



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis termo-mecánico de
tanques para refrigerante
mediante el uso de
paquetería de elemento
finito**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Aldair Ramírez Nopaltitla

ASESOR DE INFORME

M en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



INTRODUCCIÓN

El análisis mediante el uso de paquetería de elemento finito es una herramienta útil para la industria automotriz ya que permite evaluar el desempeño de sistemas y componentes como los tanques para refrigerante sin la necesidad de realizar pruebas con dispositivos físicos. A pesar de que estos análisis no representan completamente la realidad, los resultados que arrojan sirven para entender la causa de fallas, detectar oportunidades de mejora y guiar el diseño.

En el caso de los tanques para refrigerante, existen antecedentes de marcas de estiramiento y fugas que afectan al funcionamiento del tanque. Las marcas de estiramiento producen una disminución en la resistencia mecánica del material mientras que las fugas impiden que el sistema de enfriamiento cuente con la cantidad de refrigerante necesario para un funcionamiento correcto.

Anteriormente, los análisis mediante el uso de paquetería de elemento finito para evaluar el desempeño de los tanques para refrigerante se realizaban por las empresas manufactureras de dichos componentes. Su alcance era limitado ya que se basaban en teorías lineales y no tomaban en cuenta las cargas térmicas a las cuales está sujeto el tanque. Además, debido al poco tiempo entre la realización de los análisis y el lanzamiento del producto, los cambios propuestos por el analista comúnmente resultaban en cambios costosos a las herramientas de fabricación.

Es por lo anterior que este proyecto tiene como objetivo elaborar durante la etapa de diseño el análisis termo-mecánico de un tanque para refrigerante considerando los efectos no lineales del material así como las cargas térmicas y mecánicas a las cuales está sujeto el tanque.

La elaboración de dicho análisis le permitirá al equipo de diseño realizar modificaciones para reducir la posibilidad de falla del tanque, los gastos por garantía de reparación y los costos por cambios en las herramientas de fabricación.

Aunque se realizaron análisis para varios tanques con la misma metodología, por cuestiones de confidencialidad de la empresa, en este proyecto únicamente se presentaran los resultados de un tanque.



Análisis termo-mecánico de tanques para refrigerante mediante el uso de paquetería de elemento finito



En este informe, se describirá la historia e ideología de la empresa así como el puesto de trabajo del alumno dentro de esta, su ubicación dentro del organigrama de la empresa y las actividades específicas al proyecto de ingeniería realizado.

Además, se presentaran los principios teóricos del sistema de enfriamiento de los motores de combustión interna, la historia y principios de diseño de los tanques para refrigerante, el estado del arte de los análisis termo-mecánicos con software de elemento finito y también se describirá la metodología con la que se llevó a cabo este proyecto. Finalmente, se presentaran los resultados y las conclusiones.



ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y PARTICIPACIÓN DEL ALUMNO DENTRO DE ESTA.....	1
1.1. Historia de la empresa.....	1
1.2. Ideología de la empresa.....	2
1.3. Organigrama de la empresa donde labora el alumno.....	3
1.4. Descripción del puesto de trabajo.....	3
1.5. Planteamiento del problema.....	4
1.6. Objetivo general del proyecto.....	4
1.7. Justificación.....	4
1.8. Actividades a desarrollar en este proyecto.....	5
2. ANTECEDENTES DE LOS TANQUES PARA REFRIGERANTE.....	6
2.1. Sistema de enfriamiento de un motor de combustión interna.....	6
2.2. Historia de los tanques para refrigerante.....	7
2.3. Diseño de tanques para refrigerante.....	11
3. ESTADO DEL ARTE DE ANALISIS TERMO-MECÁNICOS CON PAQUETERIA DE ELEMENTO FINITO	18
3.1. Análisis termo-mecánico de la cabeza, bloque y camisa de cilindro de un motor diésel AFV.....	18
3.2. Investigación mediante elemento finito del efecto de la geometría en recipientes de presión bajo cargas estructurales y térmicas.....	20
4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MEDIANTE PAQUETERÍA DE ELEMENTO FINITO DE TANQUES PARA REFRIGERANTE.....	21
4.1. Pre-procesamiento.....	21
4.2. Modelado con paquetería de elemento finito para análisis de transferencia de calor.....	22
4.3. Modelado con paquetería de elemento finito para análisis termo- mecánico.....	24
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
5.1 Análisis del tanque original.....	25
5.2 Análisis del tanque modificado.....	29



6. CONCLUSIONES	32
7. REFERENCIAS.....	33



CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y PARTICIPACIÓN DEL ALUMNO DENTRO DE ESTA

1.1 Historia de la empresa

La invención del automóvil fascino al mundo y los emprendedores se dieron cuenta que había un mercado enorme por satisfacer. La empresa de la rama automotriz en la cual se desarrolló este proyecto, tuvo su nacimiento a principios del siglo veinte cuando fabricantes de carruajes, máquinas de coser y bicicletas se dieron cuenta que podrían obtener mayores ganancias al cambiar el giro de su empresa.

En los años 20's, la industria automotriz tuvo un crecimiento exponencial, durante esta época, esta empresa comenzó a tener presencia a nivel mundial. Poco después, al diseñarse automóviles más alargados y bajos con curvas en vez de esquinas, los automóviles dejaron de ser tan solo un modo de transporte.

Durante la Segunda Guerra Mundial, las empresas automotrices contribuyeron al esfuerzo tanto de los aliados como de las potencias del eje. Se aportaron millones de dólares con aviones, camionetas, tanques, entre otros productos para la guerra.

La Segunda Guerra Mundial fomento el desarrollo tecnológico de esta empresa automotriz y fue un factor importante para las innovaciones de los años 50's que marcaron la pauta para los automóviles actuales.

En los años 70's, los precios de la gasolina y el nacimiento de una conciencia ambiental significaron un reto. En general, los vehículos tuvieron que disminuir sus dimensiones. En 1971, se empleó por primera vez un motor que operaba con gasolina baja en plomo y en 1973, se implementaron bolsas de aire en automóviles comerciales. En 1974, se introdujo el convertidor catalítico; esta invención sigue siendo una parte importante en el control de emisiones hacia el ambiente de los automóviles.

Como sucedió con gran parte de las empresas grandes a nivel mundial, ésta se globalizo a finales del siglo XX a través de proyectos en países como China, India y Japón.



A principios del nuevo milenio, buscó incrementar su presencia en mercados emergentes como Brasil, China y Corea. Durante este tiempo, se trabajó arduamente para desarrollar tecnologías que aumentarían la eficiencia de sus vehículos.

Sin embargo, la crisis económica mundial del 2008 afectó fuertemente a la industria e hizo que las empresas pertenecientes a ésta cambiaran su forma de pensar y trabajar. Actualmente se encuentra en un periodo de transición en la cual sigue siendo prioridad la eficiencia vehicular y busca revolucionar el transporte mediante los vehículos eléctricos y autónomos.

En México, lleva casi un siglo desarrollando ingeniería de clase mundial. En un principio, las plantas automotrices abastecieron al mercado nacional. Actualmente, las labores de plantas de motores, de estampado, de transmisiones y de ensamble así como las de los centros de ingeniería tienen un impacto global.

1.2 Ideología de la empresa

La visión global de la empresa se describe mediante cinco propósitos:

- Generar clientes de por vida.
- Inspirar pasión y lealtad.
- Transformar la tecnología de punta, creando experiencias que la gente ame.
- Contribuir con las comunidades en las que existe a nivel mundial.
- Construir la compañía automotriz más valiosa del mundo.

Estos cinco propósitos se llevan a cabo teniendo siempre en mente los tres valores fundamentales de la empresa: Clientes, Relaciones y Excelencia.



1.3 Organigrama de la empresa donde labora el alumno

Esta empresa, encabezada por el Director de Ingeniería, se divide en diferentes departamentos dirigidos por gerentes de grupos de ingeniería cuya labor es supervisar un grupo de ingeniería mas específico. En el caso del departamento de Ingeniería asistida por computadora, se cuenta con tres grupos, uno de ellos es Dinámica de fluidos computacional, al cual el alumno pertenece. El siguiente organigrama describe de manera general la posición del alumno dentro de la empresa.

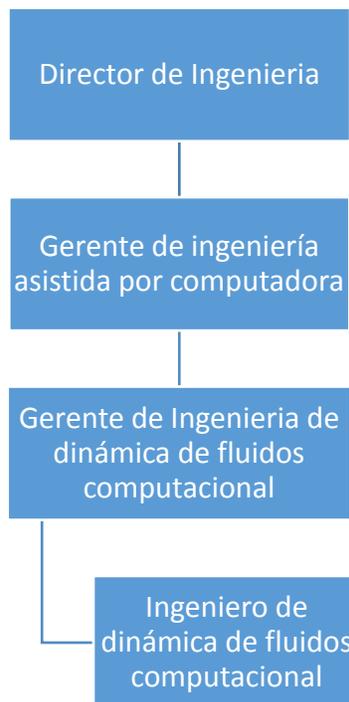


Figura 1.1 Organigrama de la empresa donde labora el alumno

1.4 Descripción del puesto de trabajo

Como Ingeniero de Dinámica de Fluidos Computacional, o CFD por sus siglas en inglés, la función principal a desempeñar es brindar orientación técnica hacia otras áreas de la ingeniería del producto.

Se realizan simulaciones numéricas mediante paquetería de elementos y volúmenes finitos en coordinación con las áreas de ingeniería de diseño, validación y manufactura, para desarrollar soluciones integrales.



La generación y evaluación de soluciones basadas en conocimientos de la ingeniería mecánica tienen como objetivo mejorar la calidad y reducir los costos de diseño. La actividad principal a realizarse es la generación de reportes de evaluación para guiar el diseño de componentes y sistemas.

1.5 Planteamiento del problema

Existen antecedentes de marcas de estiramiento y fugas en los tanques para refrigerante que reducen su resistencia mecánica e impiden que el sistema de enfriamiento cuente con la cantidad de refrigerante necesario para un funcionamiento correcto.

Anteriormente, los análisis mediante el uso de paquetería de elemento finito para evaluar el desempeño de los tanques los realizaba la empresa fabricante después de la etapa de diseño. No lograban predecir de manera confiable las fallas descritas anteriormente ya que se basaban en teorías lineales y no tomaban en cuenta las cargas térmicas a las cuales está sujeto el tanque. Además, debido al poco tiempo entre la realización de los análisis y el lanzamiento del producto, era difícil implementar las modificaciones de diseño propuestas por el analista sin hacer cambios costosos a las herramientas de fabricación.

1.6 Objetivo general del proyecto

Se establece como objetivo general elaborar, durante la etapa de diseño del vehículo, el análisis termo-mecánico de un tanque para refrigerante considerando los efectos no lineales del material así como las cargas térmicas y mecánicas a las cuales está sujeto el tanque.

1.7 Justificación

La elaboración de dicho análisis le permitirá al equipo de diseño realizar modificaciones que reduzcan la posibilidad de falla de este componente y consecuentemente los gastos por garantía de reparación así como los costos por cambios en herramientas de fabricación.



1.8 Actividades a desarrollar en este proyecto

Para este proyecto, se llevó a cabo el análisis termo-mecánico de un tanque mediante el uso de paquetería de elemento finito con el fin de obtener una mejor predicción de fallas y dar recomendaciones de diseño. Estos análisis implican actividades de pre-procesamiento y modelado mediante el uso de paquetería de elemento finito así como de análisis de resultados.

En la etapa de pre-procesamiento, se importa la geometría del tanque, se simplifica el modelo geométrico si es necesario, se hace una división del dominio mediante una malla de elementos finitos y se asignan materiales.

Durante la etapa de modelado, se define el tipo de análisis y método de solución, se establecen condiciones iniciales, condiciones de frontera y se definen las interacciones de acuerdo con el fenómeno físico.

Por último, se utilizan los conocimientos de ingeniería mecánica para verificar que los resultados sean coherentes físicamente y se realiza su interpretación para ofrecer recomendaciones de diseño.



CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES DE LOS TANQUES PARA REFRIGERANTE

2.1 Sistema de enfriamiento de un motor de combustión interna

En general, el sistema de enfriamiento de un motor consiste de una bomba de agua y un dispositivo que la accione, un radiador, un termostato, mangueras, conductos dentro del *monoblock* y cabezas del motor así como un contenedor de refrigerante, como se observa en la figura 2.1.

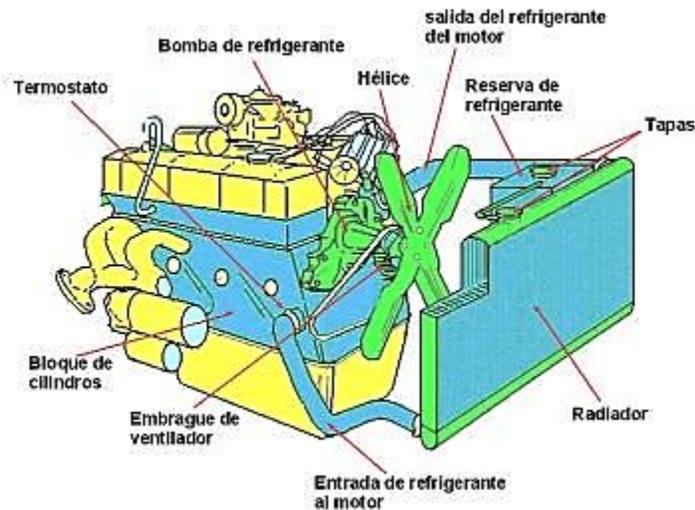


Figura 2.1 Sistema de enfriamiento de un motor de combustión interna (Santillán, 2012)

La banda o cadena de tiempo impulsa a la bomba de agua o también puede accionarse mediante energía eléctrica. El refrigerante circula por el sistema y absorbe el calor generado por el motor.

El termostato es una válvula que controla el flujo de refrigerante al radiador de acuerdo a su temperatura. A través de una manguera, el refrigerante caliente llega al radiador para ser enfriado por el aire que pasa por fuera de sus tubos. Este aire puede ser producto del movimiento del vehículo o bien por medio de ventiladores.



De no incluir un contenedor o tanque para el refrigerante, este escurriría hacia el piso y se tendría que reemplazar frecuentemente lo cual implica un cuidado especial y un costo. Al reestablecerse la temperatura en el radiador, el refrigerante fluye de regreso a este.

Un tanque de esta clase tiene como función principal el almacenamiento de refrigerante así como permitirle el tiempo de estancia suficiente para cambiar completamente de fase y así evitar la entrada de burbujas de aire hacia el motor, lo cual es importante ya que la presencia de éstas disminuye la capacidad para absorber el calor generado por un motor en funcionamiento y puede ocasionar corrosión que afecta su vida útil.

2.2 Historia de los tanques para refrigerante

Los primeros sistemas de enfriamiento se diseñaron para condiciones generales de uso. Sin embargo, rápidamente se descubrió que en condiciones de alta temperatura y altitud, era necesario detener el automóvil frecuentemente para que el motor se enfriara. Como solución a este problema, a principios de los años veinte, Didrik Welge realizó modificaciones para reabastecer automáticamente al radiador de refrigerante e incrementar el volumen de este en el sistema.

La inclusión de un tanque para refrigerante, como el que se observa en la figura 2.2, fue crucial para alcanzar estos objetivos. Este primer tanque para refrigerante se colocó en frente y por encima de la parte inferior del radiador y su capacidad de contenido era aproximadamente igual que la del radiador. Contaba con una conexión entre la parte inferior del tanque y la parte inferior del radiador así como un ducto de excedente de refrigerante. Al igual que el tanque, el radiador también contaba con un ducto de excedente de refrigerante que iba desde la parte superior del radiador hacia el tanque.

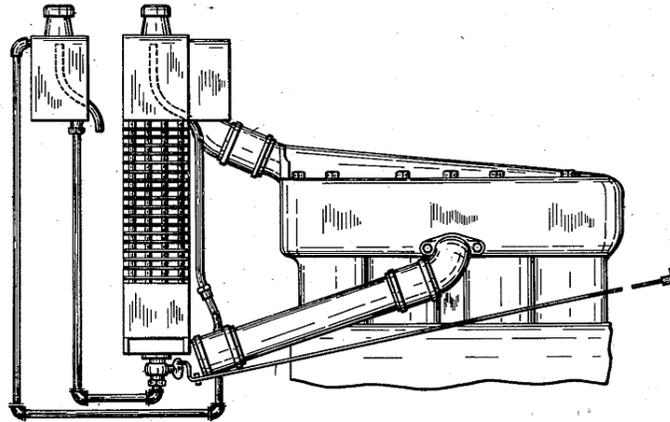


Figura 2.2 Primer sistema de enfriamiento que incluyó un tanque para refrigerante (Welge, 1921)

Algunos años después, Howe Philip L entendió que colocando el tanque por encima del radiador se podría aprovechar la fuerza de la gravedad para la distribución de refrigerante hacia todo el sistema, que un respiradero ayudaría a la eficiencia del proceso de enfriamiento y que una llave de purga permitiría remover el refrigerante de una manera más sencilla en caso de atascamiento.

La invención de Howe consistía en que cuando el refrigerante dentro del radiador se calentara y formara vapor, la presión dentro del radiador aumentaría y forzaría al líquido y vapor hacia un depósito donde el vapor se condensaría automáticamente y el líquido resultante de la condensación llegaría al tanque. Cuando el motor se enfriara, un vacío se formaría en la parte superior del radiador y la presión atmosférica que actúa sobre el tanque forzaría hacia el condensador una cantidad de líquido proporcional al grado de enfriamiento del líquido en el radiador, causando así que la cantidad correspondiente de líquido se forzara desde el condensador hacia el radiador.

Esta invención tenía como resultado principal reducir a un mínimo la pérdida de refrigerante por evaporación ya que este solo podía fugarse hacia la atmósfera por la apertura en el tanque, la cual es muy pequeña.

Casi cuarenta años después, Renault ® aportó cambios en el diseño de los tanques para refrigerante. Para tanques abiertos a la atmósfera, cubrió al refrigerante con una capa de líquido no volátil para evitar su evaporación e incorporó un flotador que impidiera la mezcla de los diferentes líquidos y preservar así la capa protectora de líquido no volátil. En el caso de los tanques cerrados, se incluyó una válvula de seguridad para evitar presiones elevadas.



Las modificaciones hechas para ambos tipos de tanque tenían como propósito el colocar al tanque en una zona de menor temperatura y donde el espacio volumétrico disponible no fuera tan limitado.

Los principios de funcionamiento de los tanques de Didrik Welge, Howe Philip L y Renault ® son prácticamente los mismos que se utilizan en la actualidad. Desde entonces, el diseño de los tanques para refrigerante se ha mejorado para facilitar la manufactura, para hacer más eficiente la separación de aire del refrigerante y para incrementar la estabilidad estructural.

Para facilitar la manufactura, en 1988, Dieter Spindelboeck y Erwin Schweiger dividieron al tanque en dos partes, como se observa en la figura 2.3, que se manufacturan de manera independiente y se unen en un plano medio que además indica el nivel máximo de llenado. Esta es la forma en la cual se manufacturan la mayoría de los tanques actuales.

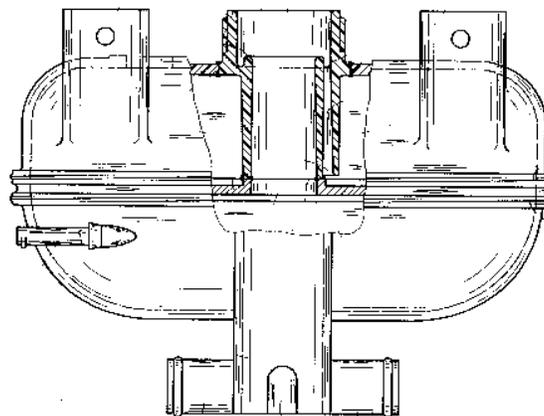


Figura 2.3 Diseño que facilita la manufactura (Schweiger et al., 1988).

En 1997, la Chrysler Corporation ®, por medio de Gary M. Smith diseño un tanque con múltiples cámaras, como se observa en la figura 2.4, con el objetivo de tener un mayor control sobre el flujo de refrigerante y mejorar la separación de aire evitando así la entrada de burbujas de aire al sistema de enfriamiento. Aunque bien es cierto que la mayoría de los tanques de la actualidad cuentan con múltiples cámaras, hay muchos que solo tienen un compartimento para recibir y almacenar al refrigerante acompañado de un espacio para la expansión.

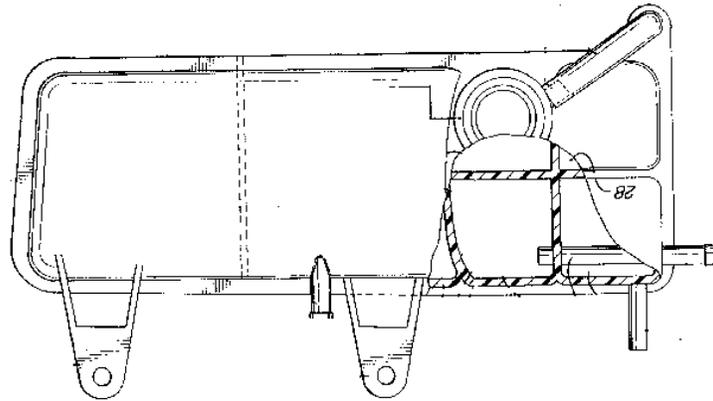


Figura 2.4 Diseño con múltiples cámaras (Smith, 1997).

En el 2008, Daimler Trucks North America ® patentó el diseño de un tanque, mostrado en la figura 2.5, de múltiples cámaras que disipa la energía del flujo entrante de refrigerante por medio de una cámara inicial y que además cuenta con ventanas entre cámaras de sección transversal variable que asisten en la reducción de velocidad del flujo de una cámara a otra y que le permiten llegar a un régimen laminar a la sección del tanque que sirve como almacén de refrigerante. Este diseño además reduce la distancia que las burbujas de aire deben elevarse para separarse del refrigerante.

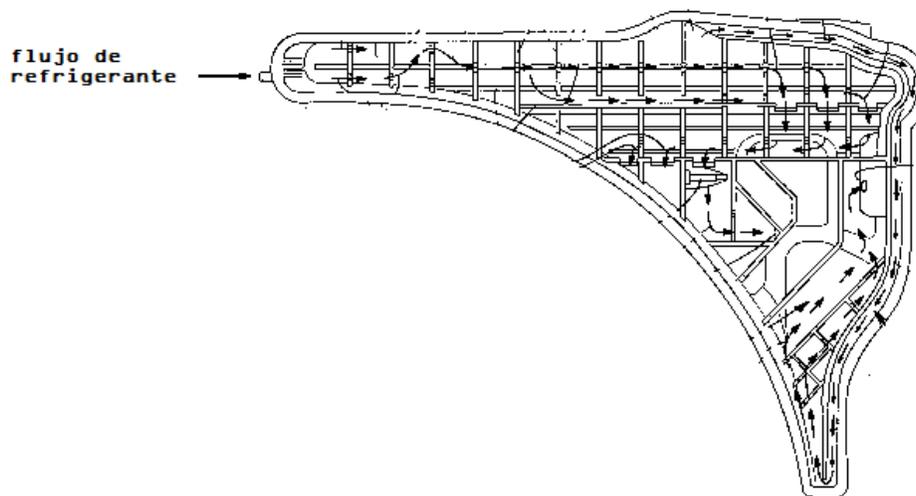


Figura 2.5 Diseño para mejorar flujo de refrigerante (Daimler Trucks North America ®, 2008).



Por último, Mann+Hummel ® diseño un tanque de dos capas como el que se muestra en la figura 2.6, la capa interna contiene al refrigerante y aire mientras que la capa externa brinda una mayor estabilidad estructural.

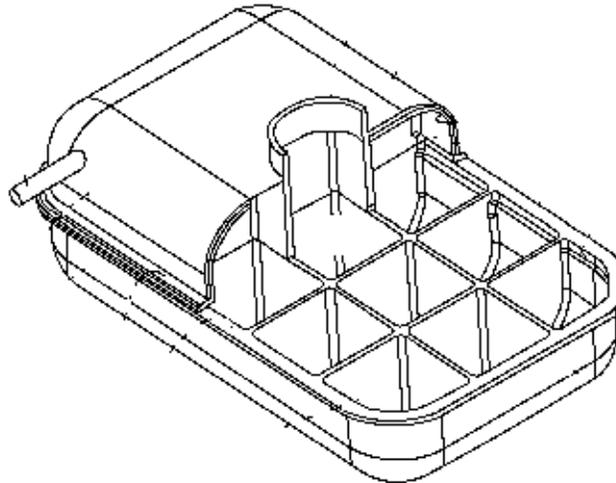


Figura 2.6 Diseño con capa interna y externa para mejorar estabilidad estructural (Hewkin, 2011).

2.3 Diseño de tanques para refrigerante

2.3.1 Selección de materiales

Dentro del mercado, existe una gran variedad de tanques para refrigerante. Por material, se clasifican en metálicos o plásticos. A su vez, los metálicos se dividen en tanques de aluminio o acero inoxidable y los plásticos son comúnmente de polipropileno pero también de polietileno o incluso de un copolímero. La densidad de los metales es notablemente mayor que la de los polímeros y por lo tanto, el peso total del vehículo es afectado por la elección de material.

En los últimos tiempos, la industria automotriz ha buscado incrementar la eficiencia de los vehículos, la cual se puede definir de manera simple como la razón entre lo que se quiere obtener (desplazamiento de una masa) y lo que cuesta mover esa masa (combustible y/o dinero). Una manera de lograr aumentar la eficiencia es disminuir el peso, teniendo esto en cuenta, el tanque polimérico resultaría en una mayor eficiencia del automóvil. Otra ventaja que presentan los tanques poliméricos es la transparencia, cualidad que le permite al usuario observar el nivel de llenado del tanque.



El tanque está sujeto a presión y temperatura y es en cierta manera afectado por las vibraciones del motor. Los tanques metálicos ofrecen mayor resistencia mecánica y vida útil, sin embargo pueden presentar daños en su superficie debido a la corrosión. En la actualidad y teniendo como prioridad la afectación al peso total del vehículo, el precio y la transparencia, el polipropileno es el material usado por las empresas automotrices en tanques para refrigerante, dejando los tanques metálicos para aplicaciones especiales o como un accesorio de reemplazo para satisfacer cuestiones estéticas.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las propiedades mecánicas y térmicas tanto del polietileno de alta densidad y del polipropileno. Cabe mencionar que no se incluyen las propiedades de los materiales metálicos debido a que las empresas automotrices de producción masiva no hacen uso de este tipo de material.

Tabla 2.1 Propiedades de dos materiales comúnmente usados en tanques para refrigerante

Propiedad	Polietileno de alta densidad	Polipropileno
Densidad	0.930 – 0.965 g/cm ³ [18]	0.904 – 0.908 g/cm ³ [17]
Módulo de Elasticidad	1035 MPa [18]	1300 MPa [17]
Relación de Poisson	0.40 – 0.45 [18]	0.42 [17]
Esfuerzo de Cedencia a Tensión	26.2 MPa [10]	32 MPa [11]
Esfuerzo Ultimo a Tensión	21.4 MPa [10]	30.1 MPa [11]
Deformación Máxima a la ruptura	536 % [10]	156 % [11]
Conductividad térmica	0.49 W/m K [18]	0.17 – 0.22 W/m K [17]
Coefficiente de Expansión Térmica Lineal	12 x 10 ⁻⁵ cm/(cm °C) [18]	8-10 x 10 ⁻⁵ cm/(cm °C) [17]



De acuerdo con los valores mostrados en la tabla anterior, se concluye que el polipropileno es más ligero, rígido y tiene mayor resistencia mecánica.

En cuanto a las propiedades térmicas, el polietileno de alta densidad tiene la capacidad para transferir más calor y tiene una mayor expansión lineal para un mismo cambio de temperatura.

2.3.2 Geometría

El volumen del tanque es proporcional al volumen total por el cual circula el refrigerante en el sistema de enfriamiento y por lo tanto, depende de las características de potencia del motor. Su geometría está limitada al espacio disponible en el vehículo y se diseña para resistir cargas mecánicas y térmicas. De manera general, se procura evitar cambios bruscos de geometría, ya que en estos se concentran esfuerzos.

Es por esto que los tanques para refrigerante de forma esférica, como el mostrado en la figura 2.7, son un diseño común. Sin embargo, es a veces difícil colocar este tipo de geometría dentro del espacio destinado para el tanque.



Figura 2.7 Tanque para refrigerante esférico (Clyde, 2011).

Por otra parte, algunos tanques para refrigerante se dividen en cámaras. La inclusión de estas en el diseño facilita el flujo del refrigerante y sus paredes le dan al tanque una mayor rigidez y resistencia mecánica.

Además, le permiten al refrigerante tener el tiempo suficiente para cambiar completamente de fase, evitando burbujas de aire en el sistema de enfriamiento.



a)

b)

c)

Figura 2.8 Diferentes tanques para refrigerante con múltiples cámaras, a) Tanque en forma de ovoide, b) Tanque con parte superior pintada, c) Tanque metálico (BD Auto Pro, 2015; RPI Designs, 2016; 3rd Strike Performance, 2016).

2.3.3 Manufactura

Debido a la baja densidad, el bajo precio y la transparencia, los polímeros son un material adecuado para los tanques para refrigerante. Ya que las empresas automotrices de producción masiva únicamente utilizan tanques poliméricos, en este trabajo solo se describirán los procesos de manufactura para tanques poliméricos.

De acuerdo al material y las características geométricas, tanto los procesos de soplado e inyección podrían utilizarse.

En la inyección de plásticos, se depositan gránulos de polímero mediante una tolva en un cañón, el cual es calentado por un sistema de resistencias eléctricas, como se muestra en la figura 2.8. Los gránulos se funden en el cañón y conforme se desplaza el husillo de manera axial, el plástico fundido fluye a través de una boquilla para que este entre a la cavidad del molde, donde el polímero se solidifica, tomando la forma de la cavidad. Por último, se expulsa la pieza solidificada del molde de inyección.

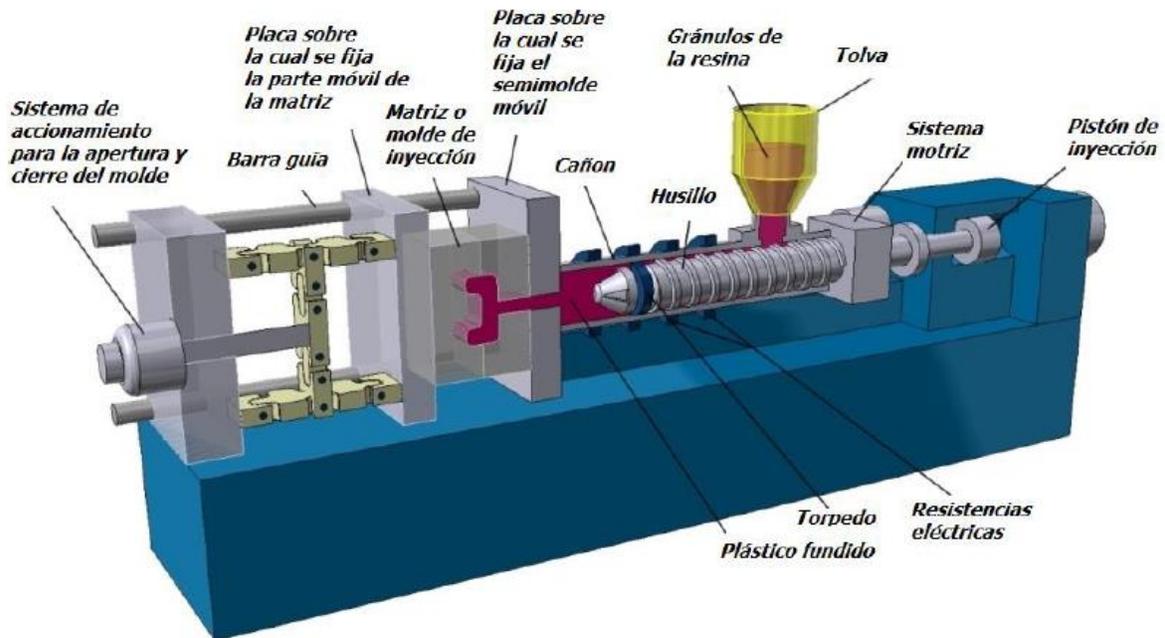


Figura 2.8 Máquina de inyección de plásticos (Rutland Plastics Ltd, 2013).

La inyección de plásticos tiene como ventajas la ejecución altamente precisa (tolerancias de 0.1 hasta 0.05 mm) y la posibilidad de producir formas complejas, (Ortiz, 2016). Además, usando moldes de múltiples cavidades, se producen grandes cantidades de partes en un tiempo relativamente corto y el costo de mano de obra es bajo.

La principal desventaja de este proceso de manufactura es el alto costo de los moldes de inyección. Además, el tamaño de la pieza está limitado por el espacio disponible para colocar el molde.

Por otra parte, el proceso de soplado se encarga principalmente de manufacturar piezas huecas de espesor pequeño y se divide en tres partes que se ilustran por la figura 2.9:

- Fundición de gránulos poliméricos
- Realización de pre-forma tubular
- Inyección de aire para, a través de la presión aumentar el diámetro y reducir el espesor de la pre-forma para así obtener la forma final deseada.

Los dos primeros pasos se pueden llevar a cabo tanto por el proceso de extrusión como por inyección.

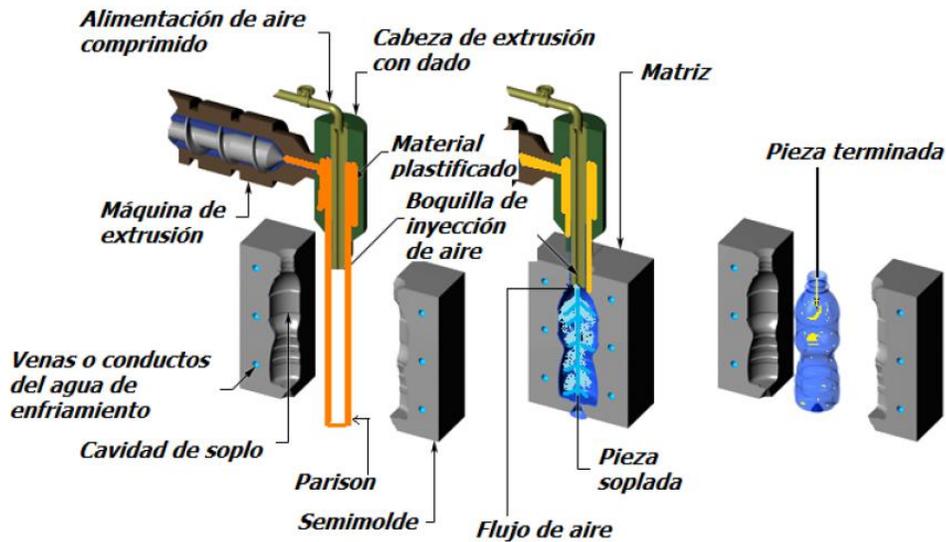


Figura 2.9 Proceso de Extrusión-Soplado (CustomPartNet, 2009).

A diferencia del proceso de inyección de plásticos en el cual se puede utilizar una gran gama de polímeros, para el soplado los materiales deben tener una buena resistencia una vez fundidos por lo que los polímeros comúnmente utilizados son polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo y tereftalato de polietileno. Además de este inconveniente, los tiempos de ciclo son mayores que en inyección de plásticos.

El tipo de polímero, la cantidad de piezas a manufacturar, el uso que se le dará al producto final y los costos son algunos de los factores más importantes que influyen a la hora de decidir el proceso de manufactura. Teniendo estos factores en cuenta, en la tabla 2.2 se hace una comparación entre los dos procesos más viables y utilizados.



Tabla 2.2 Comparación de los procesos de manufactura más utilizados en tanques para refrigerante

Proceso	Ventajas	Desventajas
Soplado	<ul style="list-style-type: none">• Mayor peso molecular de polímero lo cual significa mayor resistencia mecánica• Menor esfuerzo residual debido a proceso• Debido a que no presenta una zona de unión que le afecte morfológicamente, pueden usarse espesores menores	<ul style="list-style-type: none">• Tolerancia de espesor difícil de alcanzar en geometrías complejas• Presencia de estructura esferulítica debido a enfriamiento lento lo cual facilita agrietamiento• Únicamente para tanques huecos
Inyección	<ul style="list-style-type: none">• Tolerancia de espesor fina• Estética• Pueden fabricarse tanques con geometrías complejas	<ul style="list-style-type: none">• Bajo peso molecular de polímero resulta en menor resistencia mecánica• Esfuerzos residuales debido a proceso• Unión de parte superior e inferior aumenta la posibilidad de agrietamiento• Alto costo de moldes

En la actualidad, los tanques simples se fabrican mediante el método de soplado mientras que los tanques más complejos con cámaras se manufacturan a través de inyección de plásticos, inyectando por separado la parte inferior y superior del tanque para unirlos mediante la aplicación de alta temperatura y presión.



CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE DE ANALISIS TERMO-MECÁNICOS CON PAQUETERIA DE ELEMENTO FINITO

Debido a que dentro de la literatura no existen muchos trabajos de análisis termo-mecánicos para tanques para refrigerante con el uso de paquetería de elemento finito, en este capítulo se presentan algunos trabajos de relevancia para este proyecto en los cuales se analizan otro tipo de componentes. La metodología de modelado utilizada en este proyecto es muy similar a la descrita en el trabajo de N. Venkateswaran et al. que se presenta a continuación mientras que algunas de las recomendaciones de diseño realizadas en el capítulo de Análisis de resultados y Conclusiones de este informe concuerdan con las conclusiones del trabajo de Ahmer Mutahir et al. también descritas en este capítulo.

3.1 Análisis termo-mecánico de la cabeza, bloque y camisa de cilindro de un motor diésel AFV

N. Venkateswaran et al. en el 2013, describen un análisis termo-mecánico de estado estacionario acoplado secuencial en el cual se evalúa la durabilidad de la cabeza del cilindro de un motor. El daño por fatiga se presenta si se producen esfuerzos térmicos que excedan el esfuerzo de cedencia del material.

Este artículo indica a la conductividad térmica y al coeficiente de transferencia de calor por convección como las variables fundamentales para un análisis térmico por elemento finito.

Primero se realiza un análisis de transferencia de calor con elementos tetraédricos sólidos cuadráticos difusivos (formulación DC3D10) para obtener la distribución de temperatura (mostrada en la figura 3.1) la cual subsecuentemente se usa para el análisis estructural que se lleva a cabo.

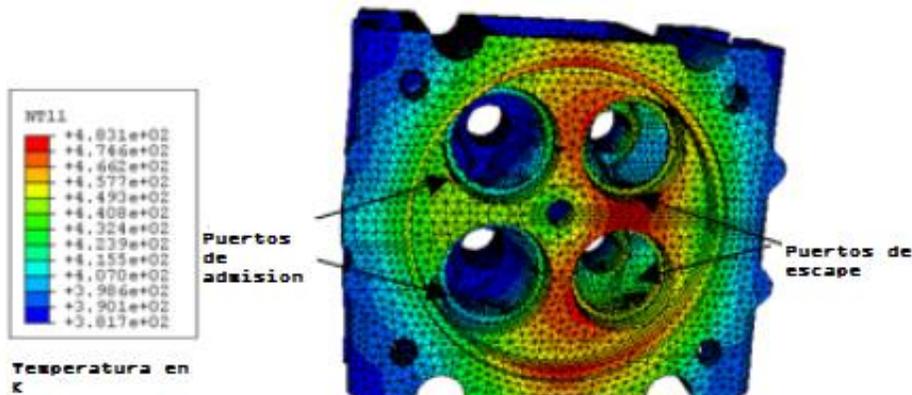


Figura 3.1 Distribución de temperatura resultante del análisis de transferencia de calor (Venkateswaran et al., 2013).

Después de haber realizado el análisis de transferencia de calor, se modificó la formulación de los elementos de tetraédricos sólidos cuadráticos difusivos (formulación DC3D10) a tetraédricos sólidos cuadráticos de continuo (formulación C3D10), se crearon condiciones de frontera estructurales en forma de eslabones rígidos y elementos viga para modelar los pernos y sus cabezas, respectivamente.

Además, se aplicó una presión de combustión de 120 bar y se incorporó el campo de temperatura resultante del análisis de transferencia de calor para obtener la distribución de esfuerzos principales que se muestra en la siguiente figura y evaluar la resistencia mecánica de los componentes involucrados.

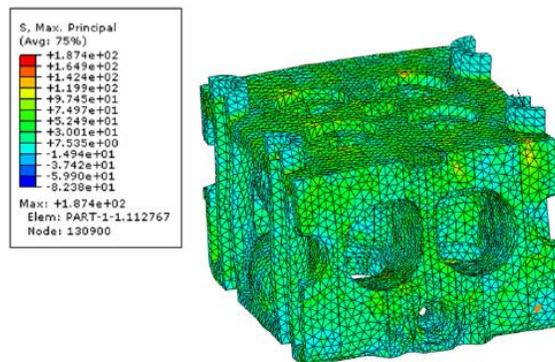


Figura 3.2 Distribución de esfuerzos principales en la cabeza del cilindro debida a la presión máxima de operación y a los efectos térmicos (Venkateswaran et al., 2013).



3.2 Investigación mediante elemento finito del efecto de la geometría en recipientes de presión bajo cargas estructurales y térmicas

Ahmer Mutahir et al., en el 2014, presentan un trabajo sobre la realización de un análisis mediante software comercial de elemento finito para comparar esfuerzos debidos a cargas térmicas y mecánicas entre diferentes geometrías de un recipiente de presión.

Se analizó un diseño inicial de un recipiente, un diseño con el extremo inferior del recipiente de forma elipsoidal y finalmente un diseño con el extremo inferior del recipiente de forma esférica. Además, para este último se varió el espesor de la pared del recipiente.

De acuerdo con los resultados para el primer caso, se encontró que este diseño inicial presenta los esfuerzos más altos de los tres casos analizados. El esfuerzo máximo se concentra en el punto de transición de la sección transversal, como se muestra en la figura 3.3a. Para el segundo caso, mostrado en la figura 3.3b, se observa que mantener un espesor constante en la pared reduce esfuerzos. Con el caso 3 (figura 3.3c), se concluyó que aumentar el espesor del recipiente con extremo inferior de forma esférica reduce esfuerzos.

Analizando los resultados del análisis, se llegó a la conclusión de que las discontinuidades geométricas son un factor importante en la concentración de esfuerzos y que aumentar el espesor de las paredes aumenta la resistencia mecánica.

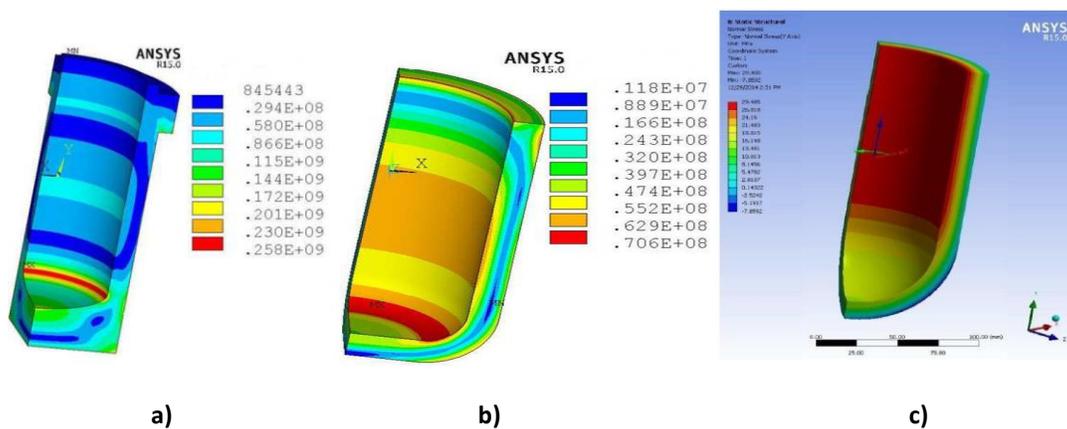


Figura 3.3 Distribución de esfuerzos en, a) Diseño inicial, b) Diseño con extremo inferior de forma elipsoidal, c) Diseño con extremo inferior esférico de máximo espesor (Mutahir et al., 2014).



CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MEDIANTE PAQUETERÍA DE ELEMENTO FINITO DE TANQUES PARA REFRIGERANTE

Se realizó un análisis termo-mecánico mediante paquetería de elemento finito del tanque para refrigerante que se muestra en la figura 4.1. Para simplificar el análisis, se consideró que los esfuerzos y deformaciones dependen de la distribución de temperatura pero que ésta no depende de los esfuerzos y deformaciones. Por lo tanto, primero se resolvió el problema de transferencia de calor y una vez obtenida la distribución de temperatura nodal, se incorporó como condición inicial para calcular los esfuerzos y deformaciones debidos a la expansión térmica y a la aplicación de presión en la parte interna del tanque. Finalmente, se interpretaron y presentaron los resultados.

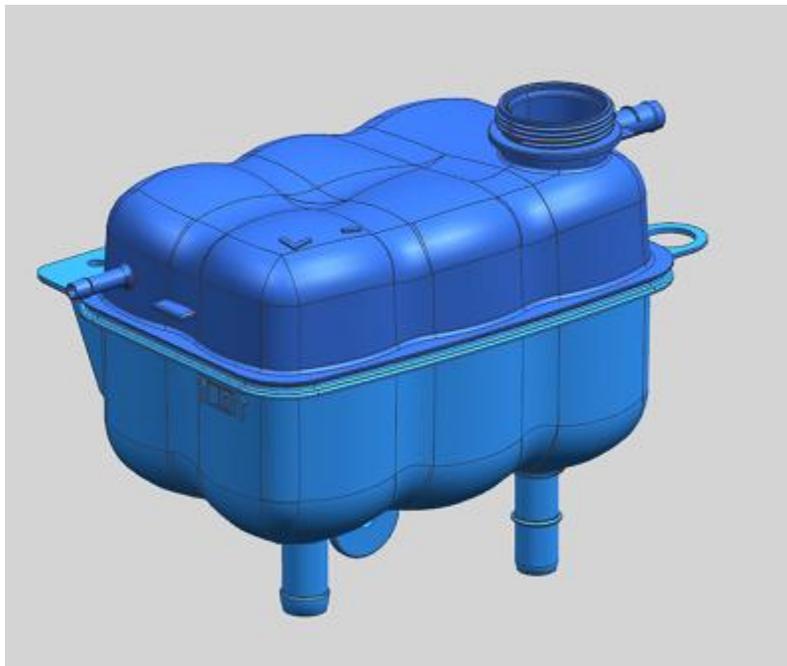


Figura 4.1 Modelo geométrico del tanque para refrigerante

Para iniciar la resolución de este problema de ingeniería, fue esencial entender el fenómeno físico. Se estableció al tanque para refrigerante como el sistema bajo análisis, despreciando los demás componentes con los que interactúa.



Los modelos que se eligieron para analizar fueron aquellos que ya contaban con pruebas físicas para realizar una comparación entre los resultados de dichas pruebas y los de la simulación numérica.

4.1 Pre-procesamiento

Los modelos geométricos fueron proporcionados por el equipo de diseño de la empresa e importados en formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) a Hypermesh®, la herramienta de pre-procesamiento que se empleó.

Se realizó una malla de elementos finitos bidimensionales sobre la superficie del tanque a partir de la cual se construyó una malla de elementos tetraédricos. Para la parte de transferencia de calor, se determinó utilizar elementos finitos tetraédricos de segundo orden de transferencia de calor o difusivos de acuerdo con el fenómeno físico, con la complejidad de la geometría y con la capacidad de cómputo disponible ya que estos ofrecen una buena exactitud y se adecuan a la complejidad de las geometrías de los tanques.

Se asignaron las propiedades elásticas, plásticas y térmicas del material del tanque de acuerdo con la caracterización de material realizada por un laboratorio externo a la empresa. Por cuestiones de confidencialidad de la empresa, la caracterización de este material no puede presentarse. Sin embargo, las propiedades térmicas y mecánicas son similares a las del polipropileno presentadas en la tabla 2.1 del capítulo 2.

4.2 Modelado con paquetería de elemento finito para análisis de transferencia de calor

En la etapa de modelado, se definió el tipo de análisis como estacionario de transferencia de calor y la escala de temperatura a utilizarse. La parte interna inferior del tanque contiene refrigerante mientras que la superior interna cuenta con aire.

Se asignaron condiciones de frontera de temperatura, fijando la temperatura de los nodos de la parte interna del tanque que entran en contacto con el refrigerante a la temperatura de operación del refrigerante como se muestra en la figura 4.2.

Después, se definió la convección de calor por medio del coeficiente de transferencia de calor por convección y de la temperatura de sumidero.



Se utilizó un coeficiente que representa una convección de calor natural mientras que la temperatura de sumidero se definió como la temperatura ambiente de la cámara en la cual se prueban físicamente los tanques para refrigerante.

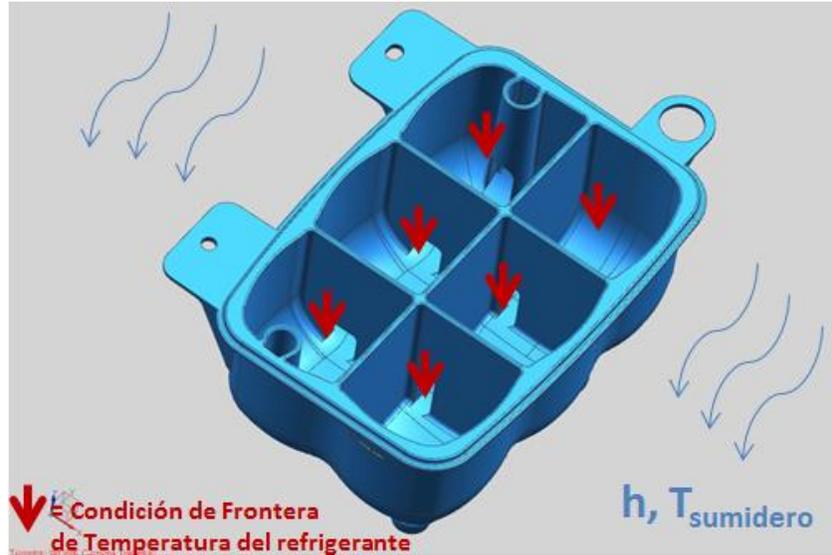


Figura 4.2 Condiciones de frontera de temperatura e interacción de transferencia de calor por convección para parte inferior del tanque

De igual manera que para el refrigerante, se asignó la condición de frontera para el aire dentro del tanque (figura 4.3).



Figura 4.3 Condición de frontera de temperatura del aire dentro de la parte superior interna del tanque



4.3 Modelado con paquetería de elemento finito para análisis termo-mecánico

Para el análisis termo-mecánico, la etapa de pre-procesamiento es similar a la del análisis de transferencia de calor; lo único que cambia es el tipo de elementos finitos utilizados. Por tratarse de un problema para el cual se calculan desplazamientos, se ocuparon elementos de esfuerzo/desplazamiento tetraédricos de segundo orden.

En la etapa de modelado, se definió el análisis como estático general. Al igual que en el modelo de transferencia de calor, se asignaron condiciones de frontera.

Sin embargo, las condiciones de este modelo simulan las sujeciones del tanque señaladas por un círculo rojo en la figura 4.4 y se definieron restringiendo los grados de libertad en los nodos pertenecientes a las sujeciones.

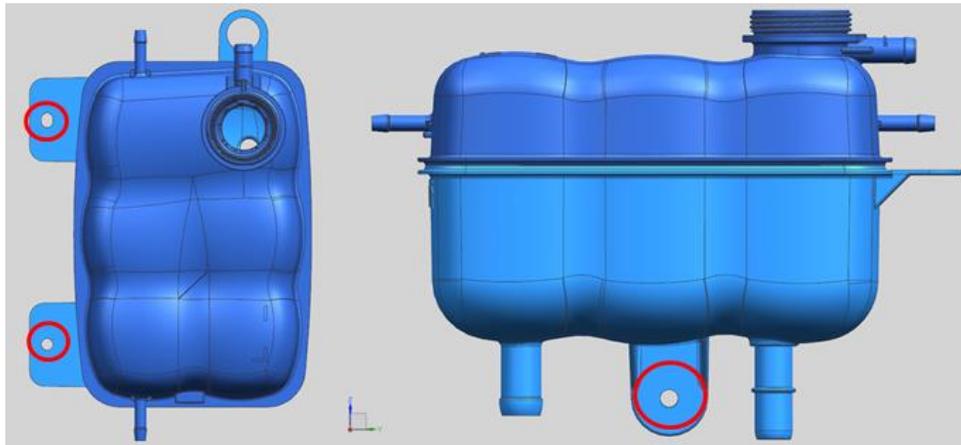


Figura 4.4 Ubicación de sujeciones del tanque

Posteriormente, se incorporó la distribución de temperatura resultante del análisis de transferencia de calor previo como una condición inicial de este análisis.

Además, se modeló la aplicación de una presión uniforme en la parte interna del tanque de acuerdo con el requerimiento de ingeniería de presión máxima de operación establecido por una norma interna de la empresa.

Se eligió y definió el método numérico de solución como iterativo, teniendo como prioridad la exactitud de los resultados y debido a que la empresa cuenta con los recursos computacionales suficientes para realizar un análisis de esta índole en un tiempo relativamente corto. Se solucionó el modelo con Abaqus®.



CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis del tanque original

Las variables principales que se analizaron para evaluar la respuesta termo-mecánica de los tanques para refrigerante son la temperatura, el esfuerzo de von Mises y la deformación plástica equivalente ya que éstas ayudan a identificar las regiones donde se pueden dar las fallas mecánicas en el tanque. Se puso especial atención a la región interna del tanque debido a que esta es la más crítica para el funcionamiento ya que es en donde se aplica la mayor temperatura y presión. Las escalas de color presentadas en este capítulo han sido normalizadas de tal forma que la menor magnitud de la variable se indica por cero y la mayor por la unidad.

El campo de temperatura resultante del análisis de transferencia de calor debe ser coherente con la segunda ley de la termodinámica. Es decir, ninguna temperatura debe ser menor que la temperatura de sumidero, la temperatura máxima debe ser la temperatura de operación del refrigerante y debe corresponder a la temperatura de los nodos de los elementos en contacto directo con este. Además, la temperatura más baja debe presentarse en las partes más alejadas al refrigerante lo cual se observa en la figura 5.1. Entre estas dos partes, se presenta una transición gradual de temperatura lo cual indica que la malla de elementos finitos es adecuada.

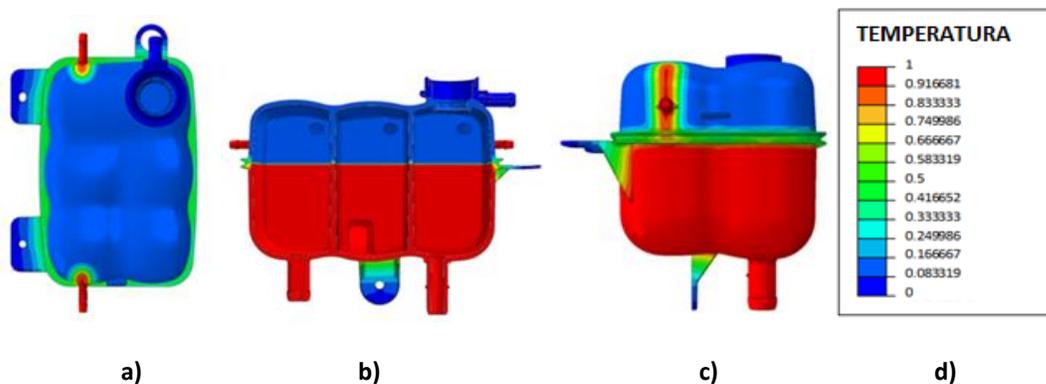


Figura 5.1 Distribución de temperatura a) Vista Superior, b) Corte Transversal, c) Vista Lateral, d) Escala de color



Por otra parte, el esfuerzo de von Mises, se define por:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad \text{Ecuación (5.1)}$$

, donde \mathbf{S} es el tensor desviador de esfuerzos que a su vez se define como

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p \mathbf{I} \quad \text{Ecuación (5.2)}$$

, donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos y p es el esfuerzo hidrostático e \mathbf{I} es el tensor identidad.

En notación índice,

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad \text{Ecuación (5.3)}$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + p \delta_{ij} \quad \text{Ecuación (5.4)}$$

, donde δ_{ij} es la delta de Kronecker y p se define por la siguiente ecuación 5.5.

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad \text{Ecuación (5.5)}$$

El criterio de falla de von Mises indica que los esfuerzos que mas influyen en la cedencia del material son aquellos que distorsionan al cuerpo mientras que los esfuerzos hidrostáticos, que actúan de igual manera en todas las direcciones, solo representan cambios de volumen.

Los esfuerzos máximos que se presentan en las esquinas de las cámaras, así como en cambios bruscos de geometría (figura 5.2a), entre las ventanas y el piso de las cámaras (figura 5.2b) y cercanas a los puntos de sujeción (mancha amarilla cerca del centro en la figura 5.2c) están entre el 95 y 105 % del esfuerzo de cedencia lo cual indica la falla del componente.

Se genera un cambio abrupto de geometría en la región en donde se adhieren los conductos cilíndricos del tanque al cuerpo principal del mismo, dando origen a una concentración de esfuerzos tal y como se observa en la figura 5.2a. A pesar de que adherir conductos o boquillas al cuerpo principal del tanque resulta en una discontinuidad geométrica, estos son necesarios para el funcionamiento del tanque.



Para que no se concentren esfuerzos en estas regiones, se recomienda realizar una transición gradual de geometría en la que no se presenten esquinas pequeñas afiladas.

Además, el radio de las esquinas de las cámaras debe aumentarse para reducir esfuerzos en estas regiones.

En cuanto a las ventanas de las cámaras, estas no deben estar a una distancia muy próxima del piso de la cámara y su geometría no debe contar con esquinas afiladas ya que estas características originan esfuerzos altos como se ve en la figura 5.2b.

Por lo tanto, las ventanas que se observan en la figura 5.2b deben reemplazarse por ventanas circulares que cuenten con la misma área y además deben colocarse de tal manera que la distancia entre éstas y el piso de las cámaras sea de por lo menos igual al diámetro de la ventana.

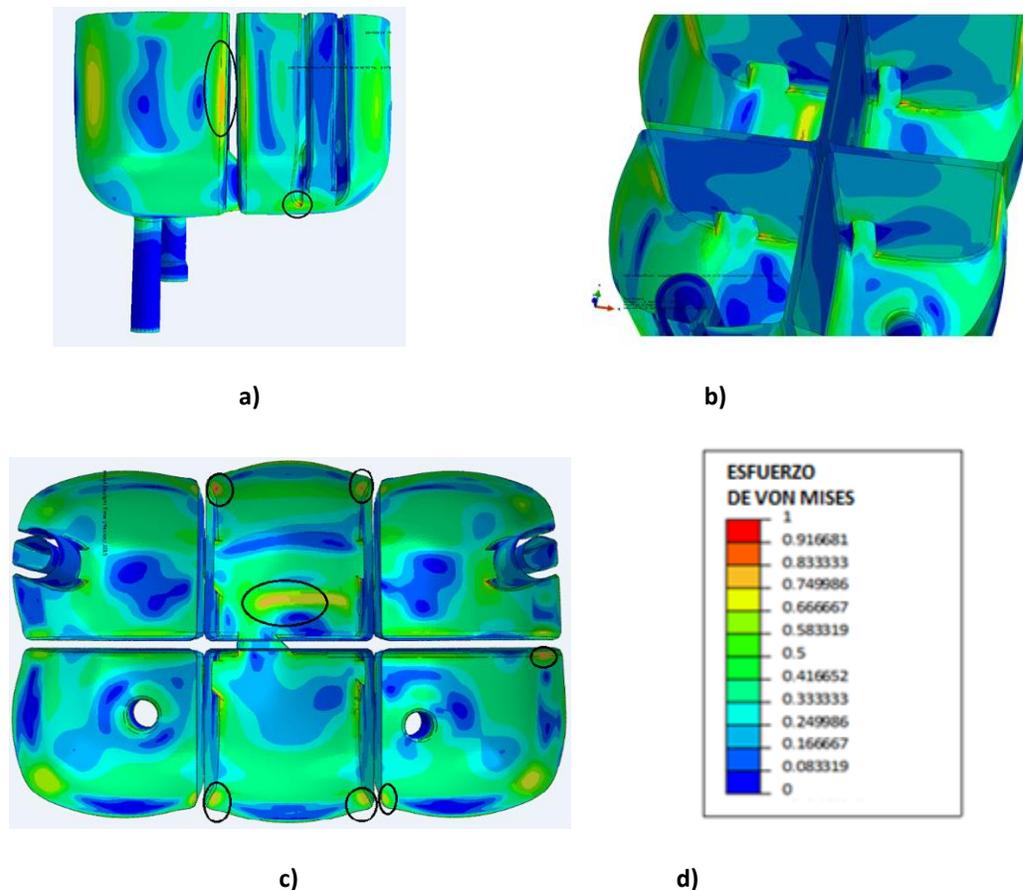


Figura 5.2 Esfuerzo de von Mises en la parte interna inferior, a) Vista lateral, b) Vista superior angulada, c) Vista superior, d) Escala de color



Por otra parte, la deformación plástica equivalente indica la cedencia del material durante un incremento de tiempo específico y se define por la ecuación:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} |_0 + \int_0^t \dot{\varepsilon}^{pl} dt \quad \text{Ecuación (5.6)}$$

, donde $\bar{\varepsilon}^{pl} |_0$ es la deformación plástica equivalente inicial mientras que $\dot{\varepsilon}^{pl}$ es la razón de deformación plástica equivalente y se define por el modelo de plasticidad del material.

Cualquier deformación plástica es indeseable para este componente por lo que el valor de esta variable idealmente debe ser cero. Las deformaciones plásticas se observan en las esquinas de las cámaras así como en los cambios bruscos de geometría (figura 5.3a), entre las ventanas y el piso de las cámaras (figura 5.3b) y cercanas a los puntos de sujeción (mancha verde cerca del centro en la figura 5.3c).

Nuevamente, es importante mencionar que la escala de colores ha sido normalizada de tal manera que el valor de 1 indica la mayor magnitud de dicha variable mientras que el menor valor es reflejado por el valor de cero.

Sin embargo, el hecho de que se esté presentando deformación plástica, aunque esta sea menor al 5 % de la deformación máxima a la ruptura, significa que se está sobrepasando el esfuerzo de cedencia del material.

Para que los esfuerzos estén por debajo del esfuerzo de cedencia y consecuentemente no se presente deformación plástica, se recomienda, además de eliminar esquinas afiladas y modificar la forma de las ventanas de las cámaras, incrementar el espesor de las paredes de las cámaras, cambiar a un material reforzado por fibra de vidrio más resistente y dividir al tanque en más cámaras para que las paredes adicionales incrementen la resistencia mecánica y rigidez del tanque.

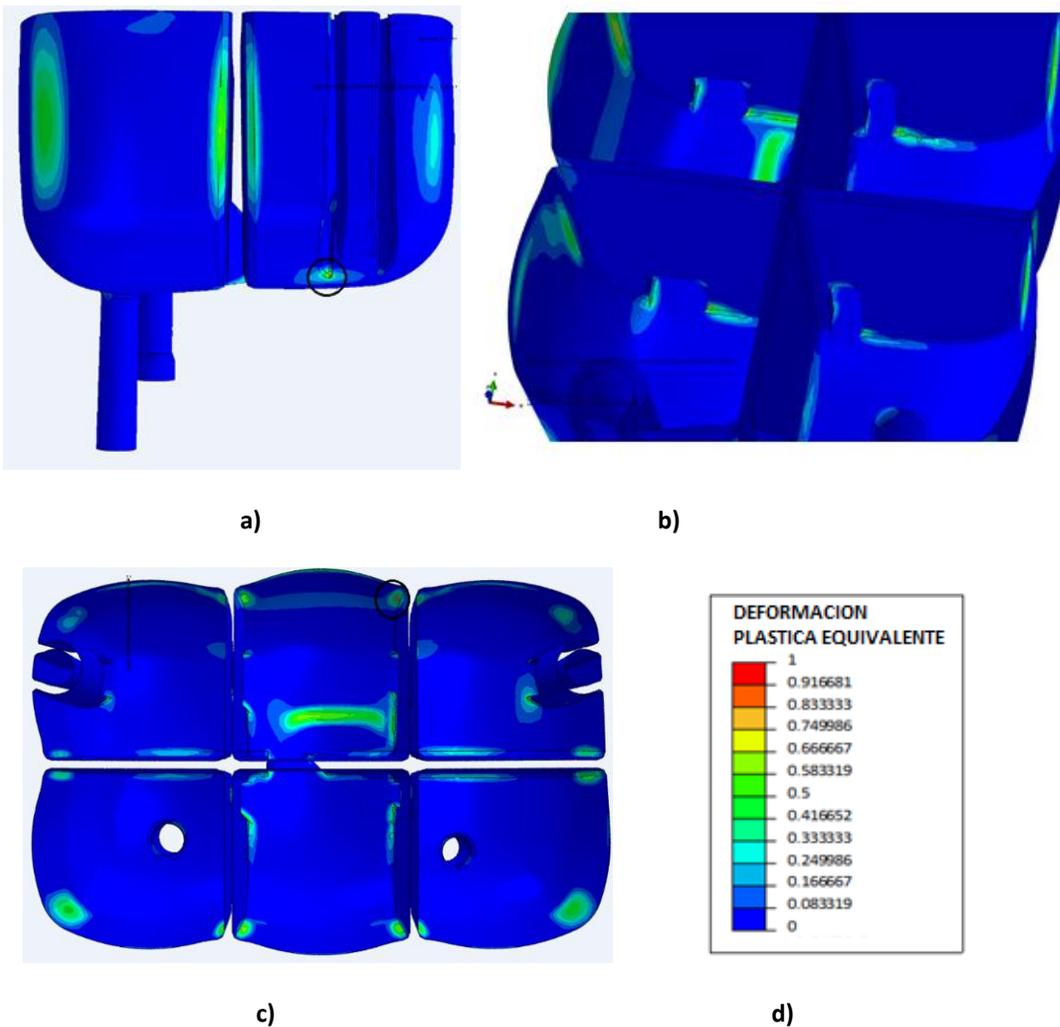


Figura 5.3 Deformación plástica equivalente en la parte interna inferior del tanque, a) Vista lateral, b) Vista superior angulada, c) Vista superior, d) Escala de color

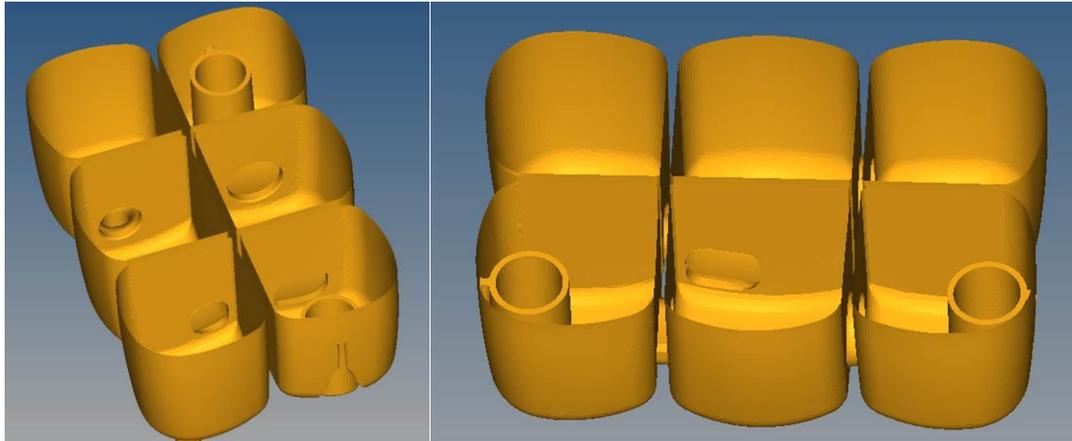
5.2 Análisis del tanque modificado

Aunque no se realizaron todas las propuestas mencionadas anteriormente, los cambios que se realizaron mejoraron el desempeño del componente.

La forma de las ventanas de las cámaras se modificó para que fueran más redondas y que estuvieran a una altura del piso de la cámara mientras que su área y forma se ajustó para cumplir el requisito de tiempo de llenado del tanque en el proceso de ensamble.

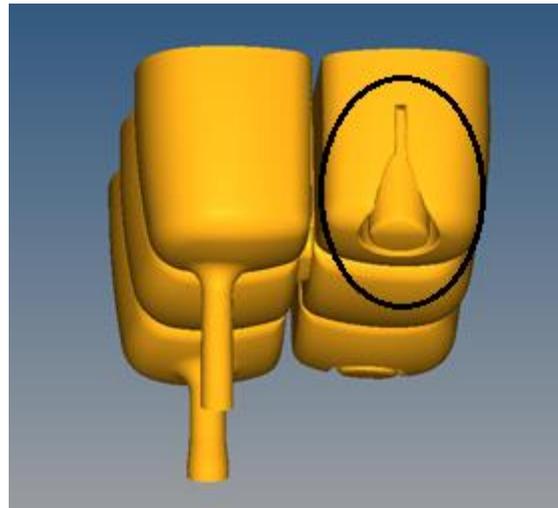


En las siguientes imágenes se muestran los cambios de forma de las ventanas de las cámaras así como un cambio en la manera que los conductos se adhieren al cuerpo principal del tanque.



a)

b)



c)

Figura 5.4 Cambios geométricos, a) y b) Cambio de forma de ventanas de las cámaras, c) Cambio de la manera en la que se adhieren los conductos al cuerpo principal del tanque



Primero, se realizaron los cambios geométricos y al obtener una mejora significativa en los resultados, no fue necesario cambiar el material, el espesor ni el número de cámaras. El esfuerzo de von Mises máximo que se presenta después de haber realizado las modificaciones geométricas está por debajo del 90% del esfuerzo de cedencia.

Por lo tanto, no se presenta deformación plástica y se pronostica que el componente resistirá las sollicitaciones termo-mecánicas a las que está sujeto.

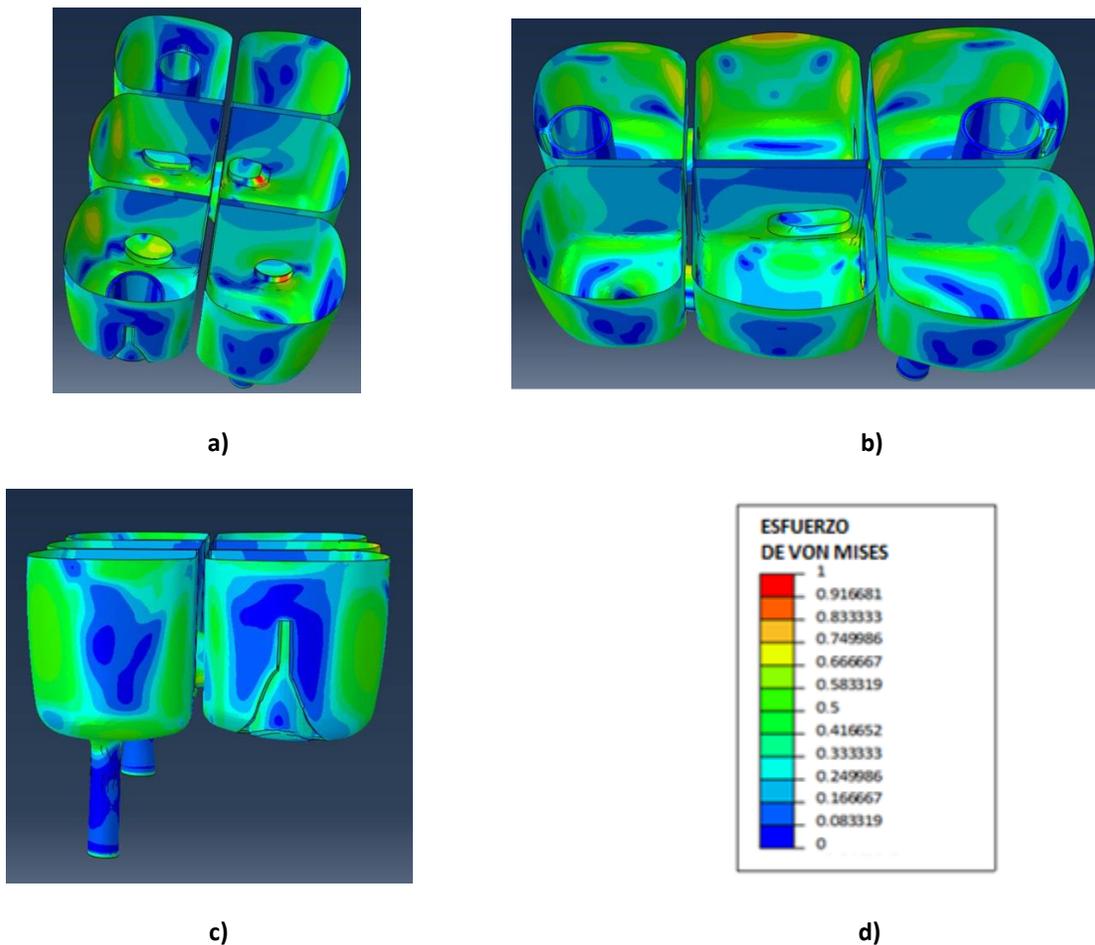


Figura 5.5 Esfuerzo de von Mises en la parte interna inferior, a) Vista superior angulada lateral, b) Vista superior angulada frontal, c) Vista lateral, d) Escala de color



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El análisis termo-mecánico realizado con Abaqus®, muestra que, bajo las sollicitaciones de presión y temperatura a las cuales está sujeto el tanque previo a las modificaciones de diseño, el esfuerzo de cedencia es sobrepasado y, por lo tanto, se presenta deformación plástica.

Para que no se presenten esfuerzos por encima del esfuerzo de cedencia, se propuso incrementar el radio de las esquinas de las cámaras, eliminar los cambios abruptos de geometría así como las esquinas pequeñas afiladas. También se propuso modificar las ventanas de las cámaras de tal manera que estas sean de forma circular y que la distancia de estas al piso de las cámaras sea por lo menos igual al diámetro de la ventana.

A la temperatura de operación máxima, el material del tanque no es lo suficientemente resistente para soportar la carga de presión aplicada en la parte interior. Por lo tanto, se propuso reforzar al material con fibra de vidrio con el fin de aumentar la resistencia mecánica.

Además, para incrementar la resistencia mecánica del tanque, se propuso aumentar el espesor de las paredes.

También, se propuso aumentar el número de cámaras para que las paredes adicionales le brinden una mayor resistencia mecánica al tanque.

Se modificaron las ventanas para que fueran más redondas y se cambió la manera en la que los conductos de refrigerante se adhieren al cuerpo principal del tanque. Debido a que estas modificaciones resultaron en una mejora significativa en la que el esfuerzo máximo presentado fue menor que el 90 % del esfuerzo de cedencia y no se presentó deformación plástica, no fue necesario incrementar el número de cámaras, aumentar el espesor ni cambiar el material para aumentar la resistencia mecánica del tanque. Se pronostica que el tanque modificado resistirá las sollicitaciones de presión y temperatura a las que está sujeto.

Los pasos a futuro son realizar un trabajo para determinar la correlación entre los resultados obtenidos mediante simulaciones matemáticas y las mediciones hechas directamente durante pruebas físicas.



CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

1. 3D Systems, "Basics of Injection Molding Design," 2016. Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <http://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/injection-molding-basics#injprocess>
2. "Funcionamiento del sistema de enfriamiento," (s.f.). Recuperado el 15 septiembre de 2015, de <http://asc-ind.com/es/cooling-system-information/how-a-cooling-system-works/>
3. HEWKIN, David, "Multi-layer coolant reservoir," U.S., 20, 110, 062, 163 A1. (CI.220/562), 17 Mar 2011. Appl. 15 Sep 2010.
4. HOWE, Philip L, "Automobile engine-cooling apparatus," U.S., 1, 608, 600 A. (CI.123/41.271; 123/41.51), 30 Nov 1926. Appl. 3 Apr 1926.
5. HOWE, Philip L, "Engine-cooling means," U.S., 1, 662, 269 A. (CI.123/41.27; 123/41.51; 123/41.1), 13 Mar 1928. Appl. 11 Feb 1927.
6. LAWRENCE, Patrick N., MENCHE, Frederick W. y ANTONIO, Edgar, "Surge tank," U.S., 7, 383, 795 B2. (CI.123/41.54; 220/562; 123/41.51; 220/563), 10 Jun 2008. Appl. 29 Aug 2006.
7. MUTAHIR, Ahmed, RAFI, Ullah Khan, SAEED, Bashah, et al., "Finite element investigation of geometry effect on pressure vessel under combined structural and thermal loads," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 4, 2014, pp. 118-124.
8. ORTIZ PRADO, Armando, ORTIZ, Juan Armando y RUIZ, Osvaldo. Introducción a la mecánica del medio continuo. *Universidad Nacional Autónoma de México*. 2013.
9. ORTIZ PRADO, Armando, "Manufactura I Sesión 8: Métodos de manufactura para polímeros," *Universidad Nacional Autónoma de México*. 2016.



10. "Overview of materials for high density polyethylene (hdpe), injection molded," (s.f.). Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fce23f90005d4f8e8e12a1bce53ebdc8&ckck=1>
11. "Overview of materials for polypropylene, molded," (s.f.). Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1>
12. PERAS, Lucien, "Devices for ensuring the fluid-tightness of hydraulic cooling systems of engines," U.S., 3, 083, 701 A. (Cl.123/41.54; 235/145.00R), 2 Apr 1963. Appl. 6 Mar 1961.
13. SIMULIA ABAQUS ® 6.14, "Heat transfer analysis procedures: overview," Abaqus Analysis User's Guide, sección 6.5.1, 2014.
14. SIMULIA ABAQUS ® 6.14, "Abaqus/Standard output variable identifiers," Abaqus Analysis User's Guide, sección 4.2.1, 2014.
15. SMITH, Gary M, "Combination coolant deaeration and overflow bottle," U.S., 5, 680, 833 A. (Cl.123/41.54; 15/104.32), 28 Oct 1997. Appl. 23 Dec 1966.
16. SPINDELBOECK, Dieter y SCHWEIGER, Erwin, "Expansion, deaeration and reservoir tank for the liquid-cooling system of internal combustion engines," U.S., 4, 723, 596 A. (Cl.165/104.32; 123/41.51; 123/41.54), 9 Feb 1988. Appl. 5 Aug 1985.
17. "Typical engineering properties of polypropylene," April 2014. Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <http://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-engineering-properties-of-pp.pdf>
18. "Typical engineering properties of high density polyethylene," (s.f.). Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <http://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-typical-engineering-properties-of-hdpe.pdf>



-
19. VENKATESWARAN, N., VINOBAKRISHNAN, R. y BALAMURUGAN, V.,
“Thermomechanical analysis of the cylinder head and cylinder block with the
liner of AFV diesel engine,” *Center for Engineering Analysis and Design,
CVRDE, Ministry of Defence, 2013.*
 20. WELGE, Didrik, “Water-cooling system for internal-combustion motors,”
U.S., 1, 378, 070 A. (Cl.165/108; 123/41.27), 17 May 1921. Appl. 21 Jul
1919.
 21. YEH, Po-Len, “Material and process problems in the manufacture of coolant
reservoir tanks,” *Loughborough University Institutional Repository.* October
1984.