

Artículo de investigación científica y tecnológica

Cálculo de la fuerza de arrastre en un transportador tubular para café tostado mediante co-simulación

Calculation of the drag force in a tubular conveyor for roasted coffee using co-simulation

Segismundo Mujica Caballero¹ , Carlos Eduardo Alfaro Rodríguez^{2*} , Yunielkis Pompa Chacon¹ 

1. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Departamento de Mecánica Aplicada y Diseño. Santiago de Cuba. Cuba.

2. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Departamento de Manufactura y Materiales. Santiago de Cuba. Cuba.

*Autor de correspondencia: alfa@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 30 de agosto de 2025

Aceptado: 12 de octubre de 2025

Publicado: 16 de octubre de 2025

Resumen

Durante la primera etapa del diseño de un transportador de arrastre tubular fue necesario determinar la fuerza de arrastre, para lo cual se apeló a la co-simulación entre programas computacionales de dinámica multicuerpo y de modelación de elementos discretos. El objetivo de este trabajo fue aplicar una metodología basada en técnicas de co-simulación a un transportador de trazado recto con el fin de determinar las fuerzas actuantes en los elementos de arrastre. Se hizo un modelado inicial y se emplearon conjuntamente los software RecurDyn y EDEM para describir la interacción del granulado con las partes móviles del

transportador. La metodología se aplicó en la etapa inicial del diseño un transportador de café tostado, el cual se tomó en calidad de objeto de investigación. Se obtuvo la fuerza de arrastre en un disco con carga granular y en vacío. La metodología propuesta demostró su efectividad para determinar las fuerzas en operación y sienta las bases para su aplicación a transportadores tubulares con otras configuraciones de trazado.

Palabras claves: transportador de arrastre tubular, modelación de elementos discretos, dinámica multicuerpo.

Abstract

During the initial stage of the design of a tubular drag conveyor, it was necessary the calculation of the drag force, for which it was used the co-simulation between multibody dynamics and discrete element modeling softwares. The objective of this study was to apply a methodology based on co-simulation techniques to a straight-layout conveyor in order to determine the forces on the drag elements. An initial model was developed and RecurDyn and EDEM software packages were used jointly to describe the interaction between the granular material and the moving parts of the

conveyor. The methodology was applied during the early design stage of a roasted coffee conveyor, which was selected as the case study. The drag force on a grain loaded and unloaded disk conditions was obtained. The proposed methodology proved to be effective in determining operational forces and establishes a basis for its application to tubular conveyors with alternative layout configurations.

Key words: tubular drag conveyor, discrete element modeling, multibody dynamics.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Mujica Caballero S, Alfaro Rodríguez CE, Pompa Chacon Y. Cálculo de la fuerza de arrastre en un transportador tubular para café tostado mediante co-simulación. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e715. <https://goo.su/iATS62>

1. Introducción

Desde hace varias décadas el Transportador Tubular de Arrastre (TTA) figura como uno de los equipos de preferencia para el acarreo de materiales granulados en diferentes tipos de industrias, encontrándose las principales aplicaciones en la industria alimentaria y la farmacéutica.

Un TTA consiste en un tubo de acero inoxidable, por dentro del cual se desliza un conjunto de discos espaciados uniformemente entre sí y unidos por un cable u otro elemento flexible formando celdas entre discos consecutivos. Los discos son movidos por un rotor motriz ubicado en un extremo y en el otro extremo se dispone de un rotor tensor, de manera que se produce el arrastre a lo largo de una rama del tubo de las partículas (granulado) alojadas en las celdas.

Una de las tareas fundamentales del diseño de estos transportadores es el conocimiento de las cargas actuantes en los órganos de arrastre. Aunque los TTA son equipos relativamente sencillos, se precisa de un cálculo previo al diseño de detalle de sus componentes que, partiendo de la capacidad de transportación, la geometría del trazado y los regímenes de trabajo, ofrezca las primeras aproximaciones a los principales esfuerzos de los componentes.

No existe una cantidad de estudios apreciable, que describan las especificidades del cálculo de este tipo de transportador, dejando la mayoría de la información en internet a reportes promocionales de mercadotecnia donde, en algunos casos, se incluyen las especificaciones funcionales y de capacidad de transportación como datos de utilidad para su selección. Diferentes autores, han investigado los esfuerzos generados en los órganos de arrastre de estos transportadores, coincidiendo en la dependencia de sus magnitudes respecto a la geometría del trazado y dimensiones de los tubos.

A diferencia de otros transportadores de arrastre, los TTA permiten trazados espaciales para adaptarse a los requerimientos topológicos del proceso, añadirse o suprimirse puntos de carga y descarga, dispositivos de cambio de dirección y de limpieza lo que produce cambios significativos en los esfuerzos que se producen en cada tramo del trazado.

En [1] presentan un desarrollo matemático para la obtención de los esfuerzos en los órganos de arrastre de un transportador. El procedimiento matemático considera las cargas dinámicas vibracionales conducentes a un sistema de ecuaciones diferenciales que facilitan la parametrización del equipo en vista a un aumento de la eficiencia energética.

Los autores de [2] desarrollan un método de cálculo para el paso entre discos consecutivos (celdas) basados en la condición de equilibrio crítico en su interacción con el material granulado que se transporta. El análisis se realiza para un transportador de arrastre tubular de trazado horizontal que, si bien limita su alcance, sienta las bases para el desarrollo de análisis ulteriores basados en el mismo principio matemático.

En [3] describen un experimento multifactorial basado en variables como el material a transportar, diámetro del tubo y velocidad lineal de los discos, lo que les permite determinar el torque necesario para animar el transportador en sectores curvos del trazado. La importancia práctica de esta aproximación es la vinculación de variables del proceso tecnológico de producción con las magnitudes geométricas del transportador.

Los autores de [4] mencionan como sumamente influyente en el deterioro de los eslabones de la cadena los esfuerzos, la configuración del trazado y el carácter abrasivo del material. Desarrollan la teoría del cálculo de los esfuerzos y validan experimentalmente las conclusiones a través de mediciones instrumentales directas y simuladas mediante software de cálculo de elementos discretos

Todos estos reportes científicos contienen un profundo estudio físico matemático del fenómeno de transporte de partículas creando las bases para el aprovechamiento de las tecnologías computacionales modernas mediante simulaciones para el cálculo de los esfuerzos en los órganos de arrastre.

Las ventajas de simulaciones en las etapas de diseño de transportadores inciden directamente en ahorro de tiempo y dinero, lo que se deduce de no tener la necesidad de construir prototipos físicos y ensayar las diferentes soluciones que devienen en el modelo optimizado. Las simulaciones se sustentan en modelos digitales paramétricos que le dan extrema flexibilidad a los diseños y a la posibilidad de vincular más de un software para la caracterización de los materiales y sus propiedades.

Los softwares manejados responden, en primer lugar, a la necesidad del desarrollo del modelo paramétrico del equipo, generalmente en un sistema computacional de asistencia al diseño como SolidWorks, Inventor o Catia, los cuales posteriormente se emplean en los cálculos de resistencia por el método de elementos finitos. En [5] aplican SolidWorks en el modelado de una plataforma vibratoria industrial y simulan por elementos finitos los esfuerzos a que se someten las partes. Aunque no se trata de una aplicación a un transportador de arrastre tubular, queda expuesta la metodología para el manejo de este software. El autor de [6] utiliza, además de SolidWorks, el módulo de elementos finito de ANSYS para la simulación por elementos finitos.

Por otro lado, es necesario un programa que simule el material a transportar, ajustándose a sus propiedades físicas, generando la cantidad precisa y localizándolo en las zonas del equipo convenientemente. Aquí se emplean softwares de modelado de elementos discretos, tales como EDEM [7]. El autor de [8] aplica el software EDEM en el cálculo específico de la interacción entre los granos y las partes y compara los resultados de tensión en el cable con mediciones instrumentales, los errores entre ambas mediciones se atribuyen a variables no controladas como el nivel las vibraciones y el contacto entre las partículas y los elementos de arrastre. Otros autores [9] establecen los métodos de calibración del software EDEM haciendo énfasis en el dimensionamiento de las partículas y la introducción de sus propiedades físicas; todo ejemplificado a través de diferentes equipos industriales.

Finalmente, para la determinación de los esfuerzos en los órganos de arrastre y con esto la potencia necesaria para su movimiento se requiere de un programa de dinámica multicuerpo como ADAMS, RecurDyn o ANSYS Motion. Estos programas se utilizan ampliamente para determinar los esfuerzos en elementos móviles de diferente naturaleza, pero cuando se trata de la interacción entre los componentes de los equipos y material granulado la co-simulación entre EDEM y RecurDyn figura como una de las mejores opciones [10, 11]. En [12]

han aplicado la cosimulación entre estos dos programas para la determinación de los esfuerzos en los cables de una excavadora eléctrica debido a la resistencia del suelo.

En este trabajo se desarrolló la metodología del empleo de la co-simulación entre RecurDyn (V9R4) y Altair EDEM (v2020) para el cálculo de la fuerza a que se somete el cable de tracción de un TTA que se diseñó como sustituto de un transportador de cangilones para el traslado de café tostado hacia el molino en una torrefactora.

El objetivo de este trabajo fue aplicar una metodología basada en la co-simulación entre los programas RecurDyn V9R4 (MBD) y Altair EDEM (DEM) para determinar los esfuerzos que se oponen a la traslación de los órganos de arrastre en la rama de carga de un transportador tubular de arrastre de trazado recto con una inclinación de 60°.

Con el desarrollo y aplicación de la metodología planteada se logró la determinación de la fuerza de tracción en la rama de carga del transportador, la cual es útil para la continuidad del diseño en tareas como el cálculo de la potencia necesaria en el accionamiento, la selección del cable, el dimensionamiento de las poleas, entre otros.

2. Métodos y Materiales

El procedimiento que se propuso en este artículo está basado en un estudio dinámico inverso; es decir, se aportaron los parámetros cinemáticos del equipo en movimiento y como resultado se obtuvieron los esfuerzos necesarios para lograr tal movimiento.

La metodología empleada en el cálculo de la tensión en el cable del transportador para café tostado se basó en las seis etapas que se describen a continuación:

1. Obtención de datos del proceso tecnológico y cálculos preliminares

Durante el desarrollo del estudio se hizo necesario el acopio de datos de los requerimientos del proceso tecnológico y del material a transportar.

El trazado del transportador quedó definido por la posición relativa de la compuerta de entrada al molino respecto a la compuerta de salida de los granos de la tolva de almacenamiento. La diferencia de altura entre ambas secciones y la disposición de los equipos adyacentes permitió un trazado recto con una longitud de 9 m y una inclinación de 60 grados.

La capacidad de transporte exigida por el proceso tecnológico se obtuvo a semejanza de la capacidad del antiguo transportador de cangilones, lo que satisface las necesidades funcionales de los equipos en la línea de producción. El valor másico de la capacidad de transporte, según las referencias del fabricante del transportador de cangilones fue de 2000 kg/h.

Por otro lado, en la literatura se obtuvieron las características del grano de café tostado, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características físicas del grano de café robusta tostado. Fuente: [13]

Característica física	Valor
Densidad de un grano de café tostado	0,56
Coeficiente de rozamiento dinámico con el	0,15
Coeficiente de restitución	0,10
Volumen (cm ³)	0,23
Fracción de vacío intersticial (entre granos)	0,45-0,55

Con estos datos, se pudo inferir el radio interior del tubo del transportador, mediante la ecuación (1).

$$R = \sqrt{\frac{Q_m}{3600 \cdot \pi \cdot K_o \cdot v \cdot \rho \cdot (1 - K_v)}} \quad (1)$$

Donde:

R : radio interior del tubo (m)

Q_m : capacidad másica horaria del transportador (2000 kg/h)

K_v : fracción de vacío intersticial (0,45 – 0,55) se tomó 0,5

K_o : fracción de volumen de la celda disponible para la carga (0,89 – 0,96) se tomó 0,9

ρ : densidad de la partícula a mover (560 kg/m³)

v : velocidad de los discos (0,01 – 0,6) m/s. Se tomó 0,3 m/s

Los valores (1 - K_v) y K_o se utilizaron para representar el aprovechamiento volumétrico del transportador. La velocidad se escogió como un valor medio ya que la integridad de los granos en esta etapa del proceso no es lo más importante. Se obtuvo un valor de 0,096 m para el diámetro del tubo, con el cual se seleccionó un tubo de acero inoxidable de 108,2 mm de diámetro interior, 114,3 mm de diámetro exterior y espesor 3,05 mm (Norma ASME B36.19-2022)

2. Construcción del modelo CAD

Con los datos obtenidos, se procedió al modelado de una celda del transportador con la asistencia del software Autodesk Inventor 2021. Una celda del transportador es el volumen comprendido entre dos discos consecutivos espaciados a 300 mm (paso), según se muestra en la figura 1.

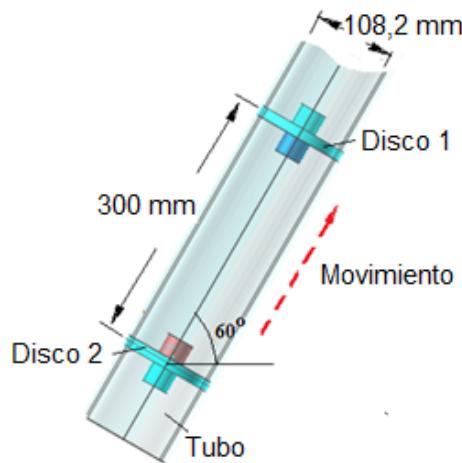


Fig. 1. Detalle de la geometría modelada de una celda del transportador para café tostado. Fuente: autores

Los elementos de la celda y sus relaciones paramétricas se dimensionaron. El espesor de cada disco fue de 5 mm y sus bordes redondeados con un radio de 0.5 mm. La holgura radial entre los discos y el tubo se le dio un valor de 2 mm.

En cuanto a los materiales, se tomó el acero inoxidable para el tubo y el núcleo del disco y polietileno de alta densidad para la zona de contacto entre el disco y el tubo. Estos materiales asignados permitieron calcular la masa del disco (0,61 kg) y el coeficiente de rozamiento cinético con el tubo (0,37).

3. Identificación de las fuerzas de resistencia al movimiento

Previo a la simulación se hizo el estudio vectorial de las fuerzas que actuaban sobre los discos del transportador. En la figura 2, se muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que se consideraron en el estudio, teniendo en cuenta las características del trazado del transportador y las propiedades de los granos de café tostado.

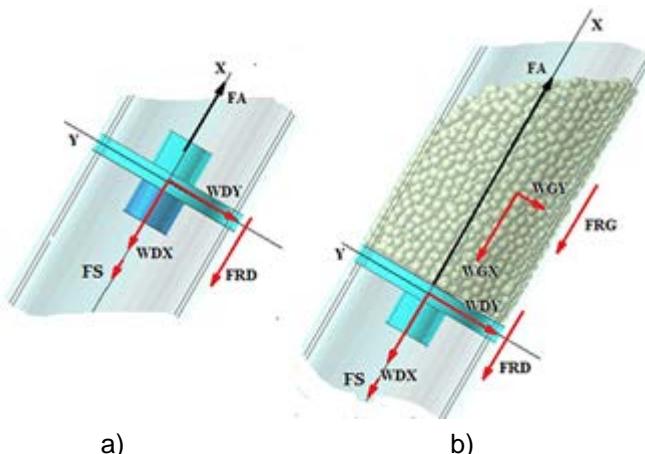


Fig. 2. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas en el disco, a) sin carga granular; b) con carga granular.

Fuente: autores

El sistema de referencia se tomó de forma que el eje X coincide con la dirección axial del tubo. Las fuerzas consideradas son:

WDX y WDY son las componentes del peso del disco proyectadas sobre los ejes X e Y, respectivamente.

WGX y WGY son las componentes de la interacción de la masa granular proyectada sobre los ejes X e Y, respectivamente.

FRD y FRG representan las fuerzas de rozamiento del disco y la masa granular con las paredes del tubo, respectivamente.

FS es la fuerza de tensado del cable. Esta es una fuerza en equilibrio para ambas ramas del tubo del transportador.

FA es la fuerza de arrastre necesaria para vencer las fuerzas de resistencia y animar el disco con la velocidad requerida por el sistema para satisfacer el volumen horario de transporte.

No se tuvo en cuenta la adherencia del material en la holgura entre disco y tubo pues el café tostado es una masa de partículas de alta fluidez y sin humedad. Igualmente, la fuerza de inercia no se consideró debido a que las celdas se alimentan en movimiento y solo cuenta el efecto de “acomodo” de los granos en su interior.

4. Importación del modelo CAD a RecurDyn

Una vez construido el modelo, las geometrías se importaron en RecurDyn y se definieron las uniones y contactos. Al tubo se le asignó una unión fija, mientras que a los discos se le asignó una unión de traslación en la dirección del eje del tubo con una velocidad constante de 0.3 m/s. En las superficies de los discos y el tubo en la unión de traslación se establecieron 10 puntos de contacto y el coeficiente de rozamiento cinemático. Se asignaron las masas a los sólidos de acuerdo con los materiales utilizados en el modelo CAD.

En este momento se realizó una simulación de verificación del funcionamiento del programa, obteniéndose las características cinemáticas mostradas en la figura 3 durante un tiempo de un segundo. Esto demostró que el modelo insertado en RecurDyn cumple con los requerimientos para proseguir con la simulación.

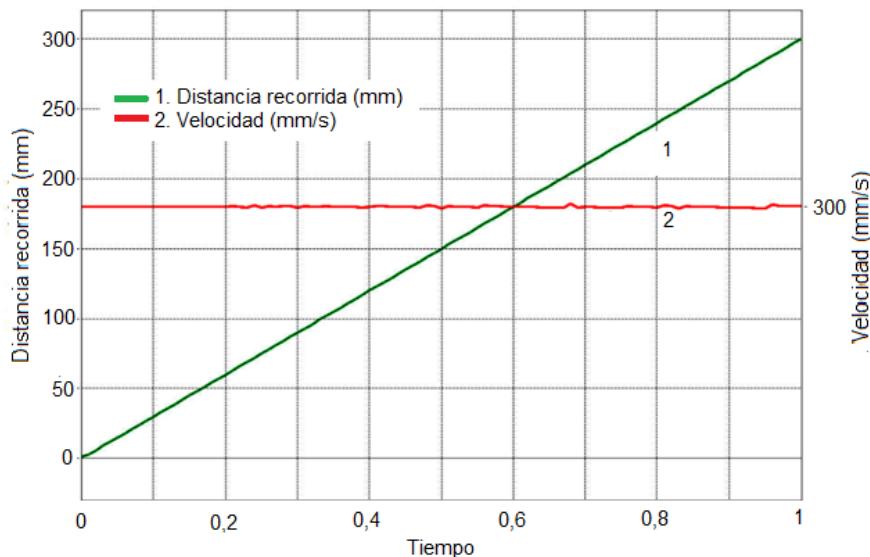


Fig. 3. Cinemática del movimiento de traslación de los discos. Fuente: autores

Las partes del modelo en RecurDyn se convirtieron en las fronteras (walls) de contención de los granos y quedaron listas para exportarlas a EDEM.

5. Construcción de los granos en EDEM

Para proseguir con la simulación se modeló la masa de granos que debía entrar en la celda. En la figura 4, se muestra la construcción de la geometría del grano de café con las dimensiones y forma promedio mediante el mismo programa CAD que se modeló el transportador. Con esto se creó una plantilla, se importó en EDEM y este lo convirtió en una geometría multiesfera similar. Dando prioridad a las propiedades de la masa por encima de la forma y teniendo en cuenta las limitaciones de recursos computacionales, se consideró la reducción a una sola esfera de masa equivalente al grano de café, las dimensiones de la cual se calcularon obteniéndose una sola esfera de diámetro de 7,6 mm.

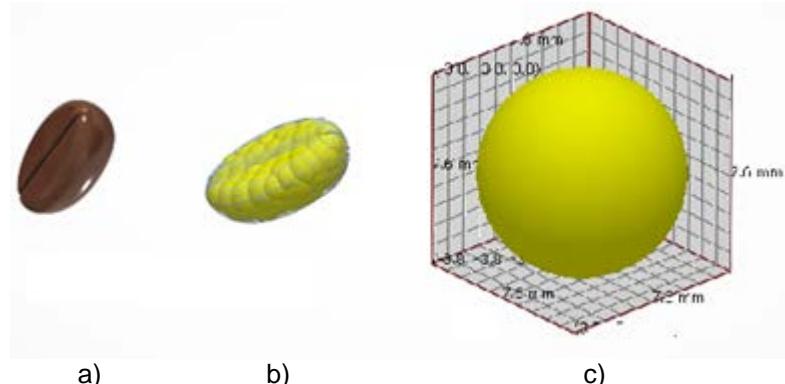


Fig. 4. Detalles de la construcción del grano de café a) modelo en CAD; b) grano de café multiesferas según plantilla en EDEM; c) esfera equivalente al grano de café en EDEM. Fuente: autores

Una vez definida la forma y masa de la esfera equivalente, se importó a EDEM el modelo constituido por las fronteras (walls) determinadas por RecurDyn. Se creó un generador estático de las partículas esféricas equivalentes en la celda en estudio y se comprobó su funcionamiento. En EDEM, trabajando de forma independiente, se verificó que la masa de partículas en la celda es 0,611 kg

6. Cosimulación RecurDyn-EDEM

Ya en esta etapa se conectaron EDEM y RecurDyn para proceder a la co-simulación. RecurDyn comenzó la animación del transportador según los parámetros cinemáticos dados y se pudo verificar el trabajo conjunto por la presencia de los granos en el modelo. Una vez terminada la co-simulación se lograron los resultados en el post-procesador de RecurDyn. Durante la co-simulación se hicieron simulaciones con el disco sin granos y con granos para evaluar el aporte que hace la carga granular a la fuerza de arrastre.

3. Resultados y Discusión

Teniendo en consideración el paso de 0,3 m y el espesor del disco de 0,005 m, en el tubo de arrastre del transportador hay 29,5 celdas entre la sección de carga y descarga, esto es 3,27 celdas por metro. Si se determinó que en cada celda hay 0,611 kg de café tostado y que la velocidad de arrastre asumida fue de 0,3 m/s, el flujo mísico por hora que se obtuvo es de 2163 kg/h. Esta capacidad mísica es ligeramente superior a la deseada para el transportador en estudio (2000 kg/h), lo cual se debe a que durante la selección del tubo normalizado se escogió un diámetro interior de 108,2 mm, algo mayor que el resultante de los cálculos iniciales. Si se desea ajustar con exactitud la productividad del transportador, se puede variar (dentro del rango recomendado) la velocidad de traslación, aunque desde el punto de vista práctico, la tolva que suministra los granos en la sección de entrada tiene la posibilidad de regular el flujo de granos.

La co-simulación de RecurDyn y EDEM permite determinar todas las fuerzas que surgen entre los componentes de la celda y entre esta y la masa granular. En este caso de estudio es de interés la fuerza de arrastre (*driving force*), es decir, la fuerza que debe ejercer el cable sobre el disco cargado con café de la celda para que cumpla con la cinemática impuesta.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la fuerza de arrastre en el disco descargado (1) y en el disco cargado (2) de la celda simulada.

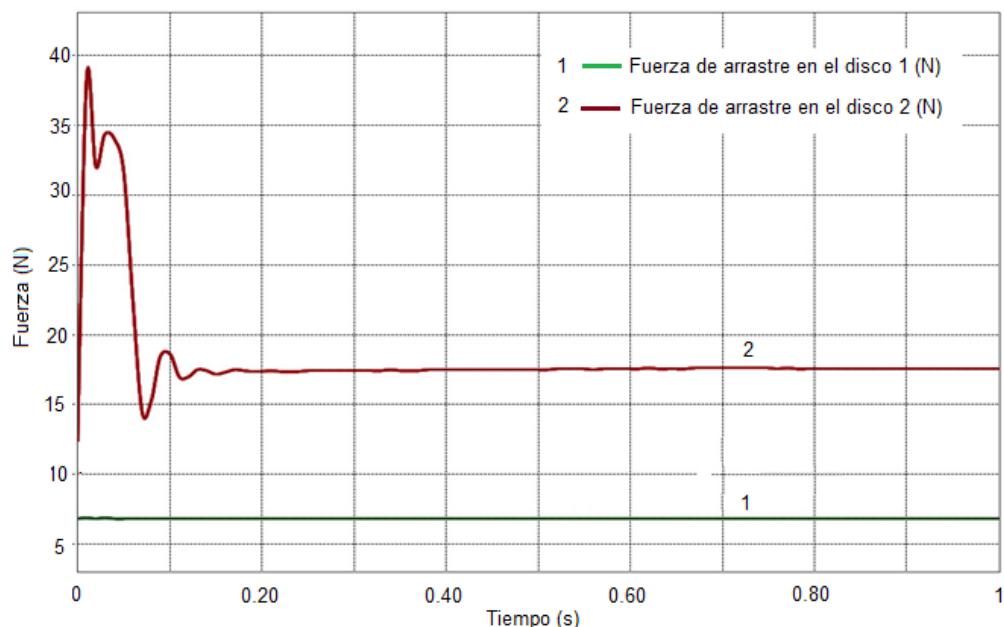


Fig. 5. Fuerza de arrastre en el disco descargado (1) y en el disco cargado (2) de la celda en estudio.

Fuente: autores

Se puede apreciar en la curva 1, correspondiente a la fuerza de arrastre necesaria para animar al disco descargado y en correspondencia con los diagramas de cuerpo libre de la figura 2, que esta permanece constante durante toda la simulación con un valor de 6,86 N. Esta es la fuerza resultante de la resistencia al desplazamiento del disco sin carga granular debida a la inclinación de la traza y la fuerza de rozamiento del disco con las paredes interiores del tubo. Ambas resistencias son constantes durante toda la simulación.

Por otra parte, la curva 2 corresponde a la fuerza de arrastre en la celda cargada con los granos de café. Al inicio de la co-simulación se aprecia un valor pico de esfuerzo antes de 0,15 s del tiempo de simulación el cual es producido por el propio generador de partículas de EDEM y el movimiento de “acomodo” de los granos en la celda. Estos valores picos provocan vibraciones en el cable en las proximidades de la tolva de carga y requieren un análisis particular para definir con precisión un valor de tensado que ayude en su control.

A partir de los 0,15 s, la fuerza de arrastre muestra un valor convergente a 17,5 N hasta el fin de la simulación. La carga granular sobre el disco 2 produce un incremento de las resistencias al movimiento en 10,65 N aproximadamente, lo cual es reflejado en la magnitud de la fuerza de arrastre.

Una vez conocida la fuerza de arrastre necesaria para animar una celda, es posible determinar la fuerza que se necesita en el cable para poner en movimiento todas las 29,5 celdas de la rama cargada del tubo del transportador. La fuerza de arrastre aportada por cada celda hasta la sección de descarga suma 525 N.

En la figura 6 se muestra el perfil de tensiones en la rama cargada del transportador. La tasa de crecimiento de la fuerza de arrastre en la medida que se aproxima a la sección de descarga es de 56,38 N/m sobre la longitud del trazado.

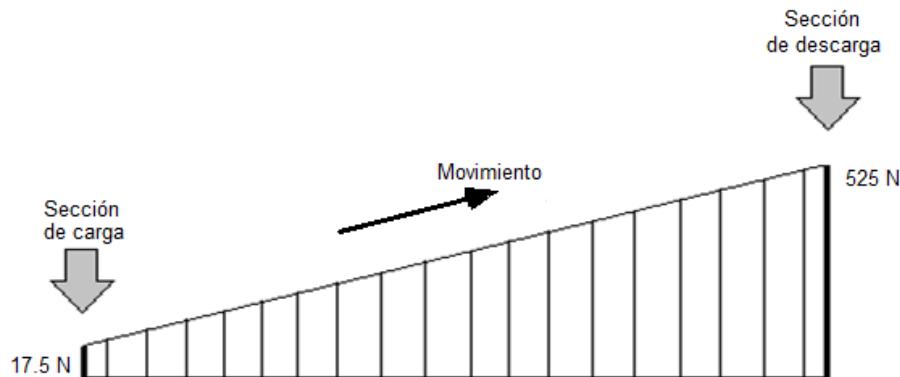


Fig. 6. Gráfico de tensiones entre la sección de carga y descarga del transportador. Fuente: autores

Es importante evaluar la contribución que hacen las masas de los órganos de arrastre y la masa granular a la fuerza de arrastre. En este caso, la fuerza de arrastre para el movimiento de la celda descargada es aproximadamente el 40 % de la fuerza que se requiere para mover la celda cargada, lo cual es algo grande e incide directamente en la eficiencia del equipo. Esto indica la necesidad de reducir la masa de los núcleos de los discos bien sea mediante el empleo de otras soluciones constructivas u otros materiales.

Estas simulaciones permiten, con muy bajo costo y poco tiempo, volver a parametrizar el modelo y repetir el procedimiento hasta soluciones óptimas. Este proceder reiterativo es típico de las tareas de diseño, pero mediante la simulación descrita, se pueden realizar experimentos (*what if*) tomando como función objetivo, por ejemplo, la capacidad de transporte o la eficiencia y variando la velocidad y las dimensiones del tubo como parámetros de diseño. Todo esto conduce a soluciones de optimización del diseño muy precisas y rápidas. Todo esto sirve de base para aplicaciones en otros transportadores de arrastre tubular con diferentes trazados.

Otras posibles aplicaciones de la co-simulación en el cálculo de transportadores de este tipo podrían ser: el cálculo de la tensión mínima del órgano de tracción, cálculo del flujo de entrada de la masa granular y su efecto, influencia de la configuración de la traza en la potencia requerida en el accionamiento, etc.

La principal limitación que tiene el empleo de la co-simulación es la gran demanda de recursos computacionales lo que obliga, en ocasiones, a simplificar el modelo

Conclusiones

La aplicación de la co-simulación RecurDyn y EDEM en el caso de un transportador de arrastre tubular, según la metodología presentada, permite de manera rápida una aproximación bastante precisa al cálculo de los esfuerzos que se generan en las diferentes partes del equipo, lo cual es imprescindible para continuar con el diseño de detalle de los elementos.

En la aplicación al transportador para café tostado, mediante la co-simulación se logró calcular la fuerza de arrastre necesaria para satisfacer la capacidad de transporte demandada por el proceso y se sentaron las bases para la continuidad de las tareas de diseño.

Referencias

1. Lyashuk O, Vovk Y, Sokil B, Klendii V, Ivasechko R, Dovbush T. Mathematical model of a dynamic process of transporting a bulk material by means of a tube scraping conveyor. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2019;21(1):74-81.
2. Weili L, Yanping Y, Xiaopeng G, Jianfei Z. Design of Horizontal Tube Chain Conveyor Scraper Pitch. TEM Journal. 2020;9(4):1413-1418. DOI: 10.18421/TEM94-12
3. Lyashuk O, Dyachun A, Zolotuy R, Oleksyshyn O, Zamora Y, Tkač Z. Results of Experimental Research of Granular Materials Transportation by Tubular Scraper Conveyors. Acta technologica agriculturae Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitrae. 2013;4:103-107. <https://doi.org/10.2478/ata-2013-0026>
4. Krause F, Katterfeld A. Functional Analysis of Tube Chain Conveyors. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim. 2004;21(4):348 – 355. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200400937>
5. Chougule SM, Murali G, Kurhade AS. Design and Analysis of Industrial Material Handling Systems using FEA and Dynamic Simulation Techniques. Journal of Scientific & Industrial Research. 2025;84(6):645-653. <https://doi.org/10.56042/jsr.v84i6.17512>
6. Wang Z, Li Y, Wang M, Wang H. Diseño y análisis de simulación de equipos de transporte de cadena en tubos flexibles de alta eficiencia. Alimentos y Maquinaria. 2020;36(7). <https://doi.org/10.13652/i.issn.1003-5788.2020.07.016>
7. Fang X, Chen Y, Liu W, Luo X, Xie G. Application of Discrete Element Method in the Analysis of Loader shovel Loading Process. In Current Trends in Computer Science and Mechanical Automation. Selected Papers from CSMA2016 - Volume 2. Shawn X. Wang (Ed.) and chapters contributors. Warsaw/Poland: Published by De Gruyter Open Poland; 2017. <https://doi.org/10.1515/9783110584998-027>

8. Yao Y. A Study of the Operation Parameters of a Tube Chain Conveyor Based on Discrete Element Simulation. In: 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science. Hangzhou, Zhejiang, China; 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1631/1/012160>
9. Katterfeld A, Donohue T. Application of the Discrete Element Method in Mechanical Conveying of Bulk Materials. In: 07th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids (CHoPS, 2012). Friedrichshafen/Germany; 2012.
10. Chen Z, Tan X, Chen Z, Zhao H, He J, Liu Y et al. Coupled RecurDyn-EDEM simulation and experimental analysis of a precision fertilization device. *Scientific Reports*. 2025;15:42167. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26063-4>
11. Naing JJ, Swe WWM, Win HH. Multibody Dynamic Analysis of a Gantry Robot for Automatic Egg Transferring Process Using RecurDyn. *GMSARN International Journal*. 2024;18:501-508. <http://gmsarnjournal.com/home/wp-content/uploads/2024/03/vol18no4-10.pdf>
12. Feng Y, Wu J, Guo C, Lin B. Numerical Simulation and Experiment on Excavating Resistance of an Electric Cable Shovel Based on EDEM-RecurDyn Bidirectional Coupling. *Machines* 2022;10(12)1203. <https://doi.org/10.3390/machines10121203>
13. Hidayat DD, Indriati A, Andriansyah CE, Rahayuningtyas A, Sudaryanto A. Changes of Some Engineering Properties of Coffee Beans Due to Roasting Process. *Asian Journal of Applied Sciences*. 2020;8(1). <https://doi.org/10.24203/ajas.v8i1.6055>

Editores:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Vladimir Tomás González Fernández.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Evaluación

Este artículo ha sido evaluado mediante revisión por pares abierta.

Ingeniería Mecánica agradece a los árbitros: Dr. C. Neeldes Matos Ramírez, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba y al Dr. C. David Coureaux Mustelier, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, Cuba, por su contribución a la evaluación de este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Segismundo Mujica Caballero.

Participó en el diseño, coordinación de la investigación y recopilación de datos. Trabajó en el ordenamiento y procesamiento de los datos, en la obtención y preparación teórica, así como en la validación de las variantes propuestas y en la elaboración de la metodología de solucionar el problema técnico, también en el procesamiento de los software empleados para la obtención de los resultados del trabajo y actualización de la bibliografía referenciada. También participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Carlos E. Alfaro Rodríguez.

Participó en la recopilación de datos e informaciones, en el diseño teórico y de investigación, valoración y discusión de los resultados, además de un análisis previo y preparación teórica. Trabajó en la búsqueda y selección de la información. Participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Yunielkis Pompa Chacon.

Se centró en la revisión y actualización de la bibliografía referenciada del trabajo estudiado en el artículo, valorando y adaptando estas al sistema previsto en el mismo, según exigencias de la revista. También participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.