

## **Procedimiento para seleccionar la velocidad óptima en bandas transportadoras de menas lateríticas**

Roberto J. Sierra-Pérez  
Arístides A. Legrá-Lobaina

### Resumen

Actualmente no se dispone de una metodología para fijar los valores racionales de velocidad de movimiento de las bandas transportadoras de menas lateríticas y otros materiales a granel; esos valores se fijan sobre la base de la experiencia y las condiciones de explotación de las bandas. Este artículo ofrece consideraciones teóricas para un método global de cálculo de los parámetros tecnológicos de la banda transportadora en el que la velocidad determina su diseño energético. El propósito es establecer el valor de velocidad óptima del movimiento de la banda que permita obtener el número de rodillos y los ángulos entre estos cuando se define la geometría de la artesa, de modo que se logre un diseño que garantice la máxima productividad a un ancho mínimo de la banda. Como caso de estudio se tomó el transportador CO2CO3 de la empresa niquelera de Nicaro y pudo verificarse su sobredimensionamiento y los sobreconsumos de energía que alcanzan valores de hasta un 37 %. Se establece una velocidad de 0,9 m/s como el valor óptimo para mantener los parámetros de diseño.

Palabras clave: Banda transportadora; diseño tecnológico; mena laterítica; optimización energética.

## **Procedure for setting belt conveyor speed in lateritic mines**

### Abstract

Currently, there is no established methodology to set the speed values for belt conveyors to move lateritic ores and other bulk materials. The speed is set according to past experience and the belt operating condition. This article provides theoretical considerations about an international method used to calculate technological parameters for belt conveyors, in which the energetic design is determined by the speed. The objective is to establish the maximum speed value for the belt to move. This will allow the calculation of number of rollers and the angle between the rollers where the trough geometry is defined. The design will guarantee maximizing productivity with a minimum belt width. The CO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> conveyor operating in Nicaro nickel plant was taken as a case study. The results proved equipment over-dimensioning and excessive power consumption reaching 37% maximum. The optimal maximum velocity was set to be 0,9 m/s to maintain design parameters.

Keywords: belt conveyors; technological design; lateritic ore; power optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las empresas cubanas del níquel y de materiales para la construcción, fundamentalmente, se emplean bandas (o cintas) transportadoras para el acarreo de menas y áridos a granel. No se dispone de una metodología que permita determinar, con una perspectiva energética, los valores óptimos de velocidad del movimiento de la banda de los transportadores, sino que la velocidad se establece sobre la base de la experiencia y las condiciones particulares de explotación.

La literatura sobre el tema (Potapov 1980; Spibacoski y Potapov 1983; Vasiliev et al. 2006) establece que los parámetros tecnológicos de la banda transportadora, incluyendo su velocidad de movimiento, están interrelacionados a través de la expresión (1):

$$B = 1,1 \cdot \left( \sqrt{Q \cdot (\chi \cdot \xi \cdot v \cdot K)^{-1}} + 0,05 \right) \quad (1)$$

Donde:

*B*: ancho de la banda, m;

*Q*: productividad entregada por el transportador, t/h;

$\xi$ : coeficiente que tiene en cuenta la disminución de la productividad debido al ángulo de inclinación longitudinal del transportador;

*v*: velocidad de movimiento de la banda, m/s;

*K*: coeficiente constructivo o de forma, que depende de las dimensiones transversales del transportador y de las propiedades del material transportado.

Aunque algunos investigadores seleccionan los valores de la velocidad partiendo de la experiencia acumulada y de las condiciones específicas de explotación, tales valores no coinciden para el acarreo de un mismo tipo de material ni condiciones de explotación similares.

Según Shubin y Pedre (1986), la velocidad de la banda recomendada para la descarga por el tambor cabezal se establece para distintos tipos de carga y de anchos de banda; o sea, para *B* igual a 400 mm se toma una velocidad *v* de 0,80 m/s a 2,00 m/s y para *B* desde 1 200 mm a 1 600 mm de ancho, *v* puede llegar hasta los 4,00 m/s. Ellos plantean:

- Para las cargas abrasivas, cualquiera sea el tamaño de los fragmentos, la velocidad debe estar entre 1,0 m/s y hasta 2,5-3,0 m/s, correspondiendo los valores mayores al ancho de banda máximo.

- Para materiales en granos, como cemento y arena,  $v=1,5$  a  $3,0-4,0$  m/s
- Para materiales en polvo, en condiciones que no se permite disgregación,  $v=0,8$  hasta  $1,0$  m/s
- Cuando la descarga se realiza por un arado, la velocidad se disminuye de  $10\%$  a  $15\%$
- Cuando la descarga es de doble tambor se recomienda disminuir la velocidad de un  $20\%$  a un  $25\%$ .

Para determinar la velocidad de la banda en el caso del transportador de minerales hay que considerar el grado de movilidad de las partículas de la carga. Aquí es importante tomar en cuenta la relación entre el ángulo del talud estático y el ángulo del talud dinámico  $\{\alpha_d$  de la carga transportada a granel; el tamaño de las partículas también debe ser considerado. Estos parámetros, aún no están determinados para el mineral laterítico y los áridos cubanos.

Según Tarasov (1980, 1986), al aumentar la velocidad de la banda, aumenta también su desgaste, principalmente en los apoyos de rodillos y tambores. Aunque este autor ofrece criterios para la selección de la velocidad de movimiento de la banda sobre la base de la experiencia y las condiciones de trabajo o explotación, y considera el aspecto económico como criterio importante, no establece un procedimiento que permita evaluar el valor de velocidad más racional, tampoco analiza materiales poco movedizos como el mineral laterítico ni realiza los análisis energéticos.

Oriol y Aguilar (1995), Aguilar (2002) y Lauhoff (2005) plantean que la velocidad de movimiento de la banda depende de la naturaleza del material transportado, de las dimensiones transversales de la banda y de la existencia de descargas intermedias del material.

Basado en la experiencia se han tabulado los valores de velocidad en función de los parámetros citados. En la práctica, esto requiere de un proceso de tanteo por la interrelación entre el ancho de la banda, la productividad, el perfil y las propiedades físicas y mecánicas del material que se transporta.

El análisis anterior no establece la regularidad del comportamiento de los parámetros citados para lograr racionalidad, validez técnica y energética durante la selección y explotación del transportador. Debe establecerse, siempre que sea posible, el menor ancho de banda para la máxima

velocidad recomendada, que será, a su vez, la velocidad de funcionamiento más económica.

De acuerdo con Zelienskii y Petrov (1986), y con las normas GOST 22645-77, los valores de velocidad se establecen según la serie: 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3. Se pueden seleccionar con margen de más menos un 10 %. Los valores de velocidad recomendados se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de velocidad de la banda recomendados según Zelienskii y Petrov (1986)

B, mm	400	650	800	1 000	1 200	1 400	1 600	2 000
v, m/s	1-1,6	1-2,5	1-3,15	1-4,0	1-4,0	1-5,0	1,25-5,0	

En este análisis no se establece procedimiento o metodología para determinar la velocidad y seleccionarla de acuerdo con los valores de la serie establecida. Tampoco se cuestiona el comportamiento energético, aspecto importante que no puede obviarse.

Pereda y Polanco (1999) plantean que la productividad calculada puede obtenerse en función de la variación de la velocidad y el ancho de la banda. Puede obtenerse la productividad deseada con un ancho de banda pequeño y un alto valor de velocidad, lo que implica bajo costo del transportador, pero un gran desgaste de la banda, y viceversa. Sin embargo, estos autores tampoco establecen la relación óptima con la cual se obtienen los gastos mínimos de explotación.

La velocidad máxima se toma según el movimiento estable de la banda, el desgaste y vibración de la misma y los rodillos y la trituración del mineral durante la carga y la descarga. Cuando la carga es en granos, la velocidad se determina por los golpes peligrosos de los granos sobre la banda a su paso por los rodillos. Este último fenómeno ha sido estudiado en los transportadores TR-1A y TR-1B de la empresa niquelera Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) y el transportador CO4 de la empresa René Ramos Latour (ECRRL) (Sierra 2009). Según Potapov (1980), la velocidad de la banda se selecciona según la Tabla 2.

Tabla 2. Velocidad de la banda  $v$  (en m/s) en función de la productividad y el tipo de material

Productividad; m <sup>3</sup> /h	Material mullido	Material rocoso
400-750	2,0-3,0	1,5-2,5
1 000-2 200	3,0-4,0	2,0-3,0
2 500-5 000	3,0-5,0	2,5-4,0
6 000-8 500	4,0-7,0	2,5-4,5

Para anchos de banda de 1 000, 1 200, 1 600, 2 000 hasta 2 400 mm, la velocidad de movimiento de la banda puede tomarse hasta de 7,0 m/s.

Vasiliev y Nicolaiev (2003) escogen la velocidad de la banda en función del ancho de esta y del tamaño de los fragmentos del material transportado. Los valores de velocidad de la banda están tabulados; para bandas entre 650 mm y 800 mm la velocidad a escoger es de 1-2 m/s, de 1 000 mm a 1 200 mm, se toma 1,25 m/s a 3,15 m/s, y en algunos casos hasta 4,0 m/s, y para bandas de 1 400 mm a 1 800 mm, se toma de 1,6 m/s a 4,0 m/s, pudiendo llegar hasta 5,0 m/s en ocasiones. En todos los casos, los mayores valores de velocidad corresponden a tamaños grandes de los fragmentos acarreados.

Todos los autores antes referidos plantean criterios diferentes de selección de la velocidad del movimiento de la banda, la mayoría de forma empírica, y no existe aún una metodología científicamente establecida para algún material específico.

Con mayor o menor precisión, para la selección del valor de velocidad de movimiento de la banda se incluyen los factores siguientes:

- La naturaleza del material transportado
- El ancho de la banda
- La existencia de descargas intermedias del material transportado
- La interrelación entre el ancho de la banda, la productividad, la masa volumétrica, la composición granulométrica y la movilidad del material transportado.

Sin embargo, consideramos que para seleccionar la velocidad hay que tener en cuenta también la altura de caída del material sobre la banda en los puntos de alimentación. Investigaciones desarrolladas con bandas transportadoras existentes en Moa y Nicaro han permitido establecer un modelo teórico que evalúa la variación de la velocidad de deformación de la banda al verter menas lateríticas desde diferentes alturas.

Se ha constatado que el desgaste de la banda en los puntos de carga puede reducirse disminuyendo la altura de caída y se sugiere emplear velocidades de la banda mayores de 3 m/s, independientemente del tamaño y la forma de las partículas (Sierra et al. 2009). Siempre que sea posible, se ha de escoger el menor ancho de banda para la máxima velocidad recomendada y así lograr la combinación más económica.

La norma rusa GOST-22645-77 establece el ancho de la banda en 300, 400, 500, 650, 800, 1 000, 1 200, 1 400, 1 600, 2 000, 2 500 y 3 000 mm; mientras que la norma CEMA (1999) establece los

siguientes valores normalizados: 400, 450, 500, 600, 750, 900, 1 050, 1 200, 1 350, 1 500 y 1 800 mm.

De análisis realizado se ha podido constatar que existen criterios diferentes de selección de la velocidad de movimiento de la banda, todos con un basamento empírico, notándose la ausencia de una metodología científicamente establecida para determinarla con un enfoque de diseño energético óptimo del transportador.

Este trabajo tuvo como objetivo establecer un procedimiento bajo una perspectiva de racionalización energética, para la determinación óptima de la velocidad de movimiento de la banda de los transportadores para un perfil dado.

## 2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Las consideraciones teóricas del método de determinación de la velocidad de movimiento de la banda de un transportador, como parte de un método global de cálculo de los parámetros tecnológicos de este tipo de transporte (Sierra 2010) asume que:

1. La determinación de la forma y área de la sección de la carga se realiza teniendo en cuenta las características del material a transportar, que pueden ser expresadas mediante sus respectivos ángulos de reposo maximal  $\{\mu_m$  y tangencial  $\{\mu_t$ , (Ricaurte 2009).
2. La determinación del ancho de la banda se realiza sumando la longitud de los rodillos, más cierto margen de seguridad. La longitud de los rodillos y su geometría debe ser tal, que el área de la sección de la carga para una velocidad deseada y valores dados de masa volumétrica y coeficiente de llenado posibilite la productividad solicitada.

Garantizar un coeficiente de llenado de la sección transversal del material sobre la artesa en un 100 % es un factor imprescindible para la determinación precisa del valor de velocidad de la banda durante el acarreo de materiales a granel (Lauhoff 2005).

Cuando las condiciones de llenado del material en la banda varían, según el valor del ancho de la banda (que permanece constante), se recomienda adaptar la velocidad de la banda para reducir el consumo de energía y el costo de operación del transportador.

Los valores racionales de velocidad de movimiento de la banda del transportador son determinantes en la ejecución del algoritmo propuesto.

La descripción de los tres puntos de dicho algoritmo involucrados con la velocidad se muestra a continuación:

1. Establecer los requerimientos tecnológicos del transportador:
  - a. Punto de inicio y punto final
  - b. Productividad deseada
  - c. Rango de velocidades posibles.
2. Determinar el número de rodillos, sus magnitudes y geometría que garanticen que el área de la sección de la carga sea tal que responda a la productividad pedida para una velocidad aceptable. De esta manera, se determina el ancho mínimo de la banda, al cual debe sumársele el margen de seguridad y luego debe ser normalizado.

Sin perder generalidad, supóngase que se quiere determinar el ancho de la banda ( $B$ ) en un transportador con una artesa de uno a siete rodillos (Figura 1) donde, en particular, se tiene que  $\{_d = \{_m = \{_t$ .

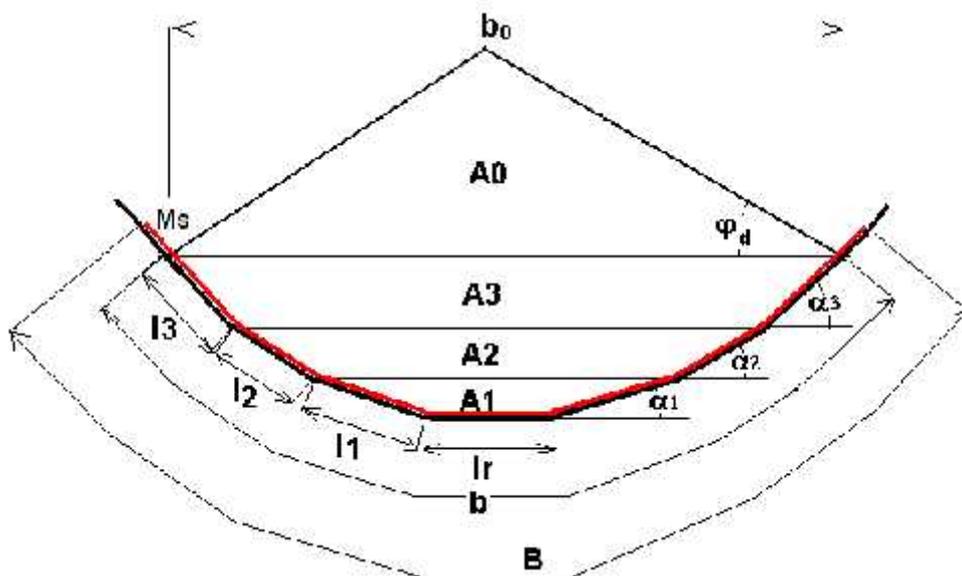


Figura 1. Esquema del área de la sección transversal del flujo de carga.

Nótese que  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  son áreas determinadas por las longitudes de los rodillos  $l_r$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  y  $l_3$  y por los ángulos  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  y  $\{_d$ . Considerando, además, que:

$Q$ : productividad del transportador, t/h;

$E$ : coeficiente que tiene en cuenta la disminución de la productividad debido al ángulo de inclinación longitudinal del transportador

$v$ : velocidad de movimiento de la banda, m/s;

$x$  : masa volumétrica del material transportado, t/m<sup>3</sup>;

$K_f$ : coeficiente que depende del tipo de sección de la carga, que según Ricaurte (2009), expone las expresiones de  $K_f$  para cada tipo de sección de carga, teniendo en cuenta los ángulos de reposo maximal  $\{\alpha_m\}$  y tangencial  $\{\alpha_t\}$ .

Para calcular el valor de  $B$  se propone la expresión (2):

$$B = 1,1 \cdot \left\{ \left( \frac{1}{K_f} \right) \cdot \left[ \frac{Q}{v \cdot x \cdot \Gamma \cdot 3600} - \left( \begin{aligned} & [l_r \cdot l_1 \cdot \text{sen} \Gamma_1 + l_1^2 \cdot \text{sen} \Gamma_1 \cdot \cos \Gamma_1] + \\ & + [(l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \cos \Gamma_1) \cdot l_2 \cdot \text{sen} \Gamma_2 + \\ & + l_2^2 \cdot \text{sen} \Gamma_2 \cdot \cos \Gamma_2] + \\ & + [(l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \cos \Gamma_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \cos \Gamma_2) \cdot l_3 + \\ & + l_3^2 \cdot \cos \Gamma_3 \cdot \text{sen} \Gamma_3] \end{aligned} \right) \right] + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \Gamma_{(i)})] + 0,05 \right\} \quad (2)$$

Si se denota a  $AT = \sum_{i=1}^n A(i)$ : área total de la sección transversal del flujo de carga;  $m$ , y para cada tipo de material que se transporte se estudia un margen de seguridad específico  $M_s$  para la banda;  $m$ , entonces se obtiene:

$$B = \sqrt{\left( \frac{1}{K_f} \right) \cdot \left[ \frac{Q}{v \cdot x \cdot \Gamma \cdot 3600} - \sum_{i=1}^n A(i) \right] + M_s + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \Gamma_{(i)})]}; \quad (3)$$

Los valores de  $b_0$  (ancho relativo de la sección transversal) y de  $b$  (ancho de la banda ocupada por el mineral) se calculan, respectivamente, por expresiones 4 y 5:

$$b_0 = l_r + 2 \cdot \sum_{i=1}^{nr} [l_i \cdot \cos(\Gamma_i)] \quad (4)$$

$$b = l_r + 2(l_1 + l_2 + l_3) \quad (5)$$

Nótese que  $b < B$ .

1. Para cada tramo donde se sitúe un motor se calcula el esfuerzo de tracción ( $W_0$ ) y de la potencia (P) que permite determinar la potencia del motor que se requiere en función del valor óptimo de velocidad de banda. Para el desarrollo de este punto se utiliza la expresión:

$$P = \frac{W_0 \cdot v}{1000 \cdot \gamma} ; \text{ kW} \quad (6)$$

### 3. CASO DE ESTUDIO: TRANSPORTADOR CO2CO3 DE NICARO

El transportador CO2CO3 de la empresa René Ramos Latour forma parte de una secuencia de cinco grandes transportadores: CO1 (traza recta), CO2CO3 (traza recta), CO4 (traza curva), CO5 (traza recta) y CO7 (traza recta), de los cuales el CO2CO3 es el más largo de los de traza recta. Su función es recibir mineral laterítico en el punto de descarga del transportador CO1 y transportarlo hasta el punto de carga del transportador CO4. Tiene un variador de la velocidad de movimiento por variación de la frecuencia de la red de suministro eléctrico (Sierra 2010).

Tabla 3. Parámetros de entrada (diseño) del transportador CO2CO3 de la ECRRL, según la firma Alemana FAM

Parámetros de Entrada	Valor
Productividad	800 t/h
Velocidad deseada	2,85 m/s
Ángulo máximo del talud	34°
Ángulo tangencial del talud	34°
Masa volumétrica mullida	1,4 t/m <sup>3</sup>
Diámetro de los pedazos	100 mm

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La optimización energética es uno de los enfoques más importantes en el diseño tecnológico, ya que es sinónimo de la eficiencia energética, cuestión de primer orden en la actualidad. En la presente investigación se prefiere perfeccionar el diseño en cada una de sus etapas bajo criterios energéticos para obtener los valores de velocidad de movimiento de la banda que optimizan el diseño energético del transportador para menas lateríticas y áridos (Sierra 2010).

El algoritmo propuesto se compone de cuatro fases. La primera, relacionada con la minimización de la resistencia por unidad de longitud del recorrido del transportador; la segunda, concerniente a la definición de los puntos de apoyo intermedio de los rodillos que haga mínima las tensiones en los tramos curvos del perfil; la tercera plantea obtener el

número de rodillos y los ángulos que se forman entre ellos cuando se define la geometría de la artesa, de manera que se alcance un diseño que, manteniendo la productividad y la velocidad pedidas, minimice el valor del ancho de banda calculado; y finalmente, la fase cuatro, para encontrar las posiciones de  $m_i$  motores en los puntos del recorrido del transportador de manera que se minimice el valor de la tensión máxima de la banda (Sierra 2010).

Este trabajo guarda relación específicamente con el procedimiento para la optimización de la tercera fase. El método de optimización seleccionado como básico es el siguiente:

1. Discretizar los valores de las variables. Con este procedimiento el problema queda escrito como un problema de optimización combinatoria.
2. Aplicar el Método Exhaustivo que consiste en evaluar las restricciones para cada una de las combinaciones de los valores discretos de las variables. Cuando cierta combinación de valores de las variables satisface las restricciones, entonces, se dice que se obtuvo una solución factible.
3. Evaluar la función objetivo para todas las soluciones factibles y seleccionar las mejores soluciones según sea adecuado (combinaciones que generen el menor o los menores valores; o que generen el mayor o los mayores valores).

A partir del diseño del perfil de cada artesa, que se basa en conocer las dimensiones de cada rodillo, el ángulo que forman entre ellos y las longitudes de los márgenes de seguridad del material ( $M_s$ ) y de los rodillos ( $R_s$ ), en el presente trabajo se evalúan de forma discreta los valores de la velocidad de la banda y se procede a identificar el valor de la misma, de manera que se obtenga un diseño que, manteniendo la productividad y la velocidad demandada, se logre:

- Durante el diseño de la banda el mínimo valor de su ancho calculado, mínimo peso propio por unidad de longitud y máximo valor de tensión admisible.
- El menor valor de la potencia de accionamiento de los motores para un racional consumo energético.

El diálogo fue programado en un software (Transbandas) para realizar el ajuste de los parámetros de entrada (Tabla 3), diversificando los valores de la velocidad de movimiento de la banda, de manera que se

mantengan constantes el resto de los parámetros que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de diseño del transportador CO2CO3 de la ECRRL según la optimización de la velocidad de la banda por el software Transbandas (Sierra, 2010)

Parámetros	Valor
Total de tramos vacíos	20
Total de tramos llenos	20
Artesa de tres rodillos de longitudes iguales	0,037 m
Ángulo entre rodillos laterales y el rodillo central	30°
Distancia entre rodillos en las ramas cargadas	1 m (diseño)
Peso de rodillos en tramos vacíos	136,697 N
Peso de rodillos en tramos llenos	155,999 N
Ancho de la banda (goma y cable)	1 m
Peso de un metro cuadrado de banda	206 N
Puntos de limpieza	1 (en el tramo 1)
Puntos de carga	1 (en el tramo 21)
Puntos de descarga	0 (descarga libre en el tramo 40)
Número de accionamientos	2 (iguales)
(tramo 1 y tramo 21)	
Coefficiente de fricción entre la banda y el tambor motor	0,3
Ángulo general de abrazado de la banda sobre el tambor	210° en cada uno.
Potencia total (dos motores de 190 kW cada uno)	380 kW (diseño)
Velocidad real calculada (ajustada)	0,9 m/s

Con el rediseño del transportador CO2CO3 de la ECRRL se consiguió un 12 % de ahorro energético (Sierra 2010). En la Tabla 4 se muestra que con un valor de velocidad de la banda menor en 1,95 m/s (2,85 - 0,9 m/s) pueden garantizarse los restantes parámetros de diseño del transportador.

Por otro lado, si se aplica la velocidad que garantiza la productividad de 800 t/h, entonces se necesita un área de la sección transversal mucho menor (Figura 2) y, por ende, un menor ancho de banda.



Figura 2. Área de sobredimensionamiento del diseño del transportador CO2CO3 de la ECRRL.

## 5. CONCLUSIONES

- Se estableció un procedimiento para la selección del valor de la velocidad óptima de movimiento de la banda con base en su diseño energético.
- Se verificó que el transportador CO2CO3 está sobredimensionado y posee sobreconsumos de energía que alcanzan valores de hasta un 37 % para los valores de diseño de la velocidad de la banda. El valor óptimo de velocidad para mantener los parámetros de diseño es de 0,9 m/s.

## 6. REFERENCIAS

- AGUILAR, F. 2002: Máquinas de transporte continuo. Monografía. CUJAE, La Habana, Cuba.
- LAUHOFF, H. 2005: Control de velocidad en correas transportadoras - ¿Realmente ahorra energía? Bulk Solids Handling 25(6), Alemania. Disponible en: [www.synergy-eng.com/spanish/pdf/](http://www.synergy-eng.com/spanish/pdf/).
- ORIO, G. J. M. & AGUILAR, P. F. 1995: Máquinas de transporte continuo. T I. 3 Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 235 p. ISBN 959-13-0393-9.
- PEREDA, H. S. & POLANCO, A. R G. 1999: Transporte minero. Félix Varela, La Habana, 363 p.
- POTAPOV, N. G. 1980: Máquinas de transporte. Niedra, Moscú, 261 p.
- RICAURTE, C. J. 2009: Precisiones en la determinación del factor de forma de las arenas industriales en transportadores de banda. Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Alberto Turro Breff (Tutores) Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- SHUBIN, V. S. & PEDRE, C. 1986: Diseño de Máquinas Industriales. T. II. Pueblo y Educación, La Habana.
- SIERRA, R. J. 2010: Optimización energética en el diseño de transportadores de banda para el mineral laterítico cubano. Arístides Alejandro Legrá Lobaina (Tutor) Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 100 p.
- SIERRA, R. J.; LEGRÁ, A. A. & VELÁZQUEZ, L. 2009: Evaluación del desgaste de la banda transportadora en las minas laterítica Moa y Nicaro. Minería y Geología 25(4): 561. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg) .
- SPIVAKOSKI, A. O. & POTAPOV, M. G. 1983: Máquinas y complejos de transporte en las labores minera. Niedra, Moscú, 383 p.

- TARASOV, U. D. 1980: Construcción y cálculo de las máquinas y complejos de transporte. Leningrado, 227 p.
- TARASOV, U. D. 1986: Dispositivos y cálculo de las máquinas mineras de carga y transporte. Instituto de Minas de Leningrado, 112 p.
- VASILIEV, K. A.; NIKOLAIEV, A. K. & CAZONOV, K. G. 2006: Máquinas de cargas y transporte de las plantas de beneficio de minerales. HAYKA, Sant Petersburgo, 358 p. ISBN 5-02-025092-9.
- VASILIEV, K. A. & NIKOLAIEV, A. K. 2003: Máquinas de transporte. Sant Petersburgo, 124 p. ISBN 5-94211-216-9.
- ZELIENKII, O. B. & PETROV, A. C. 1986: Manual para proyectos de transportadores de banda. Niedra, Moscú, 222 p.

**Roberto J. Sierra-Pérez.** [rsierra@ismm.edu.cu](mailto:rsierra@ismm.edu.cu)  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.  
Departamento de Mecánica. Instituto Superior  
Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

**Arístides Alejandro Legrá Lobaina.** [alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu)  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.  
Centro de Energía y Tecnología Avanzada de Moa.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.