

**Análisis numérico de la rueda fanguedora tipo jaula, fabricada en la Empresa Talleres****Agropecuarios Granma (Original)****Numerical analysis of the cage-type puddling wheel, manufactured at the Talleres****Agropecuarios Granma Company (Original)**

Yoan Manuel Ramos Botello. Ingeniero Mecánico. Máster en Diseño y Fabricación Asistido por Computadora. Profesor Auxiliar. Universidad de Granma. Bayamo. Granma. Cuba.

[yramosb@udg.co.cu](mailto:yramosb@udg.co.cu) 

Yennys Cuscó Varona. Ingeniera Hidráulica. Máster en Maquinaria Agrícola. Profesor Auxiliar.

Universidad de Granma. Bayamo. Granma. Cuba. [ycuscov@udg.co.cu](mailto:ycuscov@udg.co.cu) 

René Misael Arias Hidalgo. Ingeniero Mecánico. Máster en Diseño y Fabricación Asistido por Computadora. Profesor Asistente. Universidad de Granma. Bayamo. Granma. Cuba.

[rariash@udg.co.cu](mailto:rariash@udg.co.cu) 

Recibido: 26-09-2023/Aceptado: 04-12-2023

**Resumen**

Una de las labores agrícolas que se llevan a cabo en el cultivo de arroz es el fanguero, el cual se realiza con ruedas especiales acopladas a los tractores. En la Empresa Agroindustrial de Granos Fernando Echenique, algunas de estas ruedas están presentando problemas de deformación permanente en los rayos. El presente artículo tiene como objetivo realizar un análisis numérico para determinar el estado tensional y, con esto, evaluar qué sucede desde el punto de vista estructural, en las ruedas fanguedoras objetos de estudio. Para ello, se tuvieron en cuenta las cargas a las que se ven sometidas, así como los aspectos constructivos. A partir de una simulación numérica se determinó el estado tensional de la rueda, y se pudo observar que los

valores máximos de tensiones de von Mises no sobrepasaron el límite de fluencia, dando un factor de seguridad de 2,11. Además, se realizaron cálculos de pandeo en que se obtuvieron resultados que demuestran que no ocurre pérdida de estabilidad en la rueda.

**Palabras clave:** rueda fangueadora; simulación numérica; estado tensional; deformaciones permanentes; arroz.

### **Abstract**

One of the agricultural tasks carried out in rice cultivation is puddling, which is done with special wheels attached to tractors. At the Fernando Echenique Agroindustrial Grain Company, some of these wheels are presenting permanent deformation problems in the spokes. The purpose of this article is to carry out a numerical analysis to determine the stress state and, with this, to evaluate what is happening from the structural point of view, in the forged wheels under study. For this purpose, the loads to which they are subjected, as well as the constructive aspects, were taken into account. From a numerical simulation, the stress state of the wheel was determined, and it was observed that the maximum values of von Mises stresses did not exceed the creep limit, giving a safety factor of 2.11. In addition, buckling calculations were performed and results were obtained showing that there is no loss of stability in the wheel.

**Keywords:** mud wheel; numerical simulation; stress state; permanent deformations; rice.

### **Introducción**

El arroz es un cultivo antiguo y ocupa el segundo lugar a nivel mundial, después del trigo, en superficie cosechada, y se considera su importancia como cultivo alimenticio pues proporciona más calorías por hectárea que cualquier otro cultivo de cereales. Constituye el alimento básico de cerca del 50 % de la población mundial, que es producido y consumido mayormente en Asia; se

siembra con fines comerciales en más de 100 países (Fonseca & Quesada, 2023; González et al., 2023).

Este cereal es el alimento más común en la dieta de los cubanos y Granma, la provincia más productora de este en el país. La demanda anual en Cuba es de alrededor de las 700 mil toneladas y un índice de consumo promedio de más de 70 kg por persona al año; además, este cultivo constituye el máximo consumidor de agua del país, con el 28% del total destinado a los diferentes usos ( Domínguez et al., 2019; Céspedes, 2022).

En la actualidad predomina la producción especializada, la cual exige un alto grado de mecanización, condicionada por las diferentes tecnologías de siembra que se utilizan y las extensiones que se destinan para su explotación (Domínguez et al., 2019; Smiderle et al., 2022). Una de las labores agrícolas realizadas es el fanguero, para lo cual se utilizan ruedas fanguedoras como implemento agrícola. Estas trabajan acopladas a tractores de potencia media en sustitución de las ruedas traseras y, según Paneque et al. (2009), tienen como función:

alzar y revolver la tierra con el agua, en el suelo anegado; de modo que facilite la formación de una capa impermeable a fin de reducir las pérdidas de agua por infiltración durante el período de inundación, crear condiciones físico-químicas y biológicas favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz, distribuir la materia orgánica y hacerla penetrar en la capa inferior del lodo, destruir las malezas e incorporarla al suelo y hacer más asimilables los nutrientes del suelo (p.8).

En la Empresa Talleres Agropecuarios Granma se fabrica este tipo de ruedas (anexo 1), el cual es utilizado en diferentes empresas dedicadas al cultivo del arroz en la provincia Grama. La Empresa Agroindustrial de Granos Fernando Echenique es una de las que lo utiliza. Allí se reporta que algunas de estas ruedas fanguedoras han presentado deformaciones permanentes en

alguno de sus rayos, luego de un tiempo de servicio. Dichas deformaciones impiden que cumplan su función de servicio, lo cual atrasa las labores agrícolas. De acuerdo con lo antes planteado, el artículo tiene como objetivo realizar un análisis numérico para determinar el estado tensional y, con esto, evaluar qué sucede desde el punto de vista estructural, en las ruedas fangueadoras objeto de estudio.

### **Materiales y métodos**

Se realiza un estudio estático lineal y otro para determinar si existe el peligro de una falla por pandeo, para ambos se tiene en cuenta las mismas condiciones de simulación.

- *Simplificaciones en el modelo*

En una simulación numérica del modelo a calcular depende en gran medida la exactitud de los resultados, por tal motivo se le debe prestar especial atención a las posibles simplificaciones que se le puedan hacer a dicho modelo (Ramos et al., 2022; Rodríguez, 2023). Por tal motivo, para los cálculos se partió de la minuciosa medición de cada detalle de las piezas que conforman la rueda objeto de estudio. El principal problema en que se basa la investigación, es que, transcurrido un tiempo de explotación, los rayos de algunas ruedas empiezan a sufrir deformaciones permanentes que impiden su buen funcionamiento.

Para ello, se modeló completamente dicha rueda y se realizó un análisis de cada componente, para determinar cuál de las piezas que componen el ensamble tiene una conexión directa con los rayos. Con el propósito de simplificar el modelo a calcular, el cálculo se basó únicamente en los rayos y elementos que están conectados a estos directamente (anexo 2), lo cual supone peores condiciones para el modelo a calcular que a las que se ve sometido el diseño original, sin comprometer la calidad de los resultados y reduciendo el tiempo de cálculo.

- *Propiedades mecánicas de los materiales*

Todas las piezas que componen la rueda fangueadora están hechas de acero estructural ASTM A36. En la tabla 1 se muestra las propiedades mecánicas de este material.

**Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
$E$	Módulo elástico	200 GPa
$\sigma_E$	Límite elástico	250 MPa
$\sigma_T$	Límite de rotura a tracción	400 MPa
$\mu$	Coefficiente de Poisson	0,26

Fuente: MatWeb, 2022.

- *Mallado del modelo*

Para el mallado del modelo se escogió un elemento finito sólido tetraédrico de 10 nodos con tres grados de libertad por nodo y un tamaño de elementos de 4 mm. Una vez mallado el modelo, se obtuvo un total de 22 879 nodos con 9 984 elementos. Para comprobar la calidad de la malla y con esto la de los resultados, se utilizó el método adaptativo p, el cual utiliza un orden de elemento progresivamente superior.

- *Cargas y restricciones*

Para el cálculo se supone que en las ruedas objeto de estudio estarán actuando la fuerza del peso del tractor y las de su propio peso, así como el par de tiro que actúa en las ruedas motrices. Una condición desfavorable para los rayos de la rueda es cuando al girarla, uno de los rayos es paralelo al sentido de la fuerza. Dicha fuerza es producto al peso del tractor y actúa en el centro de la rueda en sentido vertical. Un tractor tiene cuatro puntos de apoyo, correspondientes a las cuatro ruedas. Según plantean Paneque et al. (2009) y Morejón et al. (2017), el 70 % de su peso recae en las ruedas traseras.

Para los cálculos se tuvo en cuenta el tractor YTO x 1204 con un peso de 53,2 kN por lo que en las ruedas traseras actuará un peso de 37,2 kN. Este valor de fuerza es compartido entre las ruedas traseras, por lo que en una de estas estará actuando una fuerza de 18,6 kN. Dicho

tractor es el de mayor peso de los utilizados en la empresa para la labor agrícola estudiada. Este es capaz de desarrollar un par motor ( $T_m$ ) de 280 Nm a un régimen de giro ( $w_m$ ) de  $167,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

Para la labor agrícola desarrollada se emplea una marcha con una relación de transmisión de 80:1 (es decir, 1 vuelta de la rueda motriz por cada 80 vueltas del volante del motor). En este régimen de funcionamiento, la potencia que desarrolla el motor del tractor ( $P_m$ ) se determina según la ecuación 1

$$P_m = T_m \cdot w_m = 46\,900 \text{ W} \quad (1)$$

El par de tiro ( $T_r$ ) que llega a una rueda del tractor se puede determinar a partir de la ecuación 2.

$$T_r = \frac{P_r}{w_r} \quad (2)$$

En la mayoría de los tractores que disponen de un sistema de transmisión clásico, el rendimiento de la transmisión de la cadena de transmisión ( $n_t$ ) estará comprendido entre un 80 y 90 %. Considerar un rendimiento medio para una transmisión de un 85 %  $n_t = 0,85$  suele ser una buena aproximación para la mayoría de los casos. Teniendo en cuenta este aspecto, la potencia transmitida a las ruedas ( $P_r$ ) es determinada según la ecuación 3.

$$P_r = P_m \cdot n_t = 39\,865 \text{ W} \quad (3)$$

Por lo general, en el tipo de labor agrícola que se estudia y el tractor objeto de estudio, la relación de transmisión ( $w_m$ ) es de 80:1, por lo que el régimen de giro de la rueda motriz del tractor ( $w_r$ ) se determina tal como sigue en la siguiente ecuación:

$$w_r = \frac{w_m}{80} = 2,09 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta estos aspectos, en la ecuación 2 se tiene que  $T_r = 19\,074,16 \text{ Nm}$  siendo este el momento que se aplicará en la parte central de la rueda en la simulación. En el anexo 3 se muestra la fuerza producto del peso del tractor que recae sobre una rueda ( $W$ ) y el par

de tiro ( $T_r$ ). Para las restricciones se considera una pequeña área en la zona de contacto entre el suelo y la rueda, restringiendo el desplazamiento vertical. Además, en el centro de dicha rueda, donde esta acopla con el eje del tractor, se restringieron los desplazamientos en dirección axial y horizontal.

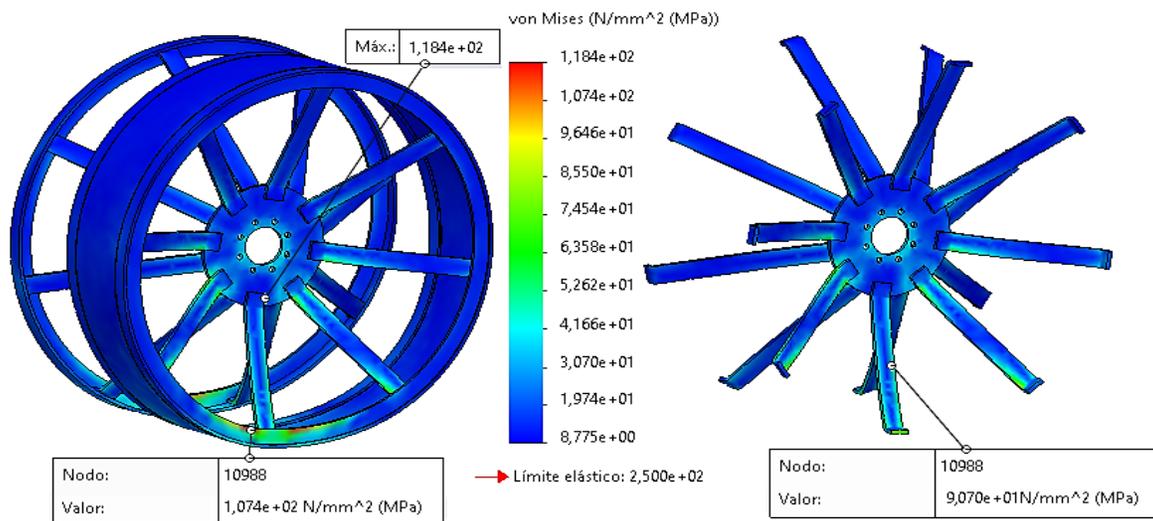
### **Análisis y discusión de los resultados**

Por la configuración geométrica de la rueda y el estado de carga actuante, los rayos siempre estarán sometidos a una sollicitación compuesta (flexión en dos direcciones y compresión). Para este tipo de sollicitación, y teniendo en cuenta que el material de cada pieza tiene un comportamiento dúctil, las tensiones a analizar son las de von Mises, las cuales caracterizan adecuadamente el comportamiento de este tipo de material.

El máximo valor de estas es de 118,4 MPa, el que no sobrepasa el límite elástico del material (figura 1). Este valor se observó en una zona de curvatura donde el rayo se une con el platillo central de la rueda, lo cual constituye un concentrador de tensiones. Independientemente de esto, el valor de tensión en esta zona no representa peligro significativo ya que en dicha zona la unión es mediante soldadura y es reforzada. Además, en consulta realizada a los especialistas, estos afirman que no ha habido problemas de rotura en la referida zona, en otras ruedas.

La deformación que ocurre en el modelo real es aproximadamente en la zona central del rayo que se encuentra paralelo a la dirección de la fuerza. Al analizar los valores de tensión en la zona del modelo de cálculo, se observó un valor máximo de tensiones de 90,70 MPa, que no representan problemas desde el punto de vista estático estructural. De cierta forma, las regiones en que se observaron las máximas tensiones coinciden con los resultados obtenidos por Mendoza et al. (2018) quienes evalúan métodos teóricos y numéricos para la determinación de las tensiones en ruedas con rayos.

Figura 1. Tensiones de von Mises en la rueda fangueadora



Fuente: Elaboración propia.

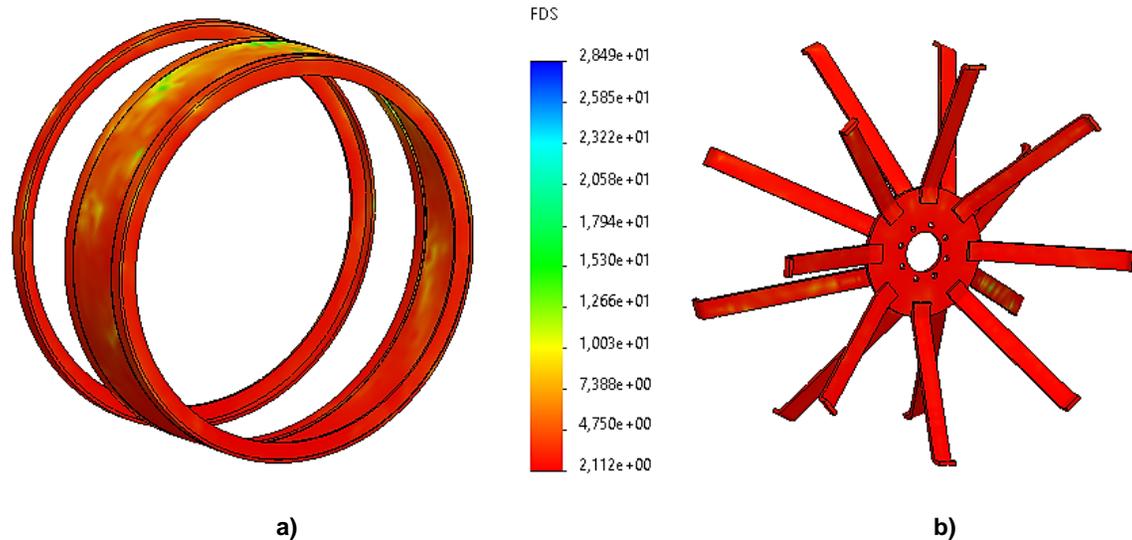
Otro lugar del modelo donde se observaron valores de tensiones próximos a los valores máximos es en la zona de unión del rayo con una pieza circular de refuerzo en el borde de la rueda, con un valor de 107,4 MPa. Con la rotación de la rueda, habrá dos instantes en el que la dirección de la fuerza producto del peso del tractor ( $W$ ) será paralela a uno de los rayos. De dichos instantes, el valor de tensión antes mencionado se produce cuando el rayo se encuentra entre el centro de la rueda y el punto de apoyo. En esta posición, el extremo inferior del rayo ejercerá una fuerza sobre la pieza circular de refuerzo, provocando ese valor de tensión. Esto sucederá con cada rayo durante la rotación de la rueda.

De forma general, se obtuvo un factor de seguridad de 2,11 que justifica por qué las deformaciones no son permanentes (figura 2). Dicho factor está dentro de lo recomendado por Mott (2006) para elementos de máquinas bajo cargas estáticas y dinámicas cuando se tiene una fianza promedio en todos los datos de diseño. En el caso del rayo donde se obtuvo el mayor valor de tensión (90,70 MPa), el factor de seguridad es de 2,75.

Se muestra para una mejor visualización, los rayos y la parte exterior de la rueda por separado. Para que las deformaciones hubiesen sido permanentes tal como sucedió en la rueda

dañada, los valores de cargas deben ser 2,11 veces superiores a las cargas actuantes. De acuerdo con esto, se puede plantear que no hay riesgo de que las deformaciones sean permanentes para las condiciones del estudio.

**Figura 2. Factor de seguridad en la rueda fangueadora. a) Modelo completo de la rueda. b) Rayos de la rueda**



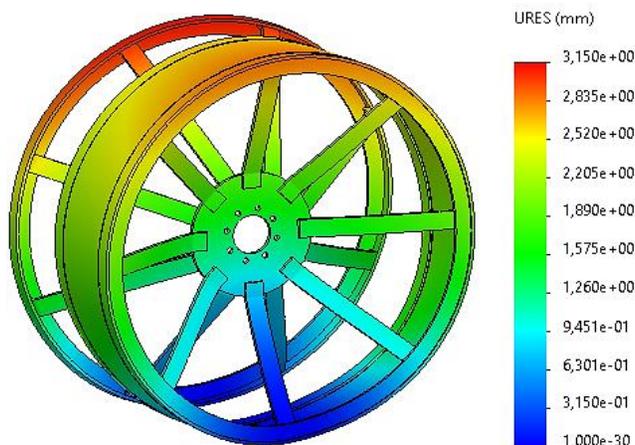
**Fuente: Elaboración propia.**

Debido a la configuración geométrica de la rueda, así como al tipo de carga aplicado, se analizaron los desplazamientos resultantes (figura 3), en que se pudo observar un valor máximo de 3,1 mm. Esto sucede en la región que queda más próxima al tractor una vez que dicha rueda es acoplada a este, situada a  $90^\circ$  de la zona donde se aplicaron las restricciones. Este desplazamiento se debe, en gran medida, al par de tiro ( $T_r$ ) y a la inclinación que tienen los rayos en relación con la vertical.

Los desplazamientos para este tipo de miembro estructural, según lo planteado por Phromjan y Suvanjumrat (2023), depende en gran medida, de la cantidad y disposición de los rayos. En el estudio realizado por los autores, se plantea que desplazamientos como los obtenidos (3,1 mm) en ruedas con características similares a la analizada, no son significativos. En la práctica, estos desplazamientos serán todavía menores, ya que el modelo utilizado para el cálculo está simplificado, lo que supone peores condiciones que a las que estará sometido el diseño real.

De acuerdo con lo anteriormente planteado, se puede decir que los desplazamientos que sufre la rueda objeto de estudio no son un problema desde el punto de vista estructural.

**Figura 3. Desplazamientos resultantes**



**Fuente:** Elaboración propia.

### *Resultados del estudio de estabilidad*

Los modelos delgados como los rayos de la rueda, tienden a deformarse bajo carga axial y fallar por pandeo. Con mucha frecuencia, la pérdida de estabilidad de este tipo de miembro estructural puede conducir a una repentina falla, por lo que debe prestarse especial atención al diseño de estas, de modo que sean capaces de soportar con seguridad las cargas aplicadas. Debido a que los rayos se encuentran sometidos a cargas axiales, además de las de flexión, es necesario comprobar si están próximos a perder la estabilidad.

A partir de la simulación numérica se obtiene el factor de carga crítica, el cual debe ser superior a uno para garantizar que no ocurra el pandeo. Al analizar el resultado del estudio, se corroboró que este mostró resultados más favorables que el de tensiones. El factor de carga crítica dio un valor de 16,28 lo que demuestra que en la rueda fangueadoras no corren peligro de pérdida de estabilidad. El valor de fuerza, a partir del cual estaría en peligro de que la rueda falle por pandeo, debe ser 16,28 veces superior a las que soporta dicha rueda, por lo que no existe el riesgo falla por pérdida de estabilidad.

## Conclusiones

1. Los resultados del estudio estructural de la rueda demuestran que esta no debe tener problemas desde el punto de vista estático estructural. Esto se corroboró con un factor de seguridad de 2,11 y con desplazamientos inferiores a 4 mm.

2. El estudio de pandeo para determinar si los rayos de dicha rueda sufren pérdida de estabilidad, dio como resultado un factor de carga crítica de 16,28, lo cual indica que no hay peligro de que ocurra este fenómeno.

3. De acuerdo con los resultados de las tensiones, los desplazamientos y la estabilidad de los rayos se puede plantear que la rueda fangueadora objeto de estudio no presenta problemas desde el punto de vista estructural bajo las cargas de trabajo impuestas.

## Referencias bibliográficas

Céspedes, L. E. (2022). Rendimiento del arroz con distintas láminas de agua en la Cooperativa “Mártires del Cauto”, Granma. *REDEL, Revista Granmense de Desarrollo Local*, 6(1), 242-254. <https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/2992>

Domínguez, C., Díaz, G., Miranda, A., Duarte, C., Rodríguez, A. & Guilherme, A. (2019). Agricultura de Conservación: consideraciones para su adopción en agroecosistemas arroceros de Pinar del Río. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(2), 51-59.

<https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1103>

Fonseca, C. L. & Quesada, R. L. (2023). Estudio de la asistencia técnica a las cosechadoras para arroz en el municipio de Yara. *REDEL, Revista Granmense de Desarrollo Local*, 7(3), 75-90. <https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/4018>

González, B., López, S. L., Bello, G. & Diéguez, A. B. (2023). Afectación de granos llenos por panícula en *Oryza sativa* L. cultivar Reforma, por altas temperaturas. *REDEL, Revista*

*Granmense de Desarrollo Local*, 7(3), 16-29.

<https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/4001>

MatWeb. (2022). *ASTM A36 Acero, placa*. MatWeb.

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>

Mendoza, A., Goytisoló, R., Cabello, J. J. & Jiménez, R. (2018). Método de cálculo para la determinación de las tensiones en volantes de rayos rectos. *DYNA*, 85(204), 98-107.

<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v85n204/0012-7353-dyna-85-204-00098.pdf>

Morejón, Y., Rodríguez, Y., González, R. & Castillo, L. R. (2017). Potencia traccional y gases emitidos por el tractor MTZ-82 en la labor de rotura. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(1), 14-22.

<http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v26n1/rcta02117.pdf>

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ta ed.). Pearson Educación.

Paneque, P., Miranda, A., Suárez, M. & Abraham, N. (2009). Costos energéticos y de explotación del cultivo del arroz en fangueo directo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 7-11.

<https://www.redalyc.org/pdf/932/93215937002.pdf>

Phromjan, J. & Suvanjumrat, C. (2023). Non-pneumatic tire with curved isolated spokes for agricultural machinery in agricultural fields: Empirical and numerical study. *Heliyon*,

9(8), e18984. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4wqBGJn9/>

Ramos, Y. M., Bosch, J. A. & Arias, R. M. (2022). Análisis numérico de la bancada de una prensa hidráulica. *REDEL, Revista Granmense de Desarrollo Local*, 6(1), 346-357.

<https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/3055>

Rodríguez, P. M. (2023). Fundición en aluminio del bloque de soporte de eje de riel lineal.

*REDEL, Revista Granmense de Desarrollo Local*, 7(1), 392-409.

<https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/3855>

Smiderle, O. J., Souza, A. d. G., Franco, J. M. & Dias, T. J. (2022). Sequential plantations of rice, edamame soybeans, and peanuts as a product of alternative and mineral fertilization in the Roraima Cerrado in Brazil. *Acta Agronómica*, 71, 162-170.

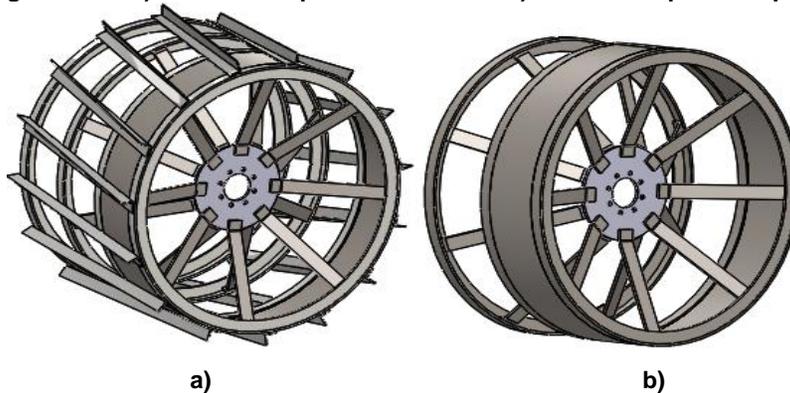
<http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v71n2/0120-2812-acag-71-02-162.pdf>

**Anexo 1. Vistas de una rueda fangueadora**



Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 2. Rueda fangueadora. A) modelo completo de la rueda. B) modelo simplificado para el cálculo**

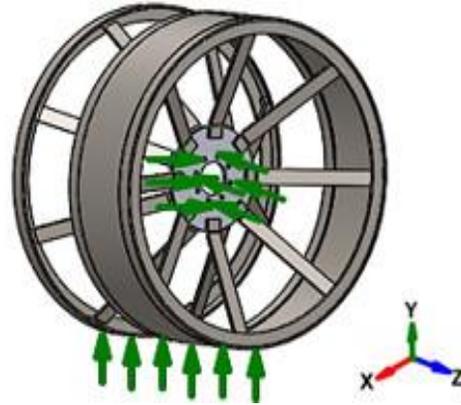


Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Cargas y restricciones a tener en cuenta en el estudio. a) Cargas. b) Restricciones



a)



b)

Fuente: elaboración propia.