

Modelo cinemático del martillo de un molino de martillos operando sin carga empleando la mecánica de Lagrange

Kinematic hammer model of a hammer mill operating without load using Lagrange mechanics

Sneider Alejandro Gil Parra¹, Albeiro Espinosa Bedoya²

¹ Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín.
matencio@estudiantes.sagilpa@unal.edu.co.

² Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín.aespinos@unal.edu.co

 OPEN ACCESS



Copyright: © 2019 Ingenierías USBMed. La revista *Ingenierías USBMed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución- no comercial- SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de Artículo: Investigación científica y tecnológica.

Recibido: 29-11-2018.

Revisado: 24-01-2019.

Aprobado: 11-02-2019

Doi: 10.21500/20275846.3871

Referenciar así: S.A., Gil-Parra and A., Espinosa-Bedoya. "Modelo cinemático del martillo de un molino de martillos operando sin carga empleando la mecánica de Lagrange" *Ingenierías USBMed*, 10(1), pp.28-33, 2019.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen conflicto de intereses.

Editor: Yohana López Rivera,
Universidad de San Buenaventura,
Medellín, Colombia

Resumen. La mecánica de Lagrange permite modelar y simular las variables cinemáticas de máquinas, sistemas mecánicos o mecanismos complejos, su aplicación es general y se ha usado en máquinas agrícolas, robótica entre otros. En el caso del molino de martillos el foco se centra en el sistema tambor-martillo. Las características geométricas de los elementos del sistema y la velocidad de entrada fueron tomadas empleando instrumentos de medición. El modelado del sistema empleando la Mecánica de Lagrange permitió obtener ecuaciones diferenciales que describen la posición angular, velocidad angular y aceleración angular en función del tiempo y las variables conocidas. La evaluación numérica de estas mostró resultados acordes con las observaciones experimentales.

Palabras Clave. Molino de martillos, martillos, Mecánica de Lagrange.

Abstract. The mechanics of Lagrange allows to model and simulate the kinematic variables of machines, mechanical systems or complex mechanisms, its application is general and has been used in agricultural machines, robotics among others. In the case of the hammer mill, the focus is on the drum-hammer system. The geometric characteristics of the system elements and the input speed were taken using measuring instruments. The modeling of the system using Lagrange Mechanics allowed obtaining differential equations that describe the angular position, angular velocity and angular acceleration of the hammer as a function of time and the known variables. The numerical evaluation of these showed results in agreement with the experimental observations.

Keywords. Hammer mill, hammers, Lagrange mechanics.

Nomenclatura

L : Lagrangiano.
 E_k : Energía cinética total del sistema.
 W_{ork} : Trabajos que aplica en el sistema.
 q_i : Desplazamiento general de cada cuerpo que interactúa para obtener el modelo.
 \dot{q}_i : La derivada de primer orden de los desplazamientos generales de cada cuerpo que interactúa para obtener el modelo con respecto al tiempo, es decir, las velocidades de estos.
 q_1 : Es el desplazamiento angular del tambor.
 \dot{q}_1 : Velocidad angular del motor.
 \ddot{q}_1 : Aceleración angular del tambor.
 m_1 : Masa del tambor.
 m_2 : Masa del martillo o placa.
 g : Aceleración gravitacional que es igual a $9,81m/s^2$.
 L_1 : Distancia entre el centro del tambor y el martillo, basado en la geometría.
 L_2 : Es la longitud del martillo.
 q_2 : Es el desplazamiento angular del martillo.
 \dot{q}_2 : Velocidad angular del martillo.
 \ddot{q}_2 : Aceleración angular del tambor.
 M : Momento angular del tambor.
 P : Potencia del motor.
 X : Componente horizontal de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro.
 Y : Componente vertical de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro.

I. Introducción

La cinemática se define como la rama de la mecánica que estudia el movimiento del cuerpo a través del espacio-tiempo sin tener en cuenta sus causas. Para explicar el comportamiento del movimiento de los cuerpos existen tres modelos principales: el modelo de la mecánica de Newton, el modelo de mecánica de Hamilton y el modelo de Lagrange. El primero es un modelo que relaciona las fuerzas con la aceleración, donde la aceleración es la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, y ésta última es la derivada de la posición con respecto a la misma variable, tal modelo presenta restricciones, ya que no se puede implementar en velocidades demasiado altas, ni en masas muy pequeñas, tal como lo explica Beer et al [1].

En cambio, los modelos de Hamilton y Lagrange se basan en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarios de primer orden, tal ecuación es la suma de las energías totales del sistema, y está en función de una constante, L (Lagrangiano) en el modelo de Lagrange y H (Hamiltoniano) en el modelo de Hamilton; La gran diferencia entre ambos modelos es que en el Lagrangiano no depende de las velocidades generalizadas, variables que son muy importantes en el Hamiltoniano, agregando además que en el modelo Hamiltoniano, están en función de los momentos generalizados, tal como lo explica Poznyak [2].

De los tres modelos anteriores, el que se aplica en este artículo es el de Lagrange, el cual se presenta en las ecuaciones (1) y (2).

$$L = E_k - W_{ork} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_1} \right) = 0 \quad (2)$$

Dónde:

L : Lagrangiano.
 E_k : Energía cinética total del sistema.
 W_{ork} : Trabajos que aplica en el sistema.
 q_i : Desplazamiento general de cada cuerpo que interactúa para obtener el modelo.
 \dot{q}_i : La derivada de primer orden de los desplazamientos generales de cada cuerpo que interactúa para obtener el modelo con respecto al tiempo, es decir, las velocidades de estos.

Como se puede ver, este modelo es aplicado en otros estudios donde la complejidad es alta, tal como se puede apreciar en Elaikh et al [3] el cual aplica el modelo de Lagrange para análisis de cinemática y vibración de la estructura de un robot Scara, ya que su comportamiento es denominado como tipo rígido de dos eslabones, por ende, el modelo más simple de explicar la cinemática de los cuerpos es a través de Lagrange; al igual que Duarte et al [4] el cual implementó el modelo Lagrange en un mecanismo manivela – corredera debido a que este no sólo generaba un modelo simple de resolver, sino que además no tenía las restricciones que tiene la mecánica Newtoniana clásica; Aunque en el caso de Patel et al [5] para explicar la dinámica de su mini excavadora, usaron el modelo Lagrange para obtener un enfoque más fácil para explicar a otras personas el fenómeno cinemático apreciado allí, al igual que Saenz et al [6] el también aplicó el modelo para analizar el sistema mecánico de Robot móvil omnidireccional. En cuanto a Aggogeri et al [7] para analizar el amortiguamiento de las vibraciones en estructuras de máquinas herramientas livianas, debido al análisis y diagrama de cuerpo libre, obtuvieron un modelo a partir del principio de D'Alembert, el cual se puede resolver de manera más sencilla implementando el modelo de Lagrange, lo mismo le sucedió a Sakhapov et al [8], ya que el modelo dinámico del chasis de máquinas de construcción se obtuvo usando el mismo principio de D'Alembert, el cual obtuvo un sistema de ecuaciones no lineales el cual se puede resolver fácilmente implementando Lagrange. Analizando otras aplicaciones del modelo, si analizamos a Medina et al [9], el modelo de Lagrange se usó para conocer el momento torsor de un brazo robot, para luego con esos datos seleccionar un servomotor para el mismo. Continuando con las aplicaciones del modelo, Caicedo [10] usa el modelo para realizar un procedimiento de dinámica inversa sobre las articulaciones de un mecanismo planar.

Para el análisis cinemático del manipulador robótico de un robot de cuatro grados de libertad, Cardoso et al [11] implementa Lagrange. Para la medicina, en el diseño de un tobillo robótico, fue necesario estudiar el movimiento del mismo para conocer las fuerzas que actúan en este sistema, por ello, Sinchi [12] requiere del modelo de Lagrange para cumplir con el objetivo. Incluso el modelo Lagrange se implementó para estudiar modelos no lineales convencionales como es el caso del péndulo rotacional invertido, tal como lo explica Montoya et al [13]. Otra aplicación del modelo de Lagrange ha sido para estudiar simulaciones hechas a través de software como el SolidWorks, el cual se hizo para comprender matemáticamente la cinemática de un robot manipulador serial Mitsubishi Movemaster RV-M1, tal como lo describe Barraza et al [14].

En cuanto a la aplicación de estos modelos en el área de la maquinaria agrícola se encuentra Marcal et al [15], el cual usa Lagrange para el análisis dinámico de una recolectora de granos a través de un programa computacional denominada ADAMS. En cuanto a robótica aplicada en el área agrícola Puignau [16], aplica Lagrange para el estudio cinemático en un vehículo autónomo articulado todoterreno, al igual que Soto et al [17], el cual analiza de la misma manera un sistema robótico que se encarga de clasificar brevas. Para estudiar la compactación del suelo producto de un tráfico de vehículos agrícolas, Cueto [18] lo hace aplicando el modelo de Lagrange. Otro caso donde se realiza un análisis lagrangiano es en las ruedas de un robot, las cuales están relacionadas al momento de torsión aplicado a los motores, tal máquina tiene aplicabilidad en el sector avícola, tal como lo afirma Cabrera et al [19], quien además se encarga de hacer tal análisis cinemático.

Este artículo presenta el modelo del comportamiento cinemático de un martillo de un molino creado a partir de la mecánica de Lagrange, el análisis se lleva a cabo con la máquina operando en vacío, esta información será importante para evaluar en un próximo trabajo el modelo del martillo cuando la máquina esté con carga, es decir, operando durante el triturado de algún tipo de material.

II. Obtención del modelo

El método físico que se implementó para obtener el modelo fue el de Lagrange, el cual está integrado por las ecuaciones (1) y (2). Un molino de martillos tiene pocos mecanismos entre la fuente de potencia y el ejecutor que es el martillo, el mecanismo principal en esta cadena cinemática es el tabor, el cual contiene los martillos, este se muestra en la Figura 1, en este mecanismo, los martillos giran de forma excéntrica y libre en relación al eje del tambor, ya que su centro se encuentra alejado del tambor como se muestra en la Figura 2, esta última es tomada como base para elaborar el diagrama de cuerpo libre

Donde:

La circunferencia describe el recorrido de los martillos en el sector el cual está ensamblado con el tambor.

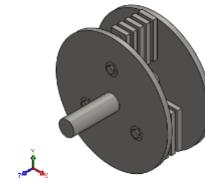


Figura 1. Sistema Tambor-Martillos del molino.

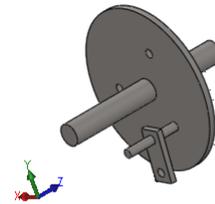


Figura 2. Disposición del martillo al interior del sistema Tambor-Martillo

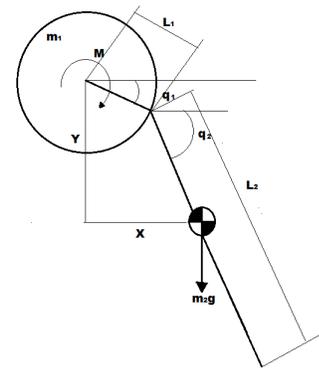


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del sistema Tambor-Martillo.

- m_1 : Masa del tambor.
- m_2 : Masa del martillo o placa.
- g : Aceleración gravitacional que es igual a $9.81 \frac{m}{s^2}$.
- L_1 : Distancia entre el centro del tambor y el martillo, basado en la geometría es igual a:

$$L_1 = 71.9mm \quad (3)$$

- q_1 : Es el desplazamiento angular del tambor.
- q_2 : Es el desplazamiento angular del martillo.
- L_2 : Es la longitud del martillo que es igual a 90 mm.
- M : Momento angular del tambor que igual al:

$$M = \frac{P}{\dot{q}_1} = \frac{583.6998031W}{141.69rad/s} = 4.119555389Nm \quad (4)$$

Donde:

- P : Potencia del motor.
- \dot{q}_1 : Velocidad angular del motor.

X: Componente horizontal de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro.

$$X = [L_1 \dot{q}_1 \cos(q_1)] + \left[\left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \cos(q_2) \right] \quad (5)$$

\dot{q}_2 : Velocidad angular del martillo.

Y: Componente vertical de la velocidad lineal del martillo medido desde el centro.

$$Y = -[L_1 \dot{q}_1 \sin(q_1)] - \left[\left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \sin(q_2) \right] \quad (6)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior, el Lagrangiano queda así:

$$\begin{aligned} L = & \left[\frac{1}{2} I_1 (\dot{q}_1)^2 \right] + \left[\frac{1}{2} I_2 ((\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2) \right] \\ & + \left[\frac{1}{2} m_2 (x^2 + y^2) \right] - [M q_1] \\ & + \left[m_2 g \left[(L_1 \cos(q_1)) + \frac{L_2}{2} \cos(q_2) - L_1 - \frac{L_2}{2} \right] \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Los datos usados hasta este punto fueron obtenidos por medición directa, tanto de la velocidad como de las dimensiones de los elementos que componen el sistema tambor-martillos.

Ahora bien, aplicando la ecuación (2), se hace teniendo en cuenta que se debe hacer una ecuación para q_1 y otra para q_2 quedando el modelo así:

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_1} = [I_1 \dot{q}_1] + [I_2 \dot{q}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)] + [m_2 (X [[L_1 \cos(q_1)]] - Y [[L_1 \sin(q_1)]])] \quad (8)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_2} = [I_2 \dot{q}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)] + \left[m_2 \left(X \left[\left(\frac{L_2}{2} \right) \cos(q_2) \right] - Y \left[\left(\frac{L_2}{2} \right) \sin(q_2) \right] \right) \right] \quad (9)$$

$$\frac{\delta L}{\delta q_1} = [-m_2 L_1 \dot{q}_1 (X - \sin(q_1) + Y \cos(q_1))] - M - [m_2 g L_1 \sin(q_1)] \quad (10)$$

$$\frac{\delta L}{\delta q_2} = \left[-m_2 \left(X \left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \sin(q_2) + Y \left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \cos(q_2) \right) \right] - \left[m_2 g \frac{L_2}{2} \sin(q_2) \right] \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_1} \right) = [I_1 \ddot{q}_1] + [I_2 \dot{q}_2 (\ddot{q}_1)] \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_2} \right) = [I_2 \ddot{q}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \dot{q}_2 I_2 \dot{q}_2] \quad (13)$$

El modelo queda finalmente como:

$$[I_1 \ddot{q}_1] + [I_2 \dot{q}_2 (\ddot{q}_1)] + [m_2 L_1 \dot{q}_1 (X \sin(q_1) + Y \cos(q_1))] + M + [m_2 g L_1 \sin(q_1)] = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} 0 = & [I_2 \ddot{q}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \dot{q}_2 I_2 \dot{q}_2] + \left[m_2 g \frac{L_2}{2} \sin(q_2) \right] \\ & + \left[m_2 \left(X \left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \sin(q_2) - Y \left(\frac{L_2}{2} \right) \dot{q}_2 \cos(q_2) \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

\ddot{q}_1 : Aceleración angular del tambor

\ddot{q}_2 : Aceleración angular del tambor

III. Validación del modelo

Tomando los valores conocidos, los cuales están en la Tabla 1, podemos reemplazarlos en las ecuaciones (14) y (15) tomando el ángulo q_1 como una variable independiente y como variables desconocidas q_2 y \dot{q}_2 ; dando como resultado la Tabla 2, teniendo en cuenta que la variación de q_1 fue cada 18 grados.

Tabla 1. Valores conocidos para la solución de ecuaciones

Variable	Valor	Unidades
\dot{q}_1	0	$\frac{Rads}{s}$
I_1	0.050139747	$Kg * m^2$
I_2	0.000206307	$Kg * m^2$
\dot{q}_1	141.69	$\frac{Rads}{s}$
m_1	5.04894	Kg
m_2	0.25489	Kg
L_1	0.0719	m
L_2	0.09	m
M	4.119555389	$N * m$

Estas últimas ecuaciones se representaron en SIMULINK, mediante el diagrama presentado en la Figura 4, de allí se llegó a los resultados de los valores desconocidos, los cuales son: q_2 , \dot{q}_2 y \ddot{q}_2 , los cuales dependen su valor de q_1 , el cual es el único valor independiente. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las gráficas con los resultados de estos valores con respecto a los anteriormente descritos en La Tabla 1.

Tabla 2. Valor de las variables desconocidas

Variable	Valor	Unidades
q_2	Oscila entre 0 y 360	$Grados$
\dot{q}_2	1.4169	$\frac{Rads}{s}$
\ddot{q}_2	0	$\frac{Rads}{s^2}$

El valor de \ddot{q}_2 es debido a que el martillo durante la operación no tiene ningún cambio de velocidad, ya que

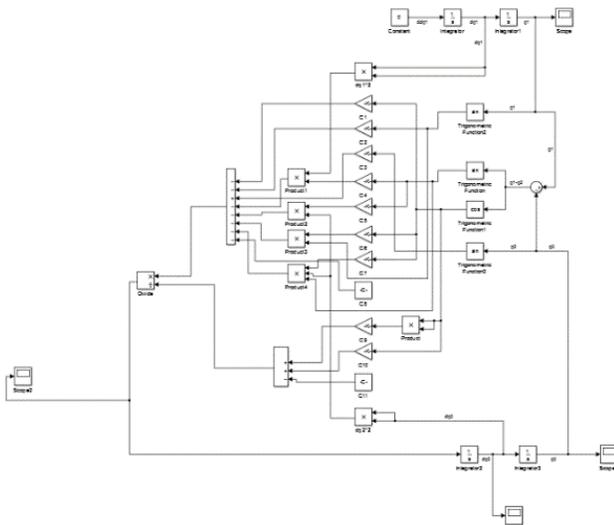


Figura 4. Diagrama de Simulink para calcular las ecuaciones

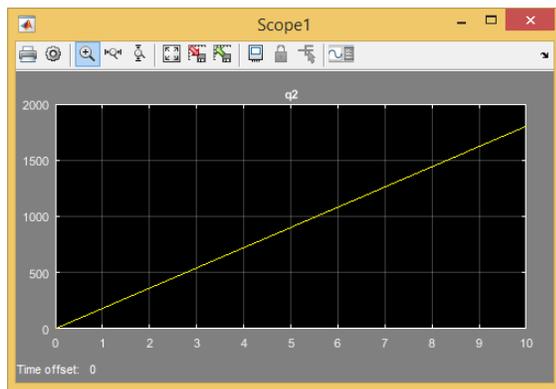


Figura 5. q_2 vs t (equivalentemente q_2 vs q_1)

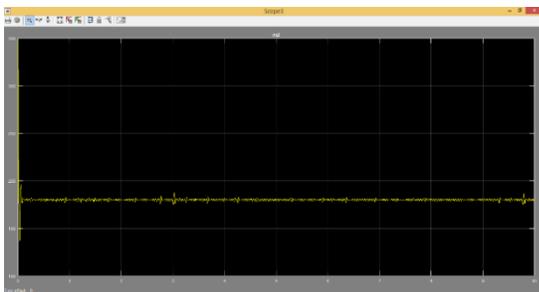


Figura 6. q_2 vs t (equivalentemente q_2 vs q_1)

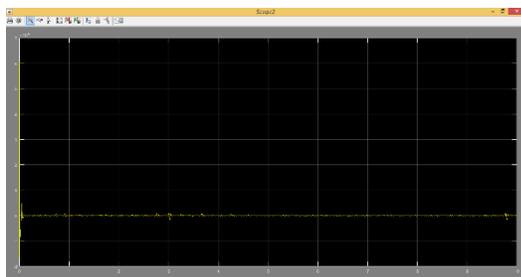


Figura 7. \dot{q}_2 vs t (equivalentemente q_2 vs q_1)

conserva el que ofrece el motor, razón que también justifica porqué \dot{q}_2 es igual a \dot{q}_1 , ya que al no haber nada que afecte el movimiento del martillo, este gira a la misma velocidad del tambor.

IV. Discusión

Si se analiza modelos matemáticos de otras máquinas trituradoras, en ninguno se hace estudio sobre su comportamiento de vacío, los únicos estudios que se conocen de máquinas de molienda es de consumo de potencia para el caso que están triturando, incluso Martínez Rodríguez et al [20] comparan un molino forrajero de tambor con una máquina de corte para manufactura, ya que el modelo matemático de este tipo de máquinas son conocidas y la analogía es muy buena aproximación, como se puede ver, todas las variables están relacionadas con corte. En cuanto al molino de martillos, Cortázar Figueroa et al [21] propone un modelo matemático, aunque tiene en cuenta la potencia de la máquina en vacío, lo único que mide es cuál es su consumo de energía por caudal másico de material que tritura, más no en cómo se comporta la máquina mientras opera. Para el caso del órgano de corte de eje vertical, el cual el modelo matemático fue hecho por Pérez et al [22] se puede apreciar que aquí como estudia la máquina en vacío, en donde mide la potencia que éste consume cuando opera en ese estado, en donde las variables a actuar son la resistencia del aire y la fricción de los apoyo del órganos, términos los cuáles están medidos en unidades de potencia, razón por la cual no se puede hacer un comparativo con el modelo expuesto en este artículo debido a que no tiene variables en común los cuales sirvan para obtener resultados.

V. Conclusiones

El modelo de Lagrange permitió modelar la cinemática del sistema tambor-martillos, mostrando que, aunque inicialmente el martillo presenta condiciones de velocidad angular variable, este se estabiliza y alcanza una velocidad angular de régimen igual a la del tambor.

VI. Trabajos Futuros

Como trabajo futuro se propone desarrollar el modelo cinemático del martillo del molino bajo condiciones de operación con carga.

Referencias

- [1] F. Beer, R. Johnston, and P. Cornwell, "Mecánica vectorial para ingenieros. dinámica," 2007.
- [2] A. Poznyak, "Modelado matemático de los sistemas mecánicos, eléctricos y electromecánicos," 2005.
- [3] T. E. Elaikh, H. J. Abed, K. M. Abed, S. M. Swadi, et al., "Vibration and kinematic analysis of scara robot structure," *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, no. 3, pp. 127–143, 2013.

- [4] J. Duarte, G. E. Valencia, and L. G. Obregón, "Application of lagrange equations in the analysis of slider-crank mechanisms," 2018.
- [5] B. P. Patel and J. Prajapati, "Dynamics of mini hydraulic backhoe excavator: A lagrange-euler (le) approach," *Int J Mech Aerospace Ind Mechatron Manuf Eng*, vol. 8, no. 1, pp. 202–211, 2014.
- [6] A. Sáenz, V. Santibáñez, and E. Bugarin, "Modelado cinemático y dinámico de un robot móvil omnidireccional de 4 ruedas considerando dinámica de actuadores," *AMRob Journal, Robotics: Theory and Applications*, vol. 4, pp. 1–6, 2016.
- [7] F. Aggogeri, A. Borboni, A. Merlo, N. Pellegrini, and R. Ricatto, "Vibration damping analysis of lightweight structures in machine tools," *Materials*, vol. 10, no. 3, p. 297, 2017.
- [8] R. Sakhapov, R. Nikolaeva, M. Gatiyatullin, and M. Makhmutov, "Modeling the dynamics of the chassis of construction machines," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 738, p. 012119, IOP Publishing, 2016.
- [9] J. M. Cervantes, N. C. Gutiérrez, E. M. Sánchez, and R. V. Díaz, "Aplicación móvil para el control de un brazo robot," *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, vol. 3, no. 5, 2016.
- [10] Y. A. Caicedo Amaranto *et al.*, *Implementación del modelo cinemático y dinámico y control de movimiento de un mecanismo planar 2R con componentes elásticos en las articulaciones*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [11] E. Cardoso, A. Fernández, S. A. Marrero Osorio, and P. F. Guardado, "Modelos cinemático y dinámico de un robot bipedo de doce grados de libertad internos," *RIELAC (Revista Ing. Electrónica, Automática y Común)*, vol. 38, no. 3, pp. 56–75, 2017.
- [12] D. A. Sinchi Torres, "Diseño y construcción de un tobillo robótico para asistencia en el proceso de rehabilitación," B.S. thesis, 2018.
- [13] O. D. M. Giraldo, J. G. V. Hernández, and D. G. Buitrago, "Control global del péndulo rotacional invertido empleando modelos de energía," *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 52, pp. 16–25, 2012.
- [14] A. B. Cantillo, J. R. Charris, J. S. Rodríguez, J. D. González, E. Y. Rodríguez, and J. R. Mckinley, "Modelado dinámico del manipulador serial mitsubishi move-master rv-m1 usando solidworks," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 15, no. 2, pp. 49–62, 2016.
- [15] D. Marcal De Queiroz, L. Z. Leyva Rafull, and C. M. Alves de Souza, "Simulação do comportamento dinámico de uma colhedora de," *Revista Eng. na Agric*, volume=13, number=4, pages=247–255, year=2014.
- [16] F. Puignau, "Modelado dinámico de un vehículo autónomo articulado todoterreno," 2017.
- [17] J. S. Duran, C. Peña, and O. Gualdrón, "Diseño de un sistema robotizado de clasificación de brevas con fines académicos.," *Revista Electrónica Redes de Ingeniería*, vol. 4, no. 2, 2013.
- [18] O. González, *Modelación de la Compactación Provocada por el Tráfico de Neumáticos de los Vehículos Agrícolas en Suelos en Condiciones de Laboratorio, 209pp*. PhD thesis, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas . . . , 2011.
- [19] F. R. C. Aguayo and J. H. Aguirre, "Diseño de un prototipo de robot móvil para granjas avícolas,"
- [20] A. M. Rodríguez, P. V. Hernández, J. D. Suárez, Y. M. Padin, and D. V. Riscart, "Modelo matemático racional para el cálculo de la potencia consumida en molinos forrajeros de tambor," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 13, no. 4, 2004.
- [21] L. Cortazar-Figueroa, R. Meléndez-Pérez, and D. Oliver-Hernández, "Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de canela (*cinnamomum zeylanicum*) y pimienta negra (*piper nigrum* L)," *Revista mexicana de ingeniería química*, vol. 7, no. 2, pp. 123–130, 2008.
- [22] J. S. P. de Corcho Fuentes and F. G. Pegna, "Modelo matemático para la demanda de potencia de un aparato de corte de eje vertical para trituración de rastrojos," *Ingeniería e Investigación*, vol. 28, no. 3, pp. 122–125, 2008.