

Diseño Óptimo de un Recipiente a Presión Toroidal de Espesor Variable para Almacenar Hidrogeno en Automóviles

Optimal Design of a Toroidal Pressure Vessel of Variable Thickness for Storing Hydrogen in Cars

Darwin Patiño Pérez¹, Alfonso Corz Rodriguez², Celia Munive Mora³

RESUMEN

El futuro vehicular estaría, dentro de dos tendencias energéticas que benefician al medio ambiente; almacenamiento en baterías de larga duración o almacenamiento de hidrogeno para usarse como combustible. En el caso de la utilización de hidrogeno, este necesita almacenarse en un contenedor dentro del automóvil que le proporcione una autonomía mayor a la que se tendría con otros tipos de combustibles, como por ejemplo gas, diésel o gasolina. Los contenedores de *composites*, son ideales para solucionar esta problemática, en vista que la relación entre la resistencia y el peso son muy favorables frente a los contenedores metálicos. Una de las soluciones que en la actualidad se está estudiando, es el uso de contenedores a presión con forma de toroide, el cual se acopla muy bien a las especificaciones que actualmente tienen los automóviles. En el presente trabajo, se verá que un contenedor o recipiente a presión con forma de toroide tiene muchas ventajas evidentes sobre las formas tradicionales. Se ha utilizado el composite AS4D/9310 (Carbono-Epoxy) para la elaboración y se lo ha condicionado con el criterio de fallo de Tsai-Wu, mediante una simulación numérica por el Método de Elementos Finitos.

Palabras clave: Almacenamiento de Hidrogeno, Contenedor a Presión, Forma de Toroide, Optimización.

ABSTRACT

The vehicle future would be, within two energy trends that benefit the environment; long-term battery storage or hydrogen storage for use as fuel. In the case of the use of hydrogen, this needs to be stored in a container inside the car that provides it with a greater autonomy than it would have with other types of fuels, such as gas, diesel or gasoline. The composite containers are ideal to solve this problem, since the relationship between resistance and weight is very favorable compared to metal containers. One of the solutions that is currently being studied is the use of pressure containers in the shape of a torus, which fits very well with the specifications that cars currently have. In the present work, it will be seen that a torus shaped container or pressure vessel has many obvious advantages over traditional forms. The AS4D / 9310 composite (Carbon-Epoxy) has been used for the elaboration and it has been conditioned with the Tsai-Wu failure criterion, through a numerical simulation by the Finite Element Method.

Keywords: Hydrogen Storage, Pressure Container, Toroid Shape, Optimization

Fecha de recepción: Junio 30, 2020.

Fecha de aceptación: Agosto 31, 2020.

Introducción

Uno de los desafíos planteados en el campo energético, es la transformación del hidrogeno en energía y la reducción de contaminación del medio ambiente, dado que son factores que influyen para su uso como combustible en automoción (Gutiérrez Jodra, 2005) por lo que se requieren recipientes resistentes para el almacenamiento. Una de las principales barreras en el diseño de los recipientes es la adaptabilidad y la capacidad de almacenar suficiente hidrogeno (Sirosh & Niedzwiecki, 2008) para generar la misma o mayor cantidad de energía que obtiene del diésel o la gasolina.

Generalmente se usan cilindros metálicos para el almacenamiento de gas natural e hidrogeno, los mismos que pesan entre 110.23lb(50Kg) y 427.7lb(194Kg), y pueden almacenar entre 80L y 200L de gas, soportando una presión aproximada de 2.9001ksi(200bar) (COMPRESION, 2018), pero hay estudios que reflejan que los recipientes toroidales son adecuados para el almacenamiento de gas(ES Patente, 2 163 040, Oct 28, 1998), por lo que se han usado para la construcción de vehículos aeronáuticos, aviación, automotrices y navales.

¹ Ph. D. Universidad de Guayaquil, Ecuador. E-mail: darwin.patinop@ug.edu.ec

² Ph. D. Universidad de Cadiz, España. E-mail: alfonso.corz@uca.edu

³ BS, DeSales University, Pensilvania, EEUU. E-mail: cm3877@desales.edu

Como citar: Patiño Pérez D.G., Corz Rodríguez. Alfonso., & Munive Mora C. K., Diseño Óptimo de un Recipiente a Presión Toroidal de Espesor Variable para Almacenar Hidrogeno en Vehículos. *Ecuadorian Science Journal*. xx(x), xx-xx.
DOI: <https://doi.org/10.46480/esj.4.2.107>

Generalmente se fabricaban de materiales metálicos como por ejemplo el acero, pero a medida que se han desarrollado nuevas tecnologías de materiales compuestos se han rediseñado estos recipientes con buenos resultados [5]. El uso de materiales compuestos en los recipientes toroidales ofrece muchas ventajas sobre los materiales convencionales y se destacan por ser menos pesados pero con gran capacidad para adaptarse a los requisitos de diseño; la rigidez, resistencia y peso, son algunas propiedades destacadas de los composites, que no se encuentran en un solo material, porque se derivan de la combinación de las propiedades de los diferentes materiales que están hechos (Miravete, 2000).

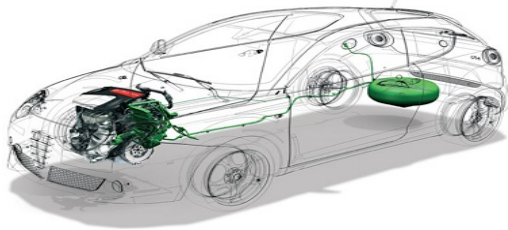


Figura 1. Auto a GNC-Hydrogen Recipiente Toroidal.
Fuente: Propia

La fibra de carbono (S. J. Park & Kim, 2015) tiene una estructura microscópica cristalina compuesta de átomos de carbono, para su fabricación (Huang, 2009) se toman miles de filamentos de carbono que se unen para formar un hilo, que por general tiene un diámetro entre 5 o 10 micras. La fibra junto con la matriz de resina, forma un material compuesto que destaca entre los demás por sus buenas propiedades. La matriz tiene como función mantener la forma de la estructura compuesta, mantener alineadas las fibras y actuar como medio de transferencia de tensiones y al mismo tiempo como elemento de protección de las fibras. El material compuesto carbono-epoxy, tiene un costo aceptable, por lo que su uso permite obtener materiales de bajo peso, alta resistencia y gran rigidez, y son muy usados en la industria aeronáutica como en el B787 de Boeing (Boeing, n.d.) o en el A350-XWB de Airbus (Airbus, n.d.) y en la industria automotriz como la de autos deportivos (Ferrari, n.d.).

Obtener soluciones, de desplazamiento y de tensiones en un toroide, tienen una complejidad más elevada que otros *shell* axilimétricos que se generan al girar sobre su propio eje, por lo que las ecuaciones difieren en los diferentes lugares del toroide y principalmente en su cresta (Fig.3); varias soluciones elásticas, para toroides ortótropos sometidos a presión interna están disponibles en la literatura, (J. S. Park, Hong, Kim, & Kim, 2002) (Maksimiyuk, V. A., Chernyshenko, 1999) y se han considerado optimizaciones del diseño (Zu, Koussios, & Beukers, 2008) para toroides fabricados mediante enrollamiento con fibra (Zu, 2012) (Hu, Li, Wang, & Zu, 2015).

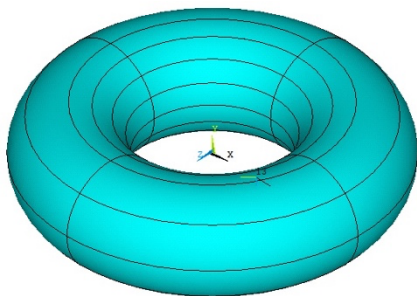


Figura 2. Toroide de Sección Recta Circular de Espesor Variable.
Fuente: Propia

Mediante técnicas de optimización (Gaspar Cunha, Takahashi, Henggeler Antunes, & Pereira, 2014) se solucionan problemas complejos, conociéndose que las técnicas clásicas en muchas ocasiones tienen un bajo rendimiento a la hora de encontrar la solución óptima y por lo general caen en los mínimos locales. Por otra parte, están las técnicas aproximadas que evitan, en lo posible, el problema de los mínimos locales, pero la solución óptima es solo aproximada. Entre las técnicas aproximadas, destacan las metaheurísticas de optimización como la elaborada en (Patiño-Pérez & Corz-Rodríguez, 2019) y con la cual se consigue muy buen rendimiento de optimización en estructuras toroidales.

En el presente trabajo, se tendrá como objetivo la optimización de un recipiente toroidal M5, en el que se usa fibra de carbono así como otras características provenientes de un estudio relacionado (Patiño & Corz, 2018); la geometría está en función de los radios $R=14\text{in}(355.6\text{mm})$ y $a=6\text{in}(152.4\text{mm})$ y el espesor del laminado será $t=0.75\text{in}(19.05\text{mm})$. Para hallar las soluciones se emplearán simulaciones numéricas con el método de elementos finitos (MEF), porque ofrecen una alta fiabilidad en los valores de las variables y una mayor precisión en los resultados; en el modelo se realizarán variaciones de los ángulos de las láminas del laminado en cada iteración para determinar la resistencia. Una vez optimizado se analizará el modelo y las ventajas que se obtienen para el almacenamiento de GNC en comparación con los recipientes cilíndricos que se usan actualmente.

Materiales y Métodos

Definición de la Geometría Toroidal

El toroide de la (Figura. 1) se ha formado girando una sección transversal o sección recta circular de radio a alrededor de un eje de rotación (eje) cuyo radio R es el radio mayor del toroide ver la (Figura. 3), el espesor t usualmente se asume constante para materiales metálicos pero puede variar para materiales ortótropos (Vick & Gramoll, 2012).

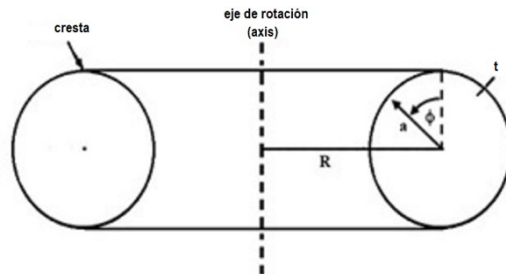


Figura 3. Corte del Toroide - Sección Recta Circular.
Fuente: Propia

La geometría, es la causa fundamental para que el toroide formado con fibra de carbono que tiene un espesor variable tenga un volumen distinto en sus áreas axiales (Enoma, Egware, Itoje, & Unueroh, 2015). Cuando el volumen de la fibra es constante a través de todo el toroide, el espesor de la pared disminuye radialmente desde el eje de revolución debido al aumento sobre su superficie.

El espesor t de la pared del toroide, puede definirse como una función desde su coordenada meridional y toma como referencia el espesor en la parte superior o cresta del toroide t_c según (Li & Cook, 2002).

$$t(\phi) = \frac{R \cdot t_c}{R - a \cdot \sin \phi} \quad (1)$$

El volumen del toroide sin incluir la pared

$$V_t = 2\pi^2 \cdot R \cdot a^2 \quad (2)$$

Al reemplazar a por a + t se incluiría la pared

$$V_{tpi} = 2\pi^2 \cdot R \cdot (a+t)^2 \quad (3)$$

Puesto que $V_{tpi} > V_t$, el volumen de la pared del toroide V_{pt} lo determina la diferencia entre Ec (3) y Ec (2)

$$V_{pt} = V_{tpi} - V_t = 2\pi^2 \cdot R \cdot (2 \cdot a \cdot t + t^2) \quad (4)$$

El margen de diferencia entre el cálculo analítico Ec (4) y el valor que ofrece el MEF sería

$$\text{margen} = 100 \cdot (V_{pt} - V_{MEF}) / V_{pt} \quad (5)$$

Especificación del Laminado y el Tipo de Material

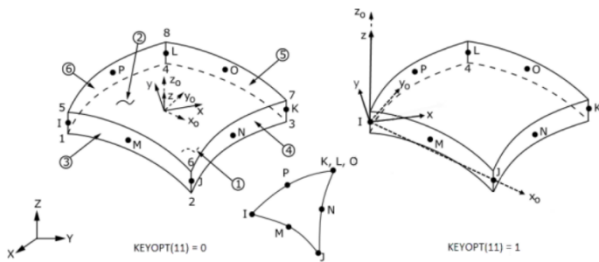


Figura 4. Elemento Shell281
Fuente: Documentos de Ansys

El elemento apropiado para el análisis elástico lineal de estructuras de pared delgada, es el shell281 (Figura. 4), las grandes rotaciones que se pueden dar y/o grandes deformaciones en aplicaciones no lineales su forma cuadrilátera tiene 8 nodos con 6 grados de libertad, en cada nodo: se pueden dar traslaciones en los tres ejes (x, y, z) y rotaciones alrededor de los tres ejes, puede ser usado considerando la teoría de membrana y de flexión, por lo que puede usarse para la modelación de aplicaciones de cascara compuestas, la precisión en la modelación con shell de material compuesto está gobernada por la teoría de placas de Reissner-Mindlin (Reddy, 2004).

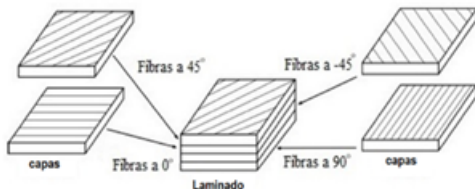


Figura 5. Apilamiento Laminar
Fuente: Propia

Las propiedades mecánicas de las láminas, están dadas por la dirección de las fibras, por lo que la micromecánica de ellas nos permite obtener parámetros que marcan su comportamiento mecánico (Barbero, 2010). Las características del material compuesto

están determinadas por las constantes ingenieriles esquematizadas en la Tabla. 1.

Tabla 1: Propiedades del material AS4D/9310 (Springer & Kollar, 2003)

| Material - AS4D/9310 | | | | | Descripción |
|----------------------|--|-----|----------|-----|--|
| Propiedad | Valor | Und | Valor | Und | |
| E1 | 19.415 | Msi | 133.86 | GPa | Módulo de elasticidad |
| E2=E3 | 1.118 | Msi | 7.706 | GPa | Módulo de elasticidad |
| G12=G13 | 0.625 | Msi | 4.306 | GPa | Módulo de rigidez |
| G23 | 0.4003 | Msi | 2.76 | GPa | Módulo de rigidez |
| V12=V13 | 0.301 | | 0.301 | | Coefficiente de Poisson |
| V23 | 0.396 | | 0.396 | | Coefficiente de Poisson |
| F1t | 2.65E+05 | Psi | 1830 | MPa | Resistencia longitudinal a tracción |
| F1c | 1.59E+05 | Psi | 1096 | MPa | Resistencia longitudinal a compresión |
| F2t | 8.27E+03 | Psi | 57 | MPa | Resistencia transversal a tracción |
| F2c | 3.31E+04 | Psi | 228 | MPa | Resistencia transversal a tracción |
| F3t | 1.00E+12 | Psi | 1.00E+06 | MPa | Resistencia (valor grande que no se calcula) |
| F3c | 1.00E+12 | Psi | 1.00E+06 | MPa | Resistencia (valor grande que no se calcula) |
| F4 | 1.00E+12 | Psi | 1.00E+06 | MPa | Resistencia (valor grande que no se calcula) |
| F5 | 1.00E+12 | Psi | 1.00E+06 | MPa | Resistencia (valor grande que no se calcula) |
| F6 | 1.03E+04 | Psi | 71 | MPa | Resistencia longitudinal a corte |
| C6 | -1 | | -1 | | Coefficiente, defaults -1 |
| C4 | -1 | | -1 | | Coefficiente, defaults -1 |
| C5 | -1 | | -1 | | Coefficiente, defaults -1 |
| ρ | 1.44g/cm ³ =0.0236Kg/m ³ | | | | Densidad del material compuesto |

Fuente: Propia

Las láminas unidireccionales de material compuesto formadas por fibra carbono (AS4D) y matriz de resina epoxi (9310) que se consideran para el proceso de optimización han dado buenas prestaciones según (Patiño & Corz, 2018), y en pruebas realizadas en la literatura (Jesus & Gonzalez, 2017) donde se refleja que el material AS4D/9310 ofrece buenas prestaciones en recipientes toroidales sometidos presión.

Especificaciones del Modelo Toroidal

Se establece un modelo por medio de elementos finitos sobre un APDL, donde elabora el diseño inicial con un toroide de espesor fijo, para luego ser contrastado con uno de espesor variable, el mismo que tendrá una serie de adecuaciones relacionadas con su geometría y que tiene que ver con la sectorización de las áreas meridionales, por lo que se plantearon 6 sectores con sus respectivos espesores $tk_1 \dots tk_6$ cada uno condicionado por:

$$\begin{aligned} 0 &\leq tk_1 < b_1 \\ b_1 &\leq tk_2 < b_2 \\ b_2 &\leq tk_3 < b_3 \\ b_3 &\leq tk_4 < b_4 \\ b_4 &\leq tk_5 < b_5 \\ b_5 &\leq tk_6 \leq b_6 \end{aligned} \quad (6)$$

En donde $b_1 < b_2 < b_3 < b_4 < b_5 < b_6$ según la (Figura. 6)

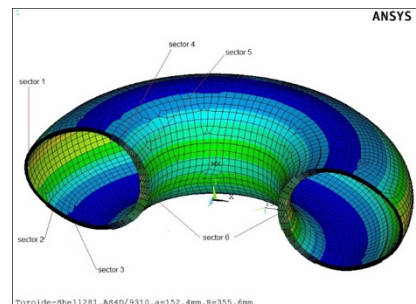


Figura 6. Sectores del Toroide de Espesor Variable
Fuente: Propia

Los ángulos que se han tomado para cada sector tienen intervalos libres según se refleja en la (Tabla 2).

Tabla 2. Ángulos de las Capas del Laminado por Sectores

| Sector | Ángulos | | | Intervalo |
|--------|---------|-------|-------|-----------|
| 1 | ang11 | ang12 | ang13 | 0°-180° |
| 2 | ang21 | ang22 | ang23 | 0°-180° |
| 3 | ang31 | ang32 | ang33 | 0°-180° |
| 4 | ang41 | ang42 | ang43 | 0°-180° |
| 5 | ang51 | ang52 | ang53 | 0°-180° |
| 6 | ang61 | ang62 | ang63 | 0°-180° |

Fuente: Propia

Para determinar el valor de los espesores en función de los ángulos de orientación de las capas del laminado, se toma como referencia información proveniente del estudio previo (Hu et al., 2015), en donde se estudió una técnica de bobinado que se ha adaptado como técnica de laminación a emplearse en este modelo toroidal y que se refleja en la (Ec. 7)

$$t_{\alpha} = \left(\frac{(R+a)\sin\alpha_0}{(R+a \cdot \cos\varphi)\sin\alpha} \right) \cdot t_0 \tag{7}$$

En la (Ec.7) se refleja que el espesor del bobinado t_{α} está en función del ángulo α que determina la dirección de la capa, así como el ángulo φ que representan la coordenada meridional en la curvatura geodésica del toroide, el ángulo α_0 es el ángulo inicial del laminado.

Tabla 3. Espesor de Sectores del Toroide

| | φ | $\cos \varphi$ | α | $\sin \alpha$ | $t_{\alpha}(\text{mm})$ | Sector | |
|-----------------|-----------|----------------|----------|---------------|-------------------------|----------|---|
| R(mm) | 355.6 | 22.5 | 0.92388 | 57 | 0.83867 | 20.60660 | 1 |
| a(mm) | 152.4 | 67.5 | 0.38268 | 54 | 0.80902 | 25.61851 | 2 |
| t_0 | 19.5 | 100 | -0.17365 | 48 | 0.74314 | 35.07358 | 3 |
| | | 120 | -0.50000 | 43 | 0.68200 | 45.02142 | 4 |
| α_0 | 60 | 140 | -0.76604 | 38 | 0.61566 | 58.33819 | 5 |
| $\sin \alpha_0$ | 0.866025 | 160 | -0.93969 | 35 | 0.57358 | 70.42095 | 6 |
| | | 180 | -1.00000 | 34 | 0.55919 | 75.49942 | 6 |

Fuente: Propia

En la tabla 3. se reflejan los valores iniciales para la construcción del diseño toroidal para la optimización, luego con todos esos valores se procederá a la simulación numérica por MEF para generar el modelo toroidal.

Simulación Numérica por MEF para Crear el Modelo

La simulación numérica realizada por medio del método de Elementos Finitos (MEF) toma criterios de la literatura: (Vick & Gramoll, 2012) (Barbero, 2010) (Barbero & Shahbazi, 2017) que se usaran en el script del ADPL (ANSYS Parametric Desing Language), para realizar un análisis elástico lineal, la técnica de mallado a usarse será local y se controlara globalmente en términos de la longitud del borde del elemento utilizado en los límites de la superficie del mismo; se usará un mallado libre con 10392 elementos de forma triangular, el tamaño global del elemento será de 0.8in(20.32mm) con 20784 nodos.

Las condiciones de contorno establecen restricciones en los ejes Y,Z para los nodos 8(R+a,0,0) y 9(-R-a,0,0) y restricciones en los ejes X,Y para los nodos 3(0,0,R+a) y 14(0,0,-R-a) para mantener apoyado el toroide.

Aplicación del Criterio de Fallo de Tsai-Wu

El criterio de fallo esta dado por una serie de pruebas experimentales que se emplean para predecir los fallos y se representa mediante un índice de fallo, que es usado por algunos programas que manejan el método de elementos finitos.

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} ; \text{ se predice el fallo cuando } I_F \geq 1 \tag{8}$$

La resistencia es el inverso del índice de fallo

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} ; \text{ se predice el fallo cuando } R \leq 1 \tag{9}$$

El criterio de Tsai-Wu sirve para determinar el fallo que se produce en la primera capa de un laminado, usando este criterio el índice de fallo es definido como:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \tag{10}$$

La descripción de las resistencias y coeficientes usados en las ecuaciones están dados en (Patiño-Pérez & Corz-Rodríguez, 2019) y sus valores se registran en la Tabla 1.

Validación Experimental del Modelo Toroidal

El modelo toroidal es validado con datos tomados de un toroide que fue ensayado experimentalmente en (Hu et al., 2015); está formado por un "liner" de titanio con espesor $t_0 = 0.07874\text{in}(2\text{mm})$ y un laminado de fibra de aramida y matriz epoxy, con un espesor por lamina de $0.01417\text{in}(0.36\text{mm})$; este laminado está formado por 12 láminas. La orientación angular está en función del ángulo φ cuyo valor esta entre $0 < \varphi < \pi$, además emplea un ángulo α que sirve para orientar el bobinado de las fibras y para determinar el espesor t_{α} de acuerdo a la orientación de la fibra.

Después de haberse realizado las pruebas utilizando el modelo de MEF desarrollado por nosotros, se procedió a contrastar los resultados con los resultados experimentales obtenidos por Haixiao Hu en [16]; , obteniéndose una presión límite para comportamiento lineal en los ensayos, de 4351.13Psi(30MPa) y una presión límite en el caso de nuestro modelo numérico de 4303.27Psi(29.67MPa). Dado que el error entre el modelo numérico y experimental es de 1.1%, se acepta como válida la metodología del modelo de MEF para nuestros modelos sucesivos de recipientes toroidales.

Optimización del Modelo

El esquema de optimización se ha realizado por medio de los métodos que se encuentran disponibles en ANSYS y con un método metaheurístico llamado PSO (Particle Swarm Optimization) que ha sido adecuado según (Patiño-Pérez & Corz-Rodríguez, 2019) y del cual procede la (Fig. 7). Con el método RAND de Ansys se generan los diseños iniciales y que se asocian con las partículas de la población inicial para el algoritmo PSO mediante el cual se

encuentra el óptimo que puede ser local o global; luego en una última pasada se usa el método aproximación de subproblema SUB de Ansys para encontrar el óptimo global de darse el caso; se interactúa con los APDL que se ejecutan en modo Batch.

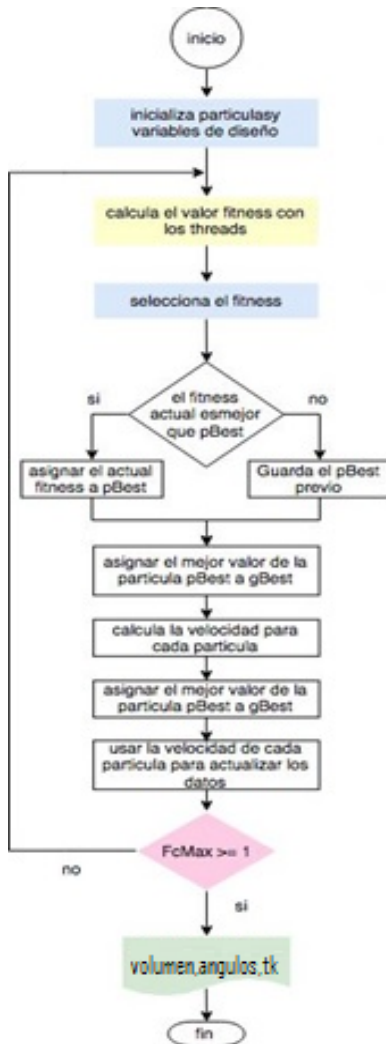


Figura 7. Flujo del Algoritmo PSO Fuente: Propia(Patiño-Pérez & Corz-Rodríguez, 2019)

En el diseño del problema se plantea la minimización de la función objetivo (OBJ) que representa el volumen del material (Tvolumen), se definen las variables de diseño (DV) tomadas de la (Ec. 4), para los espesores y los ángulos la (Tabla. 2), se establecen además 12 variables de estado (SV) cada una relacionada con el Tsai máximo de cada capa del laminado, para poder obtener el FcMax; además se cuentan con un tsai máximo por cada sector del toroide para efectos de control. Mediante las variables de estado realizamos un control de la resistencia del laminado ante la presión a la que es sometido.

Resultados y Discusiones

El comportamiento del volumen y del peso del material reflejados en la (Figura. 8) tienen una tendencia decreciente; los espesores tienen un comportamiento definido dentro del rango establecido en la (Ec. 5) según el condicionamiento creciente.

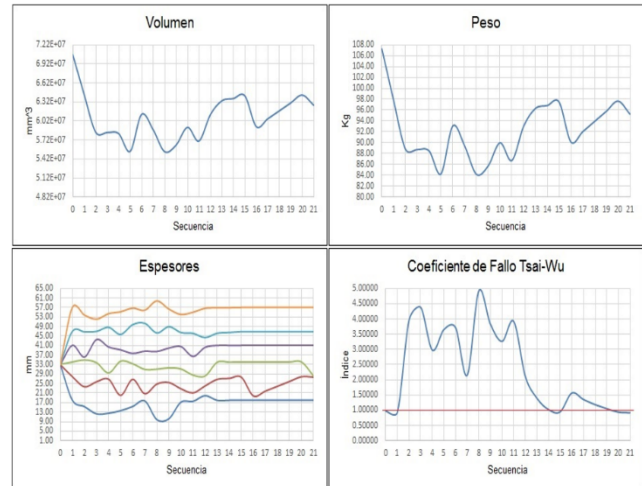


Figura 8. Tendencias Resultantes Fuente: Propia

El coeficiente de fallo de Tsai-Wu, es quien condiciona el proceso de optimización y este termina cuando el índice se acerca a 1.

Tabla 4. Resultados

| Sec | Volumen | Peso | Tsai | Espesor de Secciones (mm) | | | | | |
|-----|-----------------|--------|---------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | mm ³ | Kg | | e1 | e2 | e3 | e4 | e5 | e6 |
| 0 | 7.06E+07 | 107.32 | 0.96872 | 33.00 | 33.00 | 33.00 | 33.00 | 33.00 | 33.00 |
| 1 | 6.43E+07 | 97.74 | 0.93504 | 18.00 | 28.00 | 34.00 | 41.00 | 47.00 | 57.00 |
| 2 | 5.84E+07 | 88.79 | 3.96561 | 15.32 | 23.81 | 34.84 | 36.16 | 46.80 | 53.79 |
| 3 | 5.84E+07 | 88.75 | 4.38815 | 12.26 | 25.86 | 33.69 | 43.43 | 46.99 | 52.10 |
| 4 | 5.82E+07 | 88.49 | 2.97890 | 12.53 | 26.96 | 29.38 | 40.35 | 48.67 | 54.39 |
| 5 | 5.54E+07 | 84.26 | 3.65488 | 13.61 | 20.25 | 34.32 | 39.15 | 45.71 | 55.18 |
| 6 | 6.12E+07 | 93.10 | 3.71969 | 15.38 | 26.89 | 33.24 | 37.68 | 49.80 | 56.71 |
| ⋮ | | | | | | | | | |
| 14 | 6.37E+07 | 96.87 | 1.01686 | 17.99 | 27.29 | 33.92 | 40.99 | 46.49 | 56.89 |
| 15 | 6.42E+07 | 97.52 | 0.94412 | 18.00 | 27.81 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 16 | 5.93E+07 | 90.15 | 1.56484 | 18.00 | 20.01 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 17 | 6.06E+07 | 92.04 | 1.35110 | 18.00 | 22.01 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 18 | 6.18E+07 | 93.92 | 1.18208 | 18.00 | 24.01 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 19 | 6.30E+07 | 95.81 | 1.04621 | 18.00 | 26.00 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 20 | 6.43E+07 | 97.69 | 0.93453 | 18.00 | 28.00 | 33.99 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |
| 21 | 6.27E+07 | 95.29 | 0.91613 | 18.00 | 27.81 | 28.01 | 41.00 | 46.88 | 56.99 |

Fuente: Propia

Con los datos tomados de la tabla 4, de la sec 0 (secuencia inicial) se elaboró el modelo Tec modelo de espesor constante y con sec 21 (secuencia final) modelo de espesor variable.

La (Figura. 9) refleja que índice de fallo de Tev es de 0.916128 se ha reducido el 5.1% con respecto al índice de Tec que es 0.965263, en ambos casos MX señala que el fallo se producirá el área axial de los toroides, pero además en Tev se aprecia que hay un mejor aprovechamiento del material en sus áreas axiales.

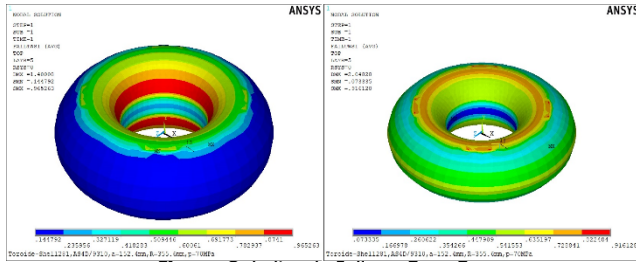


Figura 9. Índice de Fallo en Tec y Tev
Fuente: Propia

La (Figura. 10) refleja que el desplazamiento en el modelo Tev es de 0.763675mm y se ha reducido el 47.97% con respecto a Tec que tiene 1.33904mm, en ambos casos MX señala que en la cresta del toroide es donde se refleja el desplazamiento.

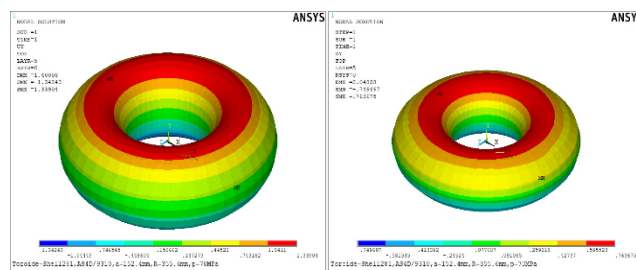


Figura 10. Desplazamientos de Tec y Tev
Fuente: Propia

La (Figura. 11) refleja el índice de deformación en los modelos Tec(0.006542) y Tev(0.005771) tiene una variación de 11.79%, la deformación se ha reducido en el modelo Tev.

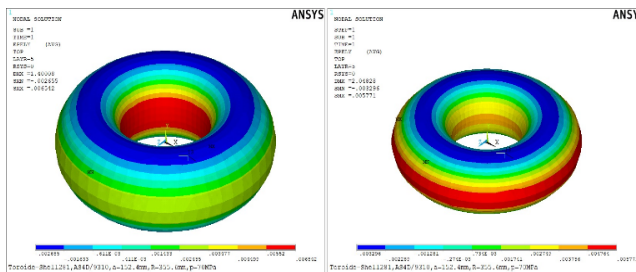


Figura 11. Deformación de Tec y Tev
Fuente: Propia

Conclusiones

En el análisis se ha determinado, que la variación angular para la ubicación de las capas del laminado en el apilamiento laminar, producen un aumento o disminución en la resistencia del laminado, cuando este es sometido a presión.

Los espesores han sufrido una reducción, sin que se pierda la resistencia del laminado tal como lo refleja la variación del índice de deformación y el desplazamiento.

En la tabla 5, se refleja la reducción de los pesos entre el modelo toroidal de espesor constante Tec y el modelo toroidal de espesor variable Tev.

Tabla 5. Ahorro de Material

| | Peso Toroide | Ahorro de Material | |
|--------------------------------|--------------|--------------------|-------|
| Modelos de Toroides | Kg | Kg | % |
| Toroide Espesor Constante(Tec) | 107.32 | - | - |
| Toroide Espesor Variable(Tev) | 95.29 | 12.03 | 11.21 |

Fuente: Propia

El proceso de optimización ha reducido el volumen y el peso del material en un 11.2%, lo que significa que se alcanzó a reducir 12.02Kg de peso de material entre los toroides de espesor constante Tec (107.32Kg) y espesor variable Tev(95.29Kg) según se aprecia en la (Figura. 12).

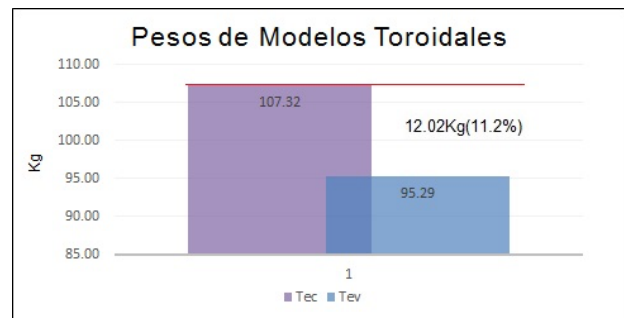


Figura 12. Reducción de Pesos
Fuente: Fuente Propia

Referencias Bibliográficas

- Airbus. (n.d.). Recuperado de:www.airbus.com.
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to Composite Materials Design, Second Edition*.
- Barbero, E. J., & Shahbazi, M. (2017). Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites. *Composite Structures*, 176, 768–779.
- Boeing. (n.d.). Recuperado de:www.boeing.com.
- Cevallos-Torres, L., & Botto-Tobar, M. (2019). Case study: Project-based learning to evaluate probability distributions in medical area. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 824, pp. 111–122). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13393-1_7
- COMPRESION, K. (2018). Cilindros GNC Vehicular.
- Cook, J., & Richards, B. J. (1998). *ES Patente.2 163 040,Oct 28*. España.
- Enoma, N., Egware, H. O., Itoje, H. J., & Unueroh, U. G. (2015). Membrane Solutions For Circular Toroidal Shells Under Internal Hydrostatic Pressure, 2(10), 2895–2900.
- Ferrari. (n.d.). Recuperado de www.ferrari.com.
- Gaspar Cunha, A., Takahashi, R., Henggeler Antunes, C., & Pereira, F. J. B. (2014). Algoritmos genéticos. In *Manual de computação evolutiva e metaheurística* (pp. 25–47). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-0583-8_1
- Gutiérrez Jodra, L. (2005). El Hidrógeno, Combustible Del Futuro. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 99(1), 49–67. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00115-3)
- Hu, H., Li, S., Wang, J., & Zu, L. (2015). Structural design and

- experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels. *Composite Structures*, 121, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.023>
- Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- Jesus, D., & Gonzalez, J. (2017). Pressure based approach for Automated Fiber Placement (AFP) with sensor based feedback loop and flexible component in the effector. In *IFAC* (Vol. 50, pp. 794–799). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.511>
- Li, S., & Cook, J. (2002). An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 124(2), 215. <https://doi.org/10.1115/1.1430671>
- Maksimyuk, V. A., Chernyshenko, I. S. (1999). No linear Elastic State of Thin-Walled Toroidal Shells Made of Orthotropic Composites. *International Applied Mechanics*, 35(12), 1238–1245.
- Miravete, A. (2000). *Materiales Compuestos. Volumen I i II. Materiales Compuestos*. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.46908>
- Park, J. S., Hong, C. S., Kim, C. G., & Kim, C. U. (2002). Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction. *Composite Structures*, 55(1), 63–71. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00137-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00137-4)
- Park, S. J., & Kim, B. J. (2015). Carbon fibers and their composites. *Springer Series in Materials Science*, 210, 275–317. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9478-7_8
- Patiño-Pérez, D., & Corz-Rodríguez, A. (2019). Optimum design of a toroidal pressure vessel of composite material for gas (CNG) powered vehicles. *Dyna (Spain)*, 94(5), 546–553. <https://doi.org/10.6036/9096>
- Patiño, D., & Corz, A. (2018). Comparative Analysis of Toroidal Pressure Vessels of Composite by Finite Elements. *International Journal of Innovation and Applied Studies(IJIAS)*, 25(1), 162–175.
- Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis. Library*. CRC Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0095-9>
- Sirosh, N., & Niedzwiecki, A. (2008). Development of storage tanks: High-pressure vessels. *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications (Green Energy and Technology)*.
- Springer, G. S., & Kollar, L. P. (2003). Displacements, Strains, and Stresses. In *Mechanics of composite structures*. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)90053-1)
- Vick, M. J., & Gramoll, K. (2012). Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134(5), 1–7. <https://doi.org/10.1115/1.4005873>
- Zu, L. (2012). Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels. *Composite Structures*, 94(5), 1855–1860. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.027>
- Zu, L., Koussios, S., & Beukers, A. (2008). Pattern design and optimization for filament - wound toroidal pressure vessels. In *23rd Technical Conference of the American Society for Composites, Memphis, TN, USA*.