



## Sensibilidad de la órbita de un punto a la variación de los parámetros geométricos de un mecanismo

### Sensitivity of the orbit of a point to the variation of the geometrical parameters of a mechanism

Heredia-Castillo Jorge

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Correo: [jorge.heredia@alumno.buap.mx](mailto:jorge.heredia@alumno.buap.mx)  
<https://orcid.org/0000-0001-9579-447X>

Mendoza-Quiñonez Jesús Alberto

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Correo: [jesus.medozaq@correo.buap.mx](mailto:jesus.medozaq@correo.buap.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-1201-9967>

Félix-Beltrán Olga Guadalupe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Correo: [olga.felix@correo.buap.mx](mailto:olga.felix@correo.buap.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-4626-1954>

Calixto-Sirene Bernardino

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Correo: [bernardino.calixto@correo.buap.mx](mailto:bernardino.calixto@correo.buap.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-4174-2361>

Aparicio-Razo Manuel

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Correo: [manuel.aparicio@correo.buap.mx](mailto:manuel.aparicio@correo.buap.mx)  
<https://orcid.org/0000-0001-9216-8203>

#### Resumen

El siguiente trabajo muestra la órbita o trayectoria de un punto de referencia de un rastrillo clasificador usado en la industria de la minería, asimismo la sensibilidad de los cambios que pueden ocurrir en esta trayectoria ante los cambios en los parámetros geométricos ajustables del mecanismo. Para determinar esta sensibilidad se procede a hallar la expresión matemática correspondiente a la diferencial total de la ecuación vectorial que define la ubicación del punto de interés respecto a un sistema de referencia ubicado en el bastidor del mecanismo. Al tomar la diferencial total de esta ecuación se puede hallar la influencia de la variación diferencial de los parámetros geométricos calibrables en la variación diferencial de las posiciones  $x$ ,  $y$  del punto de interés respecto a su trayectoria nominal teórica. Se obtiene que la variación del parámetro geométrico calibrable  $l_8$  asociada al eslabón más largo del rastrillo, ejerce la menor sensibilidad al cambio en la trayectoria del punto de referencia, y la variación del parámetro geométrico  $\beta_{81}$  asociada a un ángulo interno en el elemento barredor del rastrillo desarenador, produce la mayor sensibilidad en la variación de la trayectoria del punto de referencia. El trabajo facilita a los operarios las labores de ajuste del mecanismo durante el mantenimiento, ya que permite saber qué parámetros geométricos son más o menos influyentes para este ajuste. Asimismo, el trabajo permite establecer los requerimientos de diseño en el caso de que se desee automatizar el proceso de calibración de este mecanismo, el cual actualmente se realiza de forma manual.

**Descriptores:** Rastrillo desarenador, diferenciales totales, trayectoria nominal, análisis de sensibilidad, parámetros geométricos ajustables.

#### Abstract

The following work shows the orbit or trajectory of a reference point of a classifier rake, used in the mining industry, and the sensitivity of the changes that can occur in this trajectory to changes in the adjustable geometric parameters of the mechanism. To determine this sensitivity, we proceed to find the mathematical expression corresponding to the total differential of the vector equation that defines the location of the point of interest with respect to a reference system located on the frame of the mechanism. By taking the total differential of this equation, it is possible to find the influence of the differential variation of the calibrable geometric parameters on the differential variation of the  $x$ ,  $y$  positions of the point of interest with respect to its theoretical nominal trajectory. It is obtained that the variation of the calibrable geometric parameter  $l_8$  associated to the longest link of the rake, exerts the lowest sensitivity to the change in the trajectory of the reference point, and the variation of the geometric parameter  $\beta_{81}$  associated to an internal angle in the sweeping element of the desander rake, produces the highest sensitivity in the variation of the trajectory of the reference point. The work makes it easier for operators to adjust the mechanism during maintenance, since it allows to know which geometric parameters are more or less influential for this adjustment. Likewise, the work allows establishing the design requirements if it is desired to automate the calibration process of this mechanism, which is currently performed manually.

**Keywords:** Classifier rake, total differentials, nominal trajectory, sensitivity analysis, adjustable geometric parameters.

## INTRODUCCIÓN

Un rastrillo desarenador, o rastrillo clasificador, es una máquina industrial que generalmente se usa en circuitos cerrados de tratamientos de moliendas y en la clasificación de materiales de plantas de lavado de minerales. Su diseño incluye un tanque de sedimentación y un mecanismo para eliminar los sólidos sedimentados del fondo del tanque (Bustillo, 2018). En el caso particular de este trabajo, el mecanismo de rastrillo desarenador a estudiar, forma parte de una máquina de la marca Dorr Oliver. Dicho rastrillo se ocupa de la separación del barro del líquido acuoso resultante de la obtención de bauxita mineral para fabricar aluminio.

Un diagrama esquemático del rastrillo desarenador se muestra en la Figura 1. En esta, las letras indican la posición de las articulaciones y puntos fijos. Todas las articulaciones son pares rotatorios y los puntos fijos corresponden a las letras: A, P, D. Los números señalan la ubicación de los eslabones, siendo 1 el bastidor del mecanismo, 2 el elemento de entrada y 8 el rastrillo de salida. El elemento de entrada gira en sentido horario, con una velocidad angular de 15 ciclos por minuto. Como parte del bastidor resalta la cuba, que contiene el material a separar. La cuba tiene una inclinación de 10 grados para permitir que el líquido discurra hacia abajo en sentido opuesto al desplazamiento ascendente del barro que sube mediante el trabajo de barrido.

El rastrillo, de 5500 mm de longitud máxima, es un eslabón ajustable con 69 dientes barredores que se mueven en traslación curvilínea pura y, por tanto, todos sus puntos describen trayectorias curvilíneas paralelas. En la carrera de avance, los dientes del rastrillo se sumergen en el líquido lleno de barro que corre hacia abajo por el plano inclinado de la cuba, mientras que el rastrillo frena y arrastra hacia arriba el material sólido recuperable hasta la zona de descarga.

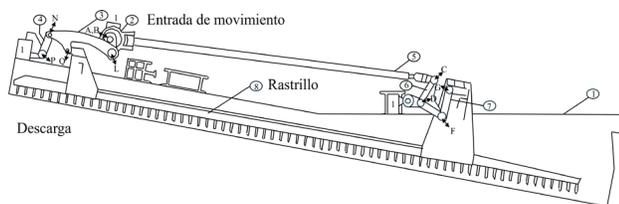


Figura 1. Esquema del rastrillo clasificador mostrando sus 8 eslabones (etiquetados con números del 1 al 8) y sus 10 pares rotatorios constituyentes (etiquetados con las letras mayúsculas A, B, C, D, F, G, L, N, P, Q), a los cuales se les identifica con una flecha bidireccional como etiqueta adicional

El mecanismo tiene 25 parámetros geométricos independientes, cinco de los cuales son ajustables ( $\beta_1, l_5, l_8, \beta_{81}$  y  $\beta_{82}$ ).

Los parámetros geométricos, con sus respectivas dimensiones, se muestran en el anexo de la Tabla 1, distinguiéndose con rojo los elementos calibrables.

Para realizar el ajuste del mecanismo, como en el caso de otros mecanismos desajustados (Mendoza & Otero, 2006; Mendoza *et al.*, 2019), el personal responsable debe conocer la sensibilidad de las trayectorias cuando se cambia la magnitud de los parámetros geométricos calibrables. Para ello, se debe emplear un análisis de sensibilidad del mecanismo rastrillo desarenador. Esto debido a que, cuando este se descalibra se modifica la trayectoria de barrido del mecanismo. De este modo, si el rastrillo tiene una distancia relativa a la cuba mayor a 15 mm, el rastrillo no realiza la tarea de separación correctamente, pues no es capaz de barrer con eficiencia las partículas sólidas. Por el contrario, si la distancia es menor a 5 mm el rastrillo puede chocar con la cuba y todo el mecanismo puede trabarse.

Existen varios métodos diferentes para determinar la sensibilidad de parámetros sobre un modelo matemático. Estas metodologías de implementación, dependiendo de las condiciones de estudio ocupadas, van desde simulaciones probabilísticas (Marshall, 2018), herramientas computacionales (Zhou *et al.*, 2021), hasta empleo de derivadas parciales (Zhang *et al.*, 2008). Uno de estos métodos se usa para determinar la sensibilidad en mecanismos. Este realiza un análisis diferencial total en el que se obtiene la influencia de los diferentes parámetros que afectan el comportamiento del mecanismo estudiado. Por ejemplo, en el estudio de las dilataciones térmicas en la descalibración del movimiento paralelo de las tres cuchillas de puesta a tierra de un seccionador eléctrico (Mendoza *et al.*, 2012).

En el presente trabajo se propone sacar la diferencial total (Fogarasy & Smith, 1998) de la ecuación vectorial que describe la trayectoria de un punto de referencia sobre el rastrillo, para ver de qué modo esa trayectoria es sensible a los cambios en los parámetros geométricos del mecanismo. Esta sensibilidad se visualiza gráficamente mediante curvas de diferenciales de trayectoria en las coordenadas  $x$  y  $y$  contra las variaciones de los parámetros geométricos ajustables.

## DESARROLLO

Para extraer la ecuación vectorial que permite trazar la trayectoria del punto extremo, que en adelante se le llamará punto 0, se necesita realizar un análisis cinemático del mecanismo basado en ecuaciones de restricción (Fogarasy & Smith, 1995), para ello, primeramente se debe visualizar el esquema cinemático del mecanismo. Este se representa en la Figura 2. Adicionalmente, se muestran las coordenadas generalizadas ( $\phi_{21}, \phi_5, \phi_{61}, \phi_{77}$

$\phi_{8r}$ ,  $\phi_4$  y  $\phi_{31}$ ) y los parámetros geométricos con la nomenclatura propia de la IFToMM (IFToMM Commission 'A' For Standards and Terminology, 1991), ver Tabla 1 en el Anexo. Los eslabones se designan por números, y los pares cinemáticos y puntos fijos del mecanismo se representan por letras mayúsculas. Además, se indica explícitamente la ubicación de los parámetros geométricos calibrables  $l_{8r}$ ,  $\beta_{1r}$ ,  $\beta_{81r}$ ,  $\beta_{82}$  y  $l_5$ .

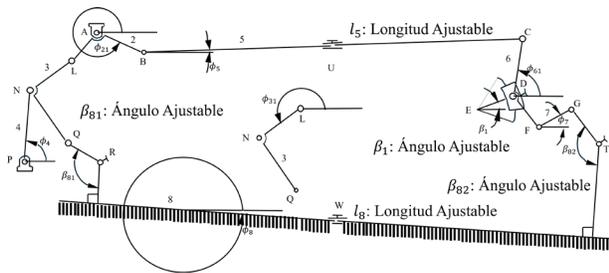


Figura 2. Esquema cinemático del mecanismo indicando los eslabones, los pares cinemáticos y las coordenadas generalizadas  $\phi_{21r}$ ,  $\phi_5$ ,  $\phi_{61r}$ ,  $\phi_7$ ,  $\phi_{8r}$ ,  $\phi_4$  y  $\phi_{31}$

El diagrama de vinculaciones cinemáticas se muestra en la Figura 3. Se puede observar que el mecanismo se divide en tres subcircuitos cinemáticos constituyentes I, II y III.

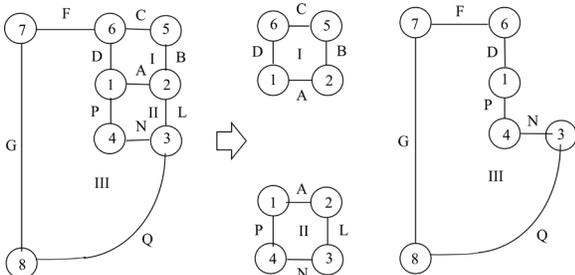


Figura 3. Grafo del mecanismo mostrando sus tres subciclos cinemáticos

El primer subcircuito cinemático está conformado por los eslabones 1, 2, 5 y 6. En la Figura 4 se muestra el diagrama cinemático de dicho subcircuito.

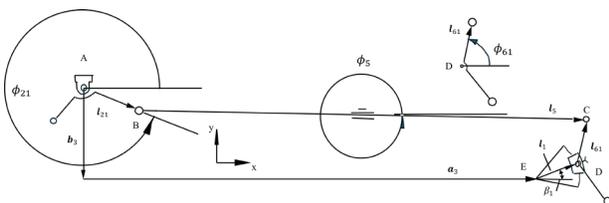


Figura 4. Diagrama cinemático del primer subcircuito formado por los eslabones 1, 2, 5, 6

A partir de la ecuación de restricción de lazo vectorial cerrado del primer subcircuito, se determinan las coor-

denadas generalizadas de salida desconocidas  $\phi_5$  y  $\phi_{61r}$  siendo  $\phi_{21}$  la coordenada de entrada. La expresión que relaciona la coordenada generalizada de entrada  $\phi_{21}$  y los parámetros geométricos con las coordenadas generalizadas de salida  $\phi_5$  y  $\phi_{61r}$  se indican en las ecuaciones (1) y (2).

$$\phi_{61r} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-kb - \sqrt{k_b^2 - 4k_a k_c}}{2k_a} \right) \quad (1)$$

$$\phi_5 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-ke + \sqrt{k_e^2 - 4k_d k_f}}{2k_d} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$k_a = [k_3 - k_1 - k_2 \cos(\phi_{21}) - k_5 \sin(\phi_{21}) + \cos(\phi_{21})] \quad (3)$$

$$k_b = [2k_4 - 2 \sin(\phi_{21})] \quad (4)$$

$$k_c = [k_3 + k_1 - k_2 \cos(\phi_{21}) - k_5 \sin(\phi_{21}) - \cos(\phi_{21})] \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{a_1}{l_{21}} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{a_1}{l_{61}} \quad (7)$$

$$k_3 = \frac{l_{21}^2 + l_{61}^2 + a_1^2 + b_1^2 - l_5^2}{2l_{21}l_{61}} \quad (8)$$

$$k_4 = \frac{b_1}{l_{21}} \quad (9)$$

$$k_5 = \frac{b_1}{l_{61}} \quad (10)$$

$$k_d = [k_8 + k_6 - k_7 \cos(\phi_{21}) - k_{10} \sin(\phi_{21}) - \cos(\phi_{21})] \quad (11)$$

$$k_e = [-2k_9 + 2 \sin(\phi_{21})] \quad (12)$$

$$k_f = [k_8 - k_6 - k_7 \cos(\phi_{21}) - k_{10} \sin(\phi_{21}) + \cos(\phi_{21})] \quad (13)$$

$$k_6 = \frac{a_1}{l_{21}} \quad (14)$$

$$k_7 = \frac{a_1}{l_5} \quad (15)$$

$$k_8 = \frac{l_{21}^2 + l_5^2 + a_1^2 + b_1^2 - l_5^2}{2l_{21}l_5} \quad (16)$$

$$k_9 = \frac{b_1}{l_{21}} \quad (17)$$

$$k_{10} = \frac{b_1}{l_5} \quad (18)$$

El segundo circuito cinemático se muestra en la Figura 5. A partir de la ecuación de restricción de lazo vectorial cerrado del segundo subcircuito se determinan las coordenadas generalizadas de salida desconocidas  $\phi_4$  y  $\phi_{31}$ , siendo  $\phi_{22}$  la coordenada de entrada. La expresión que relaciona la coordenada generalizada de entrada  $\phi_{22}$  y los parámetros geométricos con las coordenadas generalizadas de salida  $\phi_4$  y  $\phi_{31}$ , se indican en las ecuaciones (19) y (20).

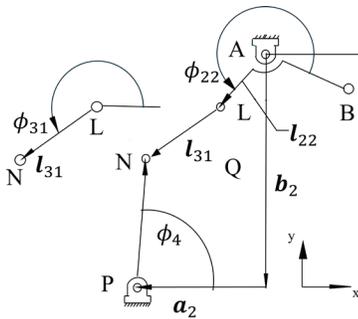


Figura 5. Esquema cinemático del segundo subcircuito formado por los eslabones 1, 2, 3, 4

$$\phi_4 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-k_h + \sqrt{k_h^2 - 4k_g k_i}}{2k_g} \right) \quad (19)$$

$$\phi_{31} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-k_n - \sqrt{k_n^2 - 4k_j k_q}}{2k_j} \right) \quad (20)$$

Donde:

$$\phi_{22} = \phi_{21} - \beta_2 \quad (21)$$

$$k_g = [k_{13} - k_{11} - k_{15} \sin(\phi_{22}) - k_{12} \cos(\phi_{22}) + \cos(\phi_{22})] \quad (22)$$

$$k_h = [2k_{14} - 2 \sin(\phi_{22})] \quad (23)$$

$$k_i = [k_{13} + k_{11} - k_{15} \sin(\phi_{22}) - k_{12} \cos(\phi_{22}) - \cos(\phi_{22})] \quad (24)$$

$$k_{11} = \frac{a_2}{l_{22}} \quad (25)$$

$$k_{12} = \frac{a_2}{l_4} \quad (26)$$

$$k_{13} = \frac{a_2^2 + b_2^2 + l_{22}^2 + l_4^2 - l_{31}^2}{2l_{22}l_4} \quad (27)$$

$$k_{14} = \frac{b_2}{l_{22}} \quad (28)$$

$$k_{15} = \frac{b_2}{l_4} \quad (29)$$

$$k_j = [k_{18} + k_{16} - k_{20} \sin(\phi_{22}) - k_{17} \cos(\phi_{22}) - \cos(\phi_{22})] \quad (30)$$

$$k_n = [-2k_{19} - 2 \sin(\phi_{22})] \quad (31)$$

$$k_q = [k_{18} - k_{16} - k_{17} \cos(\phi_{22}) - k_{20} \sin(\phi_{22}) + \cos(\phi_{22})] \quad (32)$$

Y:

$$k_{16} = \frac{a_2}{l_{22}} \quad (33)$$

$$k_{17} = \frac{a_2}{l_{31}} \quad (34)$$

$$k_{18} = \frac{a_2^2 + b_2^2 + l_{22}^2 + l_{31}^2 - l_4^2}{2l_{22}l_{31}} \quad (35)$$

$$k_{19} = \frac{b_2}{l_{22}} \quad (36)$$

$$k_{20} = \frac{b_2}{l_{31}} \quad (37)$$

El tercer circuito cinemático se muestra en la Figura 6. A partir de la ecuación de restricción de lazo vectorial cerrado del tercer subcircuito, se determinan las coordenadas generalizadas de salida desconocidas  $\phi_8$  y  $\phi_7$ , siendo  $\phi_{32}$ ,  $\phi_4$  y  $\phi_{62}$  las coordenadas de entrada conocidas, deducidas de los circuitos I y II. La expresión que relaciona las coordenadas generalizadas de entrada y los parámetros geométricos de este ciclo con las coordenadas generalizadas de salida  $\phi_7$  y  $\phi_8$  se indican en las ecuaciones (38) y (39).

A diferencia de los anteriores subcircuitos cinemáticos, el tercero tiene la particularidad de que la referencia para hacer el análisis es el punto fijo P, y no el punto fijo A como en los dos subcircuitos I y II anteriores. Las expresiones de las coordenadas generalizadas de salida

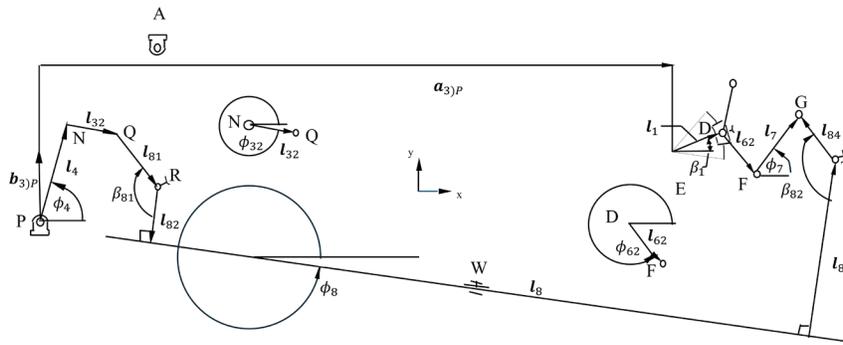


Figura 6. Esquema cinemático del tercer subcircuito formado por los eslabones 1, 3, 4, 6, 7 y 8

en este tercer subcircuito, no se ven afectadas por el cambio del punto de referencia elegido. El tercer circuito cinemático tiene movilidad igual a 3.

$$\phi_7 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-c_2 - \sqrt{c_2^2 - 4c_3c_1}}{2c_3} \right) \quad (38)$$

$$\phi_8 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-k_x + \sqrt{k_x^2 - 4k_wk_z}}{2k_w} \right) \quad (39)$$

Donde:

$$\phi_{62} = \phi_{61} + (2\pi - \beta_6) \quad (40)$$

$$\phi_{32} = \phi_{31} + (\pi - \beta_3) \quad (41)$$

$$k_w = [k_{27} - k_{26}] \quad (42)$$

$$k_x = [2k_{25}] \quad (43)$$

$$k_z = [k_{26} - k_{27}] \quad (44)$$

$$k_{25} = 2[k_{23}k_{21} + k_{24}k_{22}] \quad (45)$$

$$k_{26} = 2[k_{21}k_{24} - k_{23}k_{22}] \quad (46)$$

$$k_{27} = [(k_{24})^2 + (k_{23})^2 + (k_{21})^2 + (k_{22})^2 + (l_7)^2] \quad (47)$$

$$k_{21} = [l_4 \cos(\phi_4) + l_{32} \cos(\phi_{32}) - l_{62} \cos(\phi_{62}) - l_1 \cos(\beta_1) - a_{3P}] \quad (48)$$

$$k_{22} = [l_4 \sin(\phi_4) + l_{32} \sin(\phi_{32}) - l_{62} \sin(\phi_{62}) - l_1 \sin(\beta_1) - b_{3P}] \quad (49)$$

$$k_{23} = [l_{82} - l_{83} - l_{81} \cos(\beta_{81}) + l_{84} \cos(\beta_{82})] \quad (50)$$

$$k_{24} = [l_8 + l_{81} \sin(\beta_{81}) - l_{84} \sin(\beta_{82})] \quad (51)$$

$$a_{3P} = 5210 \text{ mm} \quad (52)$$

$$b_{3P} = -650 \text{ mm} \quad (53)$$

$$c_1 = -k_{24}^2 + k_{23}^2 + k_{22}^2 + k_{21}^2 + l_7^2 - 2l_7k_{23} \sin(\phi_8) - 2k_{21}l_7 + 2k_{23}k_{21} \sin(\phi_8) - 2k_{23}k_{22} \quad (54)$$

$$c_2 = 2[2l_7k_{23} \cos(\phi_8) - 2l_7k_{22}] \quad (55)$$

$$c_3 = -k_{24}^2 + k_{23}^2 + k_{22}^2 + k_{21}^2 + l_7^2 + 2l_7k_{23} \sin(\phi_8) + 2k_{21}l_7 + 2k_{23}k_{21} \sin(\phi_8) + 2k_{23}k_{22} \quad (56)$$

En la Figura 7 se muestra la ubicación del punto O y los vectores que se deben sumar desde A para llegar a O. En el esquema cinemático se indican explícitamente los parámetros geométricos calibrables del mecanismo, ade-

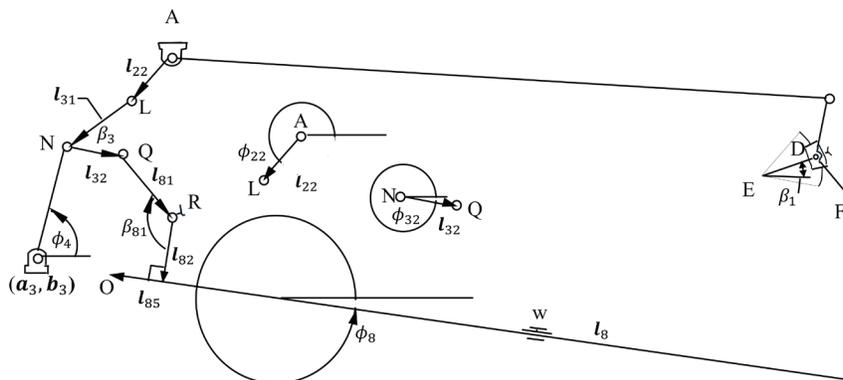


Figura 7. Esquema cinemático del mecanismo con la ubicación del punto O y los vectores que hay que sumar para llegar a O desde A

más de las coordenadas generalizadas de interés:  $\phi_{22}$ ,  $\phi_{31}$ ,  $\phi_{32}$  y  $\phi_8$ .

La ecuación vectorial que describe la trayectoria del punto  $O$  desde  $A$  se muestra en (57).

$$l_{0/A} = l_{22} + l_{31} + l_{32} + l_{81} + l_{82} + l_{85} \quad (57)$$

Separado en sus componentes horizontales y verticales la ecuación (57) se convierte en (58).

$$l_{0/A \text{ en } x} = l_{22} \cos(\phi_{22}) + l_{31} \cos(\phi_{31}) + l_{32} \cos(\phi_{32}) + l_{81} \cos(\phi_{81}) + l_{82} \cos(\phi_{82}) + l_{85} \cos(\phi_{85})$$

$$l_{0/A \text{ en } y} = l_{22} \sin(\phi_{22}) + l_{31} \sin(\phi_{31}) + l_{32} \sin(\phi_{32}) + l_{81} \sin(\phi_{81}) + l_{82} \sin(\phi_{82}) + l_{85} \sin(\phi_{85}) \quad (58)$$

A partir de la ecuación (58) es posible obtener la posición paramétrica del punto  $O$  en el plano.

La trayectoria nominal del punto  $O$ , con los valores de los parámetros geométricos provistos en la Tabla 1, ubicada en la sección de anexos y con los valores de los parámetros geométricos calibrables en sus valores nominales  $l_5 = 4600$  mm,  $l_8 = 5450$  mm,  $\beta_1 = 0^\circ$ ,  $\beta_{81} = 90^\circ$  y  $\beta_{82} = 90^\circ$ , se muestra en la Figura 8. Esta trayectoria corresponde a la trayectoria nominal del punto  $O$ .

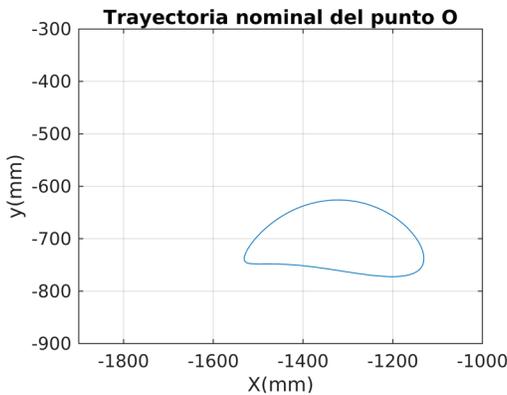


Figura 8. Gráfica de la trayectoria nominal del punto  $O$  del rastrillo desarenador

Como se observa en la Figura 8, el punto  $O$  del rastrillo realiza una órbita de trayectoria cíclica y cerrada. La parte de abajo de la trayectoria corresponde al movimiento responsable de barrer los sedimentos. Durante esta etapa, los dientes del rastrillo pasan cerca del fondo de la cuba, en un movimiento prácticamente rectilíneo, para empujar los sedimentos de la solución a separar desde el fondo de la cuba hacia el área de descarga, en contra de la acción de la gravedad. Por otro lado, la parte de arriba de la trayectoria representa el movimiento de recuperación del rastrillo. Es decir, la etapa en la cual los dientes del rastrillo se alejan de la

cuba para volver a posicionarse en la posición inicial y poder repetir el ciclo de trabajo.

Para analizar la sensibilidad de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  respecto a la trayectoria nominal, como en el caso de análisis de otros sistemas que analizan el comportamiento de salida respecto a sus entradas (Higuera, 2006; Rangel & Bogoya, 1992), se necesita recurrir a una metodología de análisis, en este caso de diferenciación total. Por ello, se realiza la diferenciación total de la ecuación paramétrica (58).

Se realiza la diferencial total de la ecuación (58) para obtener la ecuación (59).

$$\begin{aligned} \delta l_{0/A \text{ en } x} &= \delta l_{22} \cos(\phi_{22}) + \delta l_{31} \cos(\phi_{31}) + \delta l_{32} \cos(\phi_{32}) \\ &+ \delta l_{81} \cos(\phi_{81}) + \delta l_{82} \cos(\phi_{82}) + \delta l_{85} \cos(\phi_{85}) + l_{22} \sin(\phi_{22}) \\ &\delta \phi_{22} + l_{31} \sin(\phi_{31}) \delta \phi_{31} + l_{32} \sin(\phi_{32}) \delta \phi_{32} + l_{81} \sin(\phi_{81}) \\ &\delta \phi_{81} + l_{82} \sin(\phi_{82}) \delta \phi_{82} + l_{85} \sin(\phi_{85}) \delta \phi_{85} \\ \delta l_{0/A \text{ en } y} &= \delta l_{22} \sin(\phi_{22}) + \delta l_{31} \sin(\phi_{31}) + \delta l_{32} \sin(\phi_{32}) \\ &+ \delta l_{81} \sin(\phi_{81}) + \delta l_{82} \sin(\phi_{82}) + \delta l_{85} \sin(\phi_{85}) - l_{22} \cos(\phi_{22}) \\ &\delta \phi_{22} - l_{31} \cos(\phi_{31}) \delta \phi_{31} - l_{32} \cos(\phi_{32}) \delta \phi_{32} - l_{81} \cos(\phi_{81}) \\ &\delta \phi_{81} - l_{82} \cos(\phi_{82}) \delta \phi_{82} - l_{85} \cos(\phi_{85}) \delta \phi_{85} \end{aligned} \quad (59)$$

Donde las expresiones (60), (61) y (62) para las coordenadas generalizadas se extraen de trabajos previos (Heredia *et al.*, 2021).

$$\phi_{81} = \phi_8 + \left( \frac{\pi}{2} - \beta_{81} \right) \quad (60)$$

$$\phi_{82} = \phi_8 - \frac{\pi}{2} \quad (61)$$

$$\phi_{85} = \phi_8 - \pi \quad (62)$$

Una vez obtenida la ecuación (59), es posible graficarla para poder conocer la influencia de las variaciones de los parámetros geométricos calibrables  $l_8$ ,  $l_5$ ,  $\beta_{81}$ ,  $\beta_{82}$  y  $\beta_1$  en la variación de la trayectoria del punto  $O$ . Se presupone un valor nulo para los diferenciales de los ángulos de entrada  $\delta \phi_{21} = 0$ ,  $\delta \phi_{22} = 0$ , ya que el elemento de entrada da vueltas completas y pasa por todas las posiciones prescritas.

### DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores nominales de los parámetros geométricos del mecanismo se encuentran expresados en la Tabla 1 (Anexo), así como los valores máximos y mínimos que pueden tomar las longitudes y ángulos de los parámetros geométricos calibrables. Las gráficas de la Figura 9 muestran las variaciones  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria del punto  $O$  respecto a las coordenadas  $(x, y)$  que describen el punto  $O$  cuando los parámetros geométricos están en

sus valores nominales y sólo está variando el parámetro geométrico  $l_5$ .

En la Figura 9 se dan a conocer los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$ , obtenidos de la diferencial total de la trayectoria del punto  $O$  cuando se incrementa el parámetro geométrico  $l_5$ , desde su valor nominal de 4600 mm de longitud, hasta su valor extremo de 4720 mm. En la misma Figura 9 se muestra los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  obtenidos de la diferencial total de la trayectoria del punto  $O$  cuando hay un decremento en  $l_5$ , desde su valor nominal de 4600 mm de longitud, hasta 4480 mm de longitud final. El incremento o el decremento es de  $\pm 30$  mm en cada curva generada. Estas curvas se grafican juntas en la Figura 9 y se marca con un código de colores los valores de los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  según la magnitud del cambio del parámetro geométrico  $l_5$ . Para esta y las gráficas siguientes, el símbolo “+” que se muestra en el origen del sistema de referencia de la Figura 9, representa un punto adimensional sobre el plano cartesiano y no indica una trayectoria del punto  $O$  como en las demás curvas.

Los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  definen una curva cerrada debido a que la ecuación diferencial total de la trayectoria está en función del ángulo de entrada  $\phi_{21}$  que varía entre 0 y 360°. Los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  más altos posibles se muestran en la curva de color naranja. Estos tienen un valor máximo de 18 mm en el eje  $y$ , cuando el cambio de  $\delta l_5$  es +120 mm. De este modo, se puede saber ahora que el incremento de  $\delta l_5 = +120$  mm permite aumentar la altura de la trayectoria del punto  $O$ , en +18 mm respecto a la altura que tenía cuando el parámetro geométrico calibrable  $l_5$  estaba en su valor nominal. Ese mismo cambio le permite al punto  $O$  desplazarse horizontalmente hasta -15 mm respecto a las posiciones  $x$  del punto  $O$  cuando  $l_5$  está en su valor nominal. El resto de las gráficas que se muestran en la Figura 9 señalan la magnitud de los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  para cambios (en milímetros) de  $\delta l_5 = -120, -90, -60, -30, 0, 30, 60, 90, 120$ . A medida que  $\delta l_5$  es menor, las variaciones  $\delta x$ ,  $\delta y$  también son menores, por lo que el área encerrada por las curvas es menor.

A partir de la Figura 9 se puede saber que cuando se disminuye la longitud de  $l_5$  se reduce en 15 mm la distancia relativa entre el rastrillo y la cuba. Por otro lado, cuando aumenta la longitud  $l_5$ , se incrementa la distancia relativa entre la cuba y el rastrillo en 18 mm.

La sensibilidad  $\delta x$ ,  $\delta y$  de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios de los demás parámetros geométricos calibrables  $\delta l_8, \delta \beta_{1r}, \delta \beta_{82}, \delta \beta_{81}$  se muestra en las gráficas de las Figuras 10, 11, 12 y 13.

En la Figura 10 se da a conocer la sensibilidad  $\delta x$ ,  $\delta y$  de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios del parámetro geométrico calibrable  $l_8$  cuando este varía desde su valor nominal de 5450 mm, hasta su valor extremo de 5500 mm. En la Figura 10, también se

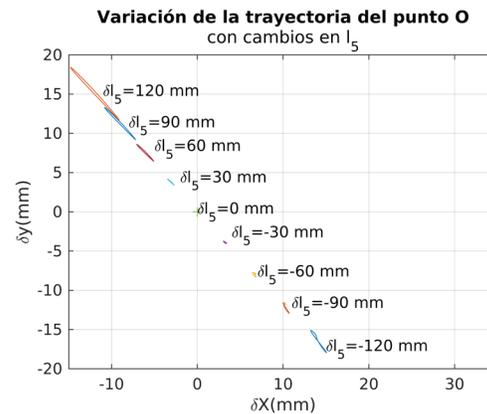


Figura 9. Valores de los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando los cambios  $\delta l_5$  toman valores en milímetros de: -120, -90, -60, -30, 0, 30, 60, 90, 120

muestra la sensibilidad  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios milimétricos  $\delta l_8 = -50, -25, 25, 50$ , respecto a su valor nominal de 5450 mm de longitud. El incremento o el decremento es de  $\pm 25$  mm en cada curva generada. Las longitudes y ángulos de los demás parámetros geométricos calibrables  $\delta l_8, \delta \beta_{1r}, \delta \beta_{82}$  y  $\delta \beta_{81}$  son constantes y tienen el valor numérico correspondiente a su valor nominal. A diferencia de las demás gráficas, en la Figura 10, se presenta un mosaico de cuatro gráficas individuales, debido a que el cambio es tan pequeño que las curvas se superponen y es difícil poder distinguir los cambios de trayectoria en una sola imagen. En la Figura 10, se puede apreciar que el cambio máximo  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria del punto  $O$ , al aumentar la longitud de  $l_8$ , desde su valor nominal hasta 5500 mm, es de -4 mm en  $y$  y 3.5 mm en  $x$ . Por otro lado, al disminuir la longitud del parámetro geométrico calibrable  $l_8$  desde su valor nominal hasta 5500 mm, el cambio  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria es de 7.5 mm en  $y$  y -5.5 mm en  $x$ . A partir de la Figura 10 se puede saber que cuando se disminuye la longitud de  $l_8$  aumenta la distancia relativa entre el rastrillo y la cuba en 7.5 mm. Por otro lado, cuando se aumenta la longitud  $l_8$ , se reduce la distancia relativa entre la cuba y el rastrillo en 4 mm respecto a la trayectoria nominal.

Al comparar los resultados de la Figura 9 con los de la Figura 10, se puede observar que los cambios  $\delta x$ ,  $\delta y$  de la trayectoria respecto a la nominal, son más sensibles ante los cambios en  $l_5$  que ante los cambios en  $l_8$ .

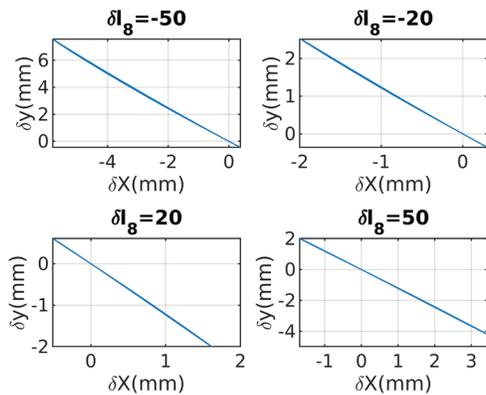


Figura 10. Valores de los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando los cambios  $\delta l_8$  toman valores en milímetros de:  $-50, -25, 25, 50$

En la Figura 11 se da a conocer la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{1v}$  cuando este varía desde su valor nominal de  $0^\circ$ , hasta su valor extremo de  $30^\circ$ . En la Figura 11, también se muestra la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios en grados  $\delta\beta_1 = -30, -10, -20, 0, 10, 20, 30$ , respecto a su valor nominal de  $0^\circ$ , siendo el incremento o el decremento de  $\pm 10^\circ$  en cada curva generada. Las longitudes y ángulos de los demás parámetros geométricos calibrables  $\delta l_{5r}$ ,  $\delta l_{8r}$ ,  $\delta\beta_{82}$  y  $\delta\beta_{81}$  son constantes y tienen el valor numérico correspondiente a su valor nominal. En la gráfica de la Figura 11 se puede apreciar que el cambio máximo  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$ , al aumentar el ángulo de  $\beta_{1v}$  desde su valor nominal  $0^\circ$  hasta  $30^\circ$ , es de  $-15$  mm en  $y$  y  $12$  mm en  $x$ . Por otro lado, al disminuir el ángulo del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{1v}$  desde su valor nominal hasta  $-30^\circ$ , el cambio  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria es de  $13$  mm en  $y$  y  $-11$  mm en  $x$ . A partir de la Figura 11 se puede saber que cuando se disminuye el ángulo  $\beta_{1v}$  aumenta la distancia relativa entre el rastrillo y la cuba en  $13$  mm. Por otro lado, cuando se aumenta el ángulo  $\beta_{1v}$  se reduce la distancia relativa entre la cuba y el rastrillo en  $15$  mm.

Al comparar los resultados de las Figuras 9 y 10 con los de la Figura 11, se puede observar que los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria respecto a la nominal, siguen siendo más sensibles ante los cambios en  $l_5$  que ante los cambios en  $l_8$  y  $\beta_1$ .

En la Figura 12 se da a conocer la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{81v}$  cuando este varía desde su valor nominal de  $90^\circ$ , hasta su valor extremo de  $120^\circ$ . En la Figura 12 también se muestra la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios en grados  $\delta\beta_{81} = -30, -10, -20, 0, 10, 20, 30$

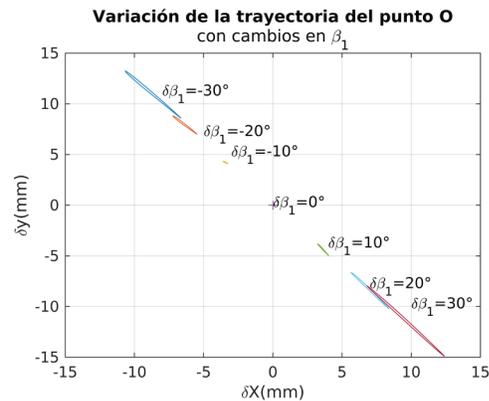


Figura 11. Valores de los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando los cambios  $\delta\beta_{81}$  toman valores en grados de:  $-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30$

$30$  respecto a su valor nominal de  $90^\circ$ , siendo el incremento o el decremento de  $\pm 10^\circ$  en cada curva generada. Las longitudes y ángulos de los demás parámetros geométricos calibrables  $\delta l_{5r}$ ,  $\delta l_{8r}$ ,  $\delta\beta_{82}$  y  $\delta\beta_{81}$  son constantes y tienen su valor nominal. En la gráfica de la Figura 12 se puede apreciar que el cambio máximo  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$ , al aumentar el ángulo de  $\beta_{81v}$  desde su valor nominal  $90^\circ$  hasta  $120^\circ$ , es de  $-50$  mm en  $y$ , mientras que en  $x$  es de  $-37$  mm. Por otro lado, al disminuir el ángulo del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{81v}$  desde su valor nominal hasta  $60^\circ$ , el cambio  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria es de  $70$  mm en  $y$ ,  $-28$  mm en  $x$ . A partir de la Figura 12 se puede saber que cuando se disminuye el ángulo  $\beta_{81v}$  aumenta la distancia relativa entre el rastrillo y la cuba en  $70$  mm. Por otro lado, cuando se aumenta el ángulo  $\beta_{81v}$  se reduce la distancia relativa entre la cuba y el rastrillo en  $50$  mm respecto a la trayectoria nominal del punto  $O$ .

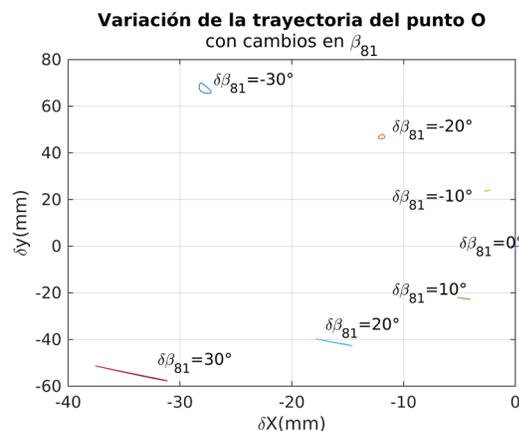


Figura 12. Valores de los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando los cambios  $\delta\beta_{81}$  toman valores en grados de:  $-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30$

Al comparar los resultados de las Figuras 9, 10, 11 con los de la Figura 12, se puede observar que los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria respecto a la nominal, son más sensibles ante los cambios en  $\beta_{81}$  que ante los cambios en  $l_7$ ,  $l_8$  y  $\beta_1$ .

En la Figura 13 se da a conocer la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de los cambios de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{82}$ , cuando este varía desde su valor nominal de  $90^\circ$ , hasta su valor extremo de  $120^\circ$ . En la Figura 13 también se muestra la sensibilidad  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios en grados  $\delta\beta_{82} = -30, -10, -20, 0, 10, 20, 30$  respecto a su valor nominal de  $90^\circ$ , siendo el incremento o el decremento de  $\pm 10^\circ$  en cada curva generada. Las longitudes y ángulos de los demás parámetros geométricos calibrables  $\delta l_7$ ,  $\delta l_8$ ,  $\delta\beta_{81}$  y  $\delta\beta_1$  son constantes y tienen el valor numérico correspondiente a su valor nominal. En la gráfica de la Figura 13 se puede apreciar que el cambio máximo  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$ , al aumentar el ángulo de  $\beta_{82}$  desde su valor nominal  $90^\circ$  hasta  $120^\circ$ , es de 11 mm en  $y$ , mientras que en  $x$  es  $-11$  mm. Por otro lado, al disminuir el ángulo del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{82}$  desde su valor nominal hasta  $60^\circ$ , el cambio  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria es de 14 mm en  $x$ ,  $-16$  mm en  $y$ . A partir de la Figura 13 se puede saber que cuando se incrementa el ángulo  $\beta_{82}$  aumenta la distancia relativa entre el rastrillo y la cuba en 11 mm. Por otro lado, cuando disminuye el ángulo  $\beta_{82}$ , se reduce la distancia relativa entre la cuba y el rastrillo en 16 mm respecto a la trayectoria nominal del punto  $O$ .

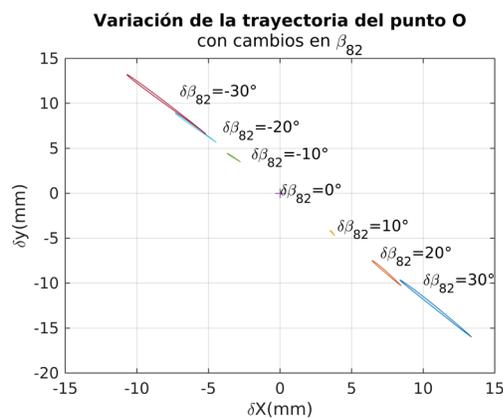


Figura 13. Valores de los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando los cambios  $\delta\beta_{82}$  toman valores en grados de:  $-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30$

Al comparar los resultados de las Figuras 9, 10, 11 y 12 con los de la Figura 13, se puede observar que los cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria respecto a la nominal, siguen siendo más sensibles ante los cambios en  $\beta_{81}$  que ante los cambios en  $l_7$ ,  $l_8$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_{82}$ .

Con la información obtenida de la sensibilidad de la trayectoria del punto  $O$  ante los cambios individuales de los parámetros geométricos de ajuste, es posible realizar una combinación de cambios para obtener el máximo y el mínimo cambio de la trayectoria del punto  $O$ .

En la Figura 14 se muestra el máximo cambio posible con todos los parámetros geométricos ajustados en sus valores extremos. Se puede notar que el máximo cambio positivo de la trayectoria en el eje  $y$  es de 110 mm y el máximo cambio negativo es de  $-105$  mm. Por otra parte, en el eje  $x$ , el máximo cambio negativo es  $-55$  mm y el máximo cambio positivo es de 15 mm. Es decir, a partir de sus valores nominales, el rastrillo tiene la capacidad física de moverse 100 mm hacia arriba o hacia abajo de su posición original y de 55 mm a la izquierda o 15 mm a la derecha.

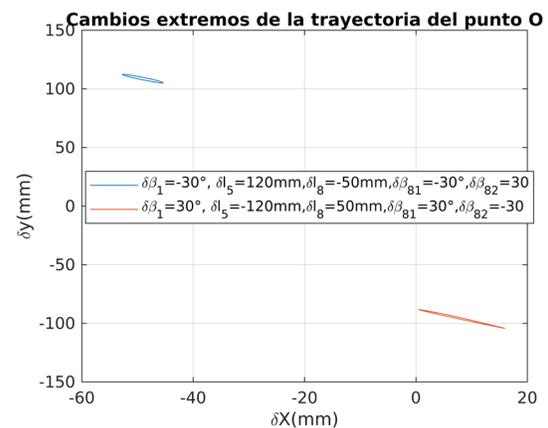


Figura 14. Cambios  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  de la trayectoria del punto  $O$  cuando todos los parámetros geométricos calibrables toman simultáneamente valores extremos

100 mm hacia arriba y hacia abajo de la posición nominal del rastrillo representan un cambio absoluto de 200 mm, en la vertical. Sin embargo, el rastrillo no puede moverse en todo ese rango debido a que, si se quisiera llevar a los parámetros geométricos calibrables a sus longitudes y ángulos máximos, el rastrillo chocaría con la cuba.

Si se comparan los cambios individuales de cada uno de los parámetros geométricos calibrables, se puede saber cuál tiene mayor y menor sensibilidad a los cambios en la trayectoria. El parámetro geométrico calibrable  $\beta_{81}$  genera el mayor de los cambios producidos. Por otro lado, el parámetro geométrico  $l_8$  genera el menor cambio en la trayectoria. En el caso de  $\beta_{82}$  y  $\beta_1$ , estos tienen una influencia parecida entre sí. Sin embargo,  $\beta_1$  produce un aumento máximo mayor del cambio de altura que  $\beta_{82}$ , aunque  $\beta_{82}$  produce un aumento mayor negativo del cambio en la altura, que la producida por  $\beta_1$ .

Por otro lado, el máximo cambio producido por  $l_5$  en la altura y traslación horizontal del punto  $0$ , es mayor que el máximo cambio producido por  $\beta_{82}$  y  $\beta_{17}$  respectivamente.

Así, se puede llegar a la afirmación de que los cambios del parámetro geométrico calibrable  $\beta_{81}$  producen un cambio grueso de la trayectoria ( $\delta_y > 50$  mm). Al variar cualquiera de los parámetros geométricos  $l_5$ ,  $\beta_{17}$  y  $\beta_{82}$ , estos provocan un cambio de valor intermedio de la trayectoria del punto  $0$  ( $10 \text{ mm} \leq \delta_y \leq 50 \text{ mm}$ ), y la variación de  $l_8$  trae consigo un ajuste fino al cambio de la trayectoria del punto  $0$  ( $\delta_y < 10$  mm).

### CONCLUSIONES

Tomar la diferencial total de la ecuación vectorial de la trayectoria del punto extremo  $0$  del rastrillo desarenador, permite determinar la sensibilidad de los cambios de su trayectoria ante la variación de los parámetros geométricos calibrables del mecanismo.

El análisis de sensibilidad hace posible comparar jerárquicamente los cambios de la trayectoria del punto  $0$  ante los cambios dimensionales de los diferentes parámetros geométricos calibrables, aún cuando los cambios de la trayectoria resultante sean muy parecidos entre sí.

Los ajustes en los parámetros geométricos calibrables producen cambios verticales de la trayectoria del punto  $0$ , gruesos ( $\delta_y > 50$  mm), intermedios ( $10 \text{ mm} \leq \delta_y \leq 50$  mm) y finos ( $\delta_y < 10$  mm).

El parámetro geométrico calibrable  $\beta_{81}$  genera los mayores cambios respecto a la trayectoria nominal del punto  $0$ . Por otro lado, el parámetro geométrico  $l_8$  genera los menores cambios en la trayectoria.

Con este trabajo se facilita a los operarios de mantenimiento las labores de ajuste del mecanismo. Así mismo, el trabajo permite establecer los requerimientos de diseño en el caso de que se desee automatizar el proceso de calibración de este mecanismo, el cual actualmente se realiza de forma manual.

Finalmente, un manual de mantenimiento para el ajuste racional del rastrillo desarenador en el que, con cartas de calibración, se muestre cómo la variación de cada uno de los cinco parámetros geométricos ajustables del mecanismo modifica la trayectoria del punto de referencia en el eslabón de salida del rastrillo desarenador. Dos cartas de calibración se observan en la Referencia (Heredia *et al.*, 2021).

### AGRADECIMIENTOS

Se hace un público reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado al desarrollo de la investigación.

### NOMENCLATURA

- A, B, C, D, E, H, ..., O', Q': Pares Cinemáticos.
  - $a_i$ : Coordenada  $x$  de un par cinemático rotatorio en el bastidor medida respecto al sistema de referencia  $Axyz$ .
  - $b_i$ : Coordenada  $y$  de un par cinemático rotatorio en el bastidor medida respecto al sistema de referencia  $Axyz$ .
  - $l_i$ : Longitud del eslabón  $i$ -ésimo.
  - $l_{ij}$ : Longitud  $j$ -ésima del eslabón  $i$ -ésimo, en el caso de tener más de un parámetro geométrico asociado al mismo eslabón  $i$ -ésimo.
  - $p_i$ : Parámetro geométrico  $i$ -ésimo.
  - $q_i$ :  $i$ -ésima coordenada generalizada.
  - $\beta_i$ : Ángulo constante o calibrable  $i$ -ésimo.
  - $\beta_{ij}$ : Ángulo  $j$ -ésimo constante o calibrable del eslabón  $i$ -ésimo.
  - $\phi_i$ : Orientación angular o coordenada generalizada del eslabón  $i$ -ésimo.
  - $l_{0A \text{ en } x}$ : Coordenada  $x$  del punto  $0$  respecto a A.
  - $l_{0A \text{ en } y}$ : Coordenada  $y$  del punto  $0$  respecto a A.
- Las entidades vectoriales se representan en negrita  $l_{17}$ ,  $l_{27}$ , ...

### ANEXO

Tabla 1. Parámetros geométricos del mecanismo de rastrillo clasificador con los elementos de calibración marcados en rojo, indicando su valor nominal y el intervalo de ajuste

Símbolo	Dimensión, coordenadas de posición o ángulo	Unidades
$a_3$	4300	mm
$b_3$	-890	mm
$l_1$	182.5	mm
$\beta_1$	0 (-30 a 30)	grados
$l_5$	4600 (4480 a 4720)	mm
$l_{61}$	397	mm
$l_{21}$	31	mm
$l_4$	300	mm
$l_{31}$	910	mm
$l_{32}$	332	mm

$l_{81}$	120	mm
$l_{82}$	700	mm
$\beta_2$	90	grados
$\beta_3$	25	grados
$\beta_6$	90	grados
$l_8$	5450 (5400 a 5500)	mm
$l_{83}$	1050	mm
$l_{84}$	185	mm
$\beta_{81}$	90 (60 a 120)	grados
$\beta_{82}$	90 (60 a 120)	grados
$l_7$	400	mm
$l_{62}$	397	mm
$l_{22}$	191	mm
$a_2$	-910	mm
$b_2$	-240	mm

## REFERENCIAS

- Bustillo, M. (2018). Classification. En Bustillo-Revuelta M. *Mineral Resurces from exploration to sustentability assessment*, 463-464. Madrid: Springer International Publishing.
- Fogarasy, A. A., & Smith, M. R. (1995). The case of a general method of kinematic analysis of plane mechanisms based on equations of constraint. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 209(5), 337-343. [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1995\\_209\\_162\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1995_209_162_02)
- Fogarasy, A. A., & Smith, M. R. (1998). The influence of manufacturing tolerances on the kinematic performance of mechanism. *SAGE Journals*, 212(1), 35-47. <https://doi.org/10.1243/0954406981521024>
- Heredia-Castillo, J., Mendoza-Quiñonez, J. A., Félix-Beltrán, O. G., Flores-Méndez, J., & Aparicio-Razo, M. (2021). Influencia de la calibración de los cinco parámetros geométricos ajustables de un rastrillo clasificador en sus trayectorias de barrido. Memorias del XXVII Congreso Internacional anual de la SO-MIM, 17-26. Pachuca: Memorias de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.
- Higuera-Sandoval, C. H. (2006). *Análisis de sensibilidad de las variables de diseño de un pavimento flexible*. Facultad de Ingeniería, UPTC, 77-86.
- IFTToMM Commission 'A' For Standards and Terminology. (1991). Terminology for the theory of machines and mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 26.
- Marshall, J. S. (2018). Modeling and sensitivity analysis of particle impact with a wall with integrated damping mechanisms. *Powder Technology*, 339, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.097> Get rights and content
- Mendoza-Quiñonez, J. A., Carballo, S. A., Solís, D. D., & Gomez, O. J. (2012). Influencia de las dilataciones térmicas en la descalibración del movimiento paralelo de las tres cuchillas de puesta a tierra de un seccionador eléctrico. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 16(63), 125-141. Recuperado de [http://ve.scie-lo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212012000200006&lng=es&tlng=es](http://ve.scie-lo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212012000200006&lng=es&tlng=es)
- Mendoza- Quiñonez, J. A., Sirene-García, B. C., Jimenez, J. M., Aparicio, M., & Pinto, L. (2019). Ecuaciones geométricas para el control del ajuste de un mecanismo de puesta a tierra. Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, México. Octubre de 2019, 642-647. México: AMCA.
- Mendoza, A. J., & Otero, L. L. (2006). Calibration of the tight seal of the discharge mechanism doors on a rail wagon using adjustable members. *ASME Digital collection*, 3, 69-76. <https://doi.org/10.1115/ESDA2006-95102>
- Rangel-Hara, H. A., & Bogoya-Maldonado, D. (1992). Análisis de la sensibilidad paramétrica en reactores de lecho fijo. *Ingeniería e Investigación, UNAL*, 27, 70-80. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n27.20777>
- Hongbiao X., Yan, L., Jiancheng, B., Tilei, Z., & Shoujun, W. (2019). Analysis and design of self-propelled trolley based on spatial RSSR mechanism. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1936-1941. Tianjin: IEEE. Recuperado de [10.1109/ICMA.2019.8816362](https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816362)
- Zhang et al. (2008). Analysis on influence of manufacturing error for output accuracy of hybrid five-bar mechanism. 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 1971-1975. Hanoi: IEEE.
- Zhou, C., Zhao, H., Chang, Q., Ji, M., & Li, C. (2021). Reliability and global sensitivity analysis for an airplane slat mechanism considering wear degradation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.048>

## Cómo citar:

Heredia-Castillo, J., Mendoza-Quiñonez, J. A., Felix-Beltran, O. G., Calixto-Sirene, B., & Aparicio-Razo, M. (2024). Sensibilidad de la órbita de un punto a la variación de los parámetros geométricos de un mecanismo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25 (03), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.024>