

Modelo numérico del corte base de la caña de azúcar



Numerical Model for Sugarcane Base Cutting

CU-ID: 2177/v31n2e02

Rigoberto Antonio Pérez-Reyes^{I*}, Lázaro Antonio Daquinta-Gradaille^I,
 Jorge Douglas Bonilla-Rocha^I, Carlos Alexander Recarey-Morfa^{II},
 Anibal Sánchez-Numa^I, Julio Eustaquio Gómez-Bravo^I

^IUniversidad de Ciego de Ávila, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba

^{II}Universidad Central de Las Villas, Facultad de Construcciones, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolla un modelo numérico para el corte base de la caña de azúcar a partir de datos experimentales obtenidos en cinco variedades de caña evaluadas en los laboratorios de Física y Resistencia de Materiales de la Universidad de Ciego de Ávila. Se analizó el desempeño de los segmentos de corte base BONEM y BUSSOLA con relación a parámetros del proceso como las tensiones, la fuerza de corte y el momento de corte. Se demostró que los segmentos de corte BUSSOLA poseen un mejor desempeño que los segmentos BONEM para cada una de las variedades ensayadas. En el análisis de un modelo con magnitudes promedios de las propiedades físico-mecánicas de los tallos de las variedades examinadas se obtuvieron los gráficos del comportamiento de las fuerzas cortantes en el tiempo y los gráficos de Fuerza - Desplazamiento para ambos segmentos. Los principales resultados muestran que no existen diferencias representativas con relación a la magnitud de las tensiones generadas en los tallos de cada una de las variedades de caña de azúcar cuando se cortan estas con los diferentes segmentos de corte y las magnitudes de fuerza de corte y momento de corte generadas con el empleo de los segmentos BONEM son significativamente superiores a las que se generan con los segmentos BUSSOLA

Palabras clave: Método de elemento finito, cosecha mecanizada de la caña de azúcar, segmentos de corte base.

ABSTRACT: In the present work, a numerical model is developed for sugarcane base cutting from experimental data obtained in five varieties of cane evaluated in the Physics and Resistance of Materials Laboratories of Ciego de Ávila University. The performance of the BONEM and BUSSOLA base-cutter blade was analyzed in relation to process parameters such as stresses, cutting force and cutting moment. It was shown that BUSSOLA cutter blade had a better performance than BONEM for each of the varieties tested. In the analysis of a model with average magnitudes of the physical-mechanical properties of the stems of the varieties examined, the behavior graphs of the cutting forces over time and the Force - Displacement graphs for both segments were obtained. The main results show that there are no representative differences in relation to the magnitude of the stresses generated in the stems of each of the sugarcane varieties when they are cut with the different cutter blades. In addition, it was shown that the magnitudes of cutting force and cutting moment generated with the use of BONEM cutter-blade are significantly higher than those generated with BUSSOLA cutter-blade.

Keywords: Finite element method, sugarcane mechanized harvest, base-cutter blades.

*Author for correspondence: Rigoberto Antonio Pérez-Reyes, e-mail: rigobertopr@unica.cu

Recibido: 06/01/2021

Aceptado: 14/03/2022

INTRODUCCIÓN

Las cosechadoras actuales utilizan mecanismo de corte base con disco giratorio que El corte base es una de las funciones principales de la cosechadora de caña de azúcar, es la operación más delicada para la incorporación de tierra y cepas, la destrucción del cultivo y las pérdidas de caña dejada en el campo por la excesiva altura del tocón, de su eficiencia depende en gran medida la cantidad y calidad de la caña que va al ingenio. Todo lo que sea material contaminante (suelo y partes de la planta principalmente) que entre en el sistema, reduce la capacidad de molienda y aumenta las pérdidas de sacarosa en las etapas de producción de azúcar (Abadia, 2018; Valeiro y Biaggi, 2019).

realizan el corte sin apoyo y por impacto de los tallos de caña de azúcar, generalmente consta de dos discos giratorios con rotación contraria que realizan el corte con segmentos de corte (cuchillas) reemplazables en cada disco instalados en su periferia, que actúan con un 60% de su área de contacto cortando la caña contra el suelo (Ma et al., 2014). Para completar el corte, la fuerza ejercida en las periferias del punto cortante debe ser mayor que la fuerza de resistencia total. La mayoría de los estudios pertinentes Otegui et al. (1995); Kroes (1997); Mello & Harris (2003); Toledo et al. (2013) investigan el corte base de un solo tallo, considerando que el estudio investiga la calidad del corte base de un plantón entero (cepa de múltiples tallos).

Handong et al. (2011) realizan la simulación del proceso de corte de la caña de azúcar basado en ANSYS / LS-DYNA. Se construyen diferentes modelos de elementos finitos con diferentes ángulos de herramienta y velocidades de corte. El resultado de la simulación revela que el efecto de la velocidad de corte sobre el consumo de energía de la fuerza de corte y el esfuerzo máximo de la herramienta es significativo, al igual que el efecto de diferentes ángulos de la herramienta sobre la fuerza de corte.

Hu et al. (2016) simulan el movimiento del cortador base de la caña de azúcar mediante un modelo de elemento finito (MEF) con el objetivo de obtener los nomogramas de la tensión en la caña, el desplazamiento del cortador base y la curva de fuerza cortante. Se evalúan parámetros geométricos y cinemáticos del cortador base, como el ángulo del filo de las cuchillas, el ángulo de inclinación y la velocidad de rotación del disco de corte, así como la velocidad de avance de la máquina. El valor de esta investigación radica en que ofrece la posibilidad de mejorar la calidad cortante del cortador base y reducir la magnitud de fuerza de corte.

Rezende (2020) ejecuta una simulación del corte basal de un tallo de caña de azúcar considerando el material anisótropo y heterogéneo (corteza y núcleo). En el estudio son utilizadas las propiedades mecánicas

de la caña RB966928, por ser la variedad más común en el sureste de Brasil. Como resultados fundamentales se obtuvo que las tensiones máximas obtenidas en el corte de la caña fueron de 24,11 MPa en la corteza y 10,29 MPa en el núcleo. Según el autor, estas magnitudes difieren en un 30% de los valores promedios encontrados en la literatura publicada y fue el ángulo de corte el factor que más influyó en la magnitud de las tensiones.

Qiu et al. (2021) utilizan simulaciones numéricas de elemento finito y un diseño experimental para investigar las influencias de los factores internos y externos en la calidad del corte. El modelo numérico es validado mediante pruebas experimentales de corte y basado en un análisis teórico. Concluyen que el ángulo de bisel de corte juega un papel significativo en afectar la fuerza de corte, mientras que la velocidad de avance de la máquina (dentro del rango 0,4 a 0,6 m/s) y la velocidad de rotación (dentro del rango 650 a 750 r/min) no tienen influencia apreciable en la fuerza de corte. Este estudio proporciona información básica para el diseño de un cortador de base para la cosecha de caña de azúcar.

El objetivo de la presente investigación es desarrollar un modelo numérico para el corte base de la caña de azúcar a partir de datos experimentales obtenidos en cinco variedades de caña representativa de la provincia de Ciego de Ávila para el análisis del desempeño de los segmentos de corte base BONEM y BUSSOLA con relación a parámetros del proceso como las tensiones, la fuerza de corte y el momento de corte. Se realiza la validación del ambiente de simulación a partir de un ensayo de resistencia al corte y se estudia el corte base de la caña de azúcar, consistente en la simulación de las condiciones de trabajo con los dos tipos de cuchillas seleccionadas para el estudio, con el propósito de valorar la respuesta del modelo en cuanto a los parámetros de operación fundamentales que caracterizan al proceso de corte base encontrados en la literatura y predecir el desempeño de los dos segmentos de corte bajo determinadas condiciones de explotación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estudiar el desempeño de los segmentos de corte base se empleó la simulación numérica, usando la modelación experimental como herramienta de calibración a partir de datos obtenidos en ensayos reales del proceso de corte base. Se utilizó el programa computacional Abaqus (2014) de la compañía Hibbit, Karlsson & Sorencen, Inc., valioso programa de propósito general que se encuentra sobre la base del Método de Elemento Finito (MEF). Específicamente se elige la versión de ABAQUS/Explicit, diseñada para problemas dinámicos. La dinámica explícita es una técnica matemática para integrar las ecuaciones del movimiento a través del

tiempo, estas ecuaciones de equilibrio dinámico se escriben por conveniencia con las fuerzas inerciales aisladas de las otras fuerzas y son completamente generales (Abaqus 2014). La ecuación (1) describe esta relación.

$$M\ddot{u} = P - I \quad (1)$$

donde: M es la masa concentrada, \ddot{u} la aceleración nodal, P es el vector de carga externa e I es el vector de carga interna.

El método de integración dinámica explícita combina la regla de integración dinámica explícita con elementos que utilizan una matriz de masa concentrada. Esta matriz M permite que el programa calcule las aceleraciones nodales fácilmente en cualquier momento de tiempo dado t , utilizando la siguiente expresión:

$$\ddot{u}(t) = [M^{-1} \cdot (P - I)](t) \quad (2)$$

El factor decisivo al elegir ABAQUS/Explicit suele ser la fluidez de la solución cuando existen discontinuidades significativas en la misma como: posibles fuentes de discontinuidad; impacto; degradación o falla del material. Ha sido diseñado para resolver problemas dinámicos altamente discontinuos y de alta velocidad de manera eficiente y tiene un algoritmo de contacto muy robusto que no agrega grados de libertad adicionales al modelo (Abaqus (2014)).

Construcción del modelo para la validación del ambiente de simulación. Se construyó un modelo numérico que reproduce el ensayo experimental de resistencia al corte para la validación del ambiente de simulación. Se realizó la reproducción numérica en la zona del entrenudo de la variedad C1051-73 con 27,62 mm de diámetro promedio y una energía promedio absorbida en la prueba de 28,5 J durante el corte con la cuchilla BONEM (Figura 1). Se realizaron varias corridas numéricas-experimentales sobre las mismas condiciones establecidas en el estudio hasta lograr la convergencia de la malla, analizando las

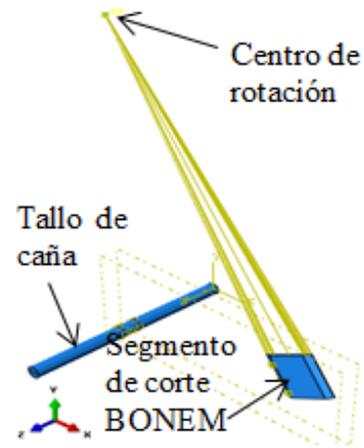


FIGURA 1. Reproducción numérica del ensayo de resistencia al corte en la zona del entrenudo de la variedad C120-78.

magnitudes de energía interna alcanzadas durante la experimentación.

En la Figura 2, se observa que para garantizar la confiabilidad de los resultados es necesario considerar un mallado de 29 289 elementos, con 3 564 elementos en la cuchilla y 25 725 elementos en el tallo.

Los resultados de la corrida numérica aparecen reflejados en la Tabla 1, donde se observa que la magnitud del error obtenido entre el ensayo experimental y el modelo numérico es inferior al 10%, lo que representa que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente las condiciones reales de experimentación.

Modelación del corte base de los tallos de caña de azúcar. El estudio de convergencia de la malla para la simulación de los modelos numéricos del corte base de la caña de azúcar se aprecia en la Figura 3. En la misma se observa que para garantizar la confiabilidad de los resultados es necesario considerar una mallado de 42 350 elementos, con 28 350 elementos en la cuchilla y 14 000 elementos en el tallo.

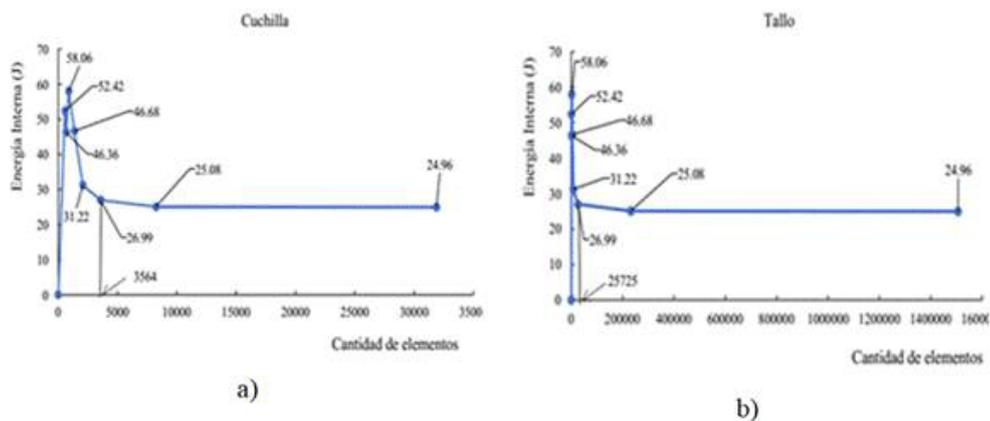


FIGURA 2. Estudio de convergencia de la malla para la validación del modelo numérico del ensayo de energía al corte: a) Para la cuchilla; b) Para el tallo.

TABLA 1. Resultados de la validación del ensayo de Energía al corte

Variedad de caña	Ensayo experimental	Modelo numérico	Error (%)
	Energía al corte (J)	Energía al corte (J)	
C120-78	28,50	26,99	5,59

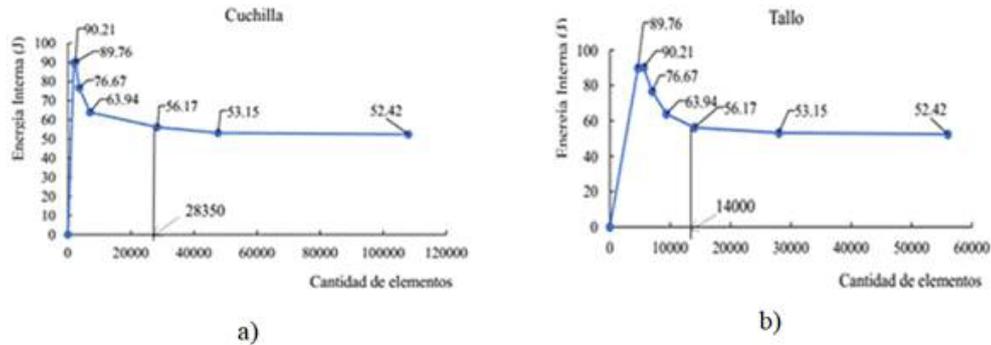


FIGURA 3. Estudio de convergencia de la malla para el modelo de corte base:
a) Para la cuchilla; b) Para el tallo.

Para modelar el comportamiento del material de las cuchillas de corte base (acero) se tienen en cuenta los trabajos de [Domínguez et al. \(2012\)](#); [Hu et al. \(2016\)](#) y [Ma et al. \(2016\)](#), con criterio de rotura de Von Mises. Los resultados obtenidos en los trabajos de estos investigadores evidencian gran correspondencia entre la experimentación y simulación numérica, hechos que validan la utilización de dicho criterio para modelar este material. Para aplicar este comportamiento se utiliza el comando PLASTIC del código ABAQUS.

Diversos autores han estudiado las propiedades mecánicas a tensión de fibras vegetales [Cortés \(2009\)](#); [Silva et al. \(2009\)](#) y [Kestur et al. \(2012\)](#), las que se requieren para implementar un modelo numérico. En el caso de la caña de azúcar, como material biológico, tiene una estructura compleja, compuesta por la corteza y el núcleo que es un material viscoelástico anisotrópico no lineal y heterogéneo.

El comportamiento de materiales viscoelásticos varía en una gama grande, estos materiales representan la unidad del comportamiento elástico, expresado por la ley de Hooke y los fluidos viscosos, que se expresan por la ley de Newton. Se debe buscar una solución para reproducir dos comportamientos; si se intenta modelar utilizando la teoría de los materiales viscoelásticos, se tendría que encontrar un modelo para cada tipo de ensayo, lo que entraría en contradicción con el objetivo que se persigue de determinar un comportamiento capaz de simular diferentes sistemas de carga. Por consiguiente, el modelo de comportamiento mecánico manifestado a través del módulo de elasticidad deberá tener parámetros que le confieran flexibilidad suficiente para reproducir el comportamiento de las curvas experimentales obtenidas ([Iznaga & Braunbeck, 2011](#)).

Sin embargo, teniendo en cuenta las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas de las diversas variedades de caña de azúcar y que los valores de falla axial a cortante son bajos, se simplifica el modelo numérico del tallo de la caña de azúcar y se considera como un material isotrópico, con un modelo elasto-plástico bilineal con endurecimiento cinemático ([Saldaña et al., 2013](#); [Dongdong y Jun, 2016](#); [Hu et al., 2016](#); [Yuan et al., 2017](#)).

El modelo cinemático-plástico es como sigue:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C_p} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \left(\sigma_0 + \beta \epsilon_{eff}^p \frac{E_t E}{E - E_t} \right) \quad (3)$$

donde: σ_y - Límite de fluencia; $\dot{\epsilon}$ - Rapidez de la deformación; C y P - Son los símbolos de Cowper y Simonds; σ_0 - Límite elástico; $\beta = 0$ para endurecimiento cinemático y 1 para endurecimiento isotrópico; ϵ_{eff}^p - Deformación plástica efectiva; E - Módulo de elasticidad; E_t - Módulo tangente.

Para el modelo se desprecia el efecto de endurecimiento por la rapidez de la deformación, porque es la aproximación más simple de un modelo elasto-plástico y es una aproximación más real al material. Por lo que, la expresión (3) resulta en:

$$\sigma_y = \sigma_0 \quad (4)$$

Se ejecutó la definición de las propiedades del material de la caña y de la cuchilla deformable en el módulo PROPERTY-EDIT MATERIAL, con un material de densidad uniforme y un comportamiento elasto-plástico para la caña y un material de densidad uniforme y un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento isotrópico para la cuchilla. Las propiedades de la cuchilla y el cortador base rígidos se definen en el módulo PROPERTY-SPECIAL-INERTIA-CREATE para el punto de referencia (centro de rotación) creado en el módulo PART-

TOLLS-REFERENT POINT-CREATE. En la [Tabla 2](#), según [Pérez \(2022\)](#), se aprecian las propiedades de los materiales utilizados en la modelación con características físicas y propiedades mecánicas promedios de las cinco variedades estudiadas, para el análisis de la influencia que ejercen los parámetros geométricos y cinemáticos en el proceso de corte.

Modelación de la geometría. Se ha decidido adoptar la modelación tridimensional de las probetas (3D), gracias a las bondades en cuanto a representación geométrica que brinda ABAQUS/CAE, siendo consecuente con la configuración de las mismas en el ensayo experimental. Los modelos constitutivos desarrollados (cuchilla única y cortador base) están constituidos por:

- Un tallo de caña de azúcar de 28 mm de diámetro y 500 mm de longitud con una cuchilla BONEM de acero de herramienta de 270 mm de longitud, 90 mm de ancho, 6 mm de espesor y un ángulo del filo de 25° ([Figura 4a](#)).
- Un tallo de caña de azúcar de 28 mm de diámetro y 500 mm de longitud con una cuchilla BUSSOLA de acero de herramienta de 270 mm de longitud, 90 mm de ancho, 6 mm de espesor y un ángulo del filo de 15° ([Figura 4c](#)).
- Un disco cortador base circular hueco de acero estructural con 533,4 mm (21 pulgadas) de diámetro exterior y 203,2 mm (8 pulgadas) de diámetro interior; 8 mm de espesor; cinco cuchillas BONEM unidas a este, distribuidas de manera uniforme con un ángulo de 72° entre ellas y tallos de caña de azúcar de 28 mm de diámetro y 500 mm de longitud ([Figura 4b](#)).
- Un disco cortador base circular hueco de acero estructural con 533,4 mm (21 pulgadas) de diámetro exterior y 203,2 mm (8 pulgadas) de diámetro interior 8 mm de espesor; cinco cuchillas BUSSOLA unidas a este, distribuidas de manera uniforme con un ángulo de 72° entre ellas y tallos de caña de azúcar de 28 mm de diámetro y 500 mm de longitud ([Figura 4d](#)).

Para el desarrollo de los modelos numéricos se tuvo en cuenta la geometría de contacto entre los cuerpos que interactúan (tallo de la caña y segmento de corte base), que en este caso se ajusta a una de las

geometrías ampliamente estudiadas por la Mecánica de Contacto: Cilindro-Plano (CP). Para la simulación del contacto entre los cuerpos en ABAQUS fue necesario definir las superficies maestras (*master*) y esclava (*slave*), las que se delimitan apenas en la región donde el contacto va de hecho a ocurrir, para que no sea exigido tiempo computacional innecesario. En este caso, se establecen el filo de los segmentos de corte como la superficie maestra y la zona de contacto del tallo como la superficie esclava, precisando las propiedades del contacto como aparece en la [Tabla 3](#). Se selecciona el método de discretización superficie a superficie (*Surface-to-Surface*), porque presenta mejores resultados que el método nodo a superficie (*Node-to-Surface*), que puede llegar a producir errores máximos de hasta un 31% ([Abaqus, 2014](#)).

Para la formulación del contacto tangencial se utiliza el método de penalidad (*Penalty*), pues el método de Lagrange aumentado no está disponible en ABAQUS/Explicit. Para la formulación del contacto normal se utiliza el método de contacto rígido (*Hard contact*), con entrada en vigor de las restricciones que permita la separación después del contacto. ([Cruzado et al., 2013](#)).

Modelación de las condiciones de frontera de los cuerpos y las cargas

El tallo de la caña de azúcar: este elemento se considera empotrado en su base, con restricción de movimiento en todas las direcciones ([Figura 5a](#)). Se le aplica una carga de empuje en la parte superior de magnitud igual a 2 kN ([Figura 5c](#)) en la dirección longitudinal (Z), simulando el efecto del rodillo deflector ([Figura 5b](#)).

Elementos rígidos: tanto en el modelo de cuchilla única como en el del cortador base se crea un punto de referencia (centro de rotación) al que se le asigna los valores de la inercia de los cuerpos en movimiento. A la cuchilla única se le restringen todos los desplazamientos, excepto la rotación en eje vertical (Y), alrededor del que se asigna un movimiento rotacional de magnitudes iguales a 65 rad/s en cada uno de los casos. De igual modo se procede con el cortador base, con la diferencia que, además de la rotación en el eje vertical (Y), se deja libre también el movimiento lineal en sentido longitudinal (Z), para simular la traslación de la máquina durante el corte con un valor de 1,39 m/s.

TABLA 2. Propiedades de los materiales utilizados en la modelación numérica con características físicas y propiedades mecánicas promedios

Propiedad	Caña	Acero de los Segmentos de corte	Acero del disco cortador base
Masa específica (g/cm ³)	$\rho = 1,13$	$\rho = 7,85$	$\rho = 7,85$
Módulo de elasticidad (MPa)	$E = 17,357$	$E = 2,1 \times 10^5$	$E = 2 \times 10^5$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,34$	$\nu = 0,28$	$\nu = 0,3$
Coefficiente de fricción		0.588	
Tensión de fluencia (MPa)	$\sigma_y = 37$	$\sigma_y = 340$	$\sigma_y = 120$

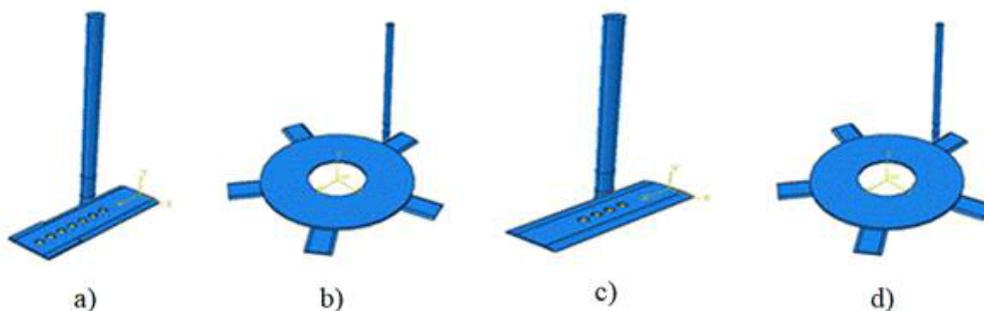


FIGURA 4. Geometría aplicada a las partes luego del proceso de ensamblaje: a) y b) con cuchilla BONEM; c) y d) con cuchilla BUSSOLA.

TABLA 3. Propiedades del contacto

Formulación del deslizamiento	Deslizamiento finito (<i>Finite Sliding</i>)
Método de discretización	Superficie a superficie (<i>Surface-to-Surface</i>)
Formulación de contacto tangencial	Penalidad (<i>Penalty</i>)
Formulación de contacto normal	Contacto rígido (<i>Hard contact</i>)

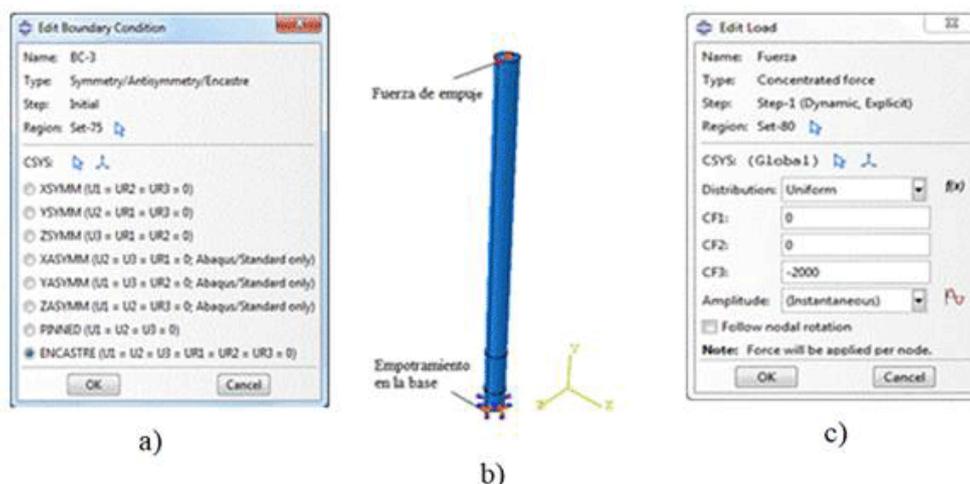


FIGURA 5. Definición de las condiciones de contorno del tallo.

Elementos deformables: en estos también se crea un punto de referencia (centro de rotación), pero con el objetivo de vincularlo con los elementos del modelo (cuchilla y cortador base) mediante un acoplamiento (*coupling*) y asignarle las restricciones y los movimientos.

Selección del tipo de elemento finito y calibración de la densidad de la malla. ABAQUS cuenta en su biblioteca de elementos sólidos (3D) con tres tipologías diferentes: los prismáticos de 6 lados C3D8, prismáticos de 5 lados C3D6 (cuñas) y tetraedros C3D4 (pirámide de base triangular). Para la selección del tipo de elemento finito se tuvo en cuenta la geometría de los cuerpos a modelar y las recomendaciones de autores como [Dongdong & Jun \(2016\)](#); [Hu et al. 2016](#) y [Ma et al. \(2016\)](#).

En la zona de contacto ([Figura 6](#)), donde se verifican los valores más críticos de los campos de tensión, deformación y distribución de presión, se

realiza un refinamiento más detallado de la malla. De acuerdo con este principio, los elementos en contacto se dividen en tres partes: zona de contacto, zona de transición y área sin contacto. Para el tallo de la caña, con una geometría cilíndrica en toda su longitud, se seleccionó el elemento prismático de 6 lados C3D8R, con 8 nodos e integración reducida, con un tamaño de malla que se hace más densa hacia la zona de contacto, donde alcanza tamaño de 2 mm. Para las cuchillas y el cortador base se escoge el elemento prismático triangular lineal de 6 nodos C3D6. En las cuchillas el mallado se hace más denso hacia la zona del filo (zona de contacto), donde alcanza una magnitud de 4 mm. En el caso del disco (área sin contacto) la malla alcanza un valor de 30 mm.

Selección del modelo de falla. Dado que el material en corte está sujeto a impactos, se ve muy afectado por grandes deformaciones y altas tasas de deformación. El modelo de falla por cizallamiento está

diseñado para la deformación a alta tasa de deformación de muchos materiales y utiliza la deformación plástica equivalente como medida de falla. Ofrece dos opciones para lo que ocurre en caso de falla, incluida la eliminación de elementos de la malla y se puede utilizar junto con los modelos de plasticidad de Von Mises para definir la falla por corte del material. Se basa en el valor de la deformación plástica equivalente en los puntos de integración del elemento y supone que la falla ocurre cuando el parámetro de daño excede el valor 1 (Abaqus, 2014). El parámetro de daño, ω , se define como:

$$\omega = \frac{\varepsilon_0^{-pl} + \sum \Delta \varepsilon^{-pl}}{\varepsilon_f^{-pl}} \quad (5)$$

ε_0^{-pl} - es cualquier valor inicial de la deformación plástica equivalente.

$\Delta \varepsilon^{-pl}$ - es un incremento de la deformación plástica equivalente.

ε_f^{-pl} - es la deformación en el momento de la falla y la suma se realiza sobre todos los incrementos en el análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la [Figura 7a](#) se observa el comportamiento de las tensiones en los diferentes segmentos de corte y en la [Figura 7b](#) el comportamiento de las tensiones en los tallos, por cada variedad de caña estudiada durante la simulación del proceso de corte de un tallo único con velocidad angular de corte de 65 rad/s y un ángulo de inclinación del corte igual a 0°. En la misma se aprecia que la magnitud de las tensiones en los segmentos de corte BUSSOLA son inferiores que con los segmentos BONEM, lo que corrobora los criterios de [Valdés et al. \(2009\)](#), sobre la influencia del ángulo del filo de los segmentos de corte en la magnitud de las tensiones generadas en estas herramientas. También se observa que no existen diferencias representativas con relación a la magnitud de las tensiones generadas en los tallos de cada una de las variedades de caña de azúcar cuando se cortan estas con los diferentes segmentos de corte. Se distingue, además, que la variedad C90-469 alcanza los mayores valores de tensiones, mientras la C120-78 logra las menores magnitudes en este parámetro.

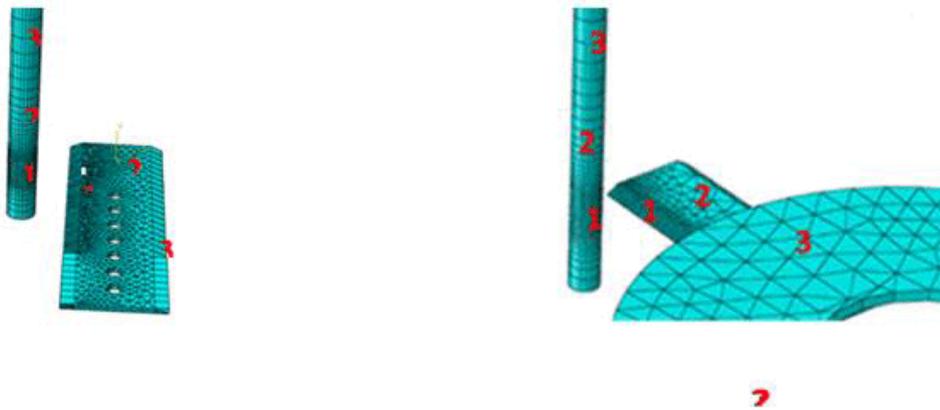


FIGURA 6. Discretización de las zonas de los cuerpos que involucran el contacto. (1-Zona de contacto; 2-Zona de transición; 3- Área sin contacto).

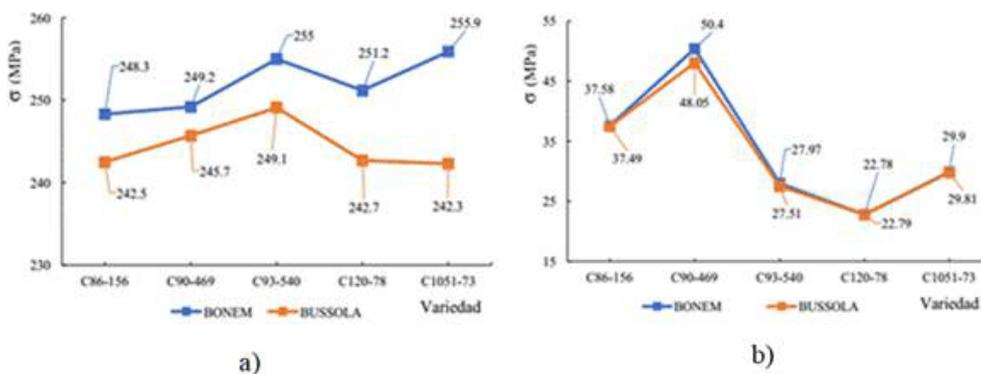


FIGURA 7. Comportamiento de las tensiones: a) en los diferentes segmentos de corte, b) en los tallos, para cada variedad de caña de azúcar estudiada a 65 rad/s y un ángulo de inclinación del corte igual a 0°.

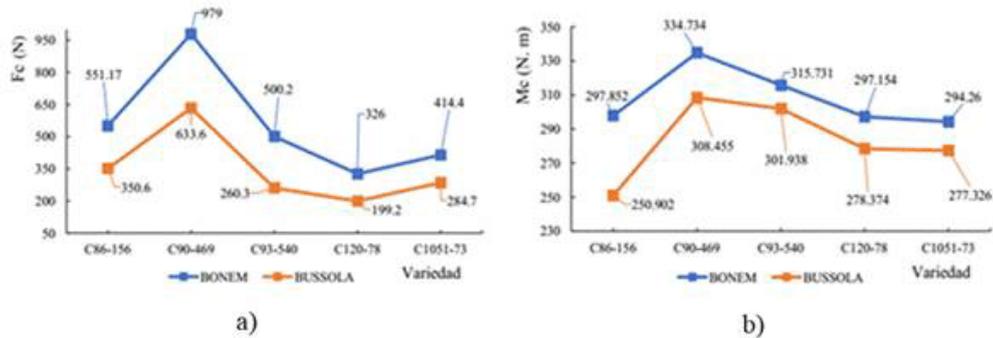


FIGURA 8. Comportamiento de: a) fuerzas de corte en el tallo, b) momento de corte en el cortador base para cada variedad de caña de azúcar estudiada con los diferentes segmentos de corte a 65 rad/s y un ángulo de inclinación del corte igual a 0°.

La [Figura 8](#) representa el comportamiento de las fuerzas de corte para los tallos y el momento de corte en el cortador base de las cinco variedades de caña de azúcar estudiadas con los dos tipos de segmentos de corte, con velocidad angular de corte de 65 rad/s y un ángulo de inclinación del corte igual a 0°. En la misma se observa que las magnitudes de fuerza de corte y momento de corte generadas con el empleo de los segmentos BONEM son significativamente superiores a las que se generan con los segmentos BUSSOLA, lo que confirma los resultados de autores como [Mello & Harris \(2003\)](#); [Qingting et al. \(2007\)](#); [Valdés et al. \(2009\)](#); [Hu et al. \(2016\)](#); [Shen et al. \(2016\)](#); [Qiu et al. \(2021\)](#), que exponen la influencia de la geometría de la herramienta en la magnitud de estos parámetros. La variedad C90-469 posee el mayor valor de los parámetros analizados para ambos segmentos.

En la [Figura 9](#) se aprecian las magnitudes de la tensión y fuerza de reacción en los tallos y el momento de reacción en el cortador base de la variedad de C90-469 para ambos segmentos de corte.

La [Tabla 4](#) muestra los resultados de la comparación de las magnitudes de potencia obtenidas a partir del momento de corte de cada variedad con los resultados de [Pérez et al. \(2019\)](#), quienes realizaron una valoración de las cargas en la cosechadora de caña de azúcar en las condiciones de Cuba y determinaron que los órganos con mayor consumo de potencia son los discos de corte base con 20,4 kW. La potencia es determinada mediante la [expresión](#):

$$Mt = \frac{N}{\omega} \quad (6)$$

donde:

Mt - Momento torsor que transmite el árbol del cortador base o momento de corte (N·m); N - Potencia que transmite el árbol (W); ω - Velocidad angular del árbol (rad/s).

Por lo tanto:

$$N = Mt \cdot \omega \quad (7)$$

La velocidad angular de corte (ω) para el cálculo es de 65 rad/s.

La mayor diferencia existente entre la potencia obtenida en la modelación y el valor de potencia reportado por [Pérez et al. \(2019\)](#), se obtuvo para la variedad C86-156 con el cortador base BUSSOLA, la que alcanzó un 20,05%, diferencia aceptable en el campo de los estudios numéricos. En el resto de las variedades la diferencia oscila entre el 0,59% en la variedad C93-540 con el cortador BONEM y el 11,62% en la variedad C1051-73 con el cortador BUSSOLA.

En la [Figura 10](#) se observan las magnitudes de las tensiones en el tallo, en el segmento de corte y el desplazamiento del cortador base en el instante del corte a una velocidad angular igual a 65 rad/s y 0° de inclinación del disco de corte para los segmentos BONEM y BUSSOLA, correspondientes al modelo con valores promedio de las propiedades físico mecánicas de los tallos, donde la diferencia fundamental se aprecia en la magnitud de las tensiones que surgen en los segmentos de corte, las que son superiores en el segmento BONEM que posee un mayor ángulo de filo.

En las [Figuras 11, 12, 13 y 14](#) se muestran los nomogramas de tensiones en los tallos y los segmentos de corte base durante el corte de un tallo con magnitudes promedio de las propiedades físico mecánicas de las variedades estudiadas, donde se observa como la tensión en la caña durante el proceso de corte es pequeña y su tensión equivalente máxima alcanza valores de 33,56 MPa con el segmento BONEM y 33,67 MPa con el segmento BUSSOLA. En los segmentos de corte la tensión equivalente máxima alcanza valores de 255,1 MPa con el segmento BONEM y 241,5 MPa con el segmento BUSSOLA. Estos resultados son similares a los obtenidos por [Handong et al. \(2011\)](#); [Hu et al. \(2016\)](#); [Rezende \(2020\)](#); [Qiu et al. \(2021\)](#), con otras variedades de caña de azúcar.

La [Figura 15](#) representa el comportamiento de los componentes de la fuerza contante en el tiempo, para los segmentos de corte BONEM y BUSSOLA respectivamente. En ambos casos, la dirección X

representa la fuerza de corte radial, la dirección Y la fuerza de corte axial y la dirección Z la fuerza de corte circunferencial. Durante el proceso de corte normal las fuerzas de corte radial y circunferencial son pequeñas,

mientras que la fuerza de corte axial es la de mayor magnitud. Las magnitudes negativas indican la reacción en el cortador base durante el proceso de corte.

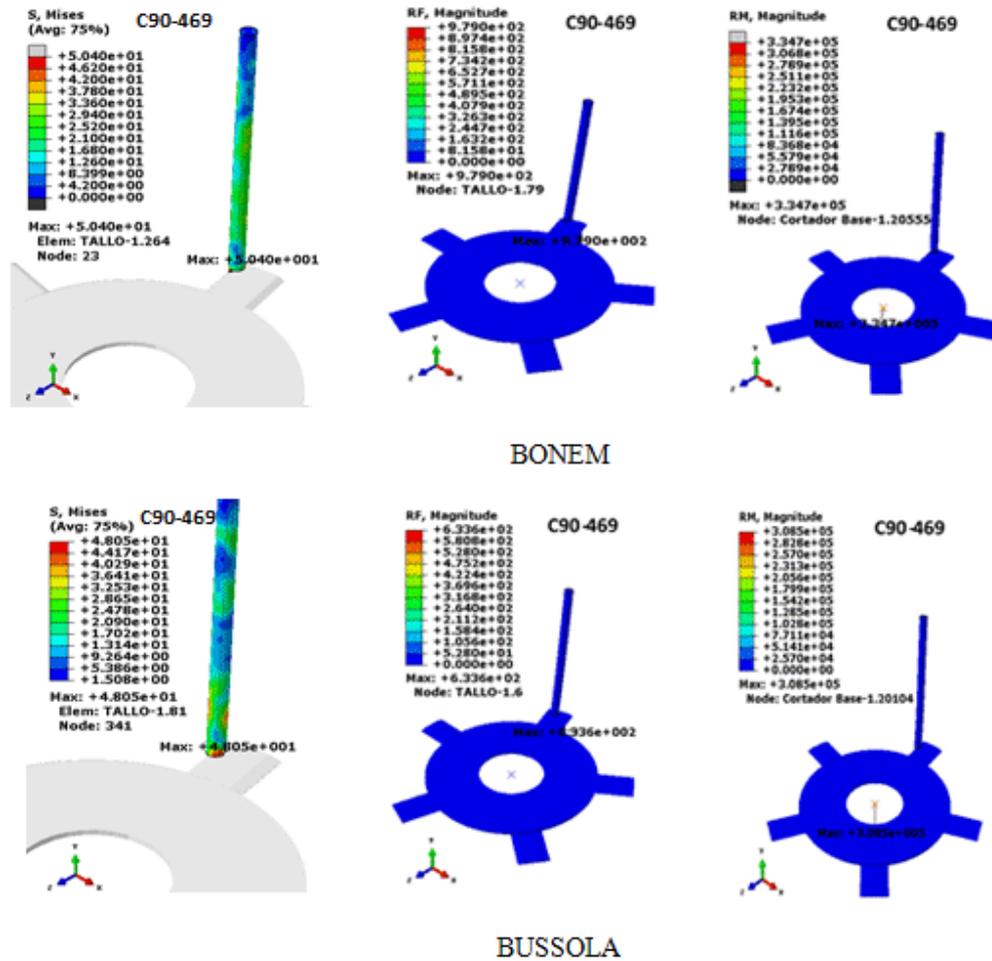


FIGURA 9. Magnitudes de las tensiones máximas y fuerzas de reacción en los tallos y el momento de reacción en el cortador base de la variedad de caña C90-469.

TABLA 4. Resultados de la comparación de las magnitudes de potencia obtenidas a partir del momento de corte de cada variedad

Variedad de caña	Momento de corte (N m)	Potencia obtenida (kW)	Potencia promedio (kW)	Diferencia (%)
BONEM				
C86-156	297,52	19,34		5,19
C90-469	334,734	21,76		6,67
C93-540	315,731	20,52	20,4	0,59
C120-78	297,154	19,32		5,29
C1051-73	294,26	19,13		6,23
BUSSOLA				
C86-156	250,902	16,31		20,05
C90-469	308,455	20,05		1,72
C93-540	301,938	19,63	20,4	3,77
C120-78	278,374	18,09		11,32
C1051-73	277,326	18,03		11,62

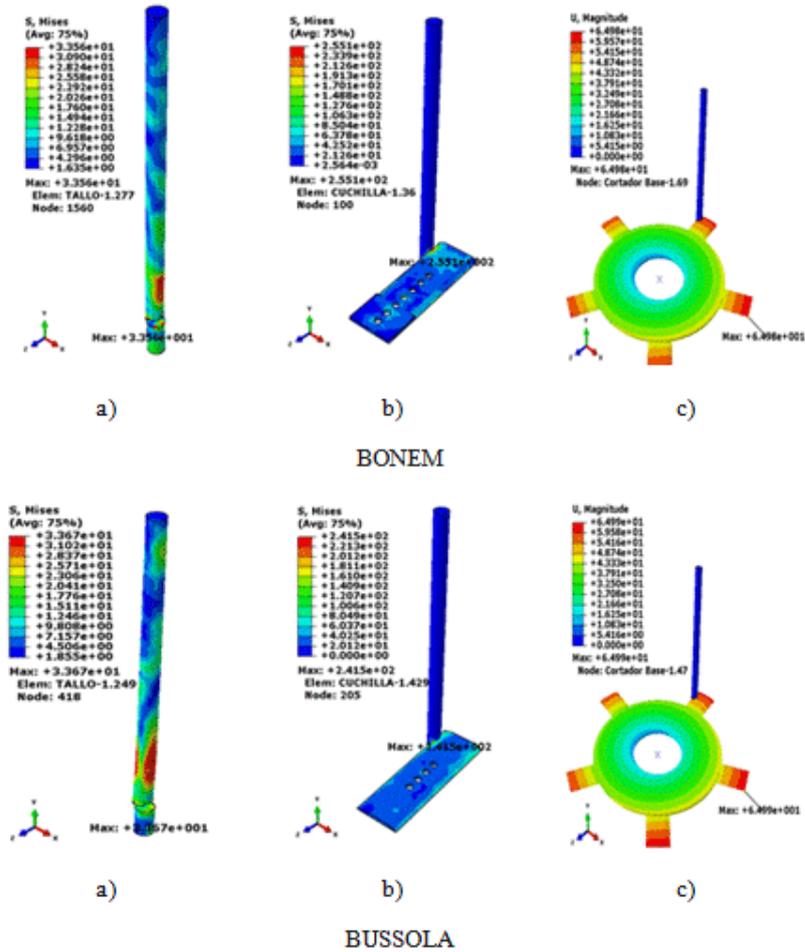


FIGURA 10. Magnitudes en el instante del corte para los modelos con valores promedio de las propiedades físico mecánicas de los tallos: a) tensiones en el tallo (MPa), b) tensiones en el segmento de corte base (MPa), c) desplazamiento del cortador base (mm).

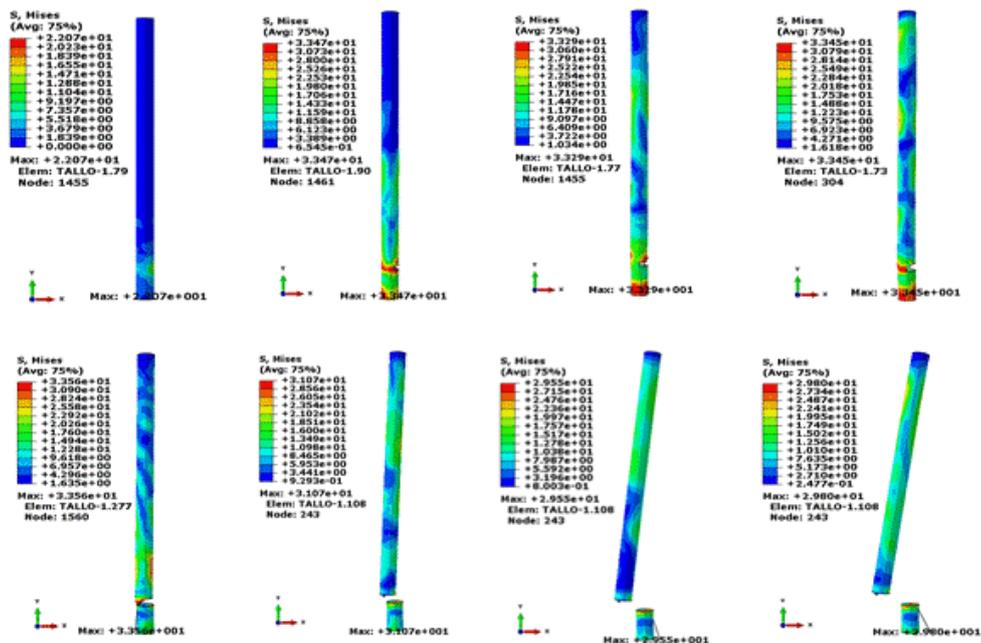


FIGURA 11. Nomogramas de tensiones en el tallo para el segmento de corte BONEM.

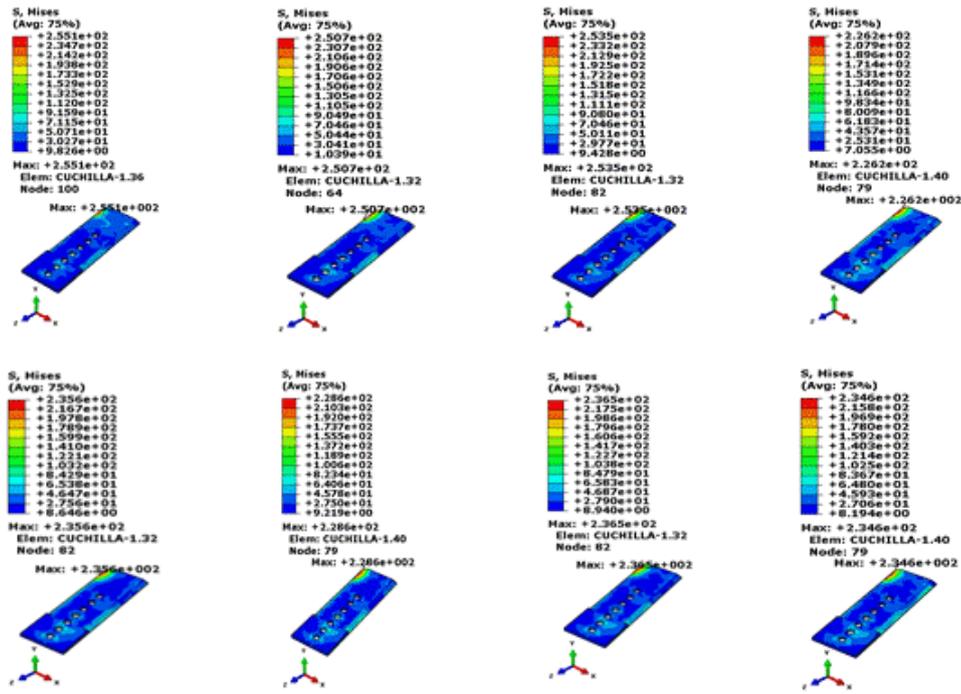


FIGURA 12. Nomogramas de tensiones en el segmento de corte BONEM.

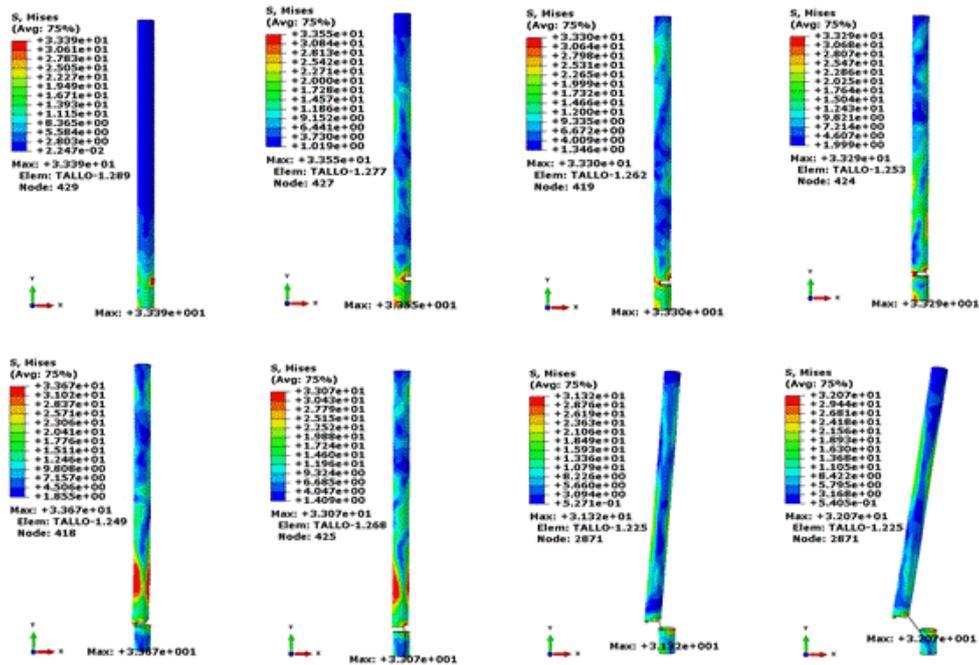


FIGURA 13. Nomogramas de tensiones en el tallo para el segmento de corte BUSSOLA.

La magnitud de la fuerza de corte con el segmento BONEM alcanza un valor máximo de 508,291 N, superior al del segmento de corte BUSSOLA que llega a ser de 433,206 N. Estos resultados están en correspondencia con los obtenidos por [Taghijarah et al. \(2012\)](#); [Shen et al. \(2016\)](#); [Xie et al. \(2020\)](#), mientras difieren de los alcanzados por [Drees \(2005\)](#); [Gedam et al. \(2015\)](#) y [Abdallah et al. \(2020\)](#), todos con diferentes variedades de caña de azúcar.

La [Figura 16](#) muestra los gráficos de Fuerza - Desplazamiento obtenidos para ambos segmentos de corte con velocidad de corte de 65 rad/s y 0° de inclinación del cortador base, los que se corresponden con los obtenidos por [Srivastava et al. \(1993\)](#); [Guarnieri et al. \(2007\)](#); [Zastempowski & Bochat \(2014\)](#) y [Shen et al. \(2016\)](#), en los que se pueden apreciar las tres etapas características del proceso de corte: I - etapa de desarrollo inicial del corte; II- etapa

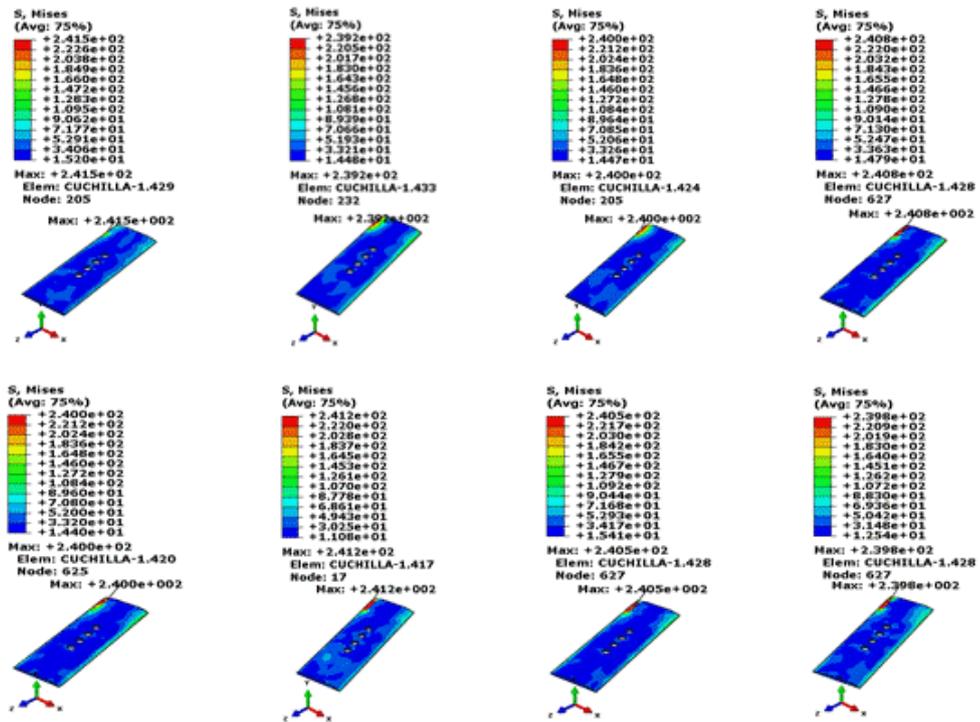


FIGURA 14. Nomogramas de tensiones en el segmento de corte BUSSOLA.

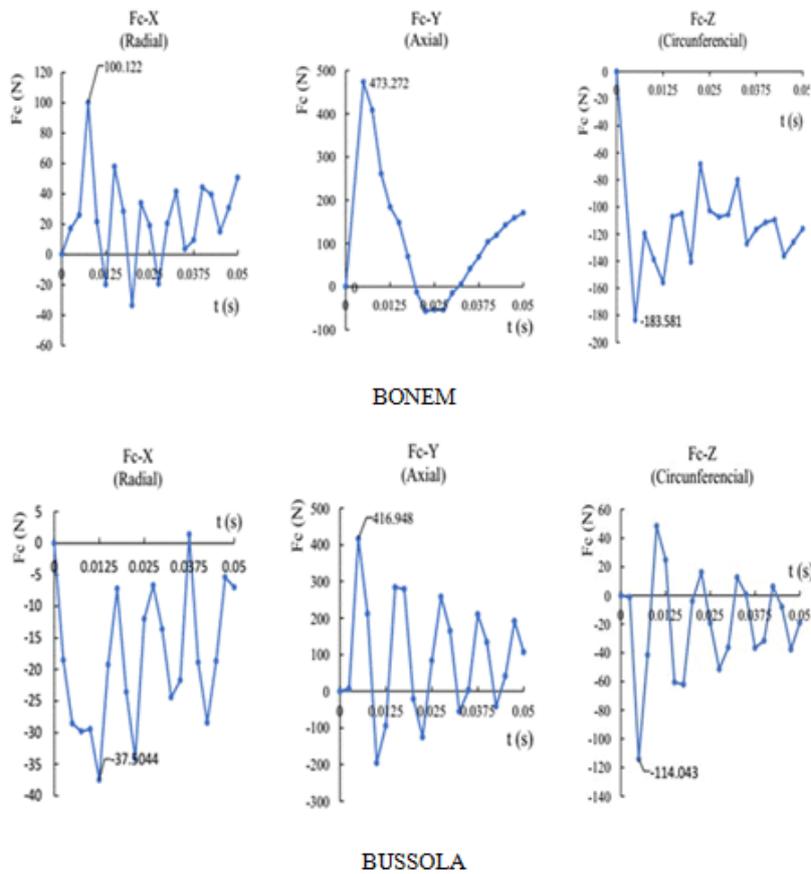


FIGURA 15. Comportamiento de los componentes de la fuerza cortante en el tiempo, para los segmentos de corte BONEM y BUSSOLA.

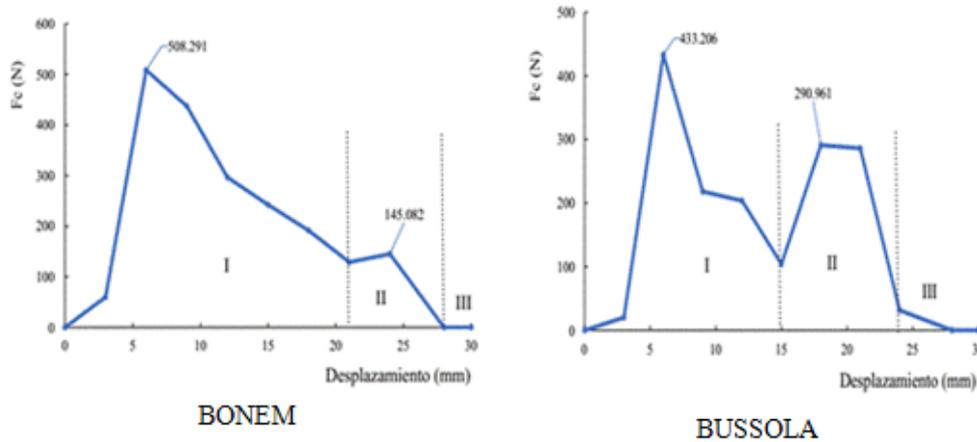


FIGURA 16. Gráficos de Fuerza - Desplazamiento obtenidos para ambos segmentos de corte.

de la deformación por corte de la sección transversal del tallo; III - etapa posterior al corte.

En el gráfico de Fuerza-Desplazamiento con el segmento de corte BONEM se distingue que en la etapa de desarrollo inicial del corte (I), la magnitud de la fuerza de corte aumenta desde cero hasta un valor máximo de 508,291 N, provocando el proceso de corte y destruyendo la estructura del tallo. Durante la etapa de la deformación por corte de la sección transversal del tallo (II), el máximo valor alcanzado por la fuerza de corte es de 145,082 N, la que decrece gradualmente con la disminución progresiva del área de corte hasta el valor de cero en el momento en que el tallo queda completamente cortado y la curva entra en la región del momento posterior al corte (III).

Con el segmento de corte BUSSOLA, en la etapa I, la magnitud de la fuerza de corte aumenta desde cero hasta un valor máximo de 433,206 N, provocando el proceso de corte y destruyendo la estructura del tallo. Durante la etapa II, el máximo valor alcanzado por la fuerza de corte es de 290,961 N y en el momento en que el tallo queda completamente cortado la curva entra en la etapa (III), donde la fuerza de corte es cero.

Como se puede apreciar, la etapa de desarrollo inicial del corte con el segmento BONEM alcanza un mayor desplazamiento que con el segmento BUSSOLA y la etapa de la deformación por corte de la sección transversal del tallo, por lo tanto, se hace menor, lo que está influenciado por la diferencia geométrica que poseen las herramientas con relación al ángulo del filo.

CONCLUSIONES

- La metodología numérica expuesta favorece el estudio del proceso de corte base de los tallos de caña de azúcar y contribuye a reducir el número de ensayos experimentales.
- El modelo numérico desarrollado permite estudiar la influencia de los principales parámetros

geométricos y cinemáticos del proceso de corte base de la caña de azúcar, existiendo una buena correspondencia entre los valores obtenidos de la energía de corte, mediante el ensayo de resistencia al corte con el péndulo de Sharpy de la variedad C120-78 con el segmento BONEM por experimentación y su simulación numérica, con un error relativo de 5,59%.

- En el análisis de las cinco variedades de caña de azúcar estudiadas se obtiene que la variedad C90-469 es la que presenta mayores magnitudes de tensión y fuerza de reacción en el tallo y momento de reacción en el cortador base para ambos segmentos de corte, lo que la convierte en la variedad que posee una mayor influencia en el desempeño de estas herramientas, mientras que las variedades C120-78 y C1050-73 poseen las menores magnitudes de estos parámetros y favorecen el comportamiento de las cuchillas.
- Durante el corte de un tallo con magnitudes promedio de las propiedades físico-mecánicas de las variedades estudiadas, se observa que la tensión en la caña durante el proceso de corte es pequeña y su tensión equivalente máxima alcanza valores de 33,56 MPa con el segmento BONEM y 33,67 MPa con el segmento BUSSOLA. En los segmentos de corte la tensión equivalente máxima alcanza valores de 255,1 MPa con el segmento BONEM y 241,5 MPa con el segmento BUSSOLA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIA, R.L.A.: "La cosecha mecanizada de caña de azúcar. Apuntes básicos de mejoramiento", [en línea], En: *Conferencia Red agrícola Trujillo-Perú, agosto, 2018*, Trujillo, Perú, 2018, Disponible en: <https://www.redagricola.com/pe/assets/uploads/2018/08/1--luis-armando-abadia-optimizacion-de-cosecha-mecanica-de-cana-de-azucar.pdf>, [Consulta: 21 de octubre de 2019].

- ABAQUS: *User's Manual, Ver. 6.14-1, [en línea]*, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc., 2014, Disponible en: <https://www.redagricola.com/pe/assets/uploads/2018/08/1--luis-armando-abadia-optimizacion-de-cosecha-mecanica-de-cana-de-azucar.pdf>, [Consulta: 21 de octubre de 2019].
- ABDALLAH, M.Z.; EL-DEN; SAAD, F.A.; WALEED, M.H.; ABDALLAH, E.E.: "Review of some parameters related to the base-cutter of sugarcane harvesters", *Misr journal of Agricultural Engineering*, 37(4): 325-330, 2020, ISSN: 1687-384X, e-ISSN: 2636-3062, DOI: <http://dx.doi.org/10.21608/mjae.2020.47247.1012>.
- CORTÉS, M.C.I.: *Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del Agave angustifolia Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal*, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Oaxaca, Tesis (en opción al título de Master en Ciencias), Oaxaca, México, publisher: Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación ..., 2009.
- CRUZADO, A.; LEEN, S.; URCHEGUI, M.; GÓMEZ, X.: "Finite element simulation of fretting wear and fatigue in thin steel wires", *International Journal of Fatigue*, 55: 7-21, 2013, ISSN: 0142-1123, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.04.025>.
- DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R.; DE JUAN, J.; MARTÍNEZ, R.A.; TARJUELO, J.: "Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment", *Agricultural Water Management*, 107: 42-53, 2012, ISSN: 0378-3774.
- DONGDONG, D.; JUN, W.: "Research on mechanics properties of crop stalks: A review", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(6): 10-19, 2016, ISSN: 1934-6352.
- DREES, A.M.: *A Study on Mechanization of Sugar Cane Planting, Fabricating a Seedling Preparation Unit and Performance Evaluation of Transplanting Machine for Sugar Cane Crop, [en línea]*, Mech. Dept., Ph.D. thesis Agric, 2005, Disponible en: https://www.erpublisher.org/published_paper/IJE_TR022297.pdf, [Consulta: 21 de enero de 2017].
- GEDAM, K.; DESHMUKH, M.; THAKARE, S.: "Mechanical Properties of Sugarcane Stalk", *Madras Agricultural Journal*, 102(7-9): 281-284, 2015, ISSN: 0024-9602.
- GUARNIERI, A.; MAGLIONI, C.; MOLARI, G.: "Dynamic analysis of reciprocating single-blade cutter bars", *Transactions of the ASABE*, 50(3): 755-764, 2007.
- HANDONG, H.; YUXING, W.; YANQIN, T.; FENG, Z.; XIANGFA, K.: "Finite element simulation of sugarcane cutting", *Transactions of the CSAE*, 27(2): 161-166, 2011.
- HU, D.F.; ZHENG, Y.F.; ZHAO, Y.: "Movement Simulation of Sugarcane Harvester Cutter Based on ANSYS/LS-DYNA", [en línea], En: *International Conference on Engineering Science and Management (ESM)*, Ed. Atlantis Press, pp. 0268-0271, 2016, Disponible en: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/esm-16/25859574>, [Consulta: 21 de enero de 2018].
- IZNAGA, B.A.M.; BRAUNBECK, G.O.A.: "Comportamiento físico-mecánico de un biomaterial sometido a bajas cargas", *Ingeniería Mecánica*, 14(1): 65-73, 2011, ISSN: 1815-5944.
- KESTUR, S.G.; FLORES, S.H.; DOS SANTOS, P.; DOS SANTOS, I.; MAZZARO, I.; MIKOWSKI, A.: "Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico", *Applied Science and Manufacturing*, 45(1): 153-161, Composites Part A, 2012.
- KROES, S.: *The cutting of sugarcane*, University of Southern Queensland, PhD diss., Toowoomba, Queensland, Australia, 1997.
- MA, S.; KARKEE, M.; SCHARF, P.A.; ZHANG, Q.: "Sugarcane harvester technology: a critical overview", *Applied engineering in agriculture*, 30(5): 727-739, 2014, ISSN: 0883-8542.
- MA, S.; SCHARF, P.; ZHANG, Q.; KARKEE, M.; TONG, J.; YU, L.: "Effect of cane stool density and stubble height on sugarcane stubble damage in Hawaii fields", *Transactions of the ASABE*, 59(3): 813-820, 2016, ISSN: 2151-0032, DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/trans.59.11334>.
- MELLO, R. da C.; HARRIS, H.: "Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2): 355-358, 2003, ISSN: 1807-1929.
- OTEGUI, M.E.; ANDRADE, F.H.; SUERO, E.E.: "Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking", *Field Crops Research*, 40(2): 87-94, 1995, ISSN: 0378-4290.
- PÉREZ, P.J.R.; SÁNCHEZ, J.R.; GUERRERO, P.J.N.; SANTILLÁN, M.C.J.: "Valoración de las Cargas en la Cosechadora de Caña de Azúcar en las Condiciones de Cuba", *European Scientific Journal*, 15(21): 294-303, 2019, ISSN: 1857-7881, e-ISSN: 1857-7431, DOI: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n21p294>.
- PÉREZ, R.R.A.: *Procedimiento para el análisis del desempeño de los segmentos de corte base de las cosechadoras de caña de azúcar CASE-IH*, Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Tesis (en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias), Ciego de Ávila, Cuba, 145p., 2022.
- QINGTING, L.; YINGGANG, O.; SHANGLE, Q.; WANZHANG, W.: "Stubble damage of sugarcane

- stalks in cutting test by smooth-edge blade [J]”, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23(3): 103-107, 2007.
- QIU, M.; MENG, Y.; LI, Y.; SHEN, X.: “Sugarcane stem cut quality investigated by finite element simulation and experiment”, *Biosystems Engineering*, 206: 135-149, 2021, ISSN: 1537-5110, DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosys_temseng.2021.03.013.
- REZENDE, S.A.A.: *Simulação numérica aplicada ao corte basal dos colmos de cana-de-açúcar*, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação para a obtenção do título de Mestre, Lavras-MG, Brasil, 88 p., 2020.
- SALDAÑA, R.A.; REVELES ARREDONDO, A.F.; SERWATOWSKI HLAWINSKA, H.R.J.; GUTIÉRREZ, V.C.; SALDAÑA, R.N.; LEDESMA, O.E.; CABRERA, S.J.M.: “Modelo de elemento finito para el corte de la fibra de Agave tequilana Weber”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(Especial): 15-21, 2013, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- SHEN, C.; CHEN, Q.M.; LI, X.W.; TIAN, K.P.; HUANG, J.C.; ZHANG, B.: “Experimental analysis on single-stalk cutting of hemp.”, *International Agricultural Engineering Journal*, 25(4): 187-196, 2016, ISSN: 0858-2114.
- SILVA, S.L.; HERNANDEZ, G.L.H.; CABALLERO, C.M.; LÓPEZ, H.I.: “Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the angustifolia Haw Agave in Function of their Length”, En: *Applied Mechanics and Materials*, Ed. Trans Tech Publ, vol. 15, pp. 103-108, 2009, ISBN: 0-87849-309-3.
- SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P.; BUCKMASTER, D.R.: “Engineering principles of agricultural machines”, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1993.
- TAGHIJARAH, H.; AHMADI, H.; HEMATIAN, R.; SATTARI, N.A.M.: “Comparison of mechanical properties between two varieties of sugar cane stalks”, *Elixir Mech. Eng.*, 42: 6415-6419, 2012, ISSN: 2229-712X.
- TOLEDO, A. de; SILVA, R.P. da; FURLANI, C.E.A.: “Quality of cut and basecutter blade configuration for the mechanized harvest of green sugarcane”, *Scientia Agricola*, 70: 384-389, 2013, ISSN: 0103-9016.
- VALDÉS, H.P.A.; MARTÍNEZ, R.A.; AJALLA, R.; BRITO, R.E.; ALBÓNIGA, G.R.: “Influencia del ángulo de deslizamiento y la velocidad de la cuchilla sobre la energía específica durante el corte de tallos de caña de azúcar”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(1): 21-26, 2009, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- VALEIRO, A.; BIAGGI, C.: *Revisión crítica de la evolución tecnológica de la cosecha de la caña de azúcar en la Argentina*, Revisiones- RIA, Trabajos en prensa, 2019.
- XIE, L.; WANG, J.; CHENG, S.; DU, D.: “Cutting Characteristics of Sugarcane in Terms of Physical and Chemical Properties”, *Transactions of the ASABE*, 63(4): 1007-1017, 2020, ISSN: 0001-2351.
- YUAN, F.; YANG, W.; YANG, J.; MENG, H.; WU, L.; NONG, H.; GUO, W.: “Numerical Simulation of Sugarcane under Wind Load”, En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Ed. IOP Publishing, vol. 187, 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/187/1/012024>.
- ZASTEMPOWSKI, M.; BOCHAT, A.: “Modeling of Cutting Process by the Shear-Finger Cutting Block”, *Applied Engineering in Agriculture*, 30(3): 347-353, 2014, ISSN: 0883-8542.
- Rigoberto Antonio Pérez Reyes, Profesor Auxiliar, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65 300, Teléfono (33) 21 7009, Fax 53 33 225768, e-mail: rigobertopr@unica.cu.
- Lázaro Antonio Daquinta Gradaille, Profesor Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65 300, Teléfono (33) 21 7009, Fax 53 33 225768, e-mail: daquintagradaille@gmail.com
- Jorge Douglas Bonilla Rocha, Profesor, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65 300, Teléfono (33) 21 7009, Fax 53 33 225768, e-mail: jorgedbr@unica.cu.
- Carlos Alexander Recarey Morfa, Profesor Titular, Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, e-mail: recarey@uclv.edu.cu.
- Anibal Sánchez Numa, Profesor, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65 300, Teléfono (33) 21 7009, Fax 53 33 225768, e-mail: anibal@unica.cu.
- Julio Eustaquio Gómez Bravo: Profesor, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65 300, Teléfono (33) 21 7009, Fax 53 33 225768, e-mail: julioe@unica.cu.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: Conceptualization: R. A. Pérez. **Data curation:** R. A. Pérez, L. A. Dquinta. **Formal analysis:** R. A. Pérez, L. A. Dquinta, J. D. Bonilla, C. A. Recarey, A. Sánchez, J. E. Gómez. **Investigation:** R. A. Pérez, L. A. Dquinta, J. D. Bonilla, C.A. Recarey, A. Sánchez, J. E. Gómez. **Methodology:** R. A. Pérez, L. A. Dquinta, J. D. Bonilla, C.A. Recarey, A. Sánchez, J. E. Gómez. **Project administration:** L. A. Dquinta, R. A. Pérez. **Software:** R. A. Pérez, J. D. Bonilla, C. A. Recarey, A. Sánchez. **Supervision:** R. A. Pérez. **Validation:** R. A. Pérez, L. A. Dquinta, J. D. Bonilla. **Roles/Writing, original draft:**R. A. Pérez. **Writing, review & editing:** L. A. Dquinta, J. D. Bonilla, C.A. Recarey, A. Sánchez, J. E. Gómez.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.