

ANÁLISIS DE LAS SINGULARIDADES DE TERCER ORDEN DE UN MECANISMO PLANO

Almaguer Rivera, Oscar Eduardo (1), Rico Martínez, José María (2),

1 [Lic. en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato] | [oe.almaguerrivera@ugto.mx]

2 [Dpto. de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato]
| [jrico@ugto.mx]

Resumen

En esta contribución se presenta el desarrollo de las ecuaciones necesarias para analizar la singularidad de orden superior presente en un mecanismo plano formado a partir de dos mecanismos de Watt. El análisis de la singularidad se realiza a partir de los análisis cinemáticos de primer orden, velocidad; segundo orden, aceleración; y, finalmente, de tercer orden, jerk, en cadenas cinemáticas. Los análisis cinemáticos del mecanismo se llevan a cabo mediante el uso de una herramienta didáctica que utiliza un programa de álgebra simbólica. De esta manera, la solución de dichos análisis permite determinar la presencia de una cúspide en el espacio de trabajo del mecanismo. Finalmente, los resultados de los diferentes análisis demuestran que la verdadera movilidad del mecanismo no corresponde a la movilidad determinada por los análisis de velocidad y de aceleración.

Abstract

In this contribution it is presented the development of the necessary equations for the analysis of the singularities of higher order found in a planar mechanism formed by a pair of Watt mechanisms. The singularity analysis is carried out using the kinematic analyses of first order, velocity, second order, acceleration, and finally third order, jerk, for closed kinematic chains. The kinematic analyses are carried out using a didactic tool generated using a symbolic algebra program. The solution of these analyses allows to determine the presence of a cusp in the workspace of the mechanisms. Finally, the results of the different analyses show that the true mobility of the mechanism does not corresponds to the mobility determined by the velocity and acceleration analyses.

Palabras Clave

1. Orden superior; 2. Análisis cinemáticos; 3. Álgebra Simbólica; 4. Cúspide; 5. Cadenas cinemáticas.

INTRODUCCIÓN

El mecanismo propuesto para este estudio fue propuesto por Conelly y Servatius [1], como se puede ver en la figura 1, es un mecanismo de la unión simétrica de dos mecanismos de Watt unidos por una barra media horizontal indicada como la más larga de todos los eslabones presentes (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Los mecanismos de Watt están comprendidos por los eslabones 1, 2, 3 y 4, el primero; y el segundo está comprendido por los eslabones 1, 5, 6 y 7, unidos por la revoluta en común A.

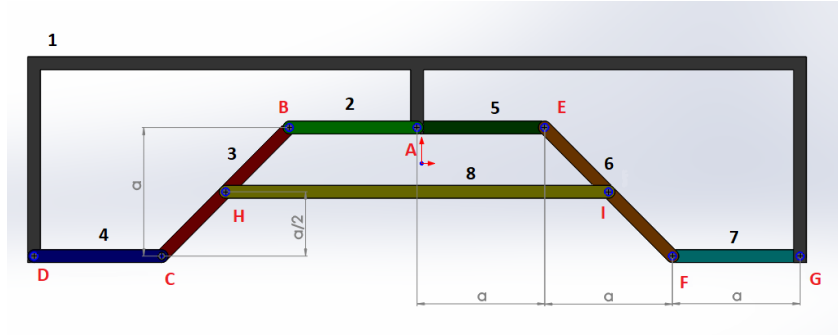


Figura 1. Mecanismo con presencia del fenómeno de cúspide en su espacio de trabajo.

El mecanismo de Watt se muestra en la figura 2, que puede considerarse formado por los eslabones 1, 4, 3 y 2, del mecanismo de la figura 1. Otro mecanismo de Watt, simétrico al indicado, está formado por los eslabones 1, 7, 6 y 5. Esta figura muestra también la trayectoria del punto q incluyendo la cúspide de su trayectoria. Evidentemente, el mecanismo de Watt simétrico también presenta otra cúspide

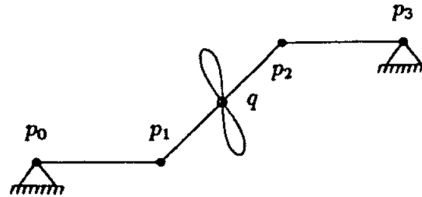


Figura 2. Mecanismo de Watt

Si se consideran ambas cúspides y el eslabón conector 8, se tiene que la posición mostrada en la parte a de la figura 3, vea [1], el eslabón 8 es horizontal, si el eslabón gira en sentido horario, su longitud aumenta, si gira en sentido antihorario su longitud disminuye, de manera que en la posición mostrada en la figura 1, la velocidad angular debe ser nula. Este aparentemente, mínimo detalle, ocasiona la singularidad de tercer orden en el análisis cinemático del mecanismo mostrado en la Figura 1.

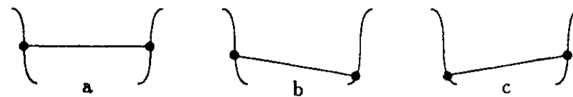


Figura 3. Posibles configuraciones cercanas a la cúspide

Análisis Cinemáticos

Tradicionalmente, los análisis cinemáticos de mecanismos se restringen al análisis de posición, de velocidad o primer orden y aceleración o segundo orden. Únicamente, en los mecanismos de leva, el análisis de tercer

orden o jerk es importante, pues se conoce que los programas de desplazamiento de levas que producen valores elevados de jerk reducen drásticamente la vida útil de la superficie de la leva. Otra aplicación que requiere de un análisis de jerk es el diseño de las trayectorias de las montañas rusas, donde se sabe que mientras más elevados son los valores de jerk más espeluznante es el recorrido para los usuarios.

MÉTODOLOGÍA

Para la solución del análisis cinemático del mecanismo, se proponen los tres lazos cerrados, también denominados circuitos, con el sentido indicados en la Figura 4.

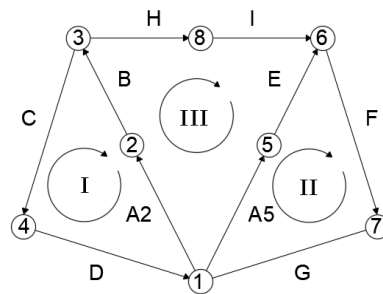


Figura 4 Gráfica de la cadena cinemática, mostrando los tres lazos cerrados a considerar.

Considerando los sentidos de los circuitos mostrados en la Figura 4, es posible formular las ecuaciones de velocidad, aceleración y jerk puntual y velocidad, aceleración y jerk angular de cada uno de los circuitos. El mecanismo está definido por cuerpos unidos únicamente mediante pares de revoluta, vea la Figura 5

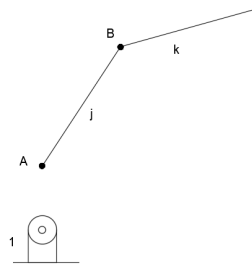


Figura 5 Eslabones j y k unidos mediante un par de revoluta localizado en el punto B.

Las ecuaciones que relacionan las velocidades del punto A, en el eslabón j, y del punto B, en el eslabón k, y las velocidades angulares de los eslabones están dadas por:

$${}^1\vec{v}_B^k = {}^1\vec{v}_B^j = {}^1\vec{v}_A^j + {}^1\vec{\omega}^j \times \vec{r}_{B/A}. \quad (1)$$

$${}^1\vec{\omega}^k = {}^1\vec{\omega}^j + {}^j\vec{\omega}^k \quad (2)$$

Las ecuaciones correspondientes para la aceleración están dadas por:

$$\begin{aligned} {}^1\vec{a}_B^k &= {}^1\vec{a}_B^j = \frac{d}{dt} {}^1\vec{v}_B^k \\ &= {}^1\vec{a}_A^j + {}^1\vec{\alpha}^j \times \vec{r}_{B/A} + {}^1\vec{\omega}^j \times ({}^1\vec{\omega}^j \times \vec{r}_{B/A}). \end{aligned} \quad (3)$$

$${}^1\vec{\alpha}^k = {}^1\vec{\alpha}^j + {}^j\vec{\alpha}^k + {}^1\vec{\omega}^j \times {}^j\vec{\omega}^k \quad (4)$$

y las ecuaciones correspondientes para el jerk están dadas por:

$$\begin{aligned} {}^1\vec{j}_B^k &= {}^1\vec{j}_B^j = \frac{d {}^1\vec{\alpha}_B^k}{dt} \\ &= {}^1\vec{j}_A^j + {}^1\vec{\rho}^j \times \vec{r}_{B/A} + 2 {}^1\vec{\alpha}^j \times ({}^1\vec{\omega}^j \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\omega}^j \times ({}^1\vec{\alpha}^j \times \vec{r}_{B/A}) + \dots \\ &\dots + {}^1\vec{\omega}^j \times [{}^1\vec{\omega}^j \times ({}^1\vec{\omega}^j \times \vec{r}_{B/A})]. \end{aligned} \quad (5)$$

$${}^1\vec{\rho}^k = {}^1\vec{\rho}^j + {}^j\vec{\rho}^k + 2 {}^1\vec{\omega}^j \times {}^j\vec{\alpha}^k + {}^1\vec{\alpha}^j \times {}^j\vec{\omega}^k + {}^1\vec{\omega}^j \times ({}^1\vec{\omega}^j \times {}^j\vec{\omega}^k). \quad (6)$$

De manera que para para los lazos se definen las velocidades, aceleraciones y jerks puntuales como:

$${}^1\vec{v}_D^1 = {}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A} + {}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{C/B} + {}^1\vec{\omega}^4 \times \vec{r}_{D/C} = \vec{0} \quad (7)$$

$${}^1\vec{v}_G^1 = {}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{E/A} + {}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{F/E} + {}^1\vec{\omega}^7 \times \vec{r}_{G/F} = \vec{0} \quad (8)$$

$${}^1\vec{v}_A^1 = {}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A} + {}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{H/B} + {}^1\vec{\omega}^8 \times \vec{r}_{I/H} + {}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{E/I} + {}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{A/E} = \vec{0} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{a}_D^1 &= {}^1\vec{\alpha}^2 \times \vec{r}_{B/A} + {}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\alpha}^3 \times \vec{r}_{C/B} + {}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{C/B}) \\ &+ {}^1\vec{\alpha}^4 \times \vec{r}_{D/C} + {}^1\vec{\omega}^4 \times ({}^1\vec{\omega}^4 \times \vec{r}_{D/C}) = \vec{0} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{a}_G^1 &= {}^1\vec{\alpha}^5 \times \vec{r}_{E/A} + {}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{E/A}) + {}^1\vec{\alpha}^6 \times \vec{r}_{F/E} + {}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{F/E}) \\ &+ {}^1\vec{\alpha}^7 \times \vec{r}_{G/F} + {}^1\vec{\omega}^7 \times ({}^1\vec{\omega}^7 \times \vec{r}_{G/F}) = \vec{0} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{a}_A^1 &= {}^1\vec{\alpha}^2 \times \vec{r}_{B/A} + {}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\alpha}^3 \times \vec{r}_{H/B} + {}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{H/B}) \\ &+ {}^1\vec{\alpha}^8 \times \vec{r}_{I/H} + {}^1\vec{\omega}^8 \times ({}^1\vec{\omega}^8 \times \vec{r}_{I/H}) + {}^1\vec{\alpha}^6 \times \vec{r}_{E/I} + {}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{E/I}) \\ &+ {}^1\vec{\alpha}^5 \times \vec{r}_{A/E} + {}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{A/E}) = \vec{0} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{j}_D^1 &= {}^1\vec{\rho}^2 \times \vec{r}_{B/A} + 2 {}^1\vec{\alpha}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\alpha}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\omega}^2 \times [{}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^3 \times \vec{r}_{C/B} + 2 {}^1\vec{\alpha}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{C/B}) + {}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\alpha}^3 \times \vec{r}_{C/B}) + {}^1\vec{\omega}^3 \times [{}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{C/B})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^4 \times \vec{r}_{D/C} + 2 {}^1\vec{\alpha}^4 \times ({}^1\vec{\omega}^4 \times \vec{r}_{D/C}) + {}^1\vec{\omega}^4 \times ({}^1\vec{\alpha}^4 \times \vec{r}_{D/C}) + {}^1\vec{\omega}^4 \times [{}^1\vec{\omega}^4 \times ({}^1\vec{\omega}^4 \times \vec{r}_{D/C})] = \vec{0} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{j}_G^1 &= {}^1\vec{\rho}^5 \times \vec{r}_{E/A} + 2 {}^1\vec{\alpha}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{E/A}) + {}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\alpha}^5 \times \vec{r}_{E/A}) + {}^1\vec{\omega}^5 \times [{}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{E/A})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^6 \times \vec{r}_{F/E} + 2 {}^1\vec{\alpha}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{F/E}) + {}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\alpha}^6 \times \vec{r}_{F/E}) + {}^1\vec{\omega}^6 \times [{}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{F/E})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^7 \times \vec{r}_{G/F} + 2 {}^1\vec{\alpha}^7 \times ({}^1\vec{\omega}^7 \times \vec{r}_{G/F}) + {}^1\vec{\omega}^7 \times ({}^1\vec{\alpha}^7 \times \vec{r}_{G/F}) + {}^1\vec{\omega}^7 \times [{}^1\vec{\omega}^7 \times ({}^1\vec{\omega}^7 \times \vec{r}_{G/F})] = \vec{0} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} {}^1\vec{j}_A^1 &= {}^1\vec{\rho}^2 \times \vec{r}_{B/A} + 2 {}^1\vec{\alpha}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\alpha}^2 \times \vec{r}_{B/A}) + {}^1\vec{\omega}^2 \times [{}^1\vec{\omega}^2 \times ({}^1\vec{\omega}^2 \times \vec{r}_{B/A})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^3 \times \vec{r}_{H/B} + 2 {}^1\vec{\alpha}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{H/B}) + {}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\alpha}^3 \times \vec{r}_{H/B}) + {}^1\vec{\omega}^3 \times [{}^1\vec{\omega}^3 \times ({}^1\vec{\omega}^3 \times \vec{r}_{H/B})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^8 \times \vec{r}_{I/H} + 2 {}^1\vec{\alpha}^8 \times ({}^1\vec{\omega}^8 \times \vec{r}_{I/H}) + {}^1\vec{\omega}^8 \times ({}^1\vec{\alpha}^8 \times \vec{r}_{I/H}) + {}^1\vec{\omega}^8 \times [{}^1\vec{\omega}^8 \times ({}^1\vec{\omega}^8 \times \vec{r}_{I/H})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^6 \times \vec{r}_{E/I} + 2 {}^1\vec{\alpha}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{E/I}) + {}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\alpha}^6 \times \vec{r}_{E/I}) + {}^1\vec{\omega}^6 \times [{}^1\vec{\omega}^6 \times ({}^1\vec{\omega}^6 \times \vec{r}_{E/I})] \\ &+ {}^1\vec{\rho}^5 \times \vec{r}_{A/E} + 2 {}^1\vec{\alpha}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{A/E}) + {}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\alpha}^5 \times \vec{r}_{A/E}) + {}^1\vec{\omega}^5 \times [{}^1\vec{\omega}^5 \times ({}^1\vec{\omega}^5 \times \vec{r}_{A/E})] = \vec{0} \end{aligned} \quad (15)$$

Mientras que las ecuaciones asociadas a las velocidades, aceleraciones y jerks angulares para los lazos están dadas por:

$${}^1\vec{\omega}^1 = {}^1\vec{\omega}^2 + 2 {}^1\vec{\omega}^3 + 3 {}^1\vec{\omega}^4 + 4 {}^1\vec{\omega}^1 = \vec{0}. \quad (16)$$

$${}^1\vec{\omega}^1 = {}^1\vec{\omega}^5 + 5 {}^1\vec{\omega}^6 + 6 {}^1\vec{\omega}^7 + 7 {}^1\vec{\omega}^1 = \vec{0}. \quad (17)$$

$${}^1\vec{\omega}^1 = {}^1\vec{\omega}^2 + 2 {}^1\vec{\omega}^3 + 3 {}^1\vec{\omega}^8 + 8 {}^1\vec{\omega}^6 - 5 {}^1\vec{\omega}^6 - 1 {}^1\vec{\omega}^5 = \vec{0}. \quad (18)$$

$${}^1\vec{\alpha}^1 = {}^1\vec{\alpha}^2 + 2 {}^1\vec{\alpha}^3 + 3 {}^1\vec{\alpha}^4 + 4 {}^1\vec{\alpha}^1 = \vec{0}. \quad (19)$$

$${}^1\vec{\alpha}^1 = {}^1\vec{\alpha}^5 + 5 {}^1\vec{\alpha}^6 + 6 {}^1\vec{\alpha}^7 + 7 {}^1\vec{\alpha}^1 = \vec{0}. \quad (20)$$

$${}^1\vec{\alpha}^1 = {}^1\vec{\alpha}^2 + 2 {}^1\vec{\alpha}^3 + 3 {}^1\vec{\alpha}^8 + 8 {}^1\vec{\alpha}^6 - 5 {}^1\vec{\alpha}^6 - 1 {}^1\vec{\alpha}^5 = \vec{0}. \quad (21)$$

$${}^1\vec{\rho}^1 = {}^1\vec{\rho}^2 + 2 {}^1\vec{\rho}^3 + 3 {}^1\vec{\rho}^4 + 4 {}^1\vec{\rho}^1 = \vec{0}. \quad (22)$$

$${}^1\vec{\rho}^1 = {}^1\vec{\rho}^5 + 5 {}^1\vec{\rho}^6 + 6 {}^1\vec{\rho}^7 + 7 {}^1\vec{\rho}^1 = \vec{0}. \quad (23)$$

$${}^1\vec{\rho}^1 = {}^1\vec{\rho}^2 + 2 {}^1\vec{\rho}^3 + 3 {}^1\vec{\rho}^8 + 8 {}^1\vec{\rho}^6 - 5 {}^1\vec{\rho}^6 - 1 {}^1\vec{\rho}^5 = \vec{0}. \quad (24)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando las seis ecuaciones asociadas a las velocidades puntuales, además de las tres asociadas a las velocidades angulares, el resultado del análisis de velocidad, que incluye 2 variables libres, está dado por:

$$\begin{bmatrix} 1\omega_2 \\ 2\omega_3 \\ 3\omega_4 \\ 4\omega_1 \\ 1\omega_5 \\ 5\omega_6 \\ 6\omega_7 \\ 7\omega_1 \\ 3\omega_8 \\ 8\omega_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7\omega_1 - 3 * 8\omega_6 \\ 7\omega_1 + 3 * 8\omega_6 \\ 7\omega_1 + 3 * 8\omega_6 \\ -7\omega_1 - 3 * 8\omega_6 \\ 7\omega_1 \\ -7\omega_1 \\ -7\omega_1 \\ 7\omega_1 \\ -8\omega_6 \\ 8\omega_6 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Para la solución del análisis de aceleración, la matriz (26) indica que la velocidad $8\omega_6$ debe ser igual a 0.

$$A_{acc} = \begin{bmatrix} a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 a \tau \omega_1^2 - 12 a \tau \omega_1 8\omega_6 \tau - 18 8\omega_6^2 \\ 0 & a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 a \tau \omega_1^2 - 36 a \tau \omega_1 8\omega_6 \tau - 54 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 & a & 0 & 0 & \frac{3}{2} a & -\frac{3}{2} a & 6 a \tau \omega_1^2 + 36 a \tau \omega_1 8\omega_6 \tau + 54 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -\frac{3}{2} & \frac{3}{2} & -4 \tau \omega_1^2 - 24 \tau \omega_1 8\omega_6 \tau - 36 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \tau \omega_1^2 a 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a & 0 & 0 & 0 & -6 \tau \omega_1^2 a 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -2 \tau \omega_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} a & -\frac{1}{2} a & -2 a & -6 a \tau \omega_1 8\omega_6 \tau - 6 8\omega_6^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 8\omega_6^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Para la solución del análisis de jerk, la matriz (27) indica que la velocidad $7\omega_1$ debe ser igual a 0.

$$A_{jerk} = \begin{bmatrix} a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42 a w 7 l^2 - 6 a \alpha 7 l w 7 l - 18 a \alpha 8 6 w 7 l \\ 0 & a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 126 a w 7 l^2 - 18 a \alpha 7 l w 7 l - 54 a \alpha 8 6 w 7 l \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 & a & 0 & 0 & -\frac{3}{2} a & -\frac{3}{2} a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 6 w 7 l (-7 w 7 l^2 + \alpha 7 l + 3 \alpha 8 6) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 a w 7 l^2 + 6 a \alpha 7 l w 7 l \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a & 0 & 0 & 0 & 18 a w 7 l^2 - 18 a \alpha 7 l w 7 l \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -6 w 7 l (-w 7 l^2 + \alpha 7 l) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} a & -\frac{1}{2} a & 30 a w 7 l^2 - 6 a \alpha 7 l w 7 l - 9 a \alpha 8 6 w 7 l \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 w 7 l^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Demostrando que el sistema debe de tener las velocidades $8\omega_6$ y $7\omega_1$ igual a cero para que tenga solución.

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra que usando las herramientas aprendidas en los cursos de dinámica y mecanismos es posible abordar problemas mucho más complicados y cuya solución todavía es motivo de contribuciones científicas de resonancia internacional.

REFERENCIAS

- [1] Connelly, R. & Servatius, H. (1994). Higher-Order Rigidity---What Is the Proper Definition?. *Discrete and Computational Geometry*, volumen (11), pp. 193-200, doi: [10.1007/bf02574003](https://doi.org/10.1007/bf02574003).
- [2] López Custodio, P.C., Pérez Soto, G. I., Sánchez Ruenes, M., Cervantes-Sánchez, J. J. & Rico Martínez, J. M. (2012). Análisis cinemáticos de orden superior de cadenas cinemáticas planas y sus aplicaciones, volumen (22), pp. 23-33, doi: [10.15174/au.2012.354](https://doi.org/10.15174/au.2012.354)