



REINGENIERÍA DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE DE MOVIMIENTO HORIZONTAL ALTERNATIVO

REENGINEERING OF A RECIPROCATING HORIZONTAL MOVEMENT CONVEYING SYSTEM

RESUMEN

En el departamento técnico de una fábrica de alimentos se confeccionó un prototipo de transporte de movimiento horizontal alternativo, un tipo de máquina de transporte de productos sólidos a granel utilizado en algunas industrias alimenticias, que logra el avance del producto por un canal abierto mediante la alternancia de un movimiento del canal en la dirección del transporte, y un movimiento de mayor velocidad en la dirección opuesta, en el que el producto desliza sobre el canal. Ese equipo logró el avance efectivo de producto, pero se intuyó que su capacidad de transporte era mejorable. Este trabajo buscó llevar a cabo una reingeniería del aparato para aumentar su rendimiento mediante el ajuste conveniente de los parámetros configurables que definen la cinemática del movimiento del canal de transporte. Con el propósito de reducir el volumen de experimentación necesario, se desarrolló un modelo matemático del comportamiento del producto transportado basado en la descripción cinemática del canal de transporte y los fenómenos de rozamiento implicados. El uso del modelo matemático y la experimentación con manipulación de variables permitió encontrar una configuración que presentó un aumento de 115% en la velocidad de transporte en comparación con la condición al inicio del estudio. Los resultados obtenidos permiten afirmar que el modelo desarrollado es suficientemente útil para encontrar configuraciones de operación buenas, incluso las que en un principio no resultaban intuitivas.

Palabras-clave:

Análisis cinemático. Modelado. Movimiento horizontal alternativo. Optimización. Transporte industrial.

Keywords:

Kinematic analysis. Modeling. Horizontal reciprocating movement. Optimization. Industrial conveying.

BARZOLA, Marcos Daniel. Reingeniería de un sistema de transporte de movimiento horizontal alternativo. **Revista Formadores**: vivências e Estudos. Cachoeira, Bahia, v. 16, n.2, p. 53 - 72, setembro 2023.

ABSTRACT

A prototypal reciprocating horizontal movement conveyor was built in the technical department of a food factory. It is a class of bulk solid product conveying machine used in some food industries that achieves the advance of the product through an open tray by alternating a tray forward movement with a higher speed backward movement, in which the product slides over the tray. That device achieved effective product forward, but it was perceived that its conveying capacity could be improved. This work attempted to carry out a device reengineering to increase its performance through the convenient adjustment of the configurable parameters that define the conveying tray kinematics. In order to reduce the volume of experimentation required, a mathematical model of the conveyed goods' motion was developed based on the kinematic description of the conveying tray and the friction phenomena involved. The use of the mathematical model and the manipulation experimentation allowed to find a configuration that presented an increase of 115% in the conveying speed compared to the starting condition. Based on the results, it can be said that the developed model is useful enough to find good operating configurations, even those that were initially not intuitive.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de movimiento horizontal alternativo es un tipo de máquina utilizada en algunos tipos de industria alimenticia. Transporta producto a granel en el interior de un canal abierto que realiza movimientos horizontales alternativos en la dirección de su eje longitudinal a diferentes velocidades dentro de un mismo ciclo. En una parte del ciclo la velocidad es menor, de manera que el producto es trasladado, y en otra parte la velocidad aumenta de manera que se produce el deslizamiento entre el canal y el producto, logrando así que este no retorne la distancia que se trasladó en la primera parte del ciclo (HIGGINS, 2005).

1.1. PROBLEMA

El equipo técnico de una fábrica de alimentos confeccionó un prototipo de este tipo de máquina para probar la factibilidad de un concepto de diseño basado en elementos de automatización simples. Aunque el prototipo mostró la viabilidad de la idea, durante la experimentación hubo una serie de variables que fueron ajustadas en forma intuitiva, como las velocidades superior e inferior y las fases del movimiento en los que se debe hacer el cambio entre ellas, y el efecto de su manipulación se evaluó únicamente en forma visual. Ese hecho hizo suponer que un enfoque metódico en el ajuste de esas variables podría lograr una mejora en el rendimiento del transporte.

1.2. REFERENCIAL TÉCNICO

En la búsqueda de información sobre cómo conducir un ajuste óptimo de las variables se acudió a libros de diseño de maquinaria industrial de transporte. Autores como Fruchtbaum (1988), Vázquez et al. (2014, pp. 202-204), Walas (1990, pp. 76-78), Barbosa-Cánovas et al. (2005, pp. 126-129), Perry et al. (1997, sec. 21.8) y Matos Ramírez (2011, sec. 4.1) aportan en sus obras descripciones, variantes constructivas e información para el diseño de varios tipos de transportes industriales, pero no abordan el transporte de movimiento horizontal alternativo.

La búsqueda en portales de revistas indexadas sólo arrojó resultados de publicaciones de tipo técnico – comercial con artículos publicitarios y entrevistas a fabricantes. (Food & Drink Technology, 2015; “Ask Factory Chimp”, 2006; “Gentle Horizontal Conveyor”, 2008; “Innovations in Packaging”, 2007; “Literature & Product Review”, 2012; “New Products”, 2013; “On The Hush”, 2008; “Technology Showcase”, 2008; CHUA, 2006; FOOD ENGINEERING, 2013; FOOD MAGAZINE, 2008; HIGGINS, 2005, 2005; NATIONAL PROVISIONER, 2008; SVEJKOVSKY, 2012)

La información más útil para la reingeniería se encontró en patentes. Las solicitudes abundan en detalles sobre la función que cumple cada elemento o pieza de un mecanismo, pero los solicitantes evitan incluir datos de calibraciones para su funcionamiento óptimo o cómo realizar una optimización. Ese conocimiento queda en el ámbito del secreto industrial. Aun así, esos detalles funcionales proveen conceptos útiles para el modelado matemático.

En Conveying system and method, Sullivan (2003) incluye la siguiente explicación del funcionamiento de su mecanismo.

Las oscilaciones se componen de una carrera de avance lenta y una carrera de retracción rápida. La carrera de avance se mueve en la dirección de transporte y lleva consigo el producto. La carrera de retracción rápida hace que el producto se deslice y se traslade a lo largo de la superficie de transporte superando la fricción entre el producto y la superficie de transporte. La repetición de este movimiento hace que el producto sea transportado. (SULLIVAN, 2003, p. 9).

Algunas patentes mencionan la diferencia en las aceleraciones en uno u otro sentido del movimiento (HILLSTROM; ZANETTI; BURGESS, 2007; KATO, 2004; ROSENSTROM, 2003) y la influencia del coeficiente de rozamiento entre el material y el canal de transporte (MORINAKA; KOIZUMI; TSUJIUCHI, 2002; ROSENSTROM, 2003). Esta información se usó para deducir los fenómenos físicos involucrados y con ello elaborar el modelo matemático.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es implementar una reingeniería al prototipo de transporte de movimiento horizontal alternativo mencionado que permita una mayor velocidad de transporte.

Los objetivos específicos son comprobar si las variables ajustables en el prototipo influyen en el rendimiento del sistema, modelar el comportamiento del sistema de transporte de movimiento horizontal alternativo en estudio a partir de los fenómenos físicos involucrados, la descripción cinemática del prototipo y los coeficientes de rozamiento entre el producto y el canal de transporte, y encontrar para las variables valores de ajuste que optimicen el rendimiento del sistema de transporte.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta aborda secuencialmente los objetivos específicos. En primer lugar, se comprobó si las variables manipulables del prototipo influyen en la velocidad neta de transporte. Luego se modelizó matemáticamente el comportamiento del sistema para predecir la velocidad neta de transporte con distintas combinaciones de valores de las variables de ajuste. Luego de contrastar el modelo con datos experimentales, se lo utilizó para encontrar una combinación de valores para las variables de ajuste que tuviera un impacto positivo en el desempeño del transporte. Se trata entonces de un diseño de estudio experimental de subtipo puro, debido a que se midieron variables dependientes y se manipularon intencionalmente variables independientes.

2.1. PROTOTIPO UTILIZADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN

La unidad motriz es un motorreductor marca STM modelo RMI40 relación 1:7 con un motor trifásico de 0,37 KW a 1370 RPM (STM, 2022). La salida del motorreductor tiene adosada una manivela de 25 mm de radio. Una biela de 260 mm vincula la manivela al canal de transporte, que está construido en chapa de acero inoxidable AISI 304 con terminación 2B (COCHRANE, 2002). El extremo vinculado al canal se encuentra 37 mm sobre el eje de salida del motorreductor. La Figura 1 presenta una descripción de la implementación.

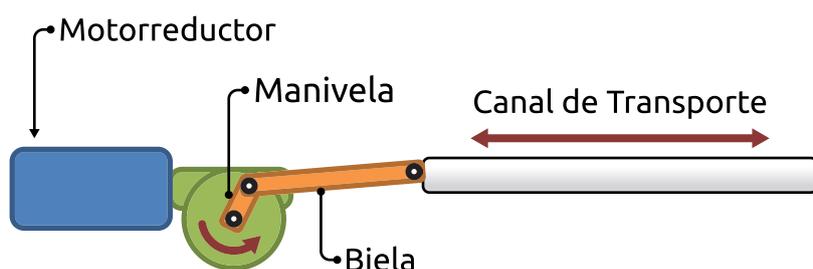


Figura 1 – Esquema del prototipo

El comando del motor se ha implementado mediante un variador de velocidad marca Schneider Electric modelo ATV312H055M2 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2022) programado para establecer dos velocidades diferentes según el estado de una entrada lógica. Una placa microcontrolada calcula la posición de la manivela con un codificador Omron E6B2-CWZ6C (OMRON, 2022) adosado al eje de salida del motorreductor, y genera la señal lógica para el cambio de velocidad en el variador.

Figura 2 – Detalle de la geometría del prototipo.

Si, como se muestra en la Figura 2, el ángulo de giro de la manivela desde su posición extrema trasera es θ , el radio de giro de la manivela es r , el largo de la biela es l y la distancia vertical entre el eje de salida del motorreductor y el vínculo entre la biela y el canal es h , la función posición de cualquier punto del canal de transporte con respecto al punto central de su propio recorrido será:

En textos como Giacosa (1987) y García (2010) pueden encontrarse desarrollos similares de esa ecuación para el caso del movimiento de un pistón de motor de combustión interna. La versión para este sistema de transporte se dedujo a partir de los análisis presentados en esos textos.

2.2. VARIABLES

El análisis bibliográfico ha permitido identificar que para la capacidad de transporte de producto son de importancia el coeficiente de rozamiento entre el producto y el canal de transporte, los valores de las aceleraciones del movimiento alternativo, las distintas velocidades que se imprimen al canal de transporte durante el ciclo de funcionamiento y en qué porciones de ese ciclo se utilizan.

2.2.1. Coeficientes de rozamiento estático y cinético entre el producto y el canal de transporte y aceleraciones máximas en adherencia y en deslizamiento

Son variables que es necesario medir, pero no se manipulan en este estudio. Para los coeficientes de rozamiento se utilizaron las técnicas del plano inclinado y de la medición de la fuerza normal y de arrastre (SERWAY; JEWETT JR; JOHN W, 2008, p. 121–122). Las aceleraciones se obtienen matemáticamente a partir de los coeficientes de rozamiento como $a = \mu g$.

2.2.2. Velocidades angulares máxima y mínima de la unidad motriz

Estas variables son dependientes del tipo de accionamiento del transporte horizontal en estudio. Las velocidades angulares de la unidad motriz son controladas por un dispositivo electrónico. La velocidad angular máxima debe medirse para su utilización en el modelo matemático, pero no se manipula debido a que coincide con la velocidad nominal del motorreductor de accionamiento. En cambio, la velocidad angular mínima es una de las variables manipulables para la reingeniería buscada.

2.2.3. Ángulos de fase para la transición de la velocidad mínima a la máxima y de la velocidad máxima a la mínima

Son las otras dos variables manipulables para la reingeniería. El codificador permite establecer la posición angular del eje de salida del motorreductor en 1/2400 avos de revolución. En el microcontrolador puede programarse el ángulo de la manivela en que se debe activar la velocidad superior y la inferior.

2.2.4. Velocidad neta de transporte

Es la variable dependiente que se desea incrementar como resultado del trabajo. Durante el transporte de un objeto este adquiere una velocidad variable de avance que puede alternarse con detenciones o incluso breves etapas de retroceso. La velocidad neta de transporte es el desplazamiento promedio medido a lo largo de múltiples ciclos. Para cada experimento se grabó un video del canal de transporte con producto en su superficie y fue analizado con el software de mediciones de variables cinemáticas Tracker (BROWN; CHRISTIAN; HANSON, 2022).

2.3. PROCEDIMIENTOS

2.3.1. Estudio de la influencia de las variables ajustables en el rendimiento del transporte.

2.3.1.1. Problema

Previo a este estudio se llevaron a cabo experimentos con el prototipo en el que se ajustaron velocidades y fases de transición en forma intuitiva. Al no tratarse de un trabajo metódico no quedó registro de las manipulaciones y la apreciación de los resultados fue netamente visual. Surge entonces, en primer lugar, la necesidad de conocer la influencia de las variables manipulables sobre la velocidad neta de transporte.

2.3.1.2. Hipótesis 1

Las variables ajustables en el prototipo influyen de manera estadísticamente significativa en el rendimiento del transporte en estudio.

2.3.1.3. Procedimientos

Se utilizó la configuración existente en el prototipo como centro de un diseño de experimento factorial 2^3 con punto central y dos repeticiones. El orden de toma de las muestras se hizo aleatorio.

En cada prueba del experimento se midió la velocidad media de transporte. Para probar la influencia de las variables en el rendimiento se realizó un análisis de varianza a los resultados.

2.3.2. Modelado cinemático del canal de transporte

2.3.2.1. Problema

Para describir la población en estudio solo por medio de la experimentación sería necesario conducir una gran cantidad de experimentos. Una forma de reducir la experimentación necesaria es lograr un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento del equipo en distintas situaciones. En la revisión bibliográfica se encontró que el rendimiento de los transportes de movimiento horizontal alternativo es sensible a la cinemática del movimiento y a los coeficientes de rozamiento.

2.3.2.2. Hipótesis 2

Es posible modelar matemáticamente el funcionamiento del transporte a partir de la descripción cinemática del prototipo, los coeficientes de rozamiento entre el producto y el canal de transporte y los fenómenos físicos involucrados.

2.3.2.3. Determinación de las funciones cinemáticas del canal de transporte

El primer paso fue describir el movimiento del canal de transporte. Con los datos del codificador se graficó la función real de la velocidad angular y se evaluaron sus flancos ascendentes y descendentes. Para modelizar matemáticamente esta función se midió la pendiente de las rectas que ajustan los datos de los flancos. La Figura 3 muestra superpuestos los datos del codificador y la función velocidad angular modelizada.

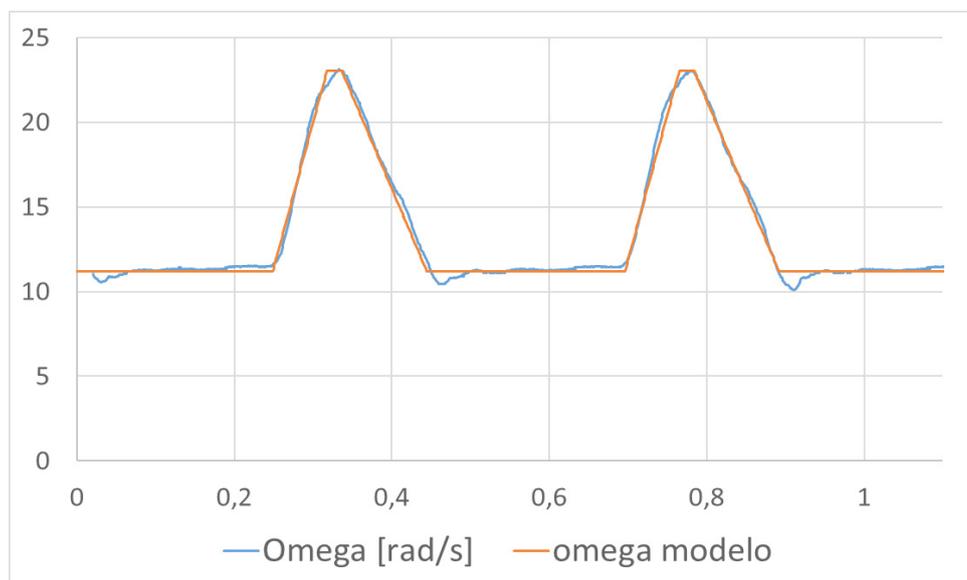


Figura 3 – Comparación función velocidad angular real y modelizada.

En segundo lugar, se utilizó el software OpenModelica versión 1.20.0 (OPENMODELICA, 2023a) para definir la función aceleración angular. Las funciones velocidad y posición angular se obtuvieron por integración.

Definida la función posición angular, se obtuvo la función posición lineal del canal de transporte haciendo uso de la ecuación que relaciona estas funciones de la sección 2.2. Luego, las funciones velocidad y aceleración lineal del canal de transporte se obtuvieron por derivación.

2.3.3. Modelado cinemático del producto sobre el canal de transporte

Conocidas las funciones cinemáticas del canal de transporte, el movimiento del producto dependerá de las condiciones de rozamiento estático o dinámico, y depende de las aceleraciones máximas que el canal puede impartir al producto en cada régimen (SERWAY; JEWETT JR; JOHN W, 2008, p. 119). El análisis busca describir el comportamiento del producto en régimen de arrastre y deslizamiento, y las condiciones necesarias para pasar de uno a otro. Luego se codificó en OpenModelica.

2.3.4. Comparación del modelo con datos experimentales

Se parametrizó el modelo matemático según las condiciones de cada una de las 9 configuraciones del experimento inicial descrito en el apartado 3.2.1.3, se calculó el error de predicción, se realizó una prueba de normalidad de su distribución, se calculó su desviación estándar y se realizó una comparación gráfica de los datos experimentales con los predichos en un rango de $\pm 2\sigma$ correspondiente al error esperado.

2.3.5. Algoritmo de búsqueda de soluciones con influencia positiva en el rendimiento

2.3.5.1. Problema

Se hace necesario elaborar un algoritmo para definir qué configuraciones simular, qué experimentos conducir y definir cuándo un resultado es aceptable para la reingeniería buscada.

2.3.5.2. Hipótesis 3

Es posible implementar un algoritmo de búsqueda experimental guiada por el modelo matemático que permita encontrar combinaciones de valores de variables manipulables que influyan positivamente en el desempeño del transporte.

2.3.5.3. Punto de partida del algoritmo

Se utilizó la herramienta Multi-parameter Sweep (OPENMODELICA, 2023b) para realizar un barrido automático de simulaciones alterando una o más variables. Con repetidos barridos se encontró la combinación de valores para las variables manipulables que según el modelo matemático sería la que redundaría en el mejor rendimiento. Este juego de valores se utilizó como punto central del primer diseño de experimento factorial 2^3 con punto central y dos repeticiones que forma parte del algoritmo de búsqueda.

Para determinar los niveles altos y bajos a utilizar en el experimento factorial se realizaron barridos univariados para encontrar los valores de cada variable que redujeron la velocidad neta en una magnitud ξ que inicialmente se fijó en 4σ .

2.3.5.4. Algoritmo de búsqueda

En el siguiente algoritmo cada experimento mencionado hace referencia a un diseño de experimento factorial 2^3 con punto central, dos repeticiones y orden de toma de las muestras se hizo aleatorio.

1. Realizar experimento
2. Si el resultado máximo no es el central, centrar experimento y volver a punto 1.
3. Si es el primer experimento en el que el resultado máximo es el central, reducir ξ a la mitad y volver al punto 1.
4. Si es el segundo experimento en el que el resultado máximo es el central, adoptar solución.

2.3.6. Valoración de la solución encontrada

Para saber si el algoritmo propuesto logró encontrar una solución que impacte positivamente en el rendimiento es preciso realizar una comparación del estado inicial con el estado final. Con este fin se condujo una prueba de mediana de Mood en el software de análisis estadístico Minitab (2023). Para mejorar el nivel de confianza del resultado se tomaron dos muestras adicionales del punto central del estado inicial y dos más del punto central del estado final alcanzado por el algoritmo. Sumadas a las dos muestras de los diseños de experimento correspondientes, la prueba se realizó con cuatro muestras del estado inicial y cuatro del estado final.

3. RESULTADOS

3.1. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES AJUSTABLES EN EL RENDIMIENTO DEL TRANSPORTE.

Tabla 1 – Velocidades netas de transporte del experimento con valores iniciales.

A	B	C	Caso 1 (m/s)	Caso 2 (m/s)
0	0	0	0,0807	0,0825
-1	-1	-1	0,1491	0,1454
-1	-1	1	0,1547	0,1559
-1	1	-1	0,0265	0,0267
-1	1	1	0,0635	0,0670
1	-1	-1	0,0573	0,0595
1	-1	1	0,1201	0,1215
1	1	-1	0,0396	0,0316
1	1	1	0,1018	0,1094

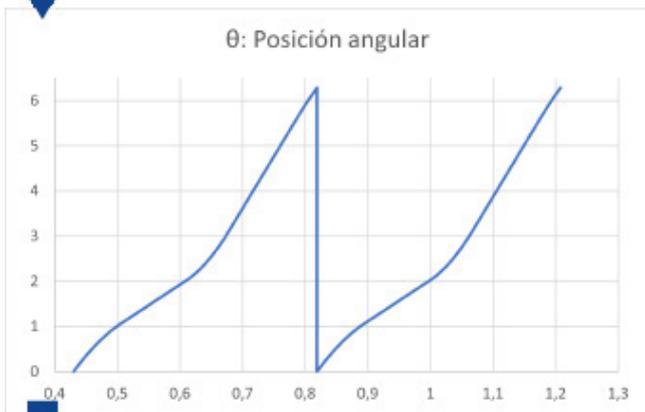
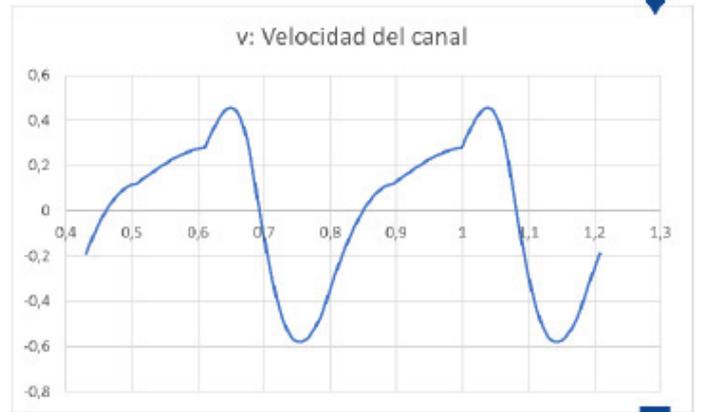
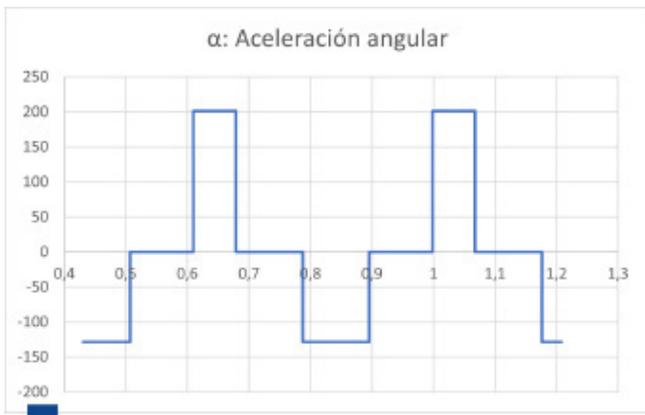
El análisis de varianza de los resultados de la Tabla 1 se muestra en la Tabla 2 con el valor F calculado y el F crítico correspondiente a una significancia del 5%.

Tabla 2 – Análisis de varianza.

Factor	F	F crítico
A	139,39	5,318
B	1577,66	5,318
C	818,48	5,318
AB	760,87	5,318
AC	187,09	5,318
BC	37,21	5,318
ABC	13,50	5,318

3.2. FUNCIONES CINEMÁTICAS DEL CANAL DE TRANSPORTE

La Figura 4 muestra las funciones aceleración angular, velocidad angular, posición angular, posición lineal, velocidad lineal y aceleración lineal modeladas. Las flechas indican el orden en el que una función permite definir la siguiente.



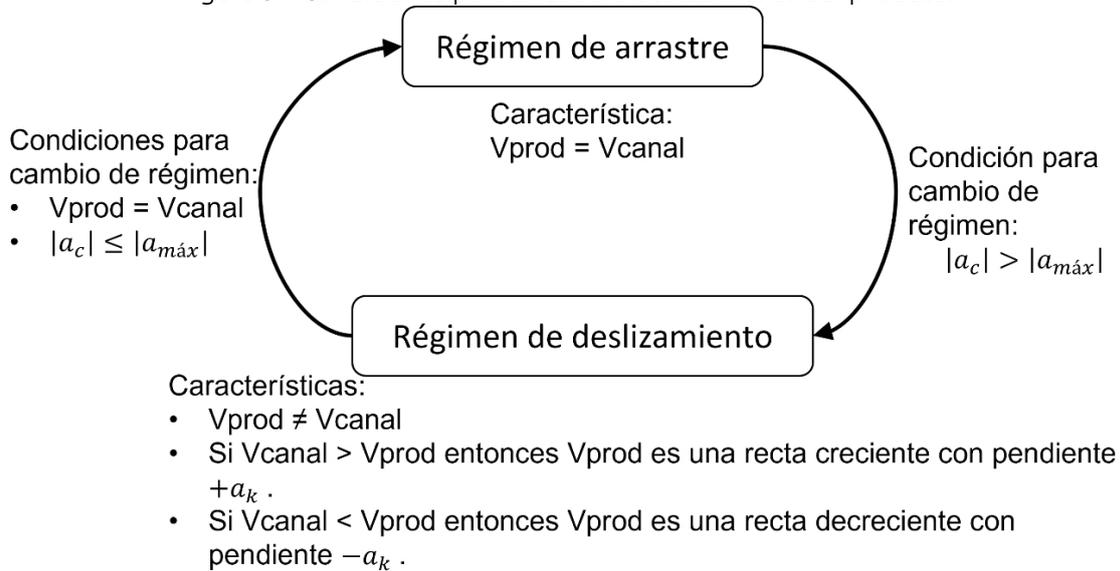
$$x(t) = -r \cdot \cos(\theta) + \sqrt{l^2 - (r \cdot \text{sen}(\theta) + d)^2} - l$$

Figura 4 – Funciones cinemáticas del prototipo.

3.3. MODELADO CINEMÁTICO DEL PRODUCTO SOBRE EL CANAL DE TRANSPORTE

El análisis de los fenómenos de rozamiento estático y dinámico llevaron a la elaboración del diagrama de estados de la Figura 5. Luego se codificó en OpenModelica para obtener las funciones cinemáticas del producto.

Figura 5 – Condiciones para arrastre o deslizamiento del producto.



Referencias: V_{canal} : Velocidad del canal de transporte, V_{prod} : Velocidad del producto, a_c : Aceleración máxima posible del producto por fuerza de rozamiento estático.

a_c : Aceleración constante por fuerza de rozamiento cinético. a_c : Aceleración del canal.

3.4. COMPARACIÓN DEL MODELO CON DATOS EXPERIMENTALES

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos en la medición experimental, los valores predichos por el modelo matemático y el error de predicción.

Tabla 3 – Error de predicción del modelo matemático.

Muestra	Velocidad media del producto	Velocidad predicha por el modelo	Error
1	0,1547	0,1701	0,01537
2	0,1491	0,1403	-0,00884
3	0,0635	0,0462	-0,01730
4	0,1201	0,1085	-0,01162
5	0,1018	0,0686	-0,03328
6	0,0396	0,0212	-0,01845

7	0,1454	0,1403	-0,00509
8	0,0807	0,0957	0,01500
9	0,1094	0,0686	-0,04087
10	0,0573	0,0758	0,01846
11	0,0825	0,0957	0,01318
12	0,0316	0,0212	-0,01046
13	0,0265	0,0356	0,00909
14	0,0670	0,0462	-0,02089
15	0,0595	0,0758	0,01624
16	0,0267	0,0356	0,00892
17	0,1215	0,1085	-0,01305
18	0,1559	0,1701	0,01415

Para la prueba de normalidad se evaluó el estadístico de Jarque-Bera. Como es menor al valor crítico 5,9915 correspondiente a una significancia de 5% no se puede descartar la hipótesis de normalidad en la distribución del error. La Tabla 4 muestra los estadísticos calculados del error de predicción.

Tabla 4 – Estadísticos del error de predicción.

Coefficiente de asimetría	Curtosis	Estadístico de Jarque-Bera	Desviación estándar σ
-0,43278	-0,84511	1,09756	0,01832

Si se asume la normalidad en la distribución del error puede esperarse que el 95,4% de las mediciones experimentales se encuentren dentro del rango de $\pm 2\sigma$ del valor predicho por el modelo matemático. La Figura 6 muestra el valor de los 18 puntos muestrales del experimento, los valores predichos por el modelo y los valores predichos $\pm 2\sigma$.

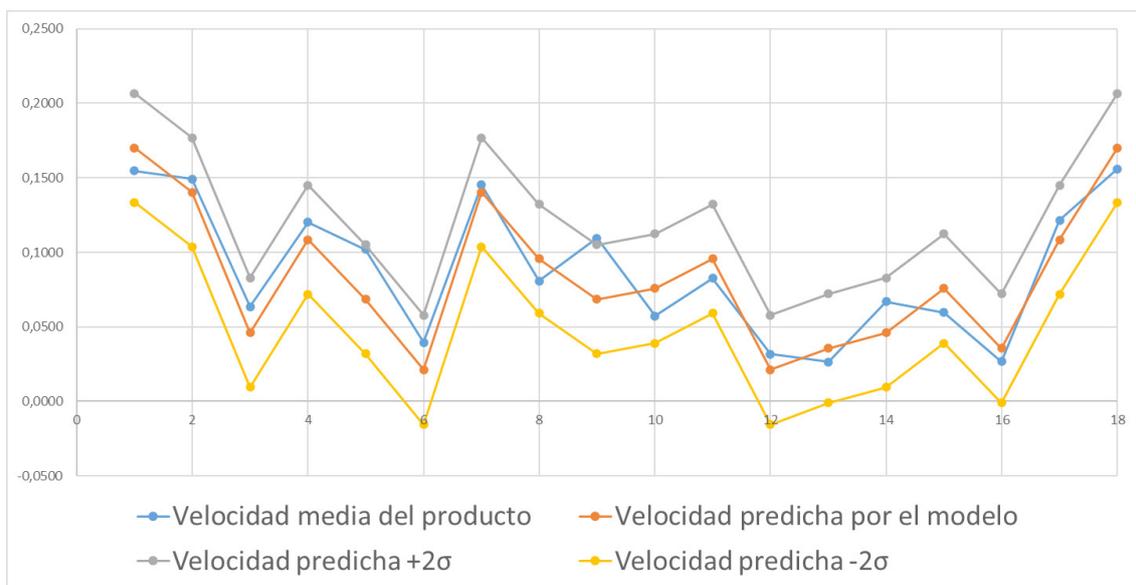


Figura 6 – Comparación de datos experimentales con el modelo matemático.

3.5. Algoritmo de búsqueda de soluciones con influencia positiva en el rendimiento

El punto de partida para el algoritmo de búsqueda de soluciones descrito en la sección 3.2.5.3 se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 – Diseño de experimento para la primera iteración del algoritmo.

Variable	-1	0	+1
A Velocidad angular mínima (rad/s)	5,50	9,58	13,30
B Fase de inicio de ascenso de velocidad (rad)	0,972	1,56	2,21
C Fase de inicio de descenso de velocidad (rad)	2,555	5,55	6,246

Los resultados de la primera iteración se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 – Velocidades netas de transporte en la primera iteración del algoritmo.

A	B	C	Caso 1 (m/s)	Caso 2 (m/s)
0	0	0	0,1598	0,1496
-1	-1	-1	0,0525	0,0455
-1	-1	1	0,0730	0,0674
-1	1	-1	0,0258	0,0256
-1	1	1	0,0697	0,0704
1	-1	-1	0,0792	0,0563
1	-1	1	0,0604	0,0773
1	1	-1	0,0512	0,0579
1	1	1	0,0592	0,0884

La segunda iteración de búsqueda se realizó con los niveles que se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7 – Diseño de experimento para la segunda iteración del algoritmo.

Variable	-1	0	+1
A Velocidad angular mínima (rad/s)	7,40	9,58	11,32
B Fase de inicio de ascenso de velocidad (rad)	1,25	1,56	1,985
C Fase de inicio de descenso de velocidad (rad)	3,72	5,55	6,03

Los resultados de la segunda iteración se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 – Velocidades netas de transporte en la segunda iteración del algoritmo.

A	B	C	Caso 1 (m/s)	Caso 2 (m/s)
0	0	0	0,1765	0,1782
-1	-1	-1	0,1253	0,1131
-1	-1	1	0,1143	0,1125
-1	1	-1	0,1190	0,1130
-1	1	1	0,1385	0,1427
1	-1	-1	0,1057	0,1068
1	-1	1	0,1609	0,1592
1	1	-1	0,1034	0,1057
1	1	1	0,1387	0,1452

3.6. VALORACIÓN DE LA SOLUCIÓN ENCONTRADA

La Tabla 9 muestra las velocidades netas medidas en las cuatro muestras de la configuración inicial y las cuatro de la configuración final.

Tabla 9 – Velocidades netas en el estado inicial y final.

Estado inicial	Estado final
0,0807	0,1765
0,0825	0,1782
0,0808	0,1762
0,0846	0,1712

La Figura 7 es una captura del resultado de la prueba de mediana de Mood realizada en el software Minitab. Donde se lee Tanda1 y Tanda3 se refiere a el estado inicial y final, respectivamente.

Prueba de mediana de Mood: velocidad_producto en funcion de tanda

Prueba de la mediana de la moda para velocidad_producto
Chi-cuadrada = 8.00 GL = 1 P = 0.005

tanda	N≤	N>	Mediana	Q3-Q1	ICs de 95.0% individuales
Tanda1	4	0	0.0817	0.0034	*)
Tanda3	0	4	0.1763	0.0053	(-*)

0.090 0.120 0.150 0.180

Mediana general = 0.1279

* NOTA * Los niveles con < 6 observaciones tienen confianza < 95.0%

Un IC de 95.0% para la mediana(Tanda1) - mediana(Tanda3): (-0.0975,-0.0865)

Figura 7 – Prueba de mediana de Mood.

Existe un índice de confianza del 95% para esperar que la diferencia entre las medianas de los estados final e inicial se encuentre entre 0,0865 y 0,0975.

4. DISCUSIÓN

Es posible comparar la velocidad de transporte obtenida con la mencionada en distintas fuentes. En la patente Linear conveyor and method for controlling the same (MORINAKA; KOIZUMI; TSUJIUCHI, 2002) se describen velocidades netas de 0,1 m/s y de 0,13 m/s para materiales con distintos coeficientes de rozamiento. En la solicitud Differential motion conveyor drive (ROSENSTROM, 2003) figura una comparación de la velocidad de transporte para distintos materiales. Dos de ellos, pellet plástico y fundición, presentan máximos en torno a los 19 fpm (pies por minuto), unos 0,097 m/s, y el punto de mayor velocidad corresponde a un bloque de madera que alcanza los 23 fpm, 0,117 m/s.

Por su parte, el fabricante del equipo Slipstick afirma en su página web que su versión para industria no alimenticia puede superar los 40 fpm, unos 0,20 m/s. Se trata de una de las empresas que lleva más años perfeccionando su producto (TRIPLE/S DYNAMICS, 2022).

En comparación, el prototipo estudiado en su configuración final alcanzó los 0,177 m/s, y en el mismo experimento se encontraron al menos otras tres configuraciones que superaron las velocidades mencionadas en las patentes citadas.

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en la sección 4.1 indican con una alta certeza que en distinta medida las tres variables influyen en forma estadísticamente significativa y también sus combinaciones. Así, la hipótesis 1 de la sección 3.2.1.2 puede considerarse razonablemente probada y cumplido el primer objetivo específico de la sección 1.

El segundo objetivo específico trata sobre el modelado matemático del movimiento del producto. Un aspecto destacable del modelo desarrollado es que permitió encontrar soluciones buenas en configuraciones no intuitivas, incluso la solución aceptada al final del algoritmo de búsqueda. En esa configuración el producto no presenta régimen de arrastre, sino de deslizamiento solamente.

El modelo se utilizó alterando las variables que son manipulables en el prototipo y fijando otros parámetros según las condiciones del caso particular, pero es posible conducir otros estudios variando esos parámetros. Por ejemplo, variar las aceleraciones, que están relacionadas a los coeficientes de rozamiento, permitiría estudiar otros productos transportados.

Los resultados expuestos en la sección 4.4 y en alguna medida lo expuesto en la sección 5 permiten afirmar que el modelo desarrollado es suficientemente útil para encontrar configuraciones de operación aceptablemente buenas. Esto prueba razonablemente la hipótesis 2 de la sección 3.2.2.2 y cumple el segundo objetivo específico de la sección 1.

Por último, basado en la información presentada en la sección 4.6, puede afirmarse con un alto grado de certeza que la configuración hallada tiene un impacto positivo en el rendimiento en comparación con el ajuste del prototipo al inicio del estudio. La hipótesis 3 de la sección 3.2.5.2 puede considerarse probada y cumplido el tercer objetivo específico.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ask Factory Chimp. **Food Magazine**, p. 35, abr. 2006.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. et al. **Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality**. [s.l.] Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.

BROWN, D.; CHRISTIAN, W.; HANSON, R. **Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education**. Disponible em: <<https://physlets.org/tracker/>>. Acceso em: 15 jun. 2022.

CHUA, S. Innovative conveyor designs improve operations. **Manufacturers' Monthly**, p. 59–60, jun. 2006.

COCHRANE, D. **Guía de Acabados de Acero Inoxidable**. Euro Inox, , 2002. Disponible em: <https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Finishes02_SP.pdf>

FOOD & DRINK TECHNOLOGY. Moving on. **Food & Drink Technology**, v. 14, n. 7, p. 34–35, abr.

2015.

FOOD ENGINEERING. Slipstick Conveyor. **Food Engineering**, v. 85, n. 2, p. 76–79, fev. 2013.

FOOD MAGAZINE. Horizontal motion conveyor. **Food Magazine**, p. 21, fev. 2008.

FRUCHTBAUM, J. **Bulk Materials Handling Handbook**. [s.l: s.n.].

GARCÍA, Á. **Movimiento de un pistón**. Disponível em: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/biela/biela.htm>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

Gentle Horizontal Conveyor. **Food Engineering**, v. 80, n. 11, p. 74, nov. 2008.

GIACOSA, D. **Motores endotérmicos**. 3a. ed. Barcelona: Dossat, 1987.

HIGGINS, K. Do the linear motion. **Food Engineering**, 2005.

HILLSTROM, K.; ZANETTI, J.; BURGESS, R. **Reciprocating conveyor system and method**. , 23 ago. 2007. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20070193858A1/en?q=20070193858>>. Acesso em: 1 maio. 2022

Innovations in Packaging. **Candy Industry**, v. 172, n. 11, p. 42–42, nov. 2007.

KATO, H. **Article conveyor device**. , 23 mar. 2004. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6708815B2/en?q=6708815>>. Acesso em: 1 maio. 2022

Literature & Product Review. **Food Engineering**, v. 84, n. 6, p. 99–101, jun. 2012.

MATOS RAMÍREZ, N. **Transportadores Industriales**. [s.l.] Universidad de Camagüey, 2011.

MINITAB. **Herramientas estadísticas, de análisis de datos y de mejora de procesos**. Disponível em: <<https://www.minitab.com/es-mx/>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

MORINAKA, H.; KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N. **Linear conveyor and method for controlling the same**. , 15 out. 2002. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6464070B1/en?q=6464070>>. Acesso em: 1 maio. 2022

NATIONAL PROVISIONER. Conveyor Systems. **National Provisioner**, v. 222, n. 9, p. 84–87, set. 2008.

New Products. **Pharmaceutical Processing**, v. 28, n. 9, p. 31, 11 dez. 2013.

OMRON. **E6B2-CWZ6C 600P/R 2M OMS | OMRON, España**. Disponível em: <<https://industrial.omron.es/es/products/E6B2-CWZ6C-600P-R-2M>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

On The Hush. **Chem.info**, v. 46, n. 7, p. 21, ago. 2008.

OPENMODELICA. **Welcome to OpenModelica**. Disponível em: <<https://www.openmodelica.org/>>. Acesso em: 17 jan. 2023a.

OPENMODELICA. **Parameter Sensitivities with OpenModelica**. Disponível em: <<https://openmodelica.org/doc/OpenModelicaUsersGuide/latest/parametersensitivity.html>>. Acesso em: 18 jan. 2023b.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. (EDS.). **Perry's chemical engineers' handbook**. 7th ed ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

ROSENSTROM, B. R. **Differential motion conveyor drive**. , 5 ago. 2003. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6601695B1/en?q=6601695>>. Acesso em: 1 maio. 2022

SCHNEIDER ELECTRIC. **ATV312H055M2 - variable speed drive ATV312**. Disponível em: <<https://www.se.com/es/es/product/ATV312H055M2/variable-speed-drive-atv312-0-55kw-1-4kva-46w-200-240-v-1phase-supply/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR; JOHN W. **Física para ciencias e ingenierías Vol. 1. 7e**. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2008.

STM. **Tornillos sin fin redondos R y limitadores de torque**. Disponível em: <<https://www.stmspa.com/esp/productos/standard/tornillos-sin-fin-redondos-y-limitadores-de-torque.html>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

SULLIVAN, J. **Conveying system and method**. , 10 abr. 2003. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20030066735A1/en?q=20030066735>>. Acesso em: 1 maio. 2022

SVEJKOVSKY, B. **Horizontal motion or vibratory conveying**. , 2012. Disponível em: <<https://www.heatandcontrol.com/sites/default/files/content/resource/pdf/2019-05/White%20paper%20-%20Horizontal%20motion%20%26%20vibratory%20conveying%20comparison.pdf>>

Technology Showcase. **National Provisioner**, v. 222, n. 9, p. 84, set. 2008.

TRIPLE/S DYNAMICS. **Industrial Horizontal Motion Conveyor**. Disponível em: <<https://www.sssdynamics.com/equipment/mechanical-conveying/slipstick-industrial/>>. Acesso em: 7 abr. 2022.

VÁZQUEZ, R. M. et al. **Balance de Materia y Energía: Procesos Industriales**. [s.l.] Grupo Editorial Patria, 2014.

WALAS, S. M. **Chemical process equipment: selection and design**. Nachdr. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1990.