siendo esta producción mayoritariamente dependiente de fuentes fósiles. De acuerdo con Vijay et al. (2004), México generó 104,501 kilotoneladas de emisiones de CO_2 , lo que resalta la necesidad urgente de encontrar alternativas sostenibles a los combustibles fósiles, con el objetivo de mitigar la contaminación ambiental asociada a su uso.

Frente a este panorama, a lo largo de los años, se han desarrollado diversas fuentes de energía renovable como alternativas viables al uso de combustibles fósiles, entre las que se incluyen los colectores solares, las celdas de combustible y los sistemas eólicos. Muchas de estas tecnologías han experimentado un proceso de desarrollo y perfeccionado, aumentando su confiabilidad y mejorando su rentabilidad en distintas aplicaciones (Posso, 2002). En este contexto, el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno, se ha presentado como una posible solución a la problemática actual (Celaya et al., 2022). Sin embargo, aún se presentan desafíos significativos en la implementación del hidrógeno, uno de ellos su almacenamiento seguro.

Como se mencionó anteriormente, el almacenamiento de hidrógeno representa un desafío considerable, ya que se requieren contenedores de gran volumen para almacenarlo. Esta limitación ha dificultado su implementación en vehículos de transporte, especialmente por las restricciones de espacio y peso. No obstante, Hernández et al. (2010) señalan que el uso de hidrógeno como combustible en motores de combustión interna alternativos presenta un comportamiento similar al de los combustibles fósiles y, bajo condiciones óptimas, puede alcanzar una eficiencia aproximadamente un 25% superior a la de la gasolina.

Cabe destacar que, desde el punto de vista fisicoquímico, el hidrógeno, cuando se emplea como combustible, es un gas incoloro, inodoro y con una alta densidad energética por unidad de masa. Si bien produce la mayor cantidad de energía por peso entre los combustibles conocidos, su baja densidad volumétrica representa una desventaja. Su poder calorífico es de 23 kcal/mol (González et al., 2009), superando incluso el poder calorífico del gas natural, lo que refuerza su potencial como fuente energética limpia y eficiente.

Desde el punto de vista técnico, los recipientes sometidos a presión se catalogan en cuatro tipos, los cuales se describen a continuación (Gemin, L., 2017):

- **Tipo I.** Recipientes tradicionales que están contruidos solo de metal, generalmente de acero.
- **Tipo II.** Recipiente metálico por lo general de acero o aluminio, el cual se refuerza envolviéndolo con un material compuesto en la parte cilíndrica.
- **Tipo III.** Recipiente con revestimiento metálico, envuelto totalmente por un material compuesto el cual soporta las cargas en su totalidad.
- **Tipo IV.** Recipiente fabricado comúnmente de algún polímero termoplástico, donde las cargas siguen siendo soportadas totalmente por un material compuesto.

Los recipientes a presión han sido elementos fundamentales durante varias décadas, con aplicaciones que abarcan desde el almacenamiento de bebidas carbonatadas hasta el almacenamiento de combustibles, entre otros usos. En la actualidad, estos recipientes se diseñan con la intención de soportar presiones elevadas y bajas temperaturas. Para ello, se ha optado por emplear diversos materiales, entre los que destacan los materiales compuestos. Sin embargo, a pesar de sus grandes ventajas, uno de los principales inconvenientes sigue siendo su elevado costo.

Por lo general, los materiales compuestos reforzados con fibras se caracterizan por contar con un módulo de elasticidad alto. Un ejemplo notable son las fibras de carbono, que presentan excelentes propiedades mecánicas, como alta resistencia por unidad de peso, bajo coeficiente de expansión térmica y una notable resistencia a la fatiga. No obstante, su alto costo hace que la industria aeroespacial sea su principal fuente de aplicación (Gemin, L., 2017).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es contribuir en el estudio de los recipientes a presión reforzados con un material compuesto en la zona cilíndrica, mediante el análisis numérico, para encontrar una alternativa confiable que satisfaga las necesidades de los recipientes, además de garantizar que la masa del recipiente sea baja.

Proceso de análisis

Esta sección describe la metodología empleada para analizar y optimizar la masa del recipiente a presión tipo II mediante herramientas de simulación numérica. El proceso comprende realizar la geometría del recipiente, definir los materiales a utilizar, realizar el mallado, definir las condiciones de frontera, para finalmente realizar la optimización. En las siguientes subsecciones se detallan cada una de estas etapas.

Geometría del recipiente

En la Figura 1 se muestra parcialmente la geometría del tanque, donde se distinguen claramente sus diferentes componentes: el *liner* metálico y la cabeza, ambos en color turquesa, así como el refuerzo de material compuesto en color violeta. Asimismo, se observan variaciones en el espesor de cada una de estas partes. Los parámetros mostrados en la Figura 1 son de gran importancia en el modelo, ya que se consideran las variables de entrada para la optimización. Estos parámetros corresponden a:

- t_l , espesor del liner (cuerpo del recipiente en la parte cilíndrica).
- t_r , espesor del material del refuerzo (parte cilíndrica).
- t_h , espesor en la cabeza del recipiente en la parte más cercana a la boquilla de alimentación.

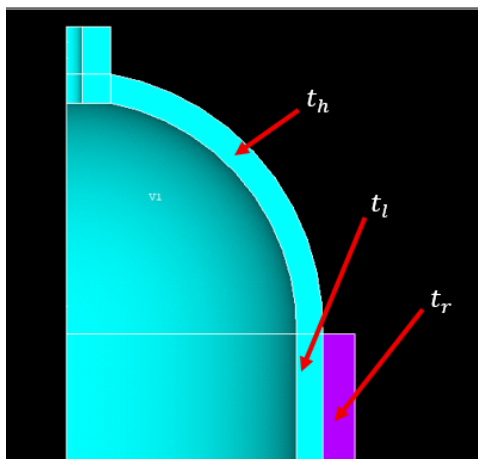


Figura 1. Espesores del tanque.

Materiales

En este análisis se utilizaron dos materiales. Para el cuerpo del tanque, se usó el acero AISI 316L considerándolo como un material multilineal. En la parte inicial, donde el comportamiento es elástico, se emplearon las propiedades listadas en la Tabla 1. Mientras que, para la parte donde se sufre deformación plástica, se utilizó la aproximación de Ramberg-Osgood realizada por Real et al. (2014) y Arrayago et al. (2015), para este mismo material.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI 316L.

| Propiedad | Valor |
|-----------|-------|
| E (GPa) | 200 |
| ν | 0.3 |

Por otro lado, el refuerzo del tanque está compuesto por fibra de carbono, cuyas propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 2, siendo E el módulo de elasticidad, G el módulo de elasticidad a cortante y ν la relación de Poisson. Estas propiedades están expresadas en el sistema de coordenadas cilíndricas, correspondiente a la orientación de las fibras en el refuerzo.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono.

| Propiedad | Valor |
|------------------------------|-------|
| E_x (GPa) | 233 |
| $E_r = E_\theta$ (GPa) | 23.1 |
| $\nu_{xr} = \nu_{x\theta}$ | 0.2 |
| $\nu_{r\theta}$ | 0.4 |
| $G_{xr} = G_{x\theta}$ (GPa) | 8.96 |
| $G_{r\theta}$ (GPa) | 8.27 |

Definición de la malla y condiciones de frontera

Con el objetivo de ahorrar tiempo de cómputo y gracias a la geometría del tanque se optó por solo modelar una octava parte del recipiente, aplicando la condición de simetría en los bordes de este mismo. Por otro lado, se aplica una carga de presión en las áreas internas del recipiente sólido. Las condiciones de frontera se presentan de forma esquemática en la Figura 2.

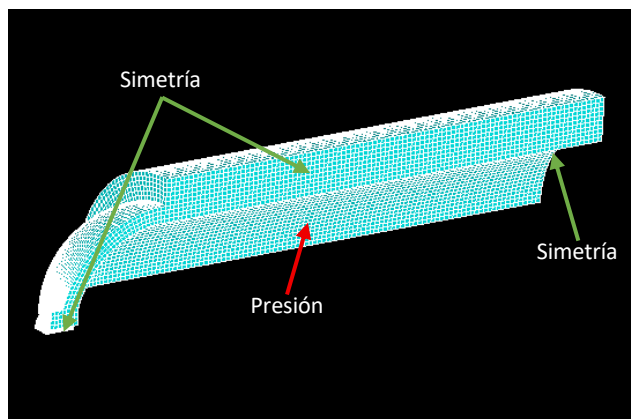


Figura 2. Condiciones de frontera del recipiente.

Para el mallado del modelo de elemento finito se utilizó el elemento Solid186, representado en la Figura 3, el cual es un elemento sólido tridimensional con un comportamiento cuadrático y contiene 20 nodos con 3 grados de libertad cada uno.

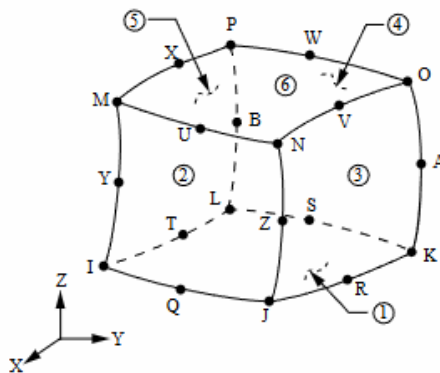


Figura 3. Elemento Solid186 (ANSYS, 2025).

Optimización

La optimización se realizó utilizando el software ANSYS Workbench, con el módulo *Design Exploration*, el cual permite realizar estudios paramétricos y de optimización. El objetivo principal fue minimizar la masa del recipiente, mientras se garantiza su integridad estructural bajo la presión de estallamiento.

Para este propósito, se implementó el algoritmo MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*), el cual es adecuado para problemas no lineales y con múltiples variables de diseño. En la Figura 4 se muestran los parámetros de entrada, así como los parámetros de salida que se desean optimizar.

| Outline of Schematic B2: Design of Experiments | | |
|--|-----------------------|-------------------------------------|
| | A | B |
| 1 | | Enabled |
| 2 | Design of Experiments | |
| 3 | Input Parameters | |
| 4 | Mechanical APDL (A1) | |
| 5 | P1 - TH | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6 | P2 - TL | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7 | P3 - TR | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8 | Output Parameters | |
| 9 | Mechanical APDL (A1) | |
| 10 | P4 - MASAT | |
| 11 | P5 - B_MISES | |
| 12 | P6 - H_MISES | |

Figura 4. Parámetros de entrada y salida para la optimización.

Para realizar la optimización, se modificaron los espesores de la cabeza, del *liner* y del refuerzo, con el objetivo de reducir la masa sin exceder el esfuerzo último del material. Para esto, se consideró que el recipiente opera a una presión de trabajo de 30 MPa y que debe de soportar una presión mínima de estallamiento de 67.5 MPa (es decir, para un factor de seguridad de 2.25). Esto con la intención de que la optimización parta de la presión de estallamiento para obtener el diseño óptimo del recipiente.

Resultados

Diseño óptimo

Mediante el proceso de optimización se encuentran diversas propuestas de diseño para los parámetros de entrada y su correspondiente salida. En la Tabla 3 se muestran los parámetros geométricos del recipiente correspondientes al diseño óptimo obtenido por el software.

Tabla 3. Espesores de diseño obtenidos de la optimización.

| Parámetro de entrada | Valor |
|----------------------|---------|
| t_l | 17.1 mm |
| t_h | 16.8 mm |
| t_r | 18.3 mm |

Con los valores arrojados por la optimización, se obtuvo una masa de 262.3 kg para el tanque tipo II reforzado con fibra de carbono. Con el fin de garantizar que el recipiente funcione para las condiciones de trabajo, este diseño fue validado, mediante el método de elemento finito, para las diferentes condiciones de carga. Los resultados de dicha validación se presentan en las siguientes subsecciones.

Presión de *autofrettage*

El proceso de *autofrettage* implica aplicar una presión al recipiente, la cual le induzca deformación plástica en la superficie interna del recipiente. Al retirar esta presión se generan esfuerzos residuales en el interior del recipiente, lo que provoca un aumento en su resistencia y capacidad para soportar carga. La presión de *autofrettage* se calcula con la siguiente fórmula (Faupel, 1955):

$$P_R = \frac{2\sigma_y}{\sqrt{3}} \left(1 - \left(\frac{b}{c} \right)^2 + \ln \left(\frac{b}{a} \right) \right) \quad (1)$$

Donde, para el caso analizado en esta investigación:

P_R = Presión de autofrettage.

a = Radio interior del recipiente.

$b = c$ = Radio exterior del recipiente sin el refuerzo.

σ_y = Esfuerzo de cedencia.

En la Figura 5 se muestran los contornos de esfuerzo de von Mises correspondientes a la presión de *autofrettage*. Como se puede observar, el esfuerzo máximo se encuentra entre la boquilla de alimentación y el cuerpo del recipiente, con un valor de 340 MPa. Dicho valor de esfuerzo es mayor al esfuerzo de cedencia del material (290 MPa), lo que garantiza que se deformó plásticamente.

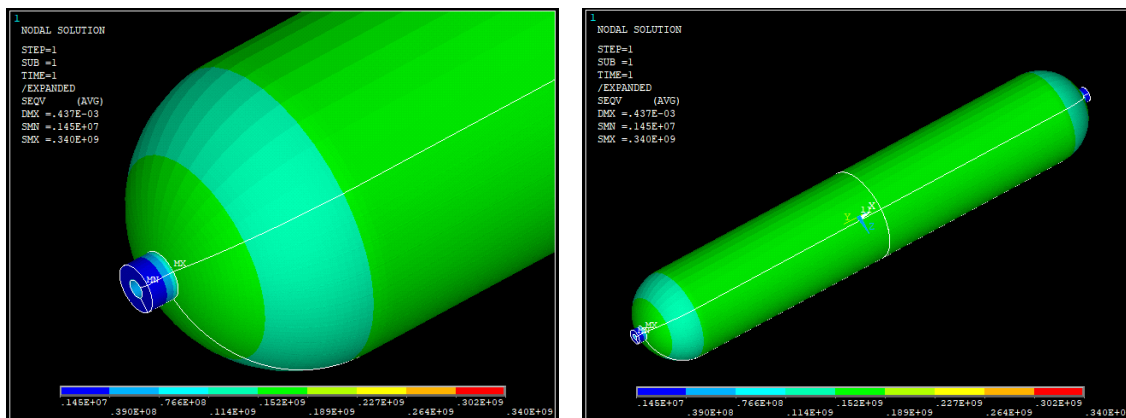


Figura 5. Esfuerzo de von Mises para la presión de autofrettage.

Presión de descarga

Una vez realizado el proceso de *autofrettage*, se realiza la descarga del tanque, lo que implica eliminar la presión interna del recipiente y observar si se presentan esfuerzos residuales. La obtención de esfuerzos residuales demuestra que el proceso de *autofrettage* fue exitoso y significa que el recipiente es capaz de resistir los esfuerzos generados por la presión de trabajo. En la Figura 6 se muestran los esfuerzos residuales en la cabeza y el cuerpo del tanque, luego del proceso de descarga. Nuevamente se puede observar que ambos presentan el mayor esfuerzo entre la boquilla de alimentación y el cuerpo del recipiente, con un valor de 15 MPa.

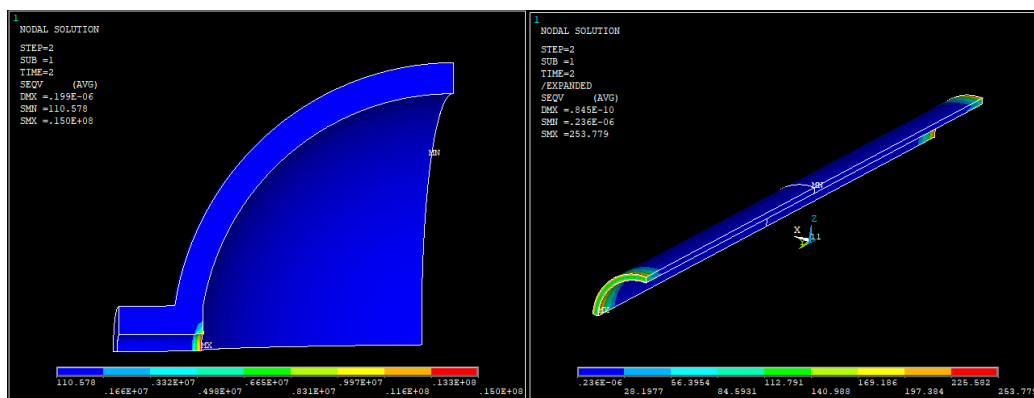


Figura 6. Esfuerzo de von Mises para la presión de descarga.

Presión de trabajo

Para esta condición, el tanque fue sometido a una carga de trabajo de 30 MPa. En la Figura 7 se muestran los contornos del esfuerzo de von Mises correspondientes a esta condición de carga. Se observa que los esfuerzos generados en el recipiente son inferiores que el esfuerzo de cedencia del material AISI 316L, lo que indica que el diseño es estructuralmente seguro bajo la presión de operación. Además, debido al refuerzo en la parte cilíndrica del recipiente, los esfuerzos en esta zona son inferiores en comparación con los esfuerzos en la cabeza. Es notorio que en la zona donde se unen la boquilla de alimentación y el cuerpo del tanque se produce el mayor esfuerzo debido a la transición en la geometría, con un valor de 264 MPa.

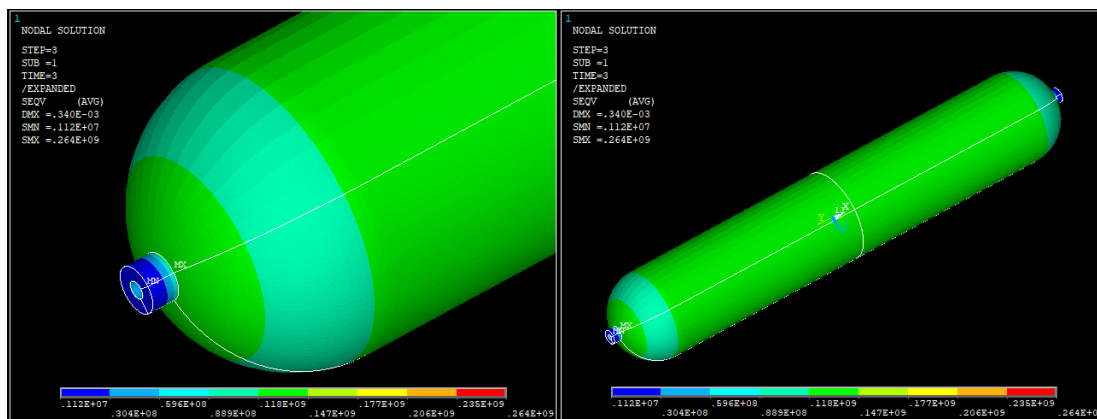


Figura 7. Esfuerzo de von Mises para la presión de trabajo.

Presión mínima de estallamiento

Como se mencionó anteriormente, la presión mínima de estallamiento aplicada al recipiente es de 67.5 MPa, lo que indica un factor de seguridad de 2.25. En la Figura 8 se presentan los esfuerzos de von Mises correspondientes a dicha carga. Se observa que el esfuerzo mayor se encuentra nuevamente entre la boquilla de alimentación y el cuerpo del tanque, con un valor de 361 MPa. Sin embargo, este esfuerzo no llega al esfuerzo último del material, lo que indica que el refuerzo del tanque contribuye a mantener la integridad del recipiente para este valor de presión.

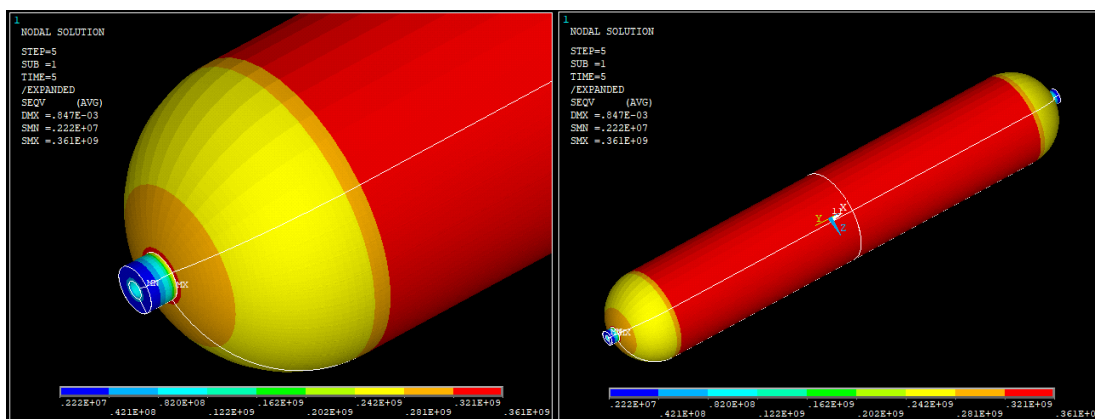


Figura 8. Esfuerzo de von Mises para la presión mínima de estallamiento.

Conclusión

En este trabajo, se realizó la optimización de un tanque para almacenamiento de hidrógeno tipo II, reforzado con fibra de carbono. El objetivo de ésta fue minimizar su masa, sin que el cuerpo metálico del recipiente llegara al esfuerzo último, cuando estuviera sometido a la carga de estallamiento. El diseño resultante fue probado para diferentes presiones: de *autofrettage*, de descarga, de trabajo y mínima de estallamiento. Se revisaron los esfuerzos de von Mises en la parte metálica del recipiente y se determinó que es adecuado, así como funcional, para el almacenamiento de hidrógeno. Asimismo, los resultados indican que es una opción rentable gracias a su seguridad y la disminución de su masa, lo que lo hace adecuado para aplicaciones móviles.

Bibliografía

- Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C., & Segura-Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y tecnología agropecuaria*, 18(1), 103-112. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- ANSYS (2025) SOLID186. Ansys Help. Recuperado el 26 de julio de 2025, de https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_el em/Hlp_E_SOLID186.html?q=solid186
- Arrayago, I., Real, E., & Gardner, L. (2015). Description of stress-strain curves for stainless steel alloys. *Materials & Design*, 87, 540-552.
- Celaya García, L.D., Gutiérrez Rivera, M. E., Ledesma Orozco, E. R., Zavala González, F. J. (2022). Diseño de un tanque de almacenamiento de hidrógeno tipo II usando propiedades equivalentes. *Memorias de Divulgación Científica y Tecnológica de la Ingeniería Mecánica*, 1 (1), D158-D162. https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A1_156.pdf
- Faupel, J. H. (1955). Residual stresses in heavy-wall cylinders. *Journal of the Franklin Institute*, 259(5), 405-419.
- Gemin, L. (2017). Fabricación y caracterización de recipientes a presión basados en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).
- González Huerta, R., López Chávez, E., & Velázquez Morales, B. (2009). *Hidrógeno: Introducción a la energía limpia*. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. <https://repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/handle/123456789/2242>
- Hernández-Sobrino, F., Rodríguez-Monroy, C., & Hernández-Pérez, J. L. (2010). EL HIDRÓGENO: Una alternativa real a los combustibles fósiles y a los biocombustibles para automoción en España. *Dyna*, 85(7), 606-614.

Matweb, (s.f) *AISI 1018 Steel, cold drawn*. Recuperado el 10 de julio de 2025 de <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a9cc570fbb24d119f08db22a53e2421>

Posso, F. (2002). Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 54-73.

Real, E., Arrayago, I., Mirambell, E., & Westeel, R. (2014). Comparative study of analytical expressions for the modelling of stainless-steel behavior. *Thin-Walled Structures*, 83, 2-11.

Vijay, S., Molina, L. T., & Molina, M. J. (2004). Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano.