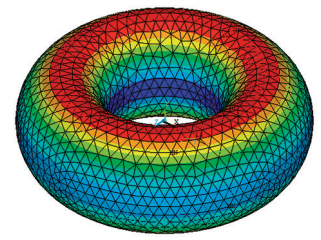


Diseño óptimo de un recipiente a presión toroidal de material compuesto, para vehículos a gas (GNC)



Optimum design of a toroidal pressure vessel of composite material for gas (CNG) powered vehicles

Darwin Patiño-Pérez^{1,2,3} y Alfonso Corz-Rodríguez¹

¹ Universidad de Cádiz. Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Grupo de I+D, Materiales Compuestos. Avda. Ramon de Puyol, s/n – 11202 Algeciras (España).

² Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Física. Carrera de Ing. en Sistemas Computacionales. Cda. Salvador Allende. Av. Delta y Av. Kennedy – 090613 Guayaquil (Ecuador).

³ Universidad de West Virginia. Facultad de Ingeniería y Recursos Minerales. Dpto. de Mecánica e Ingeniería Aeroespacial. 395 Evansdale Drive – 26506-6106 Morgantown, West Virginia (EE.UU.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9096> | Recibido: 21/01/2019 • Inicio Evaluación: 13/11/2018 • Aceptado: 07/02/2019

ABSTRACT

- In the present work a design is made, using numerical simulations, with the finite element method (FEM) a linear elastic analysis will be performed for the optimal design of a toroidal pressure vessel resistant, lightweight and capable of storing compressed natural gas (CNG) for vehicles. For the design the material AS / 3501 (carbon fiber and epoxy matrix) is used, since there are studies that indicate that, with this type of material, high resistances and better performance have been obtained than with metallic materials. In the analysis, the influence exerted by the angular orientation of the sheets on the strength of the laminate will be determined, as well as the variation of tension, deformation and displacement that occurs in the toroid when subjected to pressure, until the criterion of failure indicate it. The optimization of the volume of the material, will be made with the metaheuristic algorithm called Particles Swarm Optimization (PSO), which will use Threads in Java for the execution of the scripts developed in ANSYS for the analysis of the FEM and with which will be reduced computing times improving to the optimizer.
- **Key Words:** pressure vessel, toroidal shape, finite elements, numerical simulations, optimization, threads.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un diseño mediante simulaciones numéricas, y con el método de elementos finitos (MEF) se realizará el análisis elástico lineal para el diseño óptimo de un recipiente a presión toroidal resistente, liviano y capaz de almacenar gas natural comprimido (GNC) para vehículos.

Para el diseño se usa el material AS/3501 (fibra de carbono y matriz epoxi), dado que estudios que indican que, con este tipo de material, se han obtenido altas resistencias y mejores prestaciones que con materiales metálicos.

En el análisis se determinará, la influencia que ejerce la orientación angular de las láminas en la resistencia del laminado, además se obtendrá la variación de tensión, deformación y desplazamiento que se da en el toroide, cuando se lo somete a presión, hasta que el criterio de fallo lo indique.

La optimización del volumen del material, se realizará con el algoritmo metaheurístico llamado Particles Swarm Optimization (PSO), usara de Threads en Java para la ejecución de los scripts

desarrollados en ANSYS para el análisis del MEF y con los cuales se reducirán tiempos de computación mejorando el optimizador.

Palabras Clave: recipiente a presión, forma toroidal, elementos finitos, simulaciones numéricas, optimización, threads.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos que se plantean en el campo energético, es la transformación del gas natural comprimido (GNC) en energía, su bajo costo y la reducción de contaminación del medio ambiente, son factores que influyen para su uso como combustible en automoción [1], para 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 GNC para generar la misma o mayor cantidad de energía que genera el diésel o la gasolina [2].

Generalmente se usan cilindros metálicos para el almacenamiento de GNC, 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) [3], pero hay estudios que reflejan que los recipientes toroidales son adecuados para el almacenamiento de gas [4], por lo que se han usado en la industria aeronáutica, naval y automotriz en diferentes tipos de vehículos; inicialmente se fabricaban de material isotrópico como 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 destacan por tener un peso más ligero y una 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 materiales que lo conforman [6].

La fibra de carbono [7] tiene una estructura microscópica cristalina compuesta de átomos de carbono, para su fabricación [8] 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 compues-

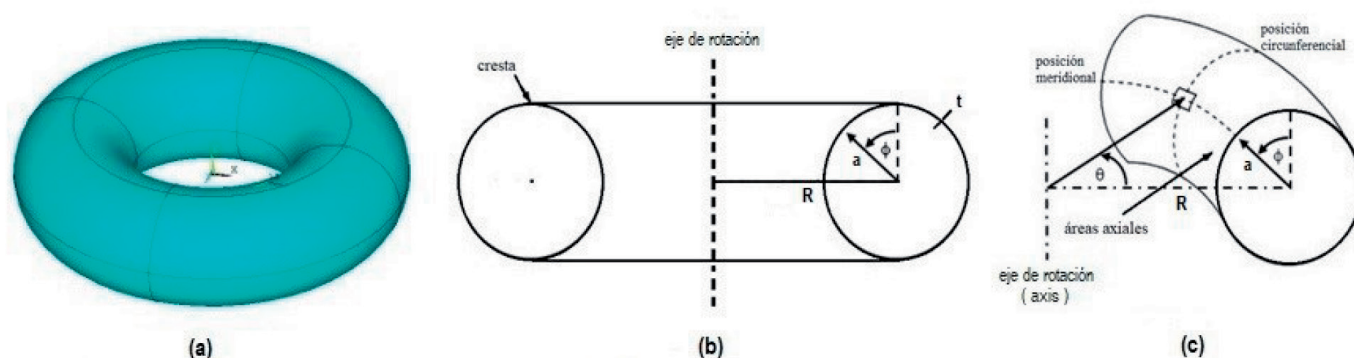


Fig. 1: Geometría del Toroide

to 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 [9] o en el A350-XWB de Airbus [10] y en la industria automotriz [11].

Obtener soluciones, de desplazamiento y de tensiones en un toroide, son más difíciles de obtener que en otras cascaras axisimétricas de revolución, debido a las peculiaridades de las ecuaciones en diferentes lugares del toroide y principalmente en su cresta (Fig.1b); varias soluciones elásticas, para toroides ortótropos sometidos a presión interna están disponibles en la literatura, [12], [13]. Mediante técnicas de optimización se solucionan problemas complejos, de forma que con técnicas clásicas se encuentra la solución óptima y se demuestra que es la mejor manera para garantizar mínimos locales, por lo que en ocasiones tienen un bajo rendimiento. 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 [17] que son consideradas como estrategias genéricas de alto nivel. *Particle Swarm Optimization* (PSO) es un algoritmo metaheurístico que realiza exploraciones en espacios de búsqueda de gran tamaño, brinda flexibilidad y adaptabilidad (descrita por James Kennedy y Russell C. Eberhart) inicialmente fue creado para la elaboración de modelos de conductas sociales que se reflejan en la naturaleza, como por ejemplo el movimiento de un banco de peces o una bandada de aves [18], que a la hora de hacer una búsqueda profunda la hace en el espacio en el que existe la mayor probabilidad de encontrar lo que busca [19]; esta idea fue trasladada al campo de la computación como un algoritmo para la resolución problemas en los que se plantean funciones con muchas variables, y cuyo objetivo es buscar la solución óptima o una muy cercana a la óptima [20].

En el presente trabajo se tendrá como objetivo la optimización de un recipiente toroidal M5, proveniente del análisis comparativo de recipientes a presión de forma toroidal con material compuesto registrado en [21], su 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.

2. MODELO Y MÉTODOS

2.1. MODELO TOROIDAL

2.1.1. Geometría del Toroide

El toroide circular (Fig. 1a) se ha formado girando una sección transversal (sección recta) de radio a alrededor de un eje de rotación (axis) cuyo radio R es el radio mayor del toroide (Fig. 1b), el espesor t usualmente se asume constante para materiales metálicos pero puede variar para materiales ortótropos [22].

La dirección meridional ϕ para un toroide circular es tangente a la sección recta, y la dirección circunferencial θ sigue el círculo de revolución para el toroide (Fig. 1c). La parte superior de la mitad del toroide se define a partir de $-90^\circ < \phi < 90^\circ$, con la cresta que ocurre en $\phi=0^\circ$.

Debido a su geometría, el toroide enrollado de láminas de fibra tiene una variación de espesor natural debido a la acumulación de fibra. El volumen de la fibra es constante a través del toroide; por lo tanto, el espesor del *shell* toroidal disminuye radialmente desde el eje de revolución debido al aumento en la superficie del toroide. El espesor del *shell* puede definirse como una función de la coordenada meridional ϕ , y puede tomar como referencia el espesor en la cresta del toroide t_c [23].

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

Los esfuerzos de membrana en las direcciones meridional y circunferencial [23], de acuerdo a la teoría de membranas son:

$$N_\phi = \frac{p \cdot a}{2} \left(1 + \frac{R}{R - a \cdot \sin \phi} \right) \quad \text{y} \quad N_\theta = \frac{p \cdot a}{2} \quad (2)$$

La tensión se considera constante a través del espesor si el material es isótropo y se relaciona con el esfuerzo en la cascará (*shell*) $N = \sigma \cdot t$; El esfuerzo meridional N_ϕ , disminuye a medida que la distancia desde el eje de revolución aumenta mientras que el esfuerzo circunferencial N_θ se mantiene constante a través del toroide, por lo que la carga meridional es dominante dentro de él. El equilibrio de esfuerzos en el *shell* de revolución bajo presión interna p está dada por:

$$\frac{N_\phi}{R_\phi} + \frac{N_\theta}{a} = p \quad (3)$$

Las tensiones longitudinales y circunferenciales del toroide de radio a y del cilindro de radio similar, que cuenta con 2 cabezas

semiesféricas del mismo radio, pueden determinar quién es más resistente, por lo que la tensión longitudinal (σ_l) y circunferencial (σ_c) de ambos serían [5]:

$$\text{Tensiones en el cilindro}$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot a}{2t} \quad ; \quad \sigma_c = \frac{p \cdot a}{t} \quad (4)$$

$$\text{Tensiones en el toroide}$$

$$\sigma_l = \sigma_\theta = \frac{p \cdot a}{2t} \quad ; \quad \sigma_c = \sigma_\phi \cdot C = \frac{p \cdot a}{t} \cdot C \quad (5)$$

El coeficiente C, depende del radio mayor (R) y radio menor (a) del toroide, además de la posición ϕ :

$$C = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R}{R - a \cdot \sin \phi} \right) \quad (6)$$

$$C_{\phi=0} = 1 \quad ; \quad \phi = 0 \quad ; \quad \sigma_\phi = \frac{p \cdot a}{t} \quad (7a)$$

$$C_{\phi=90} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \left(1 - \frac{a}{R} \right)} \quad (7b)$$

$$C_{\phi=-90} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \left(1 + \frac{a}{R} \right)} \quad (7c)$$

Para valores de R entre 2a y 10a, tendremos:

$$R = 2a \quad C_{\phi=90} = \frac{3}{2} \quad ; \quad \sigma_{\phi=90} = \frac{p \cdot a}{t} \cdot \frac{3}{2} \quad (8a)$$

$$R = 2a \quad C_{\phi=-90} = \frac{5}{6} \quad ; \quad \sigma_{\phi=-90} = \frac{p \cdot a}{t} \cdot \frac{5}{6} \quad (8b)$$

$$R = 10a \quad C_{\phi=90} = \frac{19}{18} \quad ; \quad \sigma_{\phi=90} = \frac{p \cdot a}{t} \cdot \frac{19}{18} \quad (8c)$$

$$R = 10a \quad C_{\phi=-90} = \frac{16}{22} \quad ; \quad \sigma_{\phi=-90} = \frac{p \cdot a}{t} \cdot \frac{16}{22} \quad (8d)$$

Por lo tanto, para el toroide en función de la relación R/a=2 las tensiones evolucionaran según el punto en el que el valor de ϕ se esté considerando; en el caso más desfavorable, se tendrá una variación entre 1.5 y 0.84, que a medida en que aumenta la relación R/a, esta diferencia disminuye; se tiene además que para R/a=10 la variación queda entre 1.05 y 0.72, en ambos casos esta variación pasa por 1. Con respecto al recipiente cilíndrico, la tensión máxima es para el punto más desfavorable y el caso más desfavorable es de 1.5 veces mayor, aunque el valor medio sería de 1.17 veces.

Las superficies y volúmenes son del mismo orden, de manera que la ventaja que se tiene con el recipiente toroidal es su aprovechamiento de espacio por ser compacto; al haber diferencias importantes entre las tensiones generadas en las dos direcciones ortogonales, sería ideal disponer de un material con propiedades elásticas distintas.

El volumen del toroide sin incluir la pared

$$V_t = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot a^2 \quad (9)$$

Al reemplazar a por a + t se incluiría la pared

$$V_{tpi} = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot (a+t)^2 \quad (10)$$

Puesto que $V_{tpi} > V_t$ el volumen de la pared del toroide V_{pt} lo determina la diferencia entre Ec (10) y Ec (9)

$$V_{pt} = V_{tpi} - V_t = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot (2 \cdot a \cdot t + t^2) \quad (11)$$

El margen de diferencia entre el cálculo analítico Ec (11) y el valor que ofrece el MEF sería

$$\text{margen} = 100 \cdot (V_{pt} - V_{MEF}) / V_{pt} \quad (12)$$

2.1.2. El Laminado

Los criterios del laminado del toroide provienen de la literatura Los ángulos de las capas del laminado (Fig. 2a), ejercen mucha influencia cuando este tiene que soportar cargas en diferentes direcciones, la resistencia y rigidez generalmente son mayores en la dirección de las fibras respecto a la dirección transversal.

Para toroides contruidos con materiales compuestos ortótropos, la relación constitutiva se puede definir utilizando la teoría de laminados dada en [24], [25], [26]

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^o \\ K \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Donde **N** es el vector de fuerzas por unidad de longitud, **M** es el vector de momentos por unidad de longitud, ϵ^o es el vector de deformaciones en el plano medio, y **K** es el vector de curvaturas en el plano medio. El laminado es constante siendo A, B y D las matrices de rigidez, en donde **A** es la matriz de rigidez plana, **B** es la matriz de acoplamiento y **D** es la matriz de rigidez de flexión. Éstas constituyen la base de la ecuación general de la teoría clásica de placas laminadas, en la que se relacionan las fuerzas en el plano y los momentos resultantes por unidad de longitud, con la deformación y la curvatura del plano de referencia del laminado [24], [25]

$$|A| = \sum_{i=1}^n [\bar{Q}]^i (z_i - z_{i-1}) \quad (14a)$$

$$|B| = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [\bar{Q}]^i (z_i^2 - z_{i-1}^2) \quad (14b)$$

$$|D| = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n [\bar{Q}]^i (z_i^3 - z_{i-1}^3) \quad (14c)$$

Para un laminado que contiene n capas. $[\bar{Q}]^i$ corresponde a la transpuesta de la matriz de rigidez de la i-esima capa del laminado y Z_i corresponde a la distancia desde el plano-medio del laminado hasta el borde de la capa i (Fig. 2b). Estas matrices difieren de otras constantes constitutivas (módulo de Young) debido al hecho que ellas contienen información geométrica acerca del laminado que es afectado por las condiciones del término Z_i .

Las principales constantes de ingeniería para un laminado se pueden determinar a partir de la matriz de rigidez A en el plano, de acuerdo al laminado **a*** está definida por [24].

$$\{\epsilon^o\} = [a^*] \{\sigma\} \quad \text{donde} \quad [a^*] = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{16}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{26}^* \\ a_{16}^* & a_{26}^* & a_{66}^* \end{bmatrix} = t [A]^{-1} \quad (15)$$

$$\{\bar{\sigma}\} = [Q]\{\bar{\epsilon}\} \text{ donde } \{\bar{\epsilon}\} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn^2 \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

donde $\bar{\sigma}$ es el vector del promedio de las tensiones planas, Q es la matriz de rigidez de la capa, $\bar{\epsilon}$ es la deformación de la capa girada por α_i desde el sistema de coordenadas globales (Fig. 2c) en la dirección de la fibra, $m = \cos(\alpha_i)$ y $n = \sin(\alpha_i)$. La Ec. (16) proporciona directamente la dirección de la fibra, la dirección transversal y las tensiones de corte planas dentro de cada capa, lo que permite una comparación de los estados de tensión dentro de cada capa a través de la sección transversal del toroide y proporciona la base del proceso de optimización.

Las propiedades del elemento shell de múltiples capas están determinadas por la teoría de laminados, el elemento apropiado para el análisis de estructuras de pared delgada es el shell281 (Fig. 2d), en 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 o solamente la de membrana (en este caso posee 3 grados de libertad por nodo y

solo se dan traslaciones); este elemento es adecuado para el análisis elástico lineal por las grandes rotaciones que se pueden dar y/o grandes deformaciones en aplicaciones no lineales en donde se puede tomar en cuenta las variaciones de espesor, además puede usarse para la modelación de aplicaciones multicapa, cascaras compuestas o construcciones tipo sándwich, la precisión en la modelación con shell de material compuesto está gobernada por la teoría de placas de *Reissner-Mindlin* [25].

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 [27]. Estos materiales ortótropos están caracterizados las constantes elásticas asociadas a tres direcciones mutuamente perpendiculares y tienen un comportamiento elástico representado por nueve constantes independientes formadas por tres módulos de elasticidad longitudinal (E_1, E_2, E_3), tres módulos de rigidez (G_{12}, G_{23}, G_{13}) y tres coeficientes de Poisson ($\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$). En el caso de una lámina quedan reducidas a cuatro constantes: $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$; siendo $G_{12} = G_{13}$ y $\nu_{12} = \frac{E_1}{E_2} \nu_{21}$, donde la dirección de las fibras se indica mediante el subíndice 1 y la dirección transversal a las fibras con el subíndice 2; ν_{12} es el coeficiente de Poisson en la dirección de las fibras y ν_{21} es el mismo coeficiente en la dirección transversal de ellas.

La técnica de laminación considerada en este estudio, se la denomina *Automated Fiber Placement* (AFP) [28], consiste en la aplicación automática de bandas de fibras de carbono pre-impregnadas de epoxi sobre el molde del toroide, la ventaja de esta tecnología, es la longitud de corte mínimo de las capas de la superficie de la pieza, el espesor de las bandas normalmente serán menores a 0.315in(8mm), esta técnica permite que se puede trabajar sobre piezas con contornos muy complejos [29].

2.2. MATERIAL

Las láminas unidireccionales de material compuesto AS/3501 formado por fibra carbono(AS) y matriz de resina epoxi(3501) se consideran para el proceso de optimización, en pruebas realizadas en literatura análoga el material ofrece buenas prestaciones en recipientes toroidales sometidos a presión [21].

Propiedad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Descripción
E1	20.02	Msi	138	GPa	Módulo de elasticidad
E2=E3	1.30	Msi	8.96	GPa	Módulo de elasticidad
G12=G13	1.03	Msi	7.1	GPa	Módulo de rigidez
G23	0.41	Msi	2.82	GPa	Módulo de rigidez
ν12=ν13	0.30		0.3		Coefficiente de Poisson
ν23	0.59		0.59		Coefficiente de Poisson
F1t	2.1E+05	Psi	1447	MPa	Resistencia longitudinal a tracción
F1c	2.1E+05	Psi	1447	MPa	Resistencia longitudinal a compresión
F2t	7.5E+03	Psi	52	MPa	Resistencia transversal a tracción
F2c	2.99E+04	Psi	206	MPa	Resistencia transversal a tracción
F3t	1.0E+06	Psi	1.0E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F3c	1.0E+06	Psi	1.0E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F4	1.0E+06	Psi	1.0E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F5	1.0E+06	Psi	1.0E+06	MPa	Resistencia (valor grande que no se calcula)
F6	1.35E+04	Psi	93	MPa	Resistencia longitudinal a cortante
C6	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
C4	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
C5	-1		-1		Coefficiente, defaults -1
$\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3 = 0.0262 \text{ Kg/in}^3$					Densidad del material compuesto

Tabla 1: Propiedades del Material AS/3501 [30]

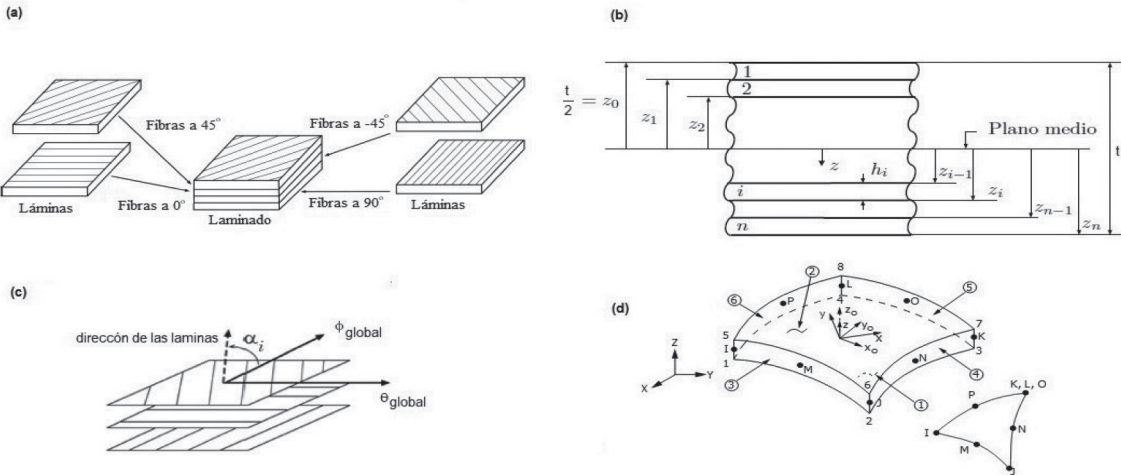


Fig. 2: Laminado y Geometría del Elemento shell281

2.3. MÉTODO

2.3.1. Simulación Numérica

La simulación numérica se realiza por medio del MEF toma criterios de la literatura: [22] 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. En el laminado se usa el material AS/3501 cuyas propiedades están en la Tabla 1, y estará formado por n=12 láminas y cada una tendrá un espesor $\frac{t}{n}$, la orientación angular será $[45/-45/0/90/-45/45]_s$ y se apilarán simétricamente. Finalmente, el modelo será sometido a 5000psi(374.44bar) de presión.

2.3.2. Restricción mediante el criterio de Fallo de Tsai-Wu

El criterio de fallo proviene de las curvas de ajuste obtenidas de pruebas experimentales que se emplean para predecir fallos y es representado por medio de la notación de índice de fallo, el cual es usado por varios paquetes de elementos finitos.

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} ; \text{ se predice el fallo cuando } I_F \geq 1 \quad (16)$$

La resistencia es el inverso del índice de fallo

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} ; \text{ se predice el fallo cuando } R \leq 1 \quad (17)$$

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:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A} \right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (18)$$

con

$$A = \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} + \quad (19)$$

$$C_4 \frac{\sigma_2\sigma_3}{\sqrt{F_{2t}F_{2c}F_{3t}F_{3c}}} + C_5 \frac{\sigma_1\sigma_3}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{3t}F_{3c}}} + C_6 \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}}$$

y

$$B = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (20)$$

donde C_i , $i=4..6$, son los coeficientes de acoplamiento de Tsai-Wu, que por defecto es -1. Se toma en cuenta que la resistencia a la compresión en la Ec. (18) y Ec. (19) son números positivos. Los valores de resistencia F_{3t} y F_{3c} a través del espesor, rara vez están disponibles en una literatura, por lo que es una práctica común utilizar los correspondientes valores transversales de resistencia en el plano [27], la resistencia intralaminar F_5 se suele calcular como igual a la resistencia al corte en el plano, por lo que al carecer de datos experimentales, la resistencia intralaminar restante F_4 se puede estimar como la resistencia al corte, proveniente de la matriz de resistencia al corte. La descripción de las resistencias y coeficientes usados en la Ec. (18) y Ec.(19) se registran en la Tabla 1.

2.3.3. Validación Experimental de un Modelo Toroidal

Para realizar la validación del modelo, se han tomado los datos de un toroide que ha sido ensayado experimentalmente por Haixiao Hu [16], que 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 0.01417in(0.36mm); 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 $t\alpha$ 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 [16], obteniéndose

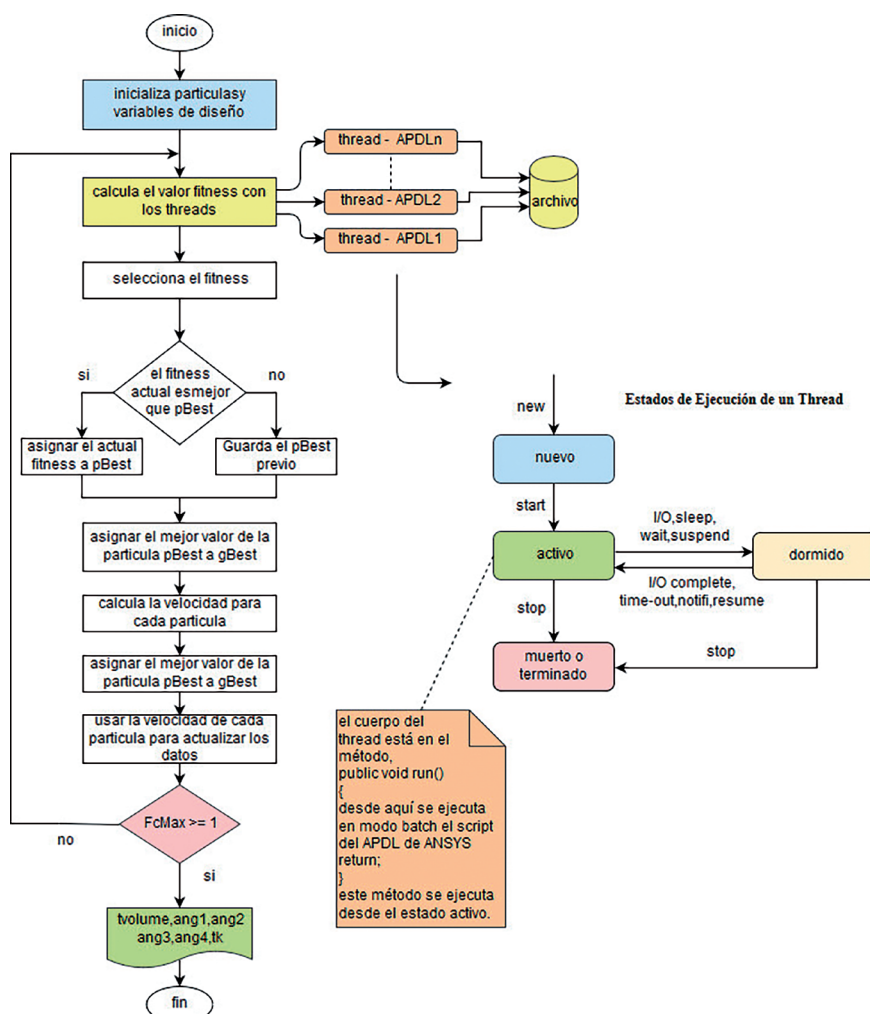


Fig. 3: Optimización por Intercambio de Partículas (PSO)

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.

2.3.4. Optimización

El PSO es un método metaheurístico, cada partícula de la población inicial, recorre el espacio solución a una velocidad V hacia nuevas posiciones X de acuerdo con su propia experiencia P y con la experiencia aportada por el mejor de sus congéneres G [18]; es así que la optimización de estructuras de material compuesto basado en PSO que incluyen MEF han dado buenos resultados [32].

En la (Fig. 3) el flujo del PSO implementado con JAVA, usa un script para el MEF creado en APDL, que lo ejecutará en modo *batch* desde cada *thread*; que se ejecute para optimizar a M5 [21].

Para este algoritmo basado en PSO se abstraen criterios de [33], cada partícula se asocia con un objeto que tiene una serie de características y propiedades asociadas con las variables de diseño(DV), variable de estado(DS) y la función objetivo(OBJ) a minimizarse; esta función objetivo representa el volumen del material (Tvolume) a optimizarse, las variables de diseño se asocian a los ángulos de orientación $ang1$, $ang2$, $ang3$ y $ang4$ para cada capa del laminado entre 0° y 90° , el espesor del recipiente t estará entre 0.0in y 1.5in, la variable de estado está asociada con FcMax o criterio de fallo estará en el intervalo de [0.0 ... 1.0] y que serán calculados por ANSYS.

En cada iteración del algoritmo, se realiza una variación del espesor t así como una rotación angular de las láminas del laminado que están asociadas con los ángulos $ang1$, $ang2$, $ang3$, $ang4$; cada *thread* recibe por parámetro las características de diferentes partículas(información relacionada al espesor y los ángulos) para que sean evaluadas por MEF en ANSYS, quien devuelve el índice de fallo, volumen, desplazamiento, deformación y tensión entre otras salidas; dependiendo del criterio de fallo, el proceso se repite y se generan nuevas características para actualizar a las partículas del espacio solución que vuelven a ser evaluadas hasta que se produzca el fallo a primera lamina (criterio de fallo de Tsai-Wu) terminando y dejando una serie de valores factibles registrados en un archivo, de los cuales se tomara el mejor de ellos.

Puesto que los *threads* abstraen criterios relacionados con multiprocesamiento [34] que se reflejan en los *estados de ejecución de un thread* (Fig. 3) y aprovechando el concepto de tiempo

compartido para ahorrar tiempos de computación [35], usamos *threads* para interactuar con ANSYS en modo *batch* y desde ellos ejecutar el script en APDL; la ejecución de un solo script para evaluar una partícula en cada iteración del optimizador, consumiría un tiempo de computación tc que por el total de m partículas nos daría un tiempo total $tt = tc \cdot m$, lo que afectaría de gran manera el rendimiento del PSO; por lo que al ejecutarse n threads en ese mismo espacio de tiempo tc se alcanzaría a reducir aprox. $\frac{1}{n}$ el total de tiempo de procesamiento de las m partículas por lo que $tt = \frac{1}{n} \cdot tc \cdot m$; dado que con los threads se pueden usar aquellos intervalos de tiempo en que la unidad central de proceso(CPU) está libre, mientras otros componentes ejecutan parte del proceso, entonces se puede compensar tiempos de computación con la ejecución solapada de threads en un mismo espacio de tiempo y de esta manera compensaremos los tiempos de ejecución del PSO.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 contiene el resultado de la optimización, registra el índice de fallo FcMax(criterio de Tsai-Wu), ángulo de las láminas $ang1$, $ang2$, $ang3$, $ang4$, espesor del recipiente t , volumen optimizado TVolume, desplazamiento. Se registran resultados de 10 iteraciones, las 9 primeras son factibles y la última sobrepasa el índice de fallo establecido; la última columna refleja datos de M5 [21] antes de la optimización.

En (Fig. 4a) se muestran las curvas de las variables de diseño $ang2$ y $ang3$ tienen tendencias decrecientes mientras que $ang1$ y $ang4$ tienen tendencias crecientes.

La (Fig. 4c) muestra que el volumen de la pared del recipiente se minimiza al mismo tiempo que el espesor del laminado se reduce (Fig. 4b) lo que además afecta al peso del recipiente (Fig.4f) cuya curva muestra que este también disminuye, las tres curvas reflejan un comportamiento similar y sus tendencias son decrecientes; esta reducción de volumen, peso y espesor en el toroide a una presión constante afectan al desplazamiento el mismo que muestra una tendencia creciente (Fig.4e). Por otra parte, el índice de fallo condiciona la optimización como variable de estado, su curva muestra una tendencia creciente puesto este debe llegar a 1 para terminar el proceso.

Con los datos de las columnas **set9** y con los de la última columna de la Tabla 2, se generaron los modelos M5 toroide no optimizado y M6 toroide optimizado, tienen igual dimensión, pero difieren por el espesor de la pared y los ángulos de orientación de las láminas del laminado.

Iteraciones		set 1	set 2	set 3	set 4	set 5	set 6	set 7	set 8	set 9	set 10	M5
Objetivo		(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(factible)	(no factible)	(sin optimizar)
FcMax (SV)	-	0.8697	0.8871	0.9018	0.9071	0.9721	0.9725	0.9793	0.9815	0.9945	1.0339	0.9040
ang1 (DV)	°	73.49	81.41	81.11	76.61	81.62	83.64	82.10	83.64	83.64	76.34	45.00
ang2 (DV)	°	31.98	18.06	24.67	27.40	14.83	5.86	9.99	5.86	5.86	22.80	45.00
ang3 (DV)	°	46.72	25.45	38.09	39.44	21.37	10.20	18.93	10.20	10.20	38.00	0.00
ang4 (DV)	°	71.47	73.99	74.37	73.97	75.36	85.71	75.52	85.71	85.71	73.62	90.00
t (DV)	in	1.0341	0.7458	0.8449	0.8854	0.6779	0.6200	0.6533	0.6166	0.6100	0.7672	0.7500
	mm	26.27	18.94	21.46	22.49	17.22	15.75	16.59	15.66	15.49	19.49	19.05
TVolume(OBJ)	in ³	3133.83	2319.6	2604.56	2719.61	2121.17	1949.79	2048.4	1939.6	1920.19	2381.38	2331.91
	m ³	0.0514	0.0380	0.0427	0.0446	0.0348	0.0320	0.0336	0.0318	0.0315	0.0390	0.0382
Peso del Toroide	kg	82.11	60.77	68.24	71.25	55.57	51.08	53.67	50.82	50.31	62.39	61.10
Desplazamiento DMX	in	0.0307	0.0402	0.0356	0.0344	0.0453	0.0474	0.0482	0.0477	0.0507	0.0404	0.0440
	mm	0.78	1.02	0.90	0.87	1.15	1.20	1.22	1.21	1.29	1.03	1.12

Tabla 2: Resultados de la Optimización

La (Fig. 4e) refleja que índice de fallo de M6(0.9945) ha aumentado 10% con respecto al índice de M5(0.90398) según (Fig. 4a), en ambos casos MX señala que el fallo se producirá el área axial de los toroides.

La (Fig. 4b) refleja que el desplazamiento de M6(0.0507in) ha aumentado el 15.23% con respecto a M5(0.044in) según (Fig. 4f); en ambos casos MX señala que en la cresta del toroide es donde se produce un mayor desplazamiento; las figuras (Fig. 4c y 4g) reflejan un corte transversal de los toroides y se puede apreciar que las áreas circunferenciales se expanden y las áreas axiales se contraen.

La (Fig. 4d) muestra que el índice de deformación de M6(0.005454) se ha reducido el 11.17% con respecto a M5(0.00614) según (Fig. 4h), en ambos modelos se producen deformaciones en las áreas circunferenciales de los toroides, pero con mayor intensidad en sus áreas axiales.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La cantidad del material M5(61.1Kg) al optimizarse M6(50.3Kg) se redujo el 17.7% ocasionando un desplazamiento del 15% aunque la deformación haya disminuido el 8%, es de mencionar que el volumen del material ha variado en los mismos porcentajes, por

lo que el espesor $t=0.61\text{in}(15.49\text{mm})$ se redujo el aprox. 18.7% con respecto modelo inicial $t=0.75\text{in}(19.05\text{mm})$, por lo tanto la variación de los ángulos de las capas del laminado han influido en los resultados obtenidos manteniendo la resistencia del laminado del recipiente a los 5000psi(374.44bar) de presión al que fue sometido.

La Tabla 3 refleja cuatro tipos de recipientes cilíndrico[36] para el almacenamiento de GNC, las presiones máximas soportadas son de aprox. 200bar, con un margen de seguridad aprox. del 26.7%, estos diseños pueden contener hasta 15Kg de GNC pero la carga máxima permisible es de 11Kg. En el mercado energético[37] se establece que 1Kg de GNC $\equiv 1.5\text{L}$ de gasolina $\equiv 1.025\text{L}$ de gasoil; puesto que el recipiente toroidal M6 puede almacenar 42.72Kg de GNC $\equiv 64.08\text{L}$ de gasolina $\equiv 43.79\text{L}$ de gasoil, en comparación con el cilindro tipo II que puede almacenar 13.5Kg de GNC $\equiv 20.25\text{L}$ de gasolina $\equiv 13.84\text{L}$ de gasoil, el recipiente M6 almacena aprox. 3 veces más GNC de lo que puede almacenar el cilindro tradicional.

Energéticamente la cantidad de GNC que puede almacenar M6 le proporciona 51221.8Kcal de energía que es 3 veces más de lo que se obtiene con el cilindro tipo II (16186Kcal), por lo que la autonomía que puede alcanzar un vehículo con este recipiente toroidal sería muy beneficiosa.

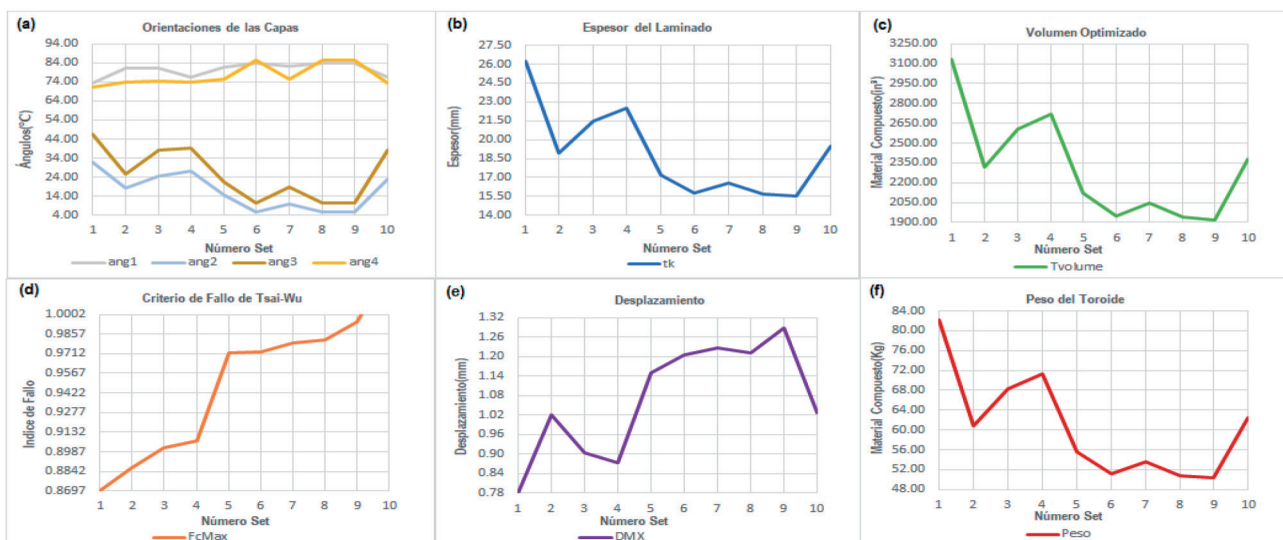


Fig. 4: Curvas de los Resultados de la Optimización

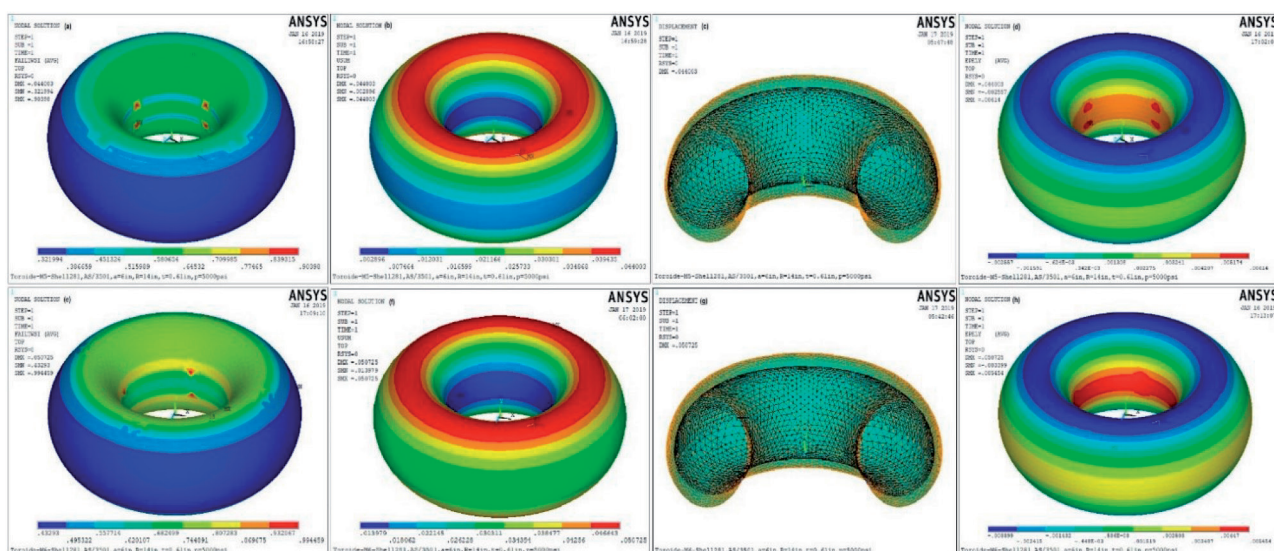


Fig. 4: Modelo Toroidal Optimizado M6

Recipientes	Peso del Material (Kg)	Presión Soportada (psi)	Presión Soportada (bar)	Capacidad (L)	Peso del GNC (Kg)	Energía que puede Almacenar (Kcal)
Toroide M5 (Sin Optimizar)	61.1	5000	344.74	163.03	42.72	512212.8
Toroide M6 (Optimizado)	50.3	5000	344.74	163.03	42.72	512212.8
Cilindro de Acero[36]	80	2900.75	180	80	12.9	154671
Cilindro de Plastico+Refuerzo de Fibra de Carbono [36]	34	2900.75	200	74	11.9	142681
Cilindro Tipo I [3]	194	2900.75	200	200	11.6	139084
Cilindro Tipo II [3]	70	2900.75	200	100	13.5	161865
Poder Calorifico del GNC	11990 Kcal/Kg					
Ecuación Ideal de los Gases	Presión.Volumen = número de moles.Rconstante universal.Temperatura					
	número de moles = masa / Masa molecular					

Tabla 3: Comparativo Recipientes Cilíndricos y Toroidales para GNC

Los recipientes cilíndricos tienen dimensiones diferentes a los recipientes toroidales, su geometría ocasiona desperdicio de espacio dentro del maletero del automóvil; M6 tiene las dimensiones de un neumático y por su forma proporciona un ahorro de espacio en el maletero, la capacidad de almacenamiento es de 163.03L equivalente a 42.72Kg de GNC que es 216.4% más de lo que se puede almacenar en el cilindro tipo II reflejado en la Tabla 3.

Por lo analizado, se concluye que el recipiente toroidal optimizado M6 ofrece muy buenas prestaciones para el almacenamiento de GNC, la fabricación de este tipo de recipiente con material compuesto proporcionaría un avance significativo en este campo por los beneficios económicos y energéticos que proporciona el GNC.

REFERENCIAS

[1] M. I. Khan, T. Yasmin, and A. Shakoore, "Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015.

[2] N. Sirosh and A. Niedzwiecki, "Development of storage tanks: High-pressure vessels," *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications (Green Energy and Technology)*. pp. 291–310, 2008.

[3] K. COMPRESION, "Cilindros GNC Vehicular," 2018.[Online]. Available: <http://www.kioshicompresion.com/vehicular.html>.

[4] J. Cook and B. J. Richards, "Aparato de Contención de Gas," 2002.

[5] C. P. Fowler, A. C. Orifici, and C. H. Wang, "A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 47, pp. 22067–22089, Dec. 2016.

[6] A. Miravete, "Materiales Compuestos. Volumen I i II," *Mater. compuestos*, 2000.

[7] S. J. Park and B. J. Kim, "Carbon fibers and their composites," *Springer Ser. Mater. Sci.*, 2015.

[8] X. Huang, "Fabrication and properties of carbon fibers," *Materials*. 2009.

[9] Boeing, "Recuperado de: www.boeing.com." [Online]. Available: www.boeing.com

[10] Airbus, "Recuperado de: www.airbus.com." [Online]. Available: www.airbus.com

[11] Ferrari, "Recuperado de www.ferrari.com." [Online]. Available: www.ferrari.com

[12] V. A. Maksimuk and I. S. Chernyshenko, "Nonlinear elastic state of thin-walled toroidal shells made of orthotropic composites," *Int. Appl. Mech.*, 1999.

[13] J. S. Park, C. S. Hong, C. G. Kim, and C. U. Kim, "Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction," *Compos. Struct.*, 2002.

[14] L. Zu, S. Koussios, and A. Beukers, "Pattern design and optimization for filament - wound toroidal pressure vessels," in *23rd Technical Conference of the American Society for Composites*, Memphis, TN, USA, 2008.

[15] L. Zu, "Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels," *Compos. Struct.*, 2012.

[16] H. Hu, S. Li, J. Wang, and L. Zu, "Structural design and experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels," *Compos. Struct.*, 2015.

[17] F. Yang, P. Wang, Y. Zhang, L. Zheng, and J. Lu, "Survey of swarm intelligence optimization algorithms," in *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2017*, 2018.

[18] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks*, 1995.

[19] W. Tao, Z. Liu, P. Zhu, C. Zhu, and W. Chen, "Multi-scale design of three dimensional woven composite automobile fender using modified particle swarm optimization algorithm," *Compos. Struct.*, 2017.

[20] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization," *Swarm Intell.*, 2007.

[21] D. Patiño and A. Corz, "Análisis Comparativo de Recipientes a Presión Toroidal de Material Compuesto por Elementos Finitos[Comparative Analysis of Toroidal Pressure Vessels of Composite by Finite Elements]," *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 25, no. 1, pp. 162–175, 2018.

[22] M. J. Vick and K. Gramoll, "Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 134, no. 5, p. 051201, 2012.

[23] S. Li and J. Cook, "An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 124, no. 2, p. 215, 2002.

[24] C. T. Herakovich, "Mechanics of Fibrous Composites," in *John Wiley and Sons*, New York, 1998.

[25] J. N. Reddy, "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, Second Edition -," *Book*, 2003.

[26] H. T. Tsai, S. W., Hahn, *Introduction to Composite Materials*. Westport, 1980.

[27] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*, Second Edition. 2010.

[28] D. Jesus and J. Gonzalez, "ScienceDirect Pressure based approach for Automated Fiber Placement (AFP) with sensor based Pressure based approach for Automated Fiber Placement (AFP) with sensor based Pressure based feedback approach loop for Automated Placement in the feedback loop," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 794–799, 2017.

[29] A. J. Contreras, "engineering & materials Ultimate breakthroughs in materials engineering Tecnología de laminado automatizado en materiales compuestos," no. imagen 1, pp. 1–8, 2018.

[30] G. S. Springer and L. P. Kollar, "Displacements, Strains, and Stresses," in *Mechanics of composite structures*, 2003.

[31] E. J. Barbero and M. Shahbazi, "Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites," *Compos. Struct.*, 2017.

[32] J. Chen, Y. Tang, R. Ge, Q. An, and X. Guo, "Reliability design optimization of composite structures based on PSO together with FEA," *Chinese J. Aeronaut.*, 2013.

[33] Lili Liu, Shengxiang Yang, and Dingwei Wang, "Particle Swarm Optimization With Composite Particles in Dynamic Environments," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B*, vol. 40, no. 6, pp. 1634–1648, Dec. 2010.

[34] N. S. Arora, R. D. Blumofe, and C. G. Plaxton, "Thread scheduling for multiprogrammed multiprocessors," *Theory Comput. Syst.*, 2001.

[35] J. Threads, "Java threads," *Comput. Math. with Appl.*, 1997.

[36] L. Shijiazhuang Yunhong Trade Co., "recuperado: Cilindros De Gnc Para Vehiculos," 2018.[Online]. Available: https://cnynunhong.en.alibaba.com/company_profile.html.

[37] M. Lage and S. General, "El gas natural en la movilidad La alternativa renovable," pp. 1–16, 2017.