

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A NOVEL CHASSIS FOR AN AIR-ASSISTED SPRAYER WITH TWO FANS BY MEANS OF THE FEM

Malón Litago, Hugo; García Ramos, Francisco Javier; Vidal Cortes, Mariano;
Boné Garasa, Antonio

Universidad de Zaragoza

The application of phytosanitary products in plantations of fruit trees are made by trailed agricultural sprayers. Current demand is requesting larger implements that improve the results of the treatments.

In order to fulfil this demand, one of the adopted solutions consists of equipping the trailed agricultural sprayers with a second fan, placed in the front part of the implement, in addition to normal fan placed in the rear part.

The increase of the dimensions of the air-assisted sprayers and the increase of the load to be transported requires the development of new models of chassis for such implements.

This paper shows the work done in the design and optimization of a new chassis model of an air-assisted sprayer with two fans. In particular, in this paper shows the numerical optimization developed based in numerical analysis by means of the Finite Element Method.

Keywords: *Design; Optimization; Chassis; Air-assisted sprayers; FEM*

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS DE UN PULVERIZADOR HIDRONEUMÁTICO DE DOS VENTILADORES MEDIANTE EL MEF

La aplicación de productos fitosanitarios en plantaciones frutales se realiza mediante pulverizadores hidroneumáticos. La demanda actual está solicitando aperos de mayores dimensiones y que mejoren los tratamientos.

Con el fin de abastecer esta demanda, una de las soluciones adoptadas consiste en equipar a los pulverizadores hidroneumáticos con un segundo ventilador, colocado en la zona delantera del apero, además de ventilador tradicional de la parte trasera.

El aumento de las dimensiones del pulverizadores hidroneumáticos, así como el incremento de la carga a transportar, obliga a un desarrollar nuevos modelos de chasis para este tipo de aperos.

El objetivo del artículo es mostrar el trabajo realizado en el diseño y optimización de un nuevo modelo de chasis para un pulverizador hidroneumático con dos ventiladores. En concreto se mostrara el trabajo de optimización realizado mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos.

Palabras clave: *Diseño; Optimización; Chasis; Pulverizador Hidroneumático; MEF*

1. Introducción

En la agricultura actual es una práctica habitual el uso de productos fitosanitarios para proteger a los cultivos frente al ataque de hongos, insectos y malas hierbas. El objeto de la aplicación de estos productos no es otro que obtener un producto vegetal más sano, a la vez que aumentar la producción por unidad de superficie cultivada. Para conseguir un tratamiento exitoso, además de elegir el producto adecuado, es necesario garantizar que éste llegue de forma óptima al objetivo buscado (hojas, frutos, insectos, etc.). Esto significa que debe alcanzar todas las zonas del vegetal afectadas por la plaga a combatir, en todas ellas con la misma uniformidad y en la concentración adecuada. Para ello, el método de aplicación debe ser el adecuado y esto implica la mecanización de este trabajo mediante la utilización de una máquina específica y correctamente regulada: el equipo de aplicación de productos fitosanitarios.

Dentro de los diferentes equipos utilizados para la protección de cultivos, en este estudio nos centraremos en aquellos que se utilizan de forma mayoritaria en plantaciones arbóreas: los pulverizadores hidroneumáticos (conocidos comúnmente como atomizadores).

Los pulverizadores hidroneumáticos son máquinas (en su mayoría arrastradas por un tractor agrícola) equipadas con un depósito donde el producto fitosanitario se disuelve en agua. La capacidad de dicho depósito depende de los modelos y fabricantes, pero puede oscilar desde los 0.5 m³ hasta los 5 m³, de los modelos más recientes.

Figura 1: Pulverizador hidroneumático



La mayoría de los pulverizadores hidroneumáticos comercializados disponen de un ventilador en su parte posterior. Ello supone que el flujo de aire generado a ambos lados de la máquina no sea simétrico, y por lo tanto el tratamiento efectuado a ambos lados tampoco lo será y en consecuencia, y por lo menos, debido al equipo, no se puede asegurar la misma calidad de tratamiento en todos los árboles (Herrington et al, (1981); Cross (1991); Doruchowski et al. (1997)). Para solventar este inconveniente, durante los últimos años, algunos fabricantes de equipos han optado por utilizar dos ventiladores en sus pulverizadores hidroneumáticos dispuestos con diferentes diseños (dos ventiladores colocados en paralelo detrás del depósito, dos ventiladores colocados en serie detrás del depósito, un ventilador colocado delante del depósito y otro detrás, etc.). De esta forma, se pretende que el flujo de aire generado presente simetría a derechas e izquierdas de la máquina, además, en algunos casos la interacción de los flujos de aire generados por los dos ventiladores facilita la penetración del producto pulverizado en el cultivo al producir un régimen de aire turbulento. En este sentido, la posibilidad de utilizar dos ventiladores podría tener un efecto positivo.

El aumento de las dimensiones los depósitos, así como la instalación de un segundo ventilador dan lugar a aperos de mayores dimensiones, con necesidades de carga muy superiores a los fabricados tradicionalmente.

El desarrollo de estos nuevos pulverizadores hidroneumáticos requiere un proceso de diseño y optimización de los chasis de los mismos con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de estos aperos.

2. Objetivo

El principal objetivo del estudio es el diseño y optimización de un chasis de pulverizador hidroneumático con un depósito de 4.000l, equipado con dos ventiladores axiales de giro invertido (figura 2), uno situado en la parte trasera del depósito (como las máquinas existentes en la actualidad) y otro situado en la parte delantera.

Figura 2: Pulverizador hidroneumático con dos ventiladores axiales con giro invertido



En el proceso de análisis se emplearán técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos, las cuales permitirán simular los casos de carga típicos de este tipo de apero. Las simulaciones numéricas permitirán analizar el comportamiento según criterios de rigidez y resistencia de los componentes de la estructura del chasis, facilitando el proceso de optimización de los mismos.

Como objetivo secundario se contemplará el diseño del chasis empleando únicamente chapa plegada, sin ningún tipo de perfil comercial. El fin de este objetivo es facilitar el proceso de optimización, permitiendo variar espesores y materiales en los diferentes componentes del chasis, así como soluciones localizadas en las zonas críticas.

3. Análisis numérico del chasis de un pulverizador hidroneumático

El análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica aplicada frecuentemente en el análisis estructural de chasis de semirremolques, camiones, maquinaria y aperos agrícolas (Beermann, (1984); Kodiyalam & Sobieszczanski-Sobieski, (2001); Karaoglu & Kuralay, (2002); Cappello et al, (2005); Li et al, (2007); Carrera et al,

(2010); Miralbes, & Castejon, (2010); Deng et al, (2011); Hoefinghoff et al, (2011); Miralbes, Malon & Castejon (2011); Vidal et al, (2011);

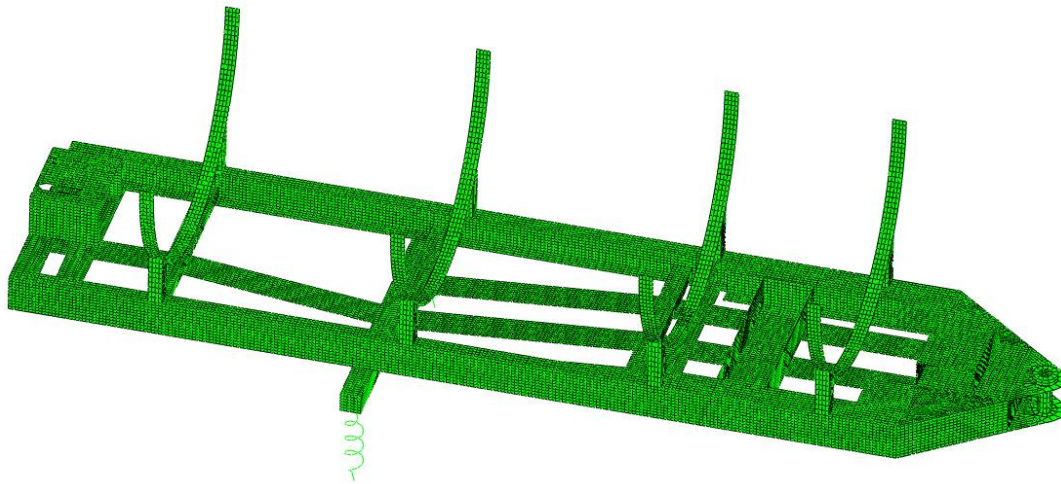
En el presente estudio se han empleado la citada técnica numérica en el diseño y optimización de un chasis de pulverizador hidroneumático.

Los casos de carga analizados corresponden a maniobras habituales a las cuales está sometido un pulverizador hidroneumático, y que corresponden con las maniobras críticas desde el punto de vista resistente del chasis del apero.

3.1 Modelo de elementos finitos

En proceso de diseño y optimización de un chasis de pulverizador hidroneumático con un depósito de 4.000l, equipado con dos ventiladores axiales de giro invertido, ha sido desarrollado un modelo de elementos finitos del mismo, el cual se muestra en la figura 3.

Figura 3: Modelo de elementos finitos del chasis del Pulverizador hidroneumático



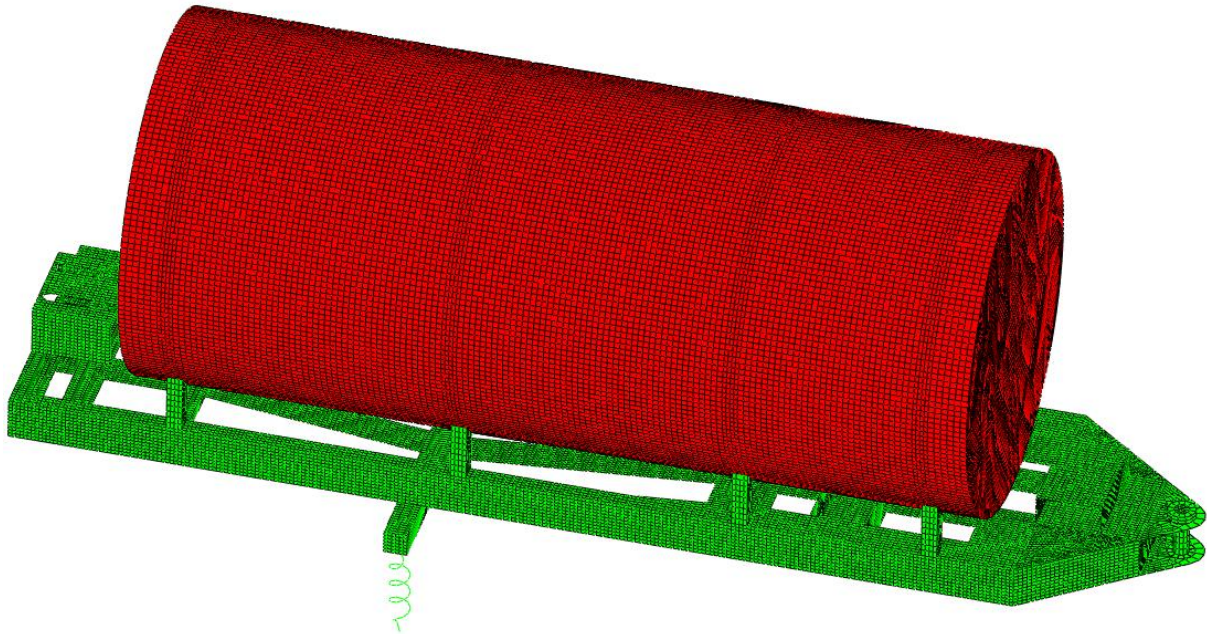
La discretización del modelo se ha realizado a partir de las dimensiones de un modelo comercial, las cuales han sido proporcionadas por la empresa GARMELET S.L.

Con el fin de realizar una correcta simulación de los caso de carga ha sido necesario realizar la discretización del depósito de 4000l. El modelo completo de elementos finitos, figura 4, está formado por 76.614 nodos y 77.421 elementos

Los elementos empleados en el mallado del modelo son mayoritariamente elementos tipo lamina (*Shell*). Elementos volumétricos han sido empleados en la discretización del bulón de enganche delantero y en el travesaño en el cual se colocan las ruedas.

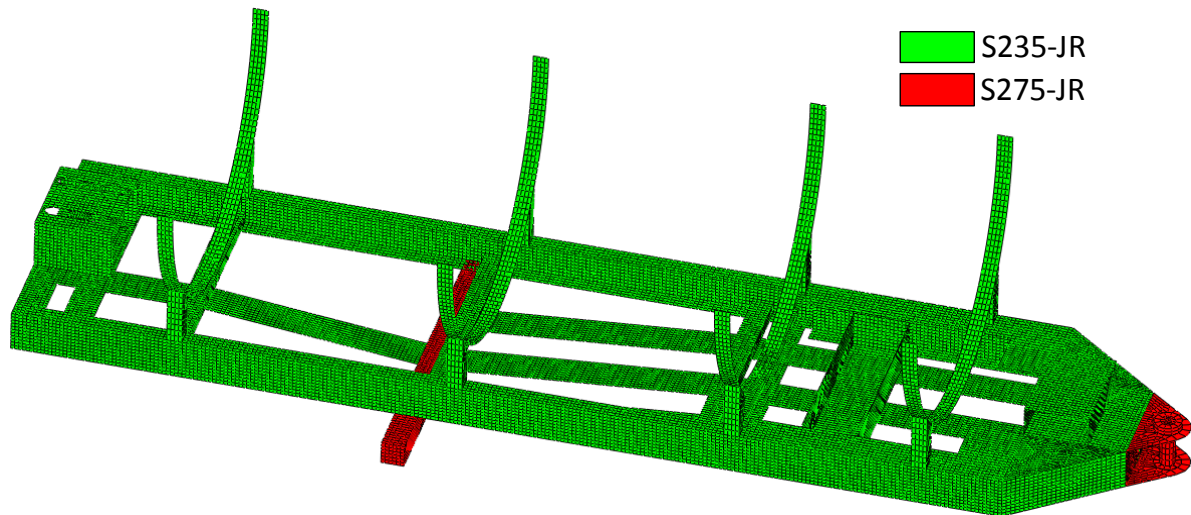
Algunos componentes del pulverizador hidroneumático, como son los ventiladores delantero y trasero y el grupo reductor han sido sustituidos por elementos tipo masa, los cuales han sido colocados en el centro de masas de los citados componentes. Estos elementos a los cuales se les ha asignado la misma masa que los componentes a los cuales simulan, han sido unidos al chasis del apero por sus puntos de anclaje mediante Multi Point Constraints (MPC's).

Figura 4: Modelo completo de elementos finitos del Pulverizador hidroneumático



Los materiales empleados en el análisis numérico basado en el Método de los Elementos Finitos son los aceros S275-JR y S235-JR, cuyas propiedades mecánicas han sido obtenidas de la norma EN 10025-2006. La distribución de los materiales en el chasis se muestra en la figura 5.

Figura 5: Materiales en el chasis del Pulverizador hidroneumático



3.2 Condiciones de contorno

A fin de reproducir el comportamiento del chasis en las maniobras a simular, se han impuesto una serie de condiciones de contorno que reproducen las existentes en la realidad.

En primer lugar se han restringido los desplazamientos en la bulón de amarre delantero existente en el apero, el cual se une con el tractor que lo arrastra.

En segundo lugar se han sustituido las dos ruedas del apero por dos muelles que realizan su función. Para el correcto funcionamiento de los muelles se han restringido los

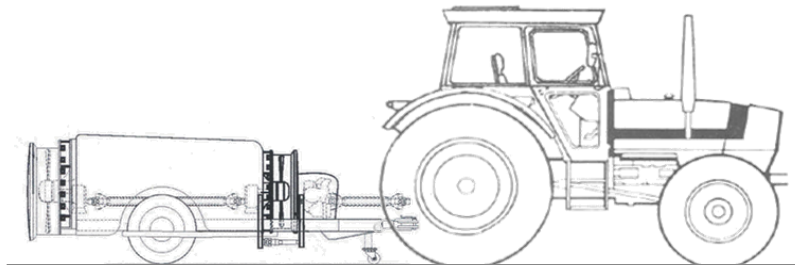
desplazamientos en los nodos inferiores de los mismo, puntos que corresponden al contacto con la rueda. A los nodos superiores de los muelles se le restringen los desplazamientos en un plano paralelo al suelo, permitiéndoles los desplazamientos verticales y los giros.

3.3 Casos de carga

Los casos de carga analizados en el proceso de diseño y optimización del chasis corresponden al caso de carga de reposo y los cinco casos de carga más críticos desde el punto de vista estructural para el chasis del apero. En los siguientes puntos se describen los casos de carga analizados.

El primer caso de carga, denominado "*Reposo*", corresponde a la situación en la cual el apero cargado con 4000l en el depósito está enganchado al tractor, sin haber movimiento en el conjunto. La disposición del conjunto apero-tractor en este caso de carga se muestra en la figura 6. En el caso de carga *Reposo* los 4000l del depósito han sido simulados como una presión hidrostática en las paredes del depósito.

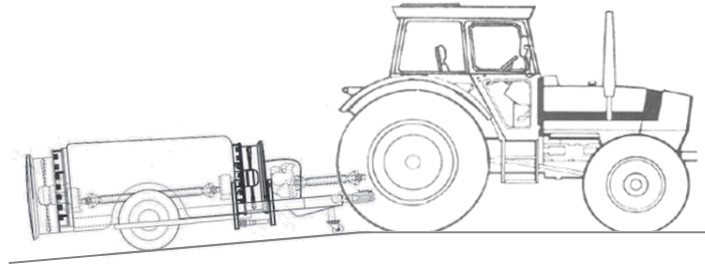
Figura 6: Caso de carga "Reposo"



El segundo caso de carga analizado, "*Impulso inicial*", corresponde a la maniobra en la cual el pulverizador hidroneumático está completamente cargado, 4000l en el depósito, y el tractor comienza a avanzar, lo que genera una fuerza de arrastre en el bulón de enganche del pulverizador hidroneumático. El valor máximo de esta fuerza se alcanza en el instante anterior a superar la fuerza de rozamiento estático de las ruedas. Con el fin de simular el caso de carga "*Impulso Inicial*", el valor máximo de la fuerza de arrastre ha sido calculado a partir de las reacciones en las ruedas del apero obtenidas del caso de carga "*Reposo*". Los 4000l de carga del depósito han sido simulados como una presión hidrostática en las paredes del mismo.

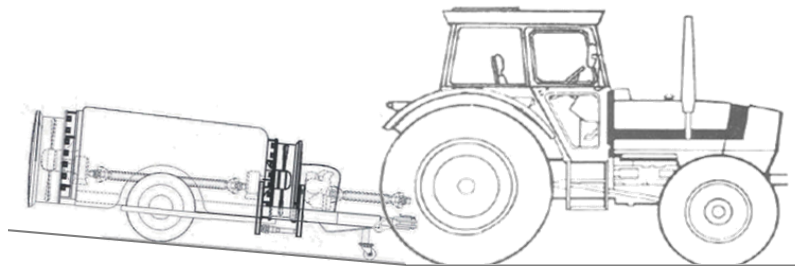
El tercer caso de carga, "*Cabeceo +5°*", corresponde a la maniobra en la cual el tractor y el pulverizador hidroneumático no se encuentran en la misma horizontal, si no que el apero está girado 5° respecto al eje de giro de las ruedas, quedando el apoyo de las ruedas del apero por debajo de la horizontal del tractor. La disposición del conjunto apero-tractor se muestra en la figura 7. Esta maniobra se da cuando el apero sigue subiendo una rampa mientras el tractor ya la ha finalizado. La carga en el depósito es de 4000l, y se simula mediante una presión hidrostática en las paredes del mismo.

Figura 7: Caso de carga “Cabeceo +5°”



El cuarto caso de carga, “*Cabeceo -5°*”, corresponde a la maniobra en la cual el tractor y el pulverizador hidroneumático no se encuentran en la misma horizontal, si no que el apero esta girado -5° respecto al eje de giro de las ruedas, quedando el apoyo de las ruedas del apero por encima de la horizontal del tractor. La disposición del conjunto apero-tractor se muestra en la figura 8. Esta maniobra se da cuando el apero sigue bajando una rampa mientras le tractor ya la ha finalizado. La carga en el depósito es de 4000l, y se simula mediante una presión hidrostática en las paredes del mismo.

Figura 8: Caso de carga “Cabeceo -5”



El quinto caso de carga, “*Balanceo lateral*”, se produce cuando una de las ruedas del pulverizador hidroneumático se eleva al tener que superar un obstáculo. En esta maniobra el apero gira entono su eje longitudinal, lo que genera una variación de la distribución de la carga sobre el chasis del mismo. En el caso de carga simulado se ha analizado el caso en el que una de las ruedas sebe superar un obstáculo de 100mm de altura, maniobra que ha sido simulada imponiendo un desplazamiento vertical ascendente de 100mm al nodo inferior de uno de los muelles que simulan las ruedas del apero. Análogamente a los casos anteriores los 4000l de carga del pulverizador han sido simulados mediante una presión hidrostática en las paredes del depósito.

El sexto y último caso de carga analizado, “*Oleaje*”, es una de los casos de carga más críticos para integridad del chasis, del depósito y del conjunto apero-tractor en general. Este caso de carga se produce cuando el depósito no está totalmente cargado, y al variar la velocidad del apero se producen olas en el interior del depósito que impactan contra las tapas delanteras y traseras. En el estudio realizado se han simulado el caso en el cual el depósito se encuentra cargado a la mitad de su capacidad, 2000l, y al circular es necesario realizar una maniobra de frenado brusco. En este instante el fluido del depósito se desplaza hacia la parte delantera del mismo, chocando la tapa delantera. Para simular el caso de carga se ha considerado una presión hidrostática en la mitad inferior del depósito, la cual simula los 2000l de carga, a la vez que se introduce una fuerza en la mitad superior de la tapa delantera del depósito, cuyo valor equivale a la fuerza generada por los 2000l en una frenada de 1g.

4. Resultados del análisis numérico

Una vez que el modelo de elementos finitos del chasis inicial de un pulverizador hidroneumática ha sido realizado se procede a realizar los cálculos numéricos de los casos de carga a analizar.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante el Método de los Elementos Finitos del diseño inicial de chasis, así como los resultados finales del proceso de optimización realizado hasta obtener un diseño óptimo para un pulverizador hidroneumático.

En el proceso de optimización desarrollado se han realizado mediante criterios de rigidez y resistencia

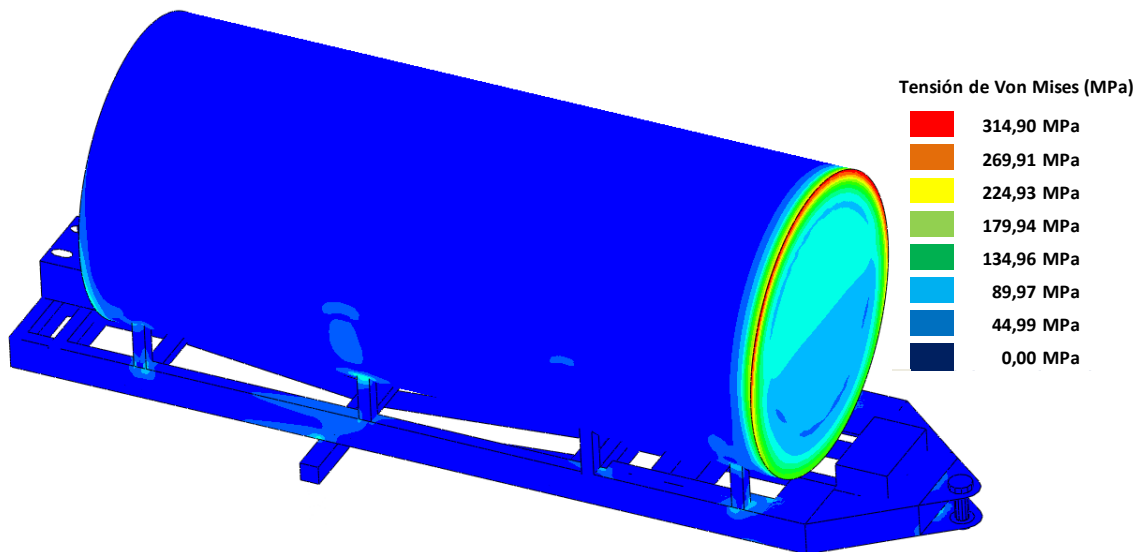
4.1 Diseño inicial

Una vez que los cálculos numéricos del modelo inicial han sido realizados, se procede a analizar los resultados obtenidos del chasis inicial con el fin de optimizar la geometría de los componentes del mismo.

Los cálculos numéricos realizados proporcionan, entre otros resultados las tensiones equivalentes de Von Mises, así como los desplazamientos del modelo global analizado y de cada uno de sus componentes por separado.

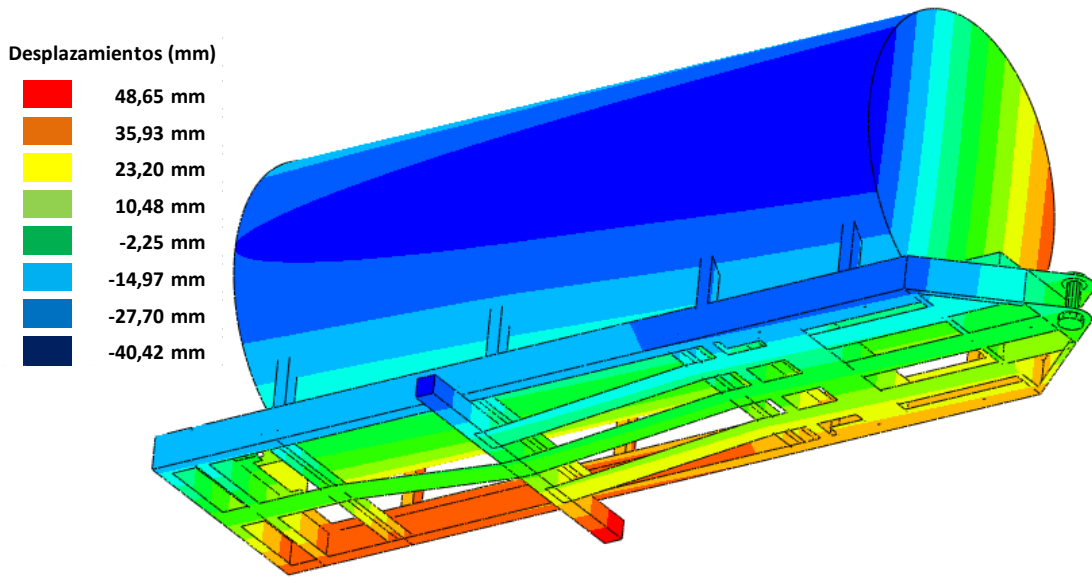
La figura 9 muestra las tensiones equivalentes obtenidos del caso de carga "Oleaje", el cual es el más crítico a nivel global desde un punto de vista resistencia.

Figura 9: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Oleaje"



La figura 10 muestra los desplazamientos verticales en el modelo global obtenidos del caso de carga "Balanceo lateral", el cual es el más crítico a nivel global según el criterio de rigidez.

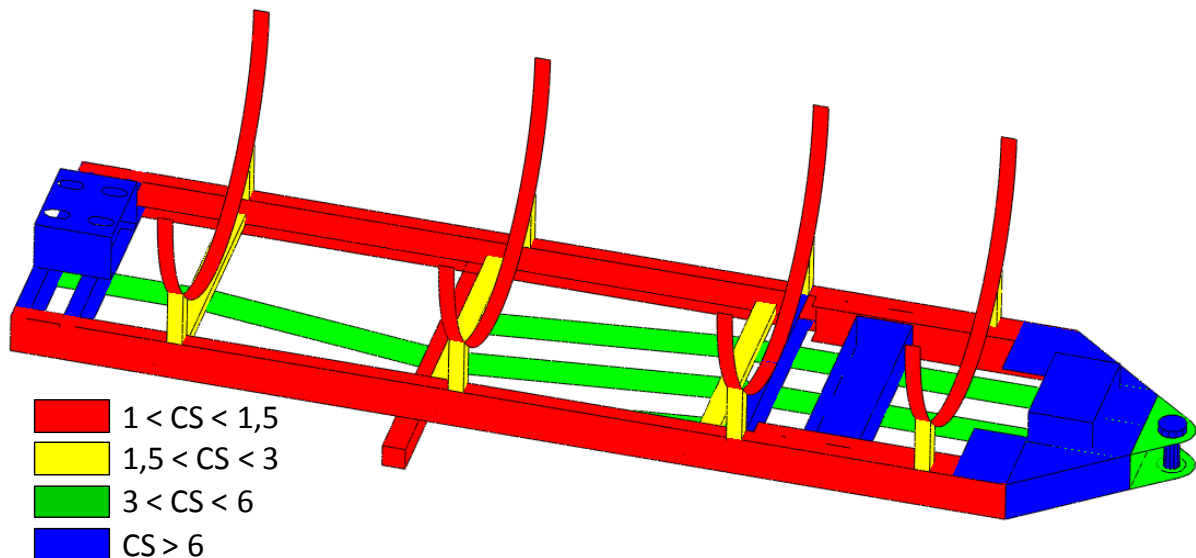
Figura 10: Desplazamientos verticales del caso “Balanceo lateral”



Analizando los valores máximos de tensiones de Von Mises obtenidos, destaca las tensiones del caso de carga “Balanceo lateral”. En este caso las tensiones máximas registradas se localizan en el eje de las ruedas, mientras que en el resto de los casos se presentan en los arcos de apoyo del depósito. Las tensiones generadas en el eje en el caso de carga “Balanceo lateral” son un efecto de las condiciones de contorno impuestas.

Con el fin de agilizar el proceso de optimización, en la figura 11 se muestra una imagen en la que se representa por colores el coeficiente de seguridad mínimo de los componentes del chasis inicial para la totalidad de los casos de carga.

Figura 11: Coeficientes de seguridad mínimos de los componentes del chasis inicial



4.2 Diseño optimizado

Una vez han sido analizados los resultados obtenidos de los cálculos numéricos del chasis inicial se procede con el proceso de optimización del mismo.

Para ello se trabajara analizando los componentes en función del coeficiente de seguridad mínimo obtenido en el estudio del modelo inicial. En referencia los componentes con coeficiente de seguridad entre 1 y 1,5 (en rojo en la figura 11), se ha concluido que los valores máximos son puntuales y en algunos casos debidos a singularidades del cálculo, por lo que se ha decidido no modificar los mismos.

En referencia a los componentes con coeficientes de seguridad entre 1,5 y 3, se ha decidido mantener su configuración inicial, bebido a que las tensiones obtenidas no presentaban problemas según criterios de resistencia, pero tampoco permitían reducir espesores de los componentes.

Para finalizar todos los componentes con coeficientes de seguridad superiores a 3 han sido modificados, reduciendo el espesor de los mismos, llegando a reducirse hasta un 50% del espesor original para alguno de los componentes. Estas modificaciones han sido posibles, a que el diseño del chasis se ha realizado con chapa plegada, lo que facilita el modificar el espesor de los componentes, cosa que hubiera sido muy complicado en cualquier diseño actual que se basan en perfiles comerciales.

Figura 12: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Impulso inicial" del chasis inicial

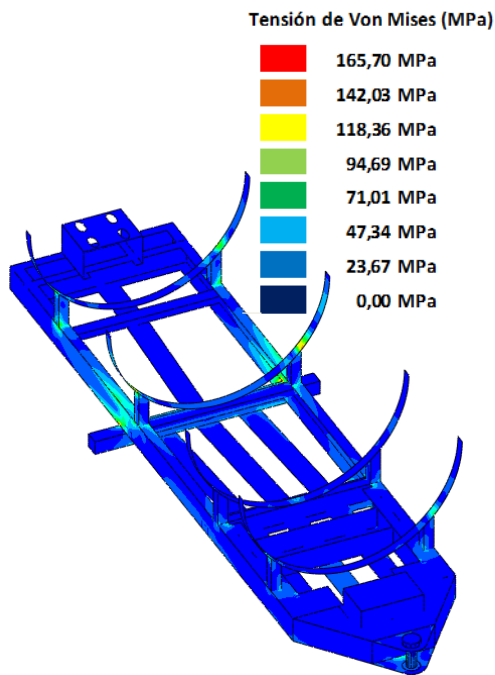


Figura 13: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Impulso inicial" del chasis optimizado

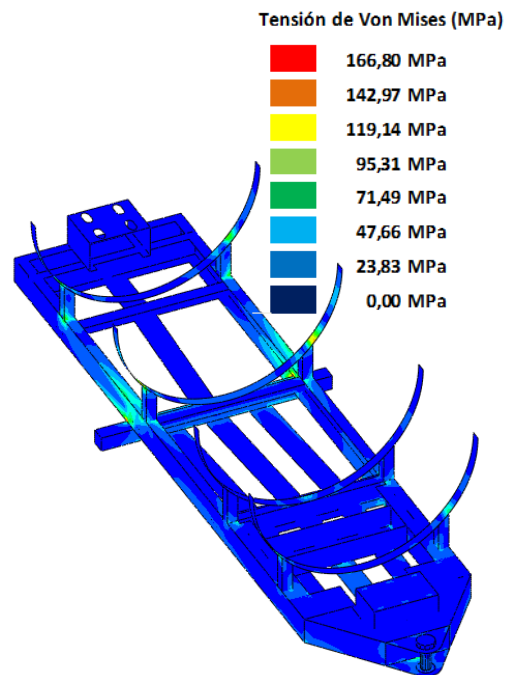


Figura 14: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Balanceo lateral" del chasis inicial

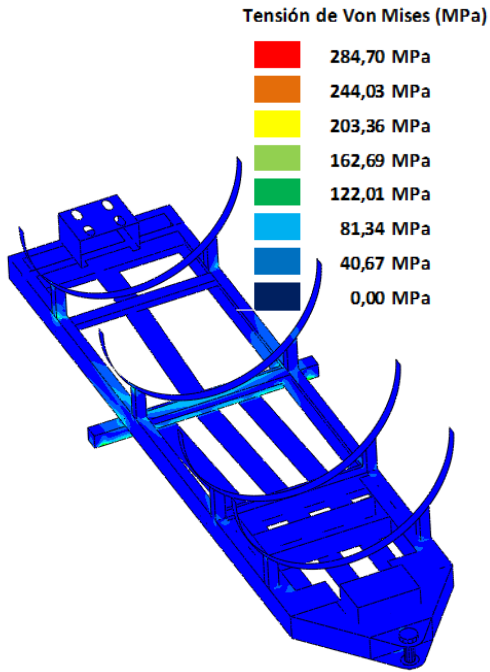


Figura 15: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Balanceo lateral" del chasis optimizado

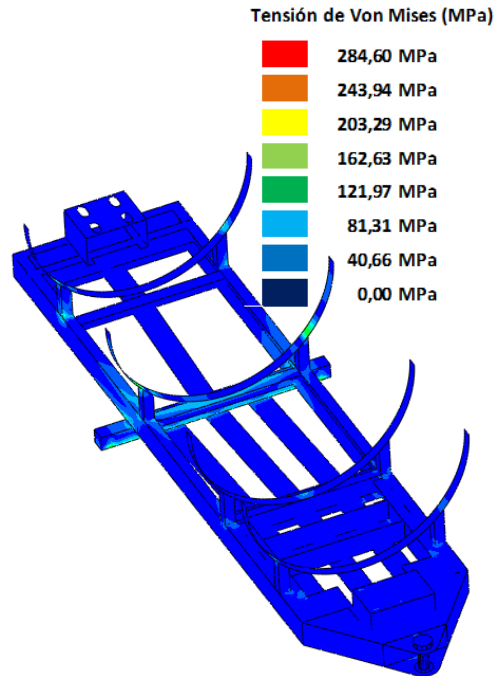


Figura 16: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Oleaje" del chasis inicial

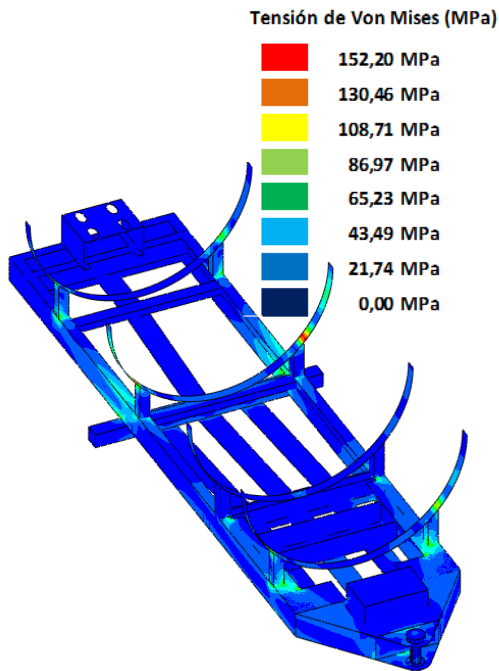
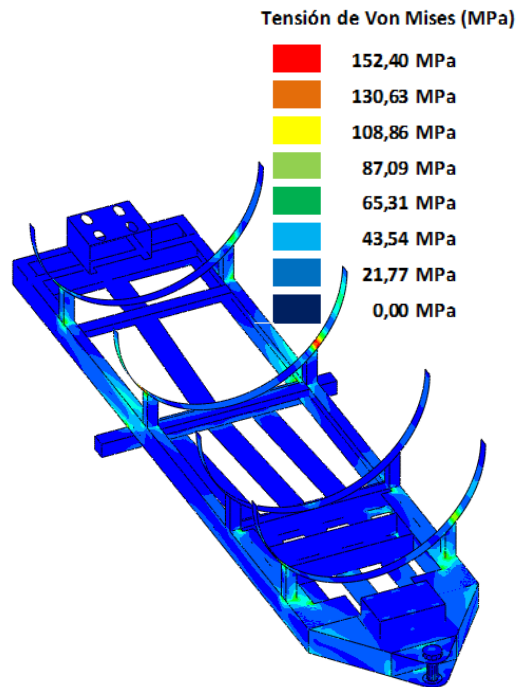


Figura 17: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Oleaje" del chasis optimizado



Las figuras 12-17 muestran una comparativa de los resultados obtenidos de tensiones de Von Mises de los en tres casos se carga más desfavorables, como son "Impulso inicial",

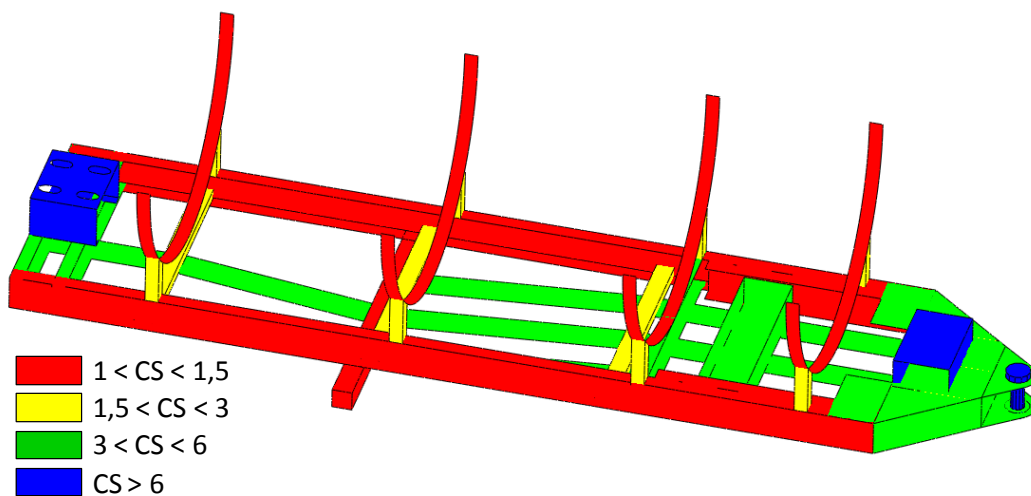
“Balanceo lateral” y “Oleaje”. Como se aprecia en las imágenes las variaciones en las distribuciones las tensiones son similares en los modelos “inicial” y “optimizado”, presentando valores máximos prácticamente iguales en ambos modelos, los cuales permiten validar el modelo optimizado según el criterio de resistencia.

Análogamente al modelo inicial, la figura 18 muestra los coeficientes de seguridad mínimos de cada uno de los componentes del chasis optimizado.

En ella se muestra como se han optimizado una serie de componentes con coeficientes de seguridad superiores a 6 en el caso inicial, varios de los cuales presentan en el modelo optimizado coeficientes de seguridad entre 3 y 6.

En el proceso de optimización se ha conseguido reducir la masa de los componentes del chasis en 97,2kg, lo que supone una reducción del 18.50% respecto del modelo inicial.

Figura 18: Coeficientes de seguridad mínimos de los componentes del chasis optimizado



5. Conclusiones

En el estudio realizado se ha diseñado y optimizado un chasis de pulverizador hidroneumático con un depósito de 4000l, y equipado con dos ventiladores axiales de giro invertido, uno situado en la parte trasera del depósito y otro en la parte delantera.

El modelo inicial ha sido diseñado en función de las dimensiones de un apero de similares características, las cuales han sido proporcionadas por la empresa GARMELET S.L.

En el proceso de análisis y optimización se han empleado técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos. Estas técnicas han permitido obtener resultados de tensiones equivalentes de Von Mises y desplazamientos, los cuales han permitido optimizar el chasis según criterios de rigidez y resistencia.

En este proceso se han analizado seis casos de carga, los cuales corresponden a un caso de “Reposo” y a las cinco maniobras más críticas para este tipo de aperos, como son “Impulso inicial”, “Cabeceo +5°”, Cabeceo -5°”, “Balanceo lateral” y “Oleaje”.

El chasis del pulverizador hidroneumático ha sido diseñado con chapas plegadas las cuales se unen mediante soldadura, en lugar de ser diseñado con perfiles comerciales como se fabrican en la actualidad.

El diseño optimizado de chasis, no presenta problemas según criterios de rigidez y resistencia, y además reduce en un 18,50% la masa del modelo optimizado respecto del modelo inicial

6. Referencias

- Beermann, H.J. (1984) Static Analysis of Commercial Vehicle Frames –A Hybrid Finite-Elements and Analytical Method. *International Journal of Vehicle Design* 5(1–2) pp 26–52.
- Cappello, F. Ingrassia, T. Mancuso, A. et al. (2005) Methodical Redesign of a Semitrailer. 9th International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering. *Computer Aided Optimum Design in Engineering IX Book Series: Wit Transactions on the Built Environment, Volume 80*, pp. 359–369.
- Carrera, M. Castejon, L. Miralbes, R. et al. (2010) Behaviour IA Rear Underrun Protection System on Car-to-Tank Vehicle Impact Used for Fuel Transportation, “*International Journal of Heavy Vehicles Systems*” 17(3–4). pp. 199–215.
- Cross, J.V. (1991). Deposits on apple leaves from medium volume, low volume and very low volume spray applications with an axial fan sprayer. *BCPC Monograph No. 46, Air-Assisted Spraying in Crop Protection*, pp. 263-268.
- Deng, Y.D. Wang, J. Wen, Y. et al. (2011). The Static and Dynamic Characteristics Study of Aluminum Tank Semitrailer. 2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. *Manufacturing Process Technology, PTS 1–5 Book Series: Advanced Materials Research, Volume 189–193*, pp. 2233–2237.
- Doruchowski, G. Svensson, S.A. & Nordmark, L. (1997): Spray deposit within apple trees of different sizes and geometry at low, medium and high spray volumes. *IOBC/WPRS Bulletin* 19 (4), pp. 289-294.
- Herrington, P.J. Mapother, H.R. & STRINGER, A. (1981): Spray retention and distribution in apple trees. *Pestic Sci.* 12 (5), pp. 515-520.
- Hoefinghoff, J. Jungk, A. Knop, W. et al. (2011). Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 59(2), pp.689–691.
- Karaoglu, C. & Kuralay, N.S. (2002). Stress Analysis of a Truck Chassis with Riveted Joints. *Finite Elements in Analysis and Design* 38(12), pp1115–1130.
- Kodiyalam, S. & Sobieszczanski-Sobieski, J. (2001). Multidisciplinary Design Optimization - Some Formal Methods, Framework Requirements, and Application to Vehicle Design. *International Journal of Vehicles Design* 25(1–2), pp. 3–22.
- Li, M.H. Lam, F. & Lee, G. (2007). Structural Assessment of Van Trailer Floor Systems with Aluminium Frame and Wood Decking. *International Journal of Heavy Vehicles Systems* 14(2). pp 216–226.
- Miralbes, R. & Castejon, L. (2010). Fatigue Design of Tanker Semi-Trailers, *Dyna* 85(6). pp. 480–488.
- Miralbes, R. Malon, H & Castejon L. (2011) Diseño de accesorios para el acoplamiento en carretillas manipuladoras: plumines y portapalets. En: Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering. ISBN 978-84-615-4542-1
- Valladares, D., Castejon, L., Carrera, M., et al. (2009). Comparative analysis of two numerical methods of rollover simulation of a semitrailer for hydrogen transport. En *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences/Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1011–1019. San Diego, CA.
- Vidal, M. Bone, A. Garcia-Ramos, F.J. Malon, H & Villacampa, R.(2011) Desarrollo de máquina para la aplicación localizada de cebo rodenticidas en parcelas agrícolas. En: Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering. ISBN 978-84-615-4542-1