

## TÉCNICA DE SIMULACIÓN PARA MEJORAR PARAMETROS DE UN TRANSPORTADOR DE CADENA REX.

Vladimir Siromiatnikov Titov, Fortino Sandoval Gutiérrez, Miguel G. Ortega Rosales  
Departamento de Ing. Mecánica Eléctrica, Universidad de Guadalajara,  
Av. Revolución 1500 Puerta 10, CP 44430, Guadalajara, Jalisco, México.  
Tel. (33) 3619 83 67, 36 18 43 16 Fax 36 19 99 73.  
[vsyromia@yahoo.com.mx](mailto:vsyromia@yahoo.com.mx), [saguf@hotmail.com](mailto:saguf@hotmail.com), [mgortega01@hotmail.com](mailto:mgortega01@hotmail.com)

### RESUMEN

La falta de herramientas analíticas que ayuden y faciliten la toma de decisiones es uno de los principales problemas con los que se encuentran los responsables de mejorar el rendimiento de aquellos sistemas de transporte cuyo comportamiento depende de un número elevado de variables de decisión. Este trabajo tiene como objetivo implantar el uso de una herramienta virtual para investigar y optimizar transportadores de cadena tipo Rex, que proporcione al ingeniero mecánico un método fácil y software de amigable entorno que le permita modelar, simular y mejorar el transportador en función de los requerimientos de su proceso simultáneamente. Debido a que esto se aplica directamente al diseño mecánico de un transportador de cadena tipo Rex, permitirá seleccionar y optimizar las partes y equipos que lo constituyen. Dicho proceso tiene una gran ventaja para el ingeniero o técnico que requiere seleccionar los transportadores, además de optimizar su uso o la calidad de servicio para aumentar la productividad de la empresa en que se utilizará dicho transportador.

### ABSTRACT

The goal of the present research was to develop a simulation model of the Rex Type conveyor system and statistical methods for the analysis and multi-objective optimization of the manufacturing process. In particular we discuss problems involving functional dependence of the chain pull, drive power, time in system from the speed of chain and operational capacity of the served equipment. We show how simulation and statistical analysis are influenced in the design methodology of chain accumulating conveyor system Aspects of experimental design in simulation and multiple response optimization of such systems are discussed. The report phase of this work is the determination of the optimum speed of conveyor and capacity of the production line for the criteria of minimum drive power, time in system and maximum chain pull. No substantive published work has been located which deals with these fundamental issues.

### NOMENCLATURA

- $A$  Coeficiente: parte constante de la tensión efectiva  $T_e$ , [N].  
 $B_j$  Coeficiente ajustado de la resistencia del tramo  $j$ , [ $m / s^2$ ].  
 $C$  Capacidad de alimentación del transportador de la línea de producción, canastillas / hora.  
 $g$  Aceleración de la gravedad, [ $m / s^2$ ].  
 $\eta$  Eficiencia de la impulsión.  
 $M_j(t)$  Masa total de las canastillas en el tramo  $j$  en el momento  $t$ , [Kg].  
 $m_{ci}$  Masa de la carga (canastillas o estibas) [Kg].  
 $T_\theta$  Tracción de las cadenas en el punto  $\theta$ , [N].  
 $V$  Velocidad del transportador [m /min].

### SUBÍNDICES

- $e$  Efectiva.  
 $i$  Número de canastilla o estiba.  
 $j$  Número del tramo.  
 $\theta$  Número del punto donde las cadenas salen del contacto con las ruedas dentadas.

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte industrial constituyen un elemento estratégico de los procesos de desarrollo nacional e internacional. Desde el punto de vista económico, el transporte influye determinadamente en los costos de producción y distribución de bienes y servicios. El transporte de materiales incluye consideraciones de movimiento, tiempo, lugar, cantidad y espacio. El manejo de materiales debe asegurar que las partes, materias primas, material en proceso, productos terminados y suministros se desplacen periódicamente de un lugar a otro. Como cada operación de proceso requiere materiales y suministros a tiempo en un punto en particular, con el eficaz manejo de materiales se asegura que los materiales sean entregados en el momento y lugar adecuado, así como en cantidad correcta.

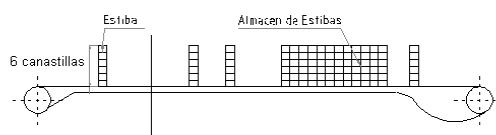
En sistemas de transportadores de cadena tipo Rex, las entradas y salidas de partes y las cargas tienden a ser, a través del tiempo, bastante variables en amplitud y frecuencia e incluso de naturaleza aleatoria. Al contrario, al iniciar el diseño de un sistema nuevo el proyectista normalmente se basa en los datos promedio del desempeño del sistema. La no concordancia entre las características calculadas y las de servicio, es la causa principal de perturbaciones en la operación del sistema de transporte. Por lo tanto muchos problemas relacionados con el análisis y la optimización de sistemas de transportadores de cadena tipo Rex quedan aún sin resolver. Con ayuda de la simulación esta falta de concordancia se puede reducir al mínimo o desaparecer.

Debido en gran parte al avance y mejora de software de simulación, éste se ha aplicado cada vez más al análisis de sistemas transportadores. Gunal y Williams (1996) [1] modelaron los transportadores de cadena en AUTOMOD. Jing, Kelton, Arantes y Houshmand (1998) [2] usaron ARENA para analizar una Red Controlada de Transportadores con Configuración de Unión (CNMC) y comprender la lógica en un Modelo de Teoría de Colas (QTM) bajo las variables y condiciones. Hall y Bowden (1999)[3] notan que la optimización de modelos de simulación puede ser definida como el proceso de ligar un método de optimización con un modelo de simulación para determinar los valores apropiados de ciertos parámetros de entrada de manera tal que se maximice el desempeño del sistema simulado. Ramiro Fuentes Ayala (2002) [4] desarrolló un modelo de simulación de un sistema de transporte de cajas de la fábrica de calzados MANACO y evaluó el desempeño de la banda transportadora circular. Sin embargo, en estos trabajos no se consideraron problemas mecánicos asociados con el tipo de equipo seleccionado y su relación con las características de servicio.

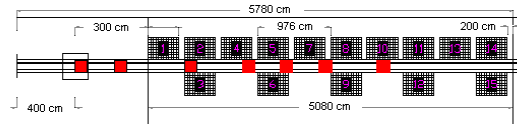
## DESARROLLO

El sistema investigado en este trabajo de un transportador de cadena tipo Rex, se obtuvo de un problema real. Este tipo de transportadores son usados en diferentes industrias donde el peso del producto a manejar es de gran magnitud y aleatoriedad. Por ser altamente robusto, soporta grandes cargas aun cuando esta carga esta frenada, **Fig. 1**. La cadena tiene un coeficiente de fricción que permite que aunque las estibas no estén en movimiento por estar detenidas en algún punto sobre el transportador, que bien puede ser mientras se acomoda el espacio donde se van almacenar, exista un desgate entre la cadena y la canastilla que está en contacto con la cadena. Se puede emplear casi para cualquier longitud de cadena de acuerdo a la capacidad permisible del motor-reductor, en función de la forma de la base y el peso del producto a transportar. La disposición del transportador incluye curvas y tramos ambos horizontales y verticales. En su forma más sencilla, este tipo de transportadores constan del tramo de cadena Rex, de un mecanismo de impulsión y de un sistema tensor que a su vez sirve de retorno. Las velocidades de la cadena oscilan entre 10.0 y 30.0 m/min. El ancho del transportador varía entre 0.3 y 1.0 m, según la capacidad y tamaño máximo de mercancías desplazadas en el transportador. Estos equipos pueden adaptarse a gran variedad de situaciones entre las que podemos destacar:

- Pueden aplicarse para grandes o cortos como sucede frecuentemente dentro de una instalación industrial. Tiene una gran capacidad de transporte.
- Al utilizar un cajón o canastilla, se pueden transportar una gran variedad de productos, a granel o envasados, pesados o ligeros, fríos o calientes, etc.
- Debido a su robustez son bajos los gastos de mantenimiento.
- La constitución de la cadena es a base de eslabones de acero unidos entre ellos.



a. Vista lateral y superior.



b. Vista trimétrica lateral.

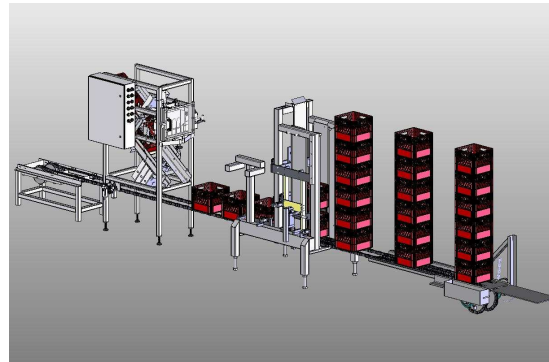


Fig. 1 Línea de transporte para el almacenamiento de canastillas

Los transportadores de cadena Rex, por lo general son un tramo de entre 10 y 80 m de largo constan de una charola de acero inoxidable, que también puede ser de acero al carbono. En el fondo de la charola se encuentran alojadas 4 guías, 2 centrales para el retorno y 2 laterales para el arrastre del producto. Estas guías alojan una solera de nylamid atornilladas, para encausar las cadenas y para que deslice sobre esta misma con el mínimo de fricción. La cadena tipo Double Flex comúnmente llamada cadena Rex, está diseñada para funcionar en dos planos. Debido a su doble flexión le permite articular en dos planos con un área deslizante amplia que disminuye el desgaste y le proporciona máxima flexibilidad en el movimiento horizontal y vertical. Los eslabones internos están endurecidos y los externos están redondeados para lograr este efecto. Las cadenas están unidas punta con punta para hacer un tramo cerrado y son jaladas por un engrane tipo estrella de 5 picos, que a su vez es movida por otro engrane común y por un moto reductor. En el extremo opuesto se encuentran dos poleas locas, para permitir el retorno de las cadenas. Cada cadena viaja en un sentido en la charola sobre las guías laterales, y retorna en la misma charola por medio de las guías centrales, las cuales se encuentran 2 cm más abajo que las guías laterales para permitir que retorne la cadena sin tocar el producto arrastrado por las cadenas, conservando entre sí una misma distancia con el objeto de crear estabilidad a la carga, Fig. 2. Se emplean curvas paralelas para el desvío en cierta dirección pero siempre en un mismo plano. Aquí solo analizaremos tramos rectos. El mecanismo de impulsión situado en el punto de tiro máximo para que tome el lado flojo de las cadenas que se separa de la rueda impulsora, emplea dos ruedas dentadas como parte motriz, acopladas éstas a una flecha que a su vez está conectada por una rueda dentada común y cadena de rodillos a un moto reductor que les transmite la potencia suficiente para girar, Fig. 3. La cadena Rex ha de deslizarse en el transcurso de su viaje de carga, a través de una solera de nylamid, que hace las veces de guía de desgaste o sufridera. Esta sufridera va alojada dentro de un perfil metálico entre la guía y la cadena, Fig. 4. Las sufrideras son generalmente de un material de ciertas características:

- Resistencia al desgaste:  $1\mu\text{m}/\text{km}$
- Resistencia mecánica:  $80\text{N}/\text{mm}^2$
- Resistencia térmica:  $(-135\dots130)^\circ\text{C}$
- Resistencia química: al agua, al aceite mineral, a la gasolina, así como los gases de escape y el aire industrial
- Resistencia dieléctrica:  $120\text{kV}/\text{mm}$
- Estabilidad dimensional: 50%
- Maleabilidad: límite de esfuerzo de compresión  $90\text{N}/\text{mm}^2$
- Rigidez:  $3200\text{N}/\text{mm}^2$

- Facilidad de maquinado.
- Ligereza:  $1.14 \text{ g/cm}^3$
- Menor consumo de lubricantes.
- Reduce el nivel de ruido.

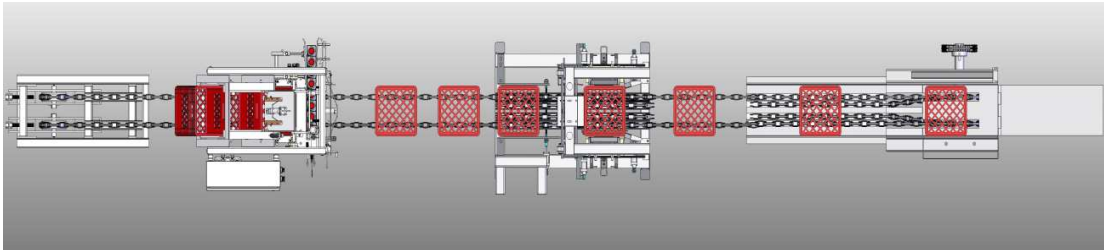


Fig. 2 Cadenas paralelas.

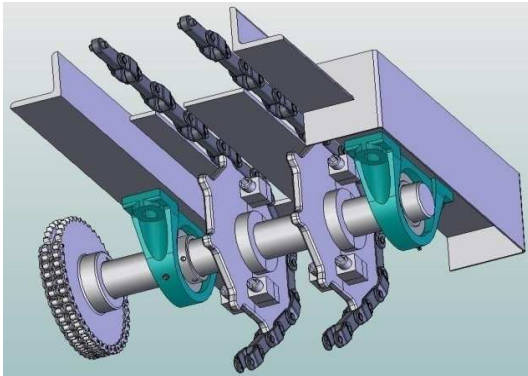


Fig. 3 Mecanismo de impulsión

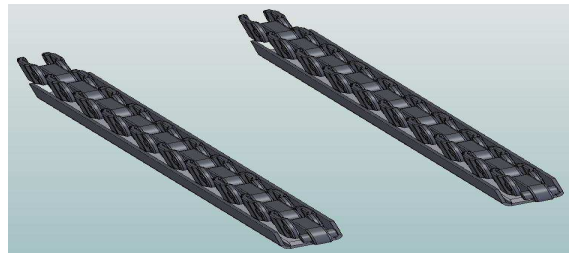


Fig. 4 Guías con sufrideras.

El sistema retorno-tensor emplea un par de poleas locas independientes para poder tensar el retorno de cada cadena con lo que se compensa el desgaste o estiramiento de la cadena y las condiciones ambientales variables. Las cadenas regresan paralelamente por la parte central solo 2 cm. más abajo que el tramo de las cadenas que sirven de arrastre. Se apoyan en un bastidor fijo al piso. La carga a transportar, objeto de este estudio, será la canastilla con producto, de fácil manipulación para carga y descarga, **Fig. 5**. Las estibas constan de 6 canastillas con producto, cada canastilla aproximadamente pesa 16 kg, Las estibas provienen de una estibadora y éstas a su vez provienen de una encajonadora que recibe las botellas con producto de la llenadora. Es por esto, que las canastillas en general, están un poco mojadas. El agua que se va escurriendo en el transportador ayuda a disminuir la fricción entre las cadenas y las canastillas, y se acomodan sobre el transportador donde se van almacenar por cierto tiempo. El sistema de transporte investigado en este trabajo corresponde a un sistema real de una empresa alimenticia de productos lácteos.



Fig. 5 Canastilla.

En este caso, el propósito es el manejo de las estibas, desde la línea de producción hasta el momento de ser transportadas hacia el camión, que puede ser inmediato o una vez que se mantuvieron en el transportador durante un tiempo requerido relativamente pequeño. La Encajonadora o empaquetadora es un elemento de la línea que carga individualmente cada canastilla. La Estibadora de canastillas, es un elemento de la línea que apila las canastillas en hileras de 6 canastillas, creando un peso menor a 100 kg. Cuando llega el camión que llevará las estibas a su destino de distribución, el transportador es cargado, para que dichas estibas se desplacen hasta el camión, donde son descargadas del transportador. Por defecto, se utiliza la distribución normal para el tiempo de arribo o llegada de las canastillas al transportador. Se tiene una zona de carga. La longitud de esta zona se determina sumando la longitud de la canastilla y la del juego de seguridad. El número de estibas a embarcar es dependiente del pedido del cliente, no es fijo. El camión tiene un segmento de transportador propio dentro de la caja, esto con el fin de poder meter el producto que viene de la bodega hasta el fondo de la caja. Es por eso, que este sistema se considera de carga y descarga aleatoria. El comportamiento del sistema de transporte se mide principalmente por:

- El consumo de energía eléctrica.
- La utilización del transportador.
- Tiempo de tránsito de las canastillas a través del sistema de transporte.

Pero la alta utilización incrementa el tiempo de tránsito, causando decrecimiento de movimiento de las canastillas del transportador. Las restricciones del sistema de transporte analizado en este trabajo son:

- El transportador es un circuito cerrado: **Fig. 1**, la longitud total es **57.80m**
- Separación del tope.
- Número máximo de estibas delante del tope: **149**
- Número de estibas cargadas al camión: **330**
- El peso de la estiba es constante: **96 kg**
- Duración del Turno: **8horas**

Variables del sistema:

- Canastillas por hora, Tabla 1.
- Velocidad del transportador, Tabla 1.

Para desarrollar las ecuaciones funcionales para el problema general de la tensión de las cadenas y utilizarlas en el modelo de simulación, se consideran dos casos:

- a) Cuando las estibas se desplacen hasta el camión, donde son descargadas del transportador hasta que se llene.
- b) Cuando el transportador está totalmente cargado y con la carga sin desplazarse, con las cadenas de arrastre en movimiento. Esto sucede cuando el camión está lleno y se pone un tope al final del transportador para que las estibas se acumulen antes del tope.

En este proyecto se espera obtener los siguientes resultados:

- Determinar la tensión efectiva en las cadenas.
- Determinar la potencia necesaria del motor para mover las cadenas.
- Determinar tiempo promedio en el sistema.
- Optimizar simultáneamente la potencia del motor, la tensión efectiva de las cadenas y el tiempo en el sistema.
- Desarrollar el método para el diseño de transportadores de cadena Rex.

#### TEORÍA PARA CALCULAR LA TENSIÓN EFECTIVA Y LA POTENCIA DEL MOTOR.

Se aplicaron el modelado y simulación para investigar la dependencia de la tensión efectiva,  $T_e$ , y potencia,  $P$ , del motor con relación a la distribución de cargas sobre las cadenas, su velocidad, la configuración del transportador, etc. Para simular la tensión efectiva  $T_e$  y la potencia  $P$  del motor en función de las cargas sobre los tramos del transportador y de su geometría, así como la relación entre  $T_e$  y las masas de estibas transportadas, usamos la siguiente expresión:

$$T_e(t) = A + \sum_I^n B_j M_j(t) \quad (1)$$

Donde

$$M_j(t) = \sum_I^{d_j(t)} m_{ci} \quad (2)$$

Es la masa total de  $d_j(t)$  estibas en el tramo  $j$  en el momento del tiempo simulado  $t$ . Las constantes  $A$  y  $B$  son:

$$A = T_0(k_{rp} + a - 1) + aW_{0i} \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{K_{j-1}} \quad B_j = ag \frac{C_j}{K_{j-1}L_j}$$

Donde:  $a = K_{nm}(1+k_{rp})$

La potencia con respecto del tiempo es:

$$P(t) = \frac{T_e(t)V}{\eta} = \frac{[A + \sum_I^n B_j M_j(t)]V}{\eta} \quad (3)$$

Donde  $C_i$  - factor lineal de resistencia del tramo  $i$ , [m];  $K_{j-1}$  - factor general de resistencias locales de los tramos del número  $I$  hasta el número  $j-1$ ;  $k_{rp}$  - factor de resistencia de las ruedas dentadas.  $W_{0i} = 2w_{cad}$  son pesos constantes para el transportador;  $w_{cad}$  - peso repartido de la cadena, [N / m].

#### MODELO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE.

El modelo de simulación diseñado para la línea de transporte ha sido construido y se ha probado en GPSS World [5]. El modelo refleja datos del proceso tecnológico como: número de turnos de trabajo, longitud de la canastilla, peso de la canastilla, número de canastillas en una estiba, número de estibas en el camión, también las características del transportador (velocidad de las cadenas, rendimiento de la línea, peso de las cadenas, disposición del accionamiento y del tensor de las cadenas). GPSS World proporciona además de la metodología de modelación otras ventajas que no se obtienen inmediatamente con otros programas para computadora. Por ejemplo: observar el cambio de los valores de tensión efectiva del accionamiento, de la potencia del motor etc. La simulación facilita entender el proceso de producción y transporte, observar la manera como la velocidad de las cadenas, número de canastillas por hora, afectan el rendimiento de la línea y el consumo del motor. Además de un ambiente amigable que facilita su utilización y el uso de gráficos de animación. El modelo está integrado por varios segmentos encadenados entre sí. Todos los segmentos tienen sus propios destinos especiales. La respuesta informática de cada segmento transmite al del siguiente y así sucesivamente.

#### DISEÑO Y REALIZACIÓN DE EXPERIMENTOS

El diseño de un experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que se obtendrán los datos apropiados, de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido. Obtener el sistema con las especificaciones óptimas es el objetivo principal del investigador o diseñador de sistemas de transporte y manejo de materiales. Por esta razón es muy importante seleccionar las herramientas estadísticas a utilizar en el diseño del experimento para la simulación, con el fin de sacar el mayor provecho de la información a obtener, [7], [8]. Cuando el número de factores que intervienen en el experimento es demasiado grande, y estos pueden estar en diferentes niveles resulta casi imposible determinar cuáles de ellos inciden de manera significativa en las respuestas del sistema, por lo que la elección de los factores y niveles es de máxima importancia para encontrar los valores "óptimos". En este caso el interés está en determinar el número de factores apropiado, así como los niveles en que se encuentran dichos factores y el tipo de experimento a realizar. Las variables que nos interesan medir y que representan resultados importantes para el sistema son:

- La tensión efectiva,  $T_e$ .
- La potencia del motor,  $P$ .
- El tiempo promedio que la carga permanece en el sistema,  $TPS$ .

Estas variables son muy importantes porque influyen de manera directa en las siguientes características del transportador:

- En la alimentación de las cadenas, del motor y de la transmisión.

- En la resistencia de las cadenas y partes de la maquinaria.
- En el consumo de energía eléctrica.
- En el costo del equipo y en el proceso total de transportación.

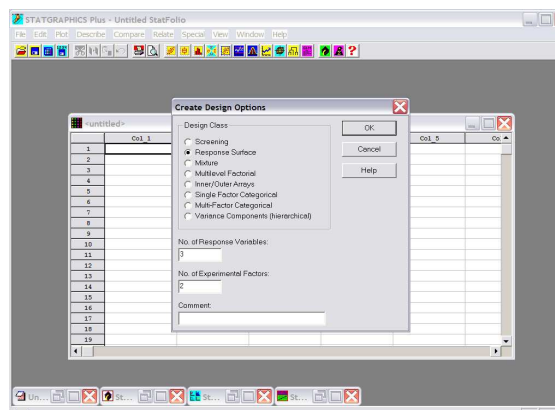
Las variables independientes o factores que afectan a las variables de respuesta son los siguientes:

- La velocidad de las cadenas,  $V$ .
- Canastillas por hora,  $C$ .

De acuerdo con la práctica de la utilización de estos sistemas de transporte cada uno de los factores puede ser considerado a tres niveles como se muestra a continuación en la **Tabla 1**. Para determinar cuál o cuáles de los factores inciden de una manera más importante en las respuestas del modelo, se aplicó el diseño multifactorial. El diseño del experimento se realiza en el STATGRAPHIC Plus [6] introduciendo los valores de los factores y niveles de las variables de respuesta ver, por ejemplo, **Fig. 6**.

**TABLA 1. Factores y niveles del experimento.**

Factores	Unidades	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Velocidad de las cadenas ( $V$ )	m / min.	10	20	30
Canastillas por hora ( $C$ )	can / hora	400	600	800



**Fig. 6 Opciones de la clase de diseño, número de variables y factores.**

El análisis de los resultados obtenidos en la experimentación de las variables de respuesta se ha realizado también mediante el uso del software STATGRAPHIC Plus. El análisis incluye la verificación de la adecuación del modelo, el análisis de varianza, el análisis y la optimización simultánea de las respuestas múltiples. La verificación del supuesto de normalidad puede hacerse con facilidad mediante las gráficas de probabilidad normal de los residuales [7]. Si la distribución fundamental de los errores es normal, estas gráficas tendrán la apariencia de una línea recta. En las **Fig. 7** y **Fig. 8** se muestran los gráficos de probabilidad normal de los residuales para el tiempo promedio  $TPS$  y la potencia del motor  $P$ . Ambos gráficos en sus partes centrales no muestran unas desviaciones marcadas de la distribución normal que confirma la adecuación del modelo y su buena representación del sistema propuesto.

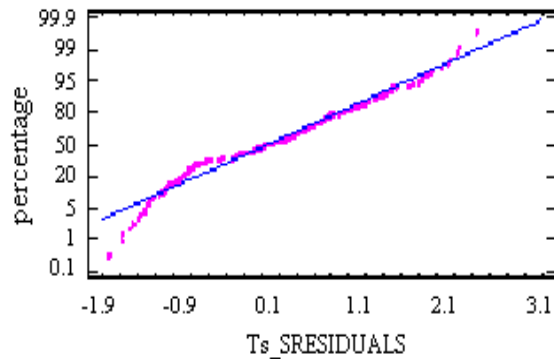


Fig. 7 Probabilidad normal de los residuos de TPS.

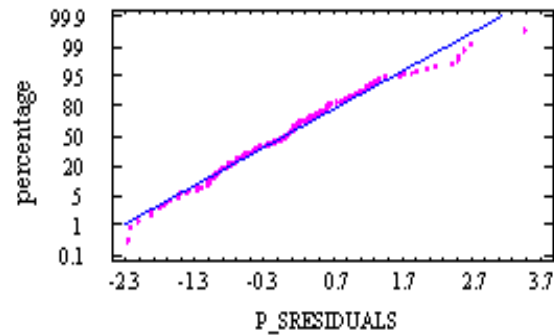


Fig. 8 Probabilidad normal de los residuos de P.

Para definir los efectos que son estadísticamente significativos se han utilizado gráficos de Pareto. En la **Fig. 9** se muestra gráfico de Pareto de efecto estandarizado para tensión efectiva  $Te$ . El efecto estandarizado es el efecto estimado dividido por su error estándar que es equivalente a computar una estadística  $t$  (de Student) para cada efecto. Las barras que se extienden más allá de la línea vertical corresponden a efectos que son estadísticamente significativos en el 95% de nivel de confianza. En resumen, los gráficos de Pareto para cada variable de respuesta confirman que los efectos de todos los factores (velocidad  $V$  de las cadenas y capacidad  $C$  canastillas por hora) y sus interacciones son significativos. Los coeficientes de determinación  $R^2$  y de determinación ajustado  $R_{aj}^2$  extraídos de tablas de ANOVA [8] muestran que la proporción mayor de la variabilidad en los datos de respuesta se incluye en el modelo, Tabla 2.

Standardized Pareto Chart for  $Te$

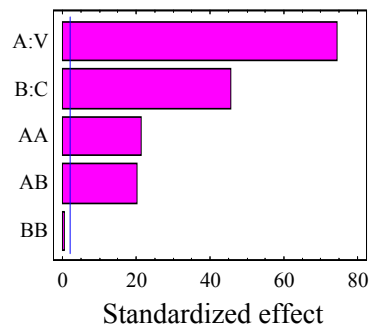


Fig. 9 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para  $Te$ .



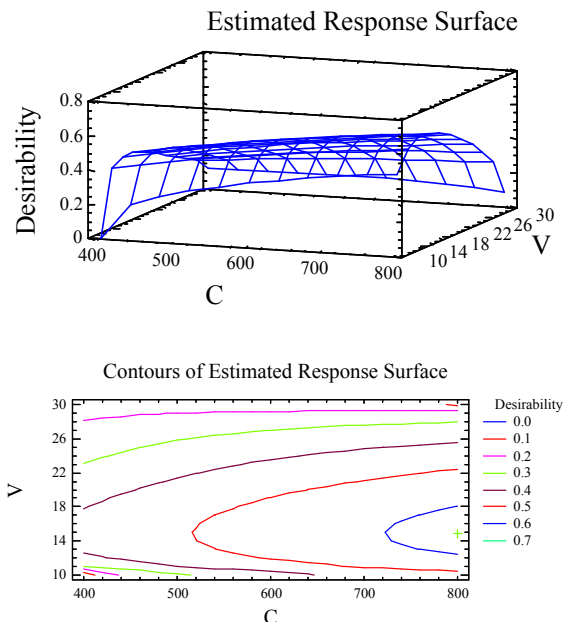
**Tabla 2. Proporción de la variabilidad en los datos de respuesta.**

	Te	P	TPS
$R^2$ , %	<b>99.57</b>	<b>99.99</b>	<b>99.99</b>
$R_{aj}^2$ , %	<b>99.52</b>	<b>99.99</b>	<b>99.99</b>

Para optimizar de manera simultánea a todas las respuestas de interés hemos utilizado el método de la función de deseabilidad [8]. El rango de búsqueda de valor óptimo para cada factor es igual al rango utilizado en la región experimental, **Tabla 1**. El software STATGRAPHIC Plus genera diseño óptimo: la función de deseabilidad global máxima de **0.629**, que determine el nivel óptimo globalmente de cada factor, los cuales son  $V = 14.82 \text{ m/min}$ ,  $C = 800.0 \text{ canastillas/hora}$ , **Fig. 10**. Los rangos experimentales de las respuestas, sus tipos de optimización y los valores óptimos se presentan en la **Tabla 3**. Para validar los resultados de las variables de respuesta, **Tabla 3**, y de los factores obtenidos del método de la función de deseabilidad se realizó la simulación con los factores óptimos y se compararon los resultados con las respuestas óptimas de la función de deseabilidad global máxima, **Tabla 4**. Los valores simulados estimados con los factores óptimos de las variables de respuesta del modelo están muy cercanos a los valores de respuesta óptima originales que justifica el diseño propuesto para el sistema en estudio.

**Tabla 3. Tipo de optimización y los valores óptimos de las respuestas.**

Respuesta	Rango de la respuesta	Tipo de Optimización	Valor óptimo
Te, N	7650-8371	máximo	8148
P, Watt	1758-5236	mínimo	2668
TPS, s	114-321	mínimo	220



**Fig. 10 Superficie de deseabilidad global y punto óptimo simultaneo.**

**Tabla 4. Confirmación del diseño óptimo**

<b>Respuesta</b>	<b>Valor óptimo</b>	<b>Valor simulado</b>	<b>Error %</b>
<b>Te, N</b>	<b>8148</b>	<b>8112</b>	<b>-0.44</b>
<b>P, Watt</b>	<b>2668</b>	<b>2704</b>	<b>1.35</b>
<b>TPS, s</b>	<b>220</b>	<b>206</b>	<b>-6.36</b>

## CONCLUSIÓN

Se demuestra que tanto el modelo utilizado como el diseño del experimento óptimo trabajan normalmente, ya que el primero como se vio anteriormente, los resultados que proporciona fueron confirmados por los cálculos. De igual forma el error en porcentaje de los datos del experimento óptimo cae dentro del 5% restante del 95% del intervalo de confianza. El modelo y el método descritos en el artículo proporcionan al ingeniero una herramienta muy útil para el diseño, la simulación y el análisis de los parámetros técnicos y de servicio más importantes de un sistema transportador de cadena tipo Rex para canastillas y estibas. Se desarrolló la metodología para investigar y optimizar el sistema mediante la combinación del software de simulación GPSS World y el software de diseño de experimentos y análisis estadístico STATGRAPHIC Plus. Este trabajo presenta una solución nueva para el diseño de transportadores de cadena Rex basándose en el método analítico y el modelo de simulación. El modelo de simulación del transportador toma en consideración las fluctuaciones de la carga a las que son sometidas las cadenas Rex. Así que el resultado arrojado contempla todos los aspectos necesarios para un buen diseño. El método logra un diseño rápido y confiable muy acorde a las exigencias actuales. Pudiendo tener aplicación real en la industria para obtener diseños confiables de transportadores, también puede emplearse como herramienta en la educación para facilitar el aprendizaje de la teoría de transportadores con elemento de tracción.

## REFERENCIAS

1. Gunal A. K. and E. J. Williams. 1996. Modeling of chain conveyors and their equipment interfaces. In Proceedings of the 1996 Winter Simulation conference, ed. J. M. Charnes, D. M. Morrice, D. T. Brunner and J. J. Swain, 1107-1114.
2. Jing G. G., W. D. Kelton, J. C. Arantes. 1998. Modeling a Controlled Conveyor Network with Merging Configuration. In proceedings of the 1998 Winter simulation Conference, ed. D. J. Medeiros, E. F. Watson, J. S. Carson and M. S. Manivannan.
3. Hall J. D. and Bowden R. O. Simulation optimization research: transition methods for a two- phased strategy. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp. 117-123, USA.
4. Ramiro Fuentes Ayala. Evaluación del Desempeño por Simulación de un Sistema Conducido por Eventos Discretos. Journal Boliviano de Ciencias, N2, 2002.
5. GPSS World. Reference manual. Minuteman Software. P.O. Box 131. Holly Springs, North Carolina, USA, 4ed, 2001
6. Juan Llovet, Diego Delgado, Julián Martínez. Statgraphics Plus 4. Guía Práctica para usuarios. Ediciones ANAYA MULTIMEDIA.
7. Douglas C. Montgomery. Diseño y Análisis de Experimentos. LIMUSA WILLEY, 2ed, 2004.
8. Humberto Gutiérrez Pulido, Román de la Vara Salazar. Análisis y Diseño de Experimentos. McGraw-Hill Interamericano, 2004.