

Diseño y Optimización de Recipientes a Presión Toroidal de Material Compuesto para Vehículos a GNC

Resumen. – El uso de gas natural comprimido (GNC) en la industria de automotores, ha generado el diseño de recipientes a presión para su almacenamiento; el recipiente que comúnmente se usa, es de forma cilíndrica y de metal, aunque hay diseños con material compuesto, estos tienen una baja capacidad de almacenamiento. La forma cilíndrica presenta problemas para su ubicación en el automóvil, por lo que la alternativa de diseñar recipientes de forma toroidal ofrecería mejores prestaciones. En el presente estudio, se plantea una metodología para el diseño de un recipiente toroidal de material compuesto, optimizado, resistente, liviano y capaz de almacenar más GNC que en los recipientes cilíndricos. Mediante simulaciones numéricas se elaborará el diseño del recipiente toroidal y por medio del método de elementos finitos (MEF) se realizará el análisis elástico lineal, se usará un composite formado por fibra de carbono y matriz de resina epoxi, dado que hay estudios que indican que, con este tipo de material, se han obtenido altas resistencias y mejores prestaciones que con los materiales metálicos. En el estudio se analizará, el efecto que produce la variación angular de las capas del laminado en su resistencia, 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 por medio de un algoritmo metaheurístico, que usará Threads en Java para reducir los tiempos de computación y mejorar el rendimiento del optimizador, a la hora de ejecutar los scripts desarrollados en ANSYS para el análisis por MEF.

Palabras Claves: simulación, toroide, recipiente a presión, material compuesto, elementos finitos, optimización, threads.

I. INTRODUCCION

La transformación del gas natural comprimido (GNC) en energía, es una alternativa de mucho impacto en el campo energético; el bajo costo y la reducción de contaminación del medio ambiente, son factores que influyen para su uso como combustible en automotores[1]; por lo que se necesitan recipientes resistentes para su almacenamiento. Uno de los principales obstáculos en el diseño de los recipientes, es la adaptabilidad y la capacidad de almacenar el GNC que se requiere para generar la misma o mayor cantidad de energía que genera la gasolina y el diésel [2].

Por lo general 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, llegando a soportar una presión aproximada de 2.9001ksi(200bar)[3], pero hay estudios que reflejan que los recipientes toroidales son adecuados para el almacenamiento de GNC[4], por lo que han sido usados en la industria aeronáutica, naval y automotriz en sus diferentes tipos de

Identificador de Objeto Digital: (Para ser insertada por LACCEI).
ISSN, ISBN: (Para ser insertada por LACCEI).

vehículos; estos recipientes toroidales inicialmente se fabricaban de material isotrópico como el acero, pero a medida que se han desarrollado nuevas tecnologías de materiales compuestos se las empleó para el diseño de estos recipientes con buenos resultados[5].

Usar 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; resistencia, rigidez y peso, son algunas propiedades destacadas que se derivan de la combinación de las propiedades de los materiales que lo conforman[6].

La fibra de carbono[7] es un compuesto que para su fabricación [8] se han unido miles de filamentos de carbono para formar un hilo cuyo diámetro fluctúa entre 5 y 10 micras, estos hilos se unen con una matriz de resina que los mantiene alineados y actúa como medio de transferencia de tensiones al mismo tiempo que actúa como elemento de protección; con lo que finalmente se forma un material de bajo peso, alta resistencia y gran rigidez, por lo que son muy usados en la industria aeronáutica como en el B787 de Boeing[9] o en el A350-XWB de Airbus[10] así como en la industria automotriz[11].

La obtención de soluciones, de desplazamiento y de tensiones en un toroide, son más difíciles de conseguir que en otras cascaras axisimétricas de revolución, debido al comportamiento de las ecuaciones en diferentes lugares del toroide y principalmente en su cresta Fig. 2a; varias soluciones elásticas, para toroides ortótropos sometidos a presión interna están disponibles en la literatura [12],[13] así como muchas consideraciones para la optimización del diseño de toroides fabricados mediante enrollamiento con fibra[14],[15],[16].

Las técnicas de optimización solucionan problemas muy complejos, existen técnicas clásicas que encuentran la solución óptima y demuestran 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 de 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].

Uno de los objetivos del trabajo, es la optimización del recipiente toroidal M5, cuyos datos son tomados 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.

II. ESTRUCTURA DEL RECIPIENTE

A. Geometría del Toroide.

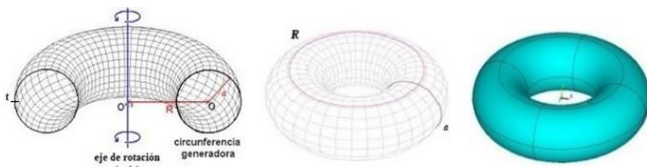


Fig. 1 Toroide sección recta circular

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

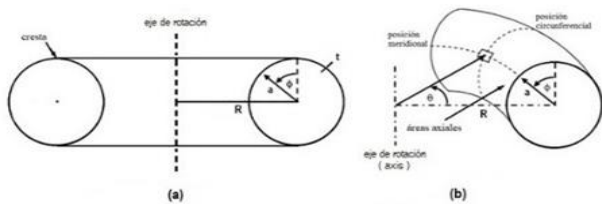


Fig. 2 Geometría del toroide

La dirección meridional ϕ para un toroide circular es tangente a la sección recta, y la dirección circumferencial θ sigue el círculo de revolución para el toroide Fig. 2b. La parte superior de la mitad del toroide se define a partir de $-90^\circ < \phi < 90^\circ$, con la cresta que ocurre en $\phi = 0^\circ$.

Por su geometría, el toroide enrollado de láminas de fibra de carbono tiene una variación de espesor natural debido a la acumulación de la 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 posiciones meridional y circumferencial Fig. 2b de acuerdo a la teoría de membranas [23] 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 isotrópico y se relaciona con el esfuerzo en la cascara (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 circumferencial 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:

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

R_ϕ es el radio de curvatura meridional y a es el radio de curvatura circumferencial.

Las tensiones longitudinales y circumferenciales 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 circumferencial (σ_c) de ambos serían[5]:

Tensiones en el cilindro

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

Tensiones en el toroide

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

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:

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

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

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

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

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

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

Puesto que $V_{tpt} > V_t$, el volumen de la pared del toroide

V_{pt} lo determina la diferencia entre (10) y (9)

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

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

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

B. El Laminado.

Los criterios del laminado del toroide provienen de la literatura[24].

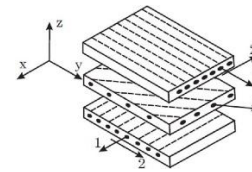


Fig. 3 Capas del Laminado

Los ángulos de las capas del laminado Fig. 3, 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 construidos con materiales compuestos ortótropos, la relación constitutiva se puede definir utilizando la teoría de laminados dada en[25],[24],[26]

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

Donde \mathbf{N} es el vector de fuerzas por unidad de longitud, \mathbf{M} es el vector de momentos por unidad de longitud, $\boldsymbol{\varepsilon}^o$ es el vector de deformaciones en el plano medio, y \mathbf{K} es el vector de curvaturas en el plano medio. El laminado es constante siendo \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{D} las matrices de rigidez, en donde \mathbf{A} es la matriz de rigidez plana, \mathbf{B} es la matriz de acoplamiento y \mathbf{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[25],[24]

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

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

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

Para un laminado que contiene n capas. $[\bar{\mathbf{Q}}]^i$ 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 según Fig. 4. 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 .

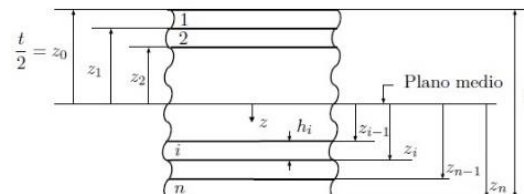


Fig. 4 Apilamiento de las capas del Laminado

Las principales constantes de ingeniería para un laminado se pueden determinar a partir de la matriz de rigidez \mathbf{A} en el plano, de acuerdo al laminado \mathbf{a}^* está definida por[25].

$\{\varepsilon^o\} = [a^*] \{\bar{\sigma}\}$ donde,

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

$\{\bar{\varepsilon}\} = [Q] \{\bar{\varepsilon}\}$ donde ,

$$\{\bar{\varepsilon}\} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn^2 \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

donde $\bar{\sigma}$ es el vector del promedio de las tensiones planas, Q es la matriz de rigidez de la capa, $\bar{\varepsilon}$ es la deformación de la capa girada por α_i desde el sistema de coordenadas globales

Fig. 5 en la dirección de la fibra, $m = \cos(\alpha_i)$ y $n = \sin(\alpha_i)$ La ecuación (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.

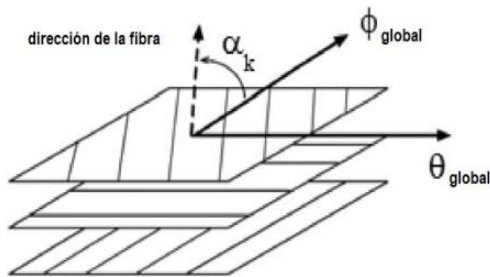


Fig. 5 Orientación de las fibras en el laminado[22]

El elemento shell de múltiples capas tiene propiedades están determinadas por la teoría de laminados, el elemento apropiado para el análisis de estructuras de pared delgada es el shell281 ver Fig. 6, 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[24].

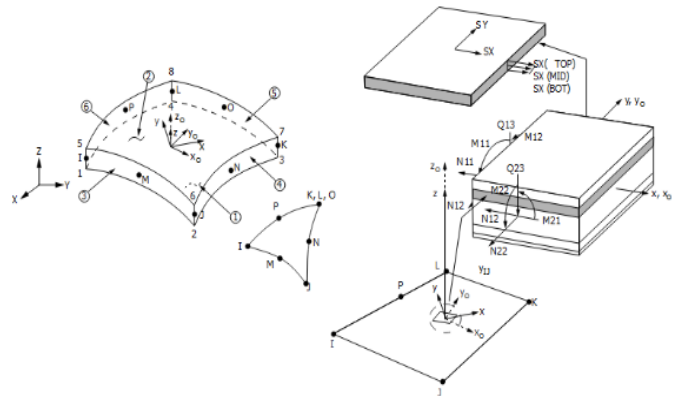


Fig.6 Estructura del Shell281

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 $\nu_{12} = (E_1/E_2)\nu_{21}$, 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.

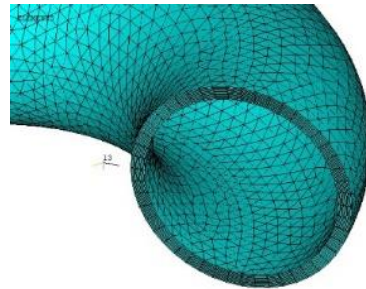


Fig. 7 Toroide con laminado de espesor fijo

Automated Fiber Placement (AFP) [28] es la técnica de laminación que se emplea para la creación del laminado, esta técnica consiste en la aplicación automática de bandas de fibras de carbono pre-impregnadas de resina epoxi sobre un molde toroidal, la ventaja de emplear esta tecnología, es que se puede controlar la longitud de corte mínimo de las capas que están sobre la superficie de la pieza, el espesor de las bandas generalmente son menores a 0.315in(8mm), la técnica permite que se puede trabajar sobre piezas con contornos muy complejos[29].

C. El Material.

Las láminas unidireccionales de material compuesto AS/3501[30] 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].

TABLA I
PROPIEDADES DEL MATERIAL AS/3501[30].

| 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 |
| V12=V13 | 0.30 | | 0.3 | | Coefficiente de Poisson |
| V23 | 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 |

III. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO

A. Simulación Numérica

La simulación numérica se realiza por medio del MEF toma criterios de la literatura: [22],[27],[31] 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 I), y estará formado por n=12 láminas y cada una tendrá un espesor $\frac{t}{n}$, la orientación angular será inicial será de [45/-45/0/90/-45/45]s y se apilaran simétricamente; el modelo será sometido a 5000psi(374.44bar) de presión.

B. Criterio de Falla de Tsai-Wu

El criterio de falla proviene de las curvas de ajuste obtenidas de pruebas experimentales que se emplean para predecir los fallos que se pueden generar sobre un material se lo representa por medio de la notación de índice de fallo, el cual es usado por varios paquetes de elementos finitos, se lo obtiene.

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} ; \text{hay fallo si } I_F \geq 1 \quad (17)$$

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} ; \text{hay fallo si } R \geq 1 \quad (18)$$

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:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (19)$$

con

$$A = \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} + \quad (20)$$

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

y

$$B = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (21)$$

donde C_i , $i=4..6$, son los coeficientes de acoplamiento de Tsai-Wu, que por defecto es -1. Se toma en cuenta además que la resistencia a la compresión en (20) y (21) 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 (20) y (21) se registran en la (Tabla I).

C. 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 $0.01417\text{in}(0.36\text{mm})$; este laminado está formado por 12 láminas. La orientación angular está en función del ángulo ϕ cuyo valor esta entre $0 < \phi < \pi$, 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 MEF desarrollado por nosotros, se procedió a contrastar los resultados con los resultados experimentales obtenidos por *Haixiao Hu*[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.

D. Optimización

La optimización de estructuras de material compuesto basado en PSO que incluyen MEF han dado buenos resultados según lo refleja [32]. La eficiencia de este algoritmo se debe a que es un método metaheurístico, donde 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 según [18]. Este esquema estructurado consume tiempos de computación, los mismos que se incrementarían si desde esa estructura se realiza una bifurcación para que se ejecute el FEM desde Ansys; Por lo que, para mejorar su rendimiento en esas condiciones, se introduce el manejo de threads para que desde ellos se bifurque a la ejecución del MEF obteniendo un procesamiento paralelo los que reducen el tiempo total de ejecución del algoritmo.

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].

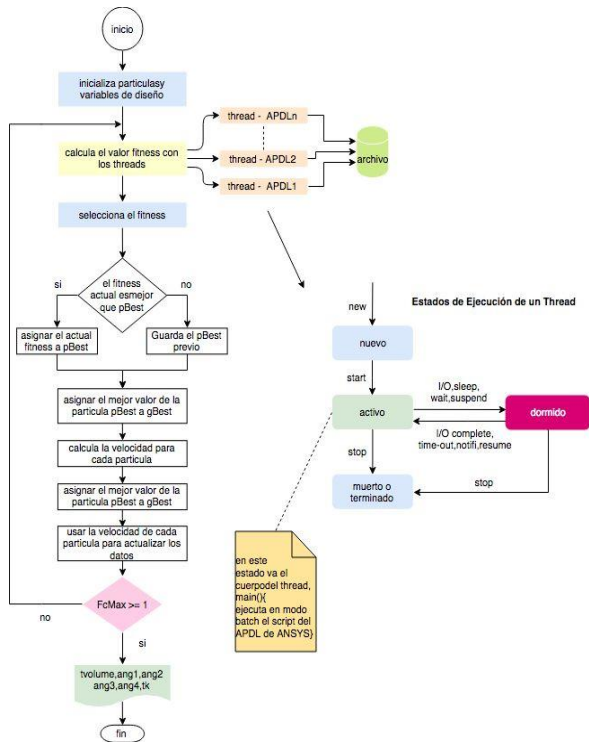


Fig. 8 Algoritmo PSO redefinido.

Para la implementación de 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; la función objetivo representa el volumen del material (Tvolume), las variables de diseño se asocian a los ángulos de orientación $ang1$, $ang2$, $ang3$ y $ang4$ para cada capa del laminado entre 0^0 y 90^0 , el espesor del recipiente t estará entre 0.0in y 1.5in, la variable de estado está asociada con $FcMax$ o criterio de fallo y estará en el intervalo de $[0.0 \dots 1.0]$ y que serán calculados por ANSYS vía APDL.

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* según Fig. 8 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.

IV. RESULTADOS

La (Tabla II) 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.

TABLA II
RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

| Iteraciones del PSO | Objetivo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | M5 |
|------------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------|
| | | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (factible) | (no factible) | |
| $FcMax(SV)$ | - | 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 | 76.81 | 81.62 | 83.94 | 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 | 36.44 | 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 |
| $TVolume(OBJ)$ | m^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 recipiente toroidal | kg | 82.11 | 60.77 | 68.24 | 71.25 | 56.57 | 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 |

En Fig. 9a 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. 9c muestra que el volumen de la pared del recipiente se minimiza al mismo tiempo que el espesor del laminado se reduce Fig. 9b lo que además afecta al peso del recipiente según Fig.9f 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 según Fig.9e.

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.

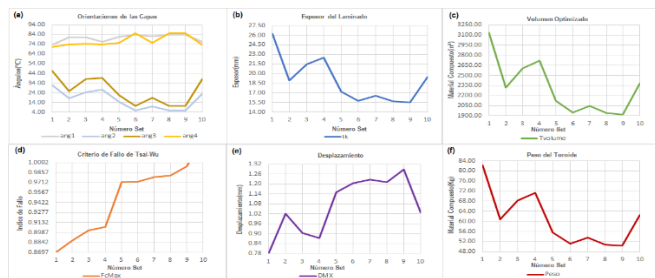


Fig. 9. Curvas de los Resultados de la Optimización

Con los datos de las columnas set9 y con los de la última columna de la (Tabla II), 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.

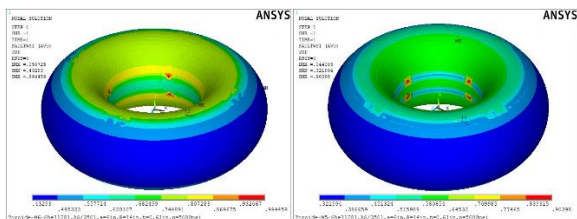


Fig. 10. Fallo en M6 y M5

La Fig. 10 refleja que índice de fallo de M6 es de 0.9945 ha aumentado el 10% con respecto al índice de M5 que es 0.90398, en ambos casos MX señala que el fallo se producirá el área axial de los toroides, pero además en M6 se aprecia que hay un mejor aprovechamiento del material en sus áreas axiales.

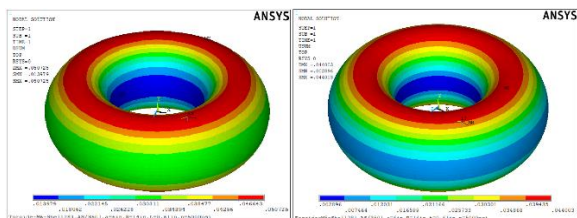


Fig. 11. Desplazamientos de M6 y M5

La Fig. 11 refleja que el desplazamiento en el modelo M6 es de 0.0507in(1.29mm) y ha aumentado el 15.23% con respecto a M5 que tiene 0.044in(1.12mm), en ambos casos MX señala que en la cresta del toroide es donde se produce un mayor desplazamiento.

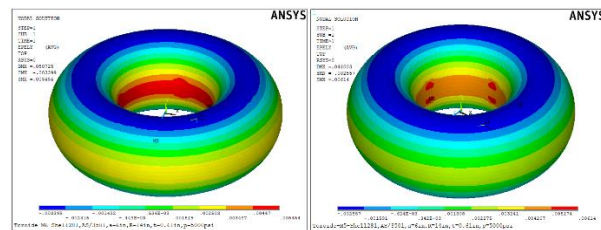


Fig. 12. Deformación en M6 y M5

La Fig.12 muestra que el índice de deformación del modelo M6 es de 0.005454 y se ha reducido el 11.17% con respecto al modelo M5 cuyo índice es de 0.00614, en ambos modelos se producen deformaciones en las áreas circunferenciales de los toroides, pero con mayor intensidad en sus áreas axiales.

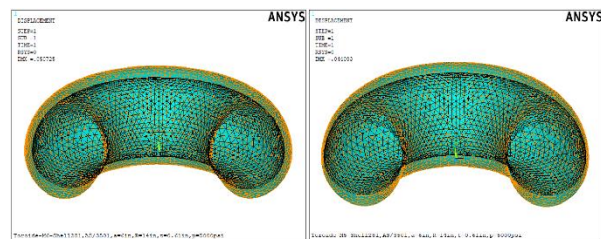


Fig. 13. Desplazamiento corte transversal de M6 y M5

Las ilustraciones en Fig. 13 reflejan un corte transversal de los toroides y se puede apreciar que las áreas circunferenciales de los toroides se produce la expansión y en las áreas axiales se produce la contracción.

VI. DISCUSION Y CONCLUSION

La cantidad del material usado en el recipiente M5 es de 61.1Kg el proceso de optimización ha reducido el 17.7% obteniéndose un modelo M6 que consume 50.3Kg de material, la optimización ha producido un desplazamiento del 15% aunque la deformación haya disminuido en un 8%, es de mencionar que el volumen del material ha variado en los mismos porcentajes, por lo que el espesor alcanzado en M6 es de 0.61in(15.49mm) reduciéndose el 18.7% con respecto al modelo inicial M5 que tiene un espesor de 0.75in(19.05mm), 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.

COMPARATIVO RECIPIENTES CILÍNDRICOS Y TOROIDALES PARA GNC

| Recipientes | Peso del Recipiente (Kg) | Presión Soportada (psi) | Presión Soportada (bar) | Capacidad del Recipiente en (L) | Peso del GNC en el recipiente (Kg) | Energía en (Kcal) |
|--|---|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Toroide M5(noOPT) | 61.1 | 5000 | 344.74 | 163.03 | 42.72 | 512212.8 |
| Toroide M6(OPT) | 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 Plástico+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 Calorífico del GNC | 11990 | Kcal/Kg | | | | |
| Ecuación Ideal de los Gases | Presión.Volumen = número de moles.Rconstante universal.Temperatura número de moles = masa / Masa molecular | | | | | |

La (Tabla III) 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. Dado que el mercado energético[37] establece que: 1Kg de GNC = 1.5L de gasolina = 1.025L de gasoil; y puesto que el recipiente toroidal M6 puede almacenar, 42.72Kg de GNC=64.08L de gasolina=43.79L de gasoil, en comparación con el cilindro tipo II que puede almacenar, 13.5Kg de GNC=20.25L de gasolina=13.84L de gasoil, el recipiente M6 almacena aprox. 3 veces más GNC de lo que puede almacenar el cilindro tradicional.

La cantidad de GNC que puede almacenar M6 en términos energéticos proporciona 512221.8Kcal de energía que es 3 veces más de lo que se obtiene con lo que se puede el cilindro tipo II que tiene capacidad para almacenar GNC que proporciona 161865Kcal, por lo que la autonomía que puede alcanzar un automóvil con el recipiente toroidal M6 sería muy beneficiosa.

Los recipientes cilíndricos ocupan mucho espacio en el portamaletas de un automóvil, las dimensiones del recipiente toroidal M6 son las de una rueda de emergencia, por lo que su acoplamiento en el espacio designado para esta, implica un ahorro de espacio en dicho portamaletas. La capacidad de almacenamiento de M6 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 III).

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.

Se concluye además 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. Shakoob, "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.kioshicompression.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. Maksimyuk 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] J. N. Reddy, "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, Second Edition -," *Book*, 2003.
- [25] C. T. Herakovich, "Mechanics of Fibrous Composites," in *John Wiley and Sons*, New York, 1998.
- [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 Vehículos,” 2018. [Online]. Available: https://cnyunhong.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.