

Modelamiento mecánico-térmico orientado al diseño de una cámara de compactación para densificación de biomasa residual

Mechanical-thermal modeling oriented to the design of a compaction chamber for densification of residual biomass

Huber Cabrales Contreras ¹ , Nelson Arzola de la Peña ² 

¹ Universidad Francisco de Paula Santander. Departamento de Ingeniería Mecánica
hcabralesc@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
narzola@unal.edu.co

Recibido: 7 diciembre de 2022 / **Aprobado:** 6 marzo 2023

Cómo citar: Cabrales, H., Arzola, N. Modelamiento mecánico-térmico orientado al diseño de una cámara de computación para densificación de biomasa residual. *Ingeniería y Competitividad* 2023; 25(2): e-20311808.
doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.11808>

Resumen

La transición energética requiere de esfuerzos orientados en múltiples direcciones para explotación sostenible de la mayor cantidad de fuentes renovables disponibles. De particular interés para los países situados en regiones cálidas y con condiciones de suelos favorables resulta el aprovechamiento de la biomasa residual proveniente de cultivos agrícolas. Esta fuente renovable de energía presenta el inconveniente de su baja densidad aparente cuando sale de los sistemas de procesamiento de postcosecha, siendo necesaria su densificación para lograr una densidad energética que sea atractiva en términos económicos. En este artículo se presenta el modelamiento mecánico-térmico de una camisa de compactación de briqueteadora con fines de diseño de prototipo experimental. Se plantea como variables independientes los diámetros tanto interno como externo de la cámara de compactación; y, el tiempo de calentamiento para lograr una temperatura en la biomasa que produzca la activación de la lignina. Las simulaciones se realizaron manteniendo constante la potencia eléctrica de calentamiento, la longitud de trabajo de la camisa, la presión de compactación, y los materiales, entre otros factores de tipo geométrico. Por último, se realiza optimización geométrica para la camisa de compactación sujeto a una condición de resistencia mecánica y de potencia eléctrica de calentamiento fija.



plantas extractoras con una capacidad total instalada de 24 ton/h [5]. En la actualidad la tusa es utilizada como abono para las plantaciones, siendo depositada entre las líneas de los cultivos de Palma de Aceite Africana. El transporte de la tusa a los cultivos provoca la compactación de los suelos donde se encuentran los cultivos, trayendo como consecuencia disminución en la producción de fruta de palma de aceite o corozo. Un segundo factor negativo de la deposición de la tusa entre líneas de cultivo es la obstaculización que produce para las labores de cosecha [3]. Además, la baja densidad de esta biomasa dificulta su transporte y almacenamiento, generando sobrecostos en un esquema de aprovechamiento como residuo agroindustrial.

Una posible solución a todos estos problemas es la posible utilización en la propia planta extractora de la tusa de palma de aceite africana como combustible renovable, con un costo más competitivo que los combustibles actuales, con bajas emisiones de CO₂ y SO₂ y con la garantía que se cuente con un poder calorífico similar a otros combustibles de fuentes renovables existentes en el mercado. Para que la tusa pueda ser utilizada en la producción de combustible a un costo competitivo, se requiere de procesos previos de secado y densificación [3, 5, 6]. En años recientes se ha incrementado las investigaciones sobre procesos de densificación de biomasa (PDB) [7, 8, 9, 10, 11]. Lo anterior debido a la necesidad de la industria agropecuaria de aprovechar los desechos generados de la producción de azúcar, panela, arroz y aceite de palma africana. En el proceso de densificación mediante acción mecánica se han implementado diferentes sistemas, como los de palancas, biela-manivela, rodillos y de tornillo sinfín. Cada uno de los mecanismos mencionados anteriormente utiliza un principio de densificación, los cuales son compresión o contricción, impacto y extrusión [3, 6]. El principio de prensado por impacto o extrusión utiliza un mecanismo biela-manivela.

Este tipo de mecanismo permite convertir un movimiento circular de la manivela en uno lineal del pistón, por lo tanto, puede ser implementado para grandes producciones al tener incorporado un motor, sin embargo, puede ser operado manualmente. En los equipos que utilizan este principio, la briqueta se forma en la cámara de compactación. En el principio de prensado por compresión se utiliza fuerza axial hidráulica. Debido a los bajos costos de implementación el método es seleccionado para la fabricación de prensas a escalas de laboratorio, donde prima el control y determinación de rangos de valores de las variables involucradas en el proceso sobre la producción. En el método de compresión por fuerza axial, la densificación ocurre en la cámara de compactación [1, 3, 6]. Mientras el principio de prensado por compresión o contricción utiliza prensas de rodillos para la fabricación de briquetas. Este tipo de prensa emplea un arreglo de rodillos solidarios a un eje, cuya alimentación se realiza por gravedad de manera manual o utilizando una tolva. La geometría de la briqueta depende de las muescas en la superficie de los rodillos. Las prensas de rodillos están clasificadas en función de la construcción de los rodillos como prensas de rodillos integrales o segmentados y paralelos o perpendiculares; siendo utilizadas en la fabricación de briquetas a altas temperatura y cuyo material es abrasivo, por lo tanto, su material debe presentar buen comportamiento a la abrasión y altas temperaturas [3, 6, 12].

Por otra parte, en el proceso de densificación de biomasa varios investigadores han utilizado aglutinantes, como son los carbohidratos solubles en agua, cuyo porcentaje en briquetas de las biomasa tales como cascara de arroz y bagazo de caña se encuentra entre 2,2% y 7,9% y almidón de 0,4% -3% del volumen, lo anterior con el fin de obtener briquetas con mayor durabilidad. Otros investigadores han utilizado lignina presente en la biomasa, la cual usualmente se encuentra presente en un porcentaje en masa que

2. Metodología

El proceso de simulación inicia con el cálculo de las dimensiones preliminares del espacio de compactación. De acuerdo con la investigación realizada para procesos de compactación [3, 18], la densidad de la tusa previa al proceso de densificación es de 149 kg/m^3 , para una longitud de fibras en el rango de 70 a 150 mm, típica para cultivos de entre 5 a 20 años, además se define una masa objetivo de 42 g para una briqueta. Además, la norma sueca SS187120 establece un diámetro mínimo para las briquetas de 25 mm, mientras la Norma Técnica Colombiana NTC 2160 que corresponde a briquetas combustibles para uso doméstico, define que el diámetro mínimo debe ser 30 mm. Partiendo del valor de densidad, longitud promedio de fibras, dimensiones mínimas por norma para briquetas el volumen de la cámara de compactación deberá ser de 282 cm^3 , y predefiniendo un diámetro interno tentativo de 30 mm para la cámara de compactación, de acuerdo con NTC 2060 [19], la longitud total de la cámara deberá ser $L = 400 \text{ mm}$, con lo cual se garantiza un recorrido de la cabeza del émbolo o pistón suficiente para alcanzar relaciones de compresión (R_c) que conduzcan a un nivel de densificación apreciable de la biomasa. La relación de compresión se define como la posición inicial de la cabeza el émbolo respecto al extremo superior cerrado de la cámara de compresión dividido entre esta misma posición al finalizar el proceso de densificación. La relación de compresión que se logre es importante entonces para alcanzar valores de densidad aparente de la biomasa,

con los cuales se cumpla lo establecido en las normas para briquetas de biomasa.

Para definir preliminarmente el espesor de la pared del cilindro se tiene en cuenta la longitud de la rosca de la termocupla. Se selecciona para el diseño una termocupla tipo K con longitud de rosca de 8 mm y un diámetro 5 mm; además, se sugieren al menos 2 mm de espesor adicional de la pared para evitar el contacto directo de la termocupla con la biomasa. Basado en lo anterior, el espesor preliminar para el diseño inicial de la cámara de compactación es de 10 mm.

La modelación de la geometría se realiza mediante el módulo Design Modeler de Ansys. Se parametriza el diámetro externo e interno de la camisa de compactación para una posterior optimización considerando como variable de respuesta esencial la temperatura de la superficie de la biomasa, la temperatura máxima alcanzada y la temperatura para la ubicación de la termocupla. En el estudio mecánico se consideró un comportamiento lineal elástico tanto para las piezas mecánicas como para la biomasa. La condición de apoyo definida es deslizante para la superficie inferior de la brida y los agujeros cilíndricos de sujeción. Las cargas sobre el ensamblen fueron la de trabajo del cilindro hidráulico y la gravedad. Se establecieron condiciones de contacto sin penetración para todas las superficies en contacto. Para la simulación se realiza un mallado utilizando elementos tetragonales de tamaño 5 mm para un total de 15 547 elementos en los cuatro componentes (cámara, tapón superior, pistón y la biomasa). Las condiciones de contacto incluyen la imposibilidad de penetración de una parte con relación a la otra, con un con un mallado tipo compatible. Además, se define un coeficiente de fricción de 0,15 entre las partes en acero y de 0,25

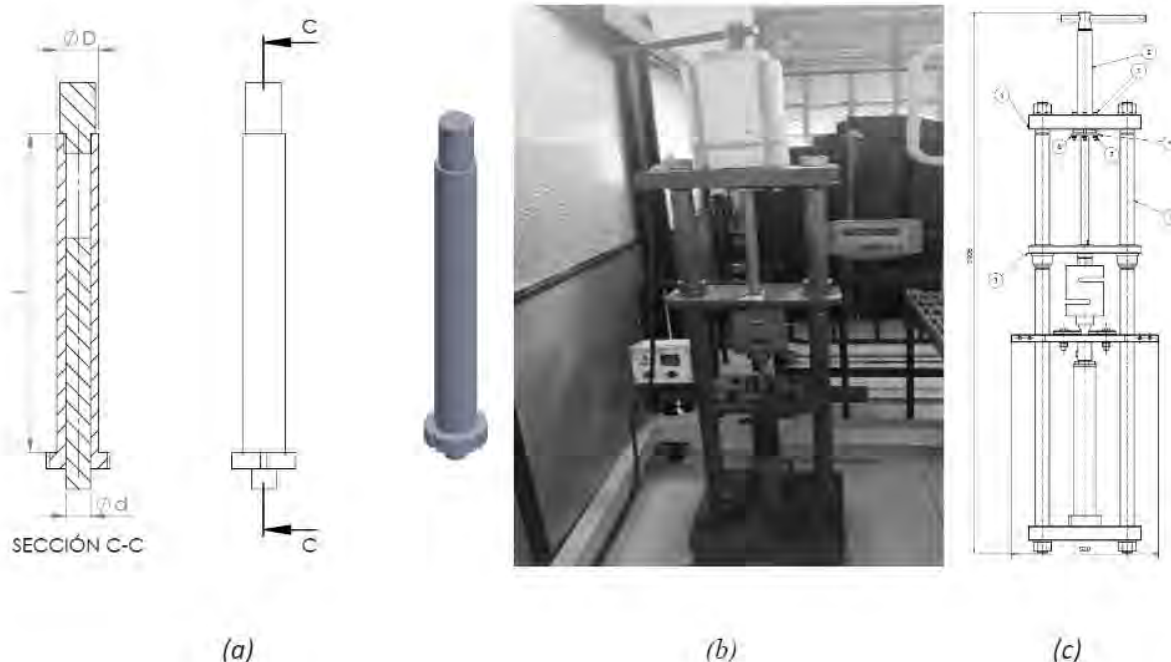


Figura 1. a) Representación de la cámara de compactación y sus dimensiones básicas; b) fotografía del primer prototipo de briqueteadora experimental. c) Prensa briquetadora para densificación de Tusa. Partes: 1. Columnas. 2. Cámara de compactación. 3. Base guía. 4. Arandela de sujeción. 5, 6 y 7. Pernos. [3].

Fuente: elaboración propia.

Se plantea un diseño de experimentos basado en simulaciones utilizando como factores independientes el diámetro interno y el externo de la camisa de compactación. El diámetro interno se varía entre 27 mm y 33 mm mientras que el diámetro externo se varía entre 45 mm y 55 mm, respectivamente. La fuerza axial hidráulica se mantuvo para todas las simulaciones igual a 78 445 N, que es la fuerza máxima que entrega el sistema hidráulico del prototipo experimental, mientras que la potencia eléctrica se mantuvo constante con valor de 1,44 kW.

En las simulaciones térmicas se considera un coeficiente de convección de calor de $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, considerando que el equipo opera en un espacio cerrado y que el exterior del cilindro está recubierto por una manta térmica. Además, se tiene en cuenta la conducción de calor a través de

la brida de sujeción a la placa de la bancada del equipo y no se consideran las pérdidas por radiación. Para el diseño de la cámara de compactación se realiza un análisis térmico transitorio utilizando el software Ansys Workbench versión R2021^a. En este estudio se utilizan mediciones obtenidas por vía experimental de la temperatura en un primer prototipo de camisa de compactación, como forma de validación de los resultados computacionales.

Finalmente se plantea una optimización para obtener una camisa de compactación con mínimo uso de material teniendo como restricción que el esfuerzo equivalente en la pared no supere el valor de esfuerzo admisible de diseño y que la potencia eléctrica se mantenga constante, lo cual conlleva a que el flujo de calor es función de las

rápido en la superficie interior de la cámara de compactación, cuando el flujo de calor se incrementa de 0,0208 a 0,0410 W/mm².

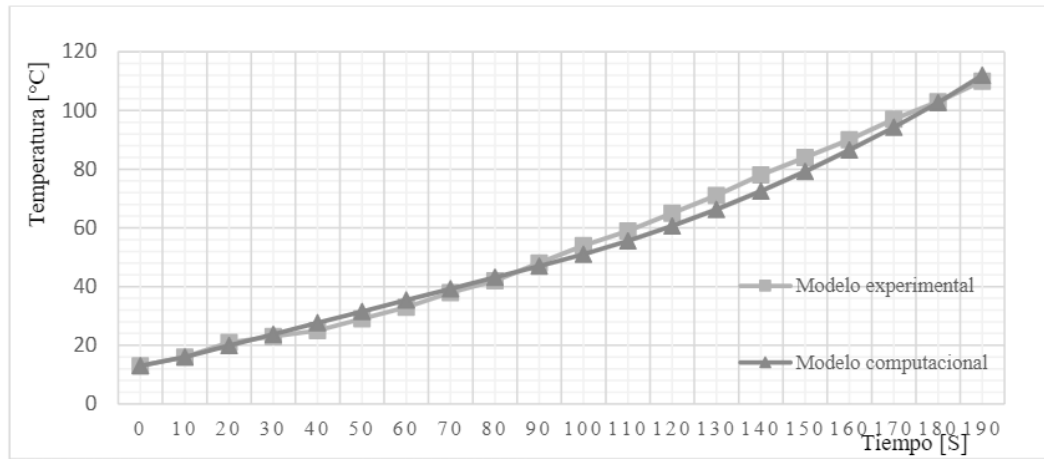


Figura 2. Curvas de incremento de temperatura obtenidas en el modelo físico experimental y mediante simulación. Fuente: autores.

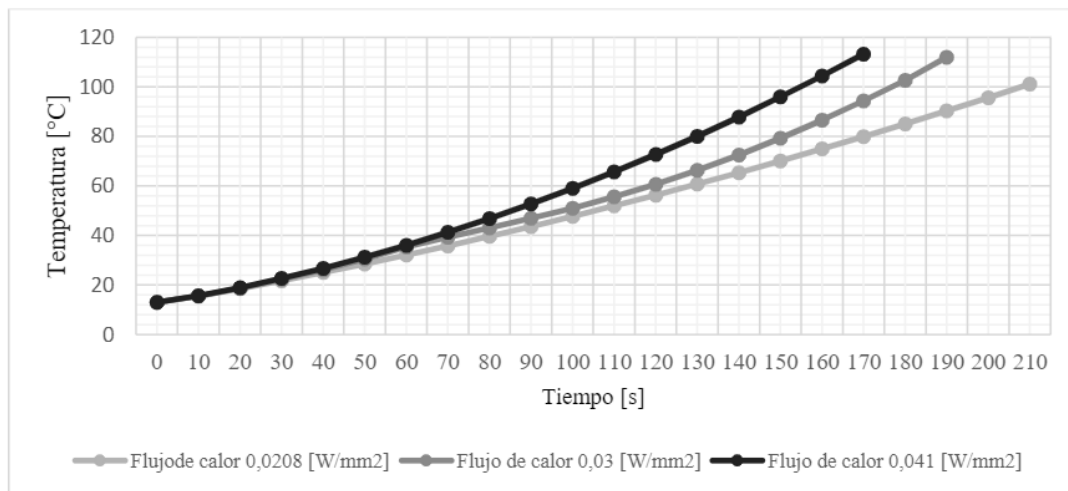


Figura 3. Comportamiento de la temperatura para diferentes flujos de calor. Fuente: autores.

En la Figura 4 se muestran los trazados del campo de temperatura para los resultados de simulaciones térmicas transitorias cuando se utiliza un flujo de calor de 0,003 W/mm², para tiempos de calentamiento de a) 110 s, b) 120 s, c) 130 s y d) 150 s respectivamente. Para estas simulaciones se consideró que la camisa se

encuentra en $t=0$ s a una temperatura homogénea de 45°C (precalentamiento) y que ya el pistón realizó completamente su recorrido de compactación. Los diámetros interno y externo considerados para este estudio fueron 30 mm y 50 mm respectivamente. Se puede apreciar como a partir de un tiempo de

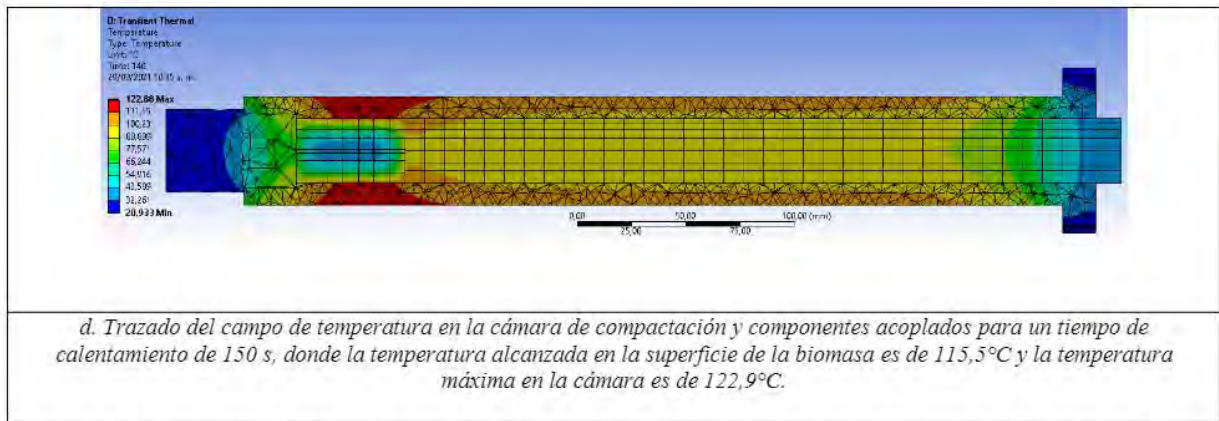
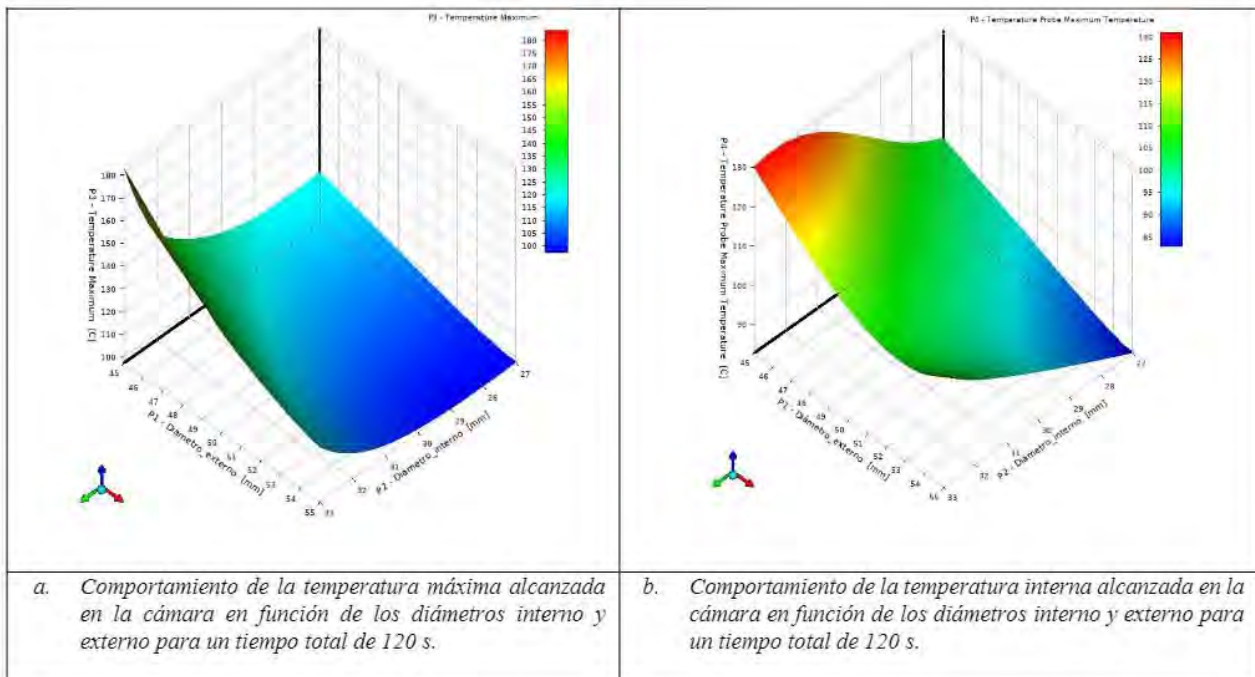


Figura 4. Comportamiento de la temperatura en el cilindro de compactación para distintos tiempos de calentamiento. Fuente: autores.

Otro resultado particularmente útil es la influencia de la geometría de la camisa de compactación (diámetros exterior e interior) en la temperatura máxima alcanzada y la temperatura en la superficie interna de la camisa en contacto con la biomasa para distintos tiempos de calentamiento. Para estas simulaciones también se consideró un precalentamiento de 45°C de la cámara de compactación y que ya el pistón realizó

completamente su recorrido de compactación. En la Figura 5 aparecen las superficies de respuesta para la temperatura máxima y la temperatura interna que alcanza la camisa de compactación en función de los diámetros exterior e interior y distintos tiempos de calentamiento final: a y b) para 120 s; c y d) para 130 s; y e y f) para 150 s, respectivamente.



presenta valores significativos de esfuerzos equivalentes.

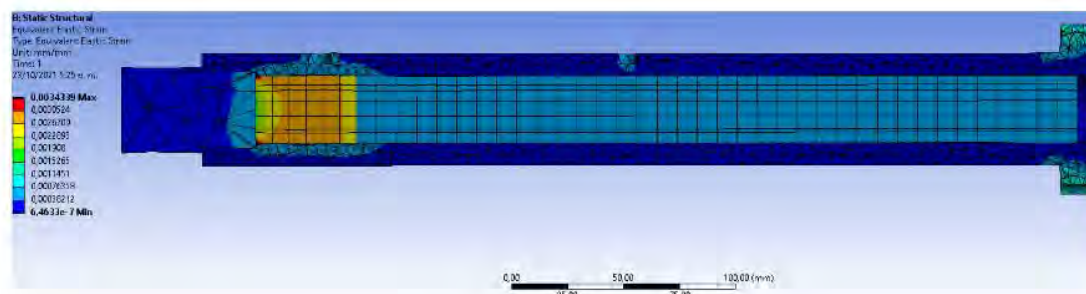


Figura 6. Deformación equivalente de los distintos componentes bajo estudio de la briqueteadora durante el proceso de densificación de la biomasa. Fuente: Autores.

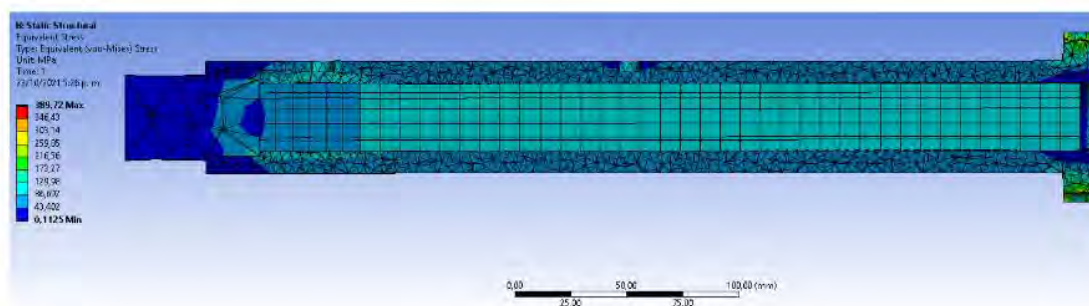


Figura 7. Esfuerzo equivalente Von Mises de los distintos componentes bajo estudio de la briqueteadora durante el proceso de densificación de la biomasa. Fuente: Autores.

En la Figura 8 se muestra la superficie de respuesta para el esfuerzo máximo equivalente en función de los diámetros externos e internos del cilindro. El espesor de pared se reduce hasta un 40% en la simulación variando entre 12 mm y 6 mm, con el fin de establecer un valor apropiado en función de los esfuerzos equivalentes actuantes, los cuales son obtenidos considerando todos los detalles geométricos funcionales necesarios, como por ejemplo el agujero roscado para la termocupla. Para espesores mayores o iguales a 10 mm de

pared el esfuerzo equivalente se encuentra por debajo de 360 MPa, mientras para espesores menores a 7 mm el esfuerzo crece de forma rápida por encima del esfuerzo permisible. En la Figura 9 se muestra la superficie de respuesta para la temperatura en la superficie de la biomasa en función de los diámetros, interno y externo, de la cámara de compactación, donde se observa que a mayor espesor de pared es menor la temperatura alcanzada de acuerdo con el planteamiento de Fourier para la transferencia de calor por

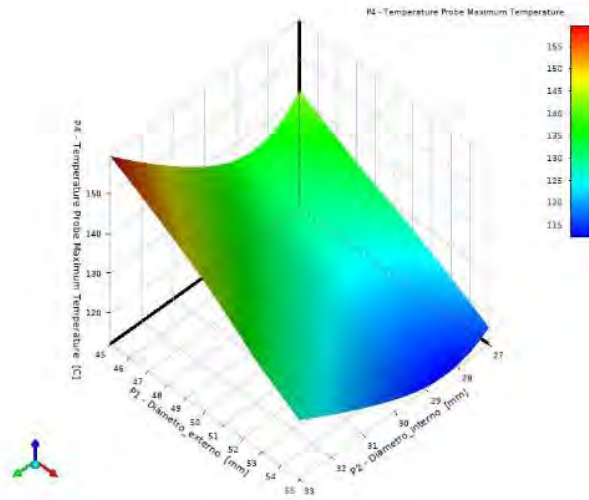
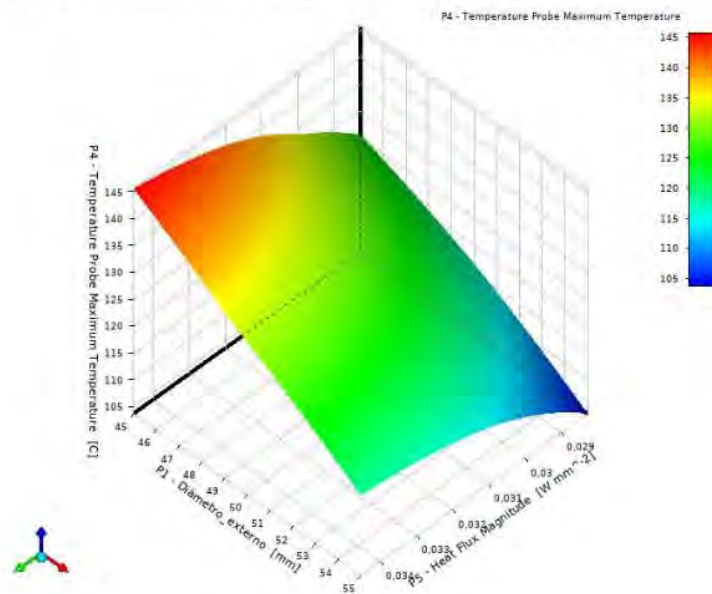


Figura 9. Comportamiento de la temperatura en la biomasa vs los diámetros de la camisa de compactación. Fuente: Autores.

En la Figura 10 se muestra la superficie de respuesta para la temperatura máxima en función del diámetro externo y el flujo de calor. La superficie de respuesta muestra su máximo valor para la temperatura de 145°C en valores bajos de espesor pared (6 mm) donde el diámetro externo es de 45 mm y el flujo de

calor es mayor, siendo su valor 0,035 W/mm². A medida que se incrementa el diámetro externo y decrece el flujo de calor, para una resistencia eléctrica instalada de potencia constante, se produce disminución en el valor de la temperatura máxima alcanzada en el cilindro.



interno, mientras que la dependencia de esta temperatura es aproximadamente lineal e inversamente proporcional con el diámetro externo de la cámara de compactación.

Se selecciona una camisa de compactación con dimensiones principales $D=46$ mm, $d=32$ mm y $L=400$ mm, con la cual se cumplen las restricciones de diseño establecidas, como son la meta de relación de compresión necesaria, las dimensiones de la probeta según los estándares existentes y la resistencia mecánica suficiente para el diseño ($332 \text{ MPa} < [\sigma]=400 \text{ MPa}$). Para esta geometría y la potencia de calentamiento fija instalada, se logra una temperatura en la

superficie de la briqueta de 118°C para un tiempo total de calentamiento de la biomasa de 130 s.

La metodología seguida en el actual trabajo sirve como una guía de diseño para cámaras de compactación de biomasa, mostrando las simulaciones basadas en el método de los elementos finitos donde son necesarias, las variables independiente influyentes que participan y las respuestas que funcionan como especificaciones técnicas, que caracterizan el desempeño de este subsistema perteneciente a los equipos para densificación de biomasa de esta categoría.

5. Referencias

- [1] H. P. García, Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho, Bogotá: Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [2] P. V. Sowndharya Ganesan, «Production of sustainable biomass briquettes from de-oiled cashewnut Shell,» *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [3] H. Cabrales, Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa), Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [4] Fedepalma, «Sispa,» Fedepalma, [En línea]. Available: www.sispaweb.fedepalma.org/SitePages/Censo.aspx. [Último acceso: 28 julio 2021].
- [5] A. A. y. J. A. G. N. N. E. Ramírez Contreras, «Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia,» *Revista Palmas*, vol. 36, n° 4, pp. 41-54, 2015.
- [6] N. A. O. A. Huber Cabrales, «The effects of moisture content, fiber length and compaction time on African oil palm empty fruit bunches briquette quality parameters,» *Heliyon*, vol. 6, n° 12, 2020.
- [7] J. L. H. S. Nibal T. Albashabsheh, «Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with densification: Literature review,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 144, 2021.
- [8] F. S. A. P. L. V. G. San Miguel, «One-step torrefaction and densification of woody and herbaceous biomass feedstocks,» *Renewable Energy*, pp. 825-840, 2022.
- [9] B. V. B. N. W. S. Robert Mikulandrić, «Modelling of thermal processes during extrusion based densification of agricultural biomass residues,» *Applied Energy*, vol. 184, pp. 1316-1331, 2016.
- [10] G. H. J. B. Stefan Frodeson, «Effects of moisture content during densification of biomass pellets, focusing on polysaccharide