

# Modificación de mecanismos andadores utilizando mecanismos combinados de barras y levas

Joan Puig-Ortiz<sup>1</sup>, Lluïsa Jordi Nebot<sup>1</sup>, Rosa Pàmies-Vilà<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya, España. joan.puig@upc.edu, lluisa.jordi@upc.edu, rosa.pamies@upc.edu

## Resumen

En el diseño de robots móviles, los mecanismos andadores pueden superar la eficiencia de las ruedas en terrenos irregulares o en escaleras. Este estudio propone una metodología para modificar la trayectoria de un punto representativo del pie mediante la sustitución de barras por mecanismos combinados de barras y levas. Se detalla el proceso de selección de la barra a reemplazar y se presentan dos ejemplos de aplicación. En el mecanismo de Theo Jansen, se ha modificado la manivela para mantener la misma zancada, pero elevando más el pie. En el mecanismo de Klann, se ha modificado la manivela para lograr una zancada mayor. Estos ejemplos validan la viabilidad de la metodología y demuestran su potencial para mejorar el rendimiento de los mecanismos andadores en robots móviles.

**Palabras clave:** robots andadores; mecanismos combinados de barras y levas; cinemática; trayectoria.

## Abstract

In the design of mobile robots, walking mechanisms can outperform wheels in irregular terrains or staircases. This study proposes a methodology to modify the trajectory of a representative foot point by replacing bars with combined cam-linkage mechanisms. The process for selecting the bar to be replaced is detailed, and two application examples are presented. In the Theo Jansen mechanism, the crank was modified to maintain the same stride while raising the foot higher. In the Klann mechanism, the crank was modified to achieve a longer stride. These examples validate the feasibility of the methodology and demonstrate its potential to enhance the performance of walking mechanisms in mobile robots.

**Keywords:** walking robots; combined cam-linkage mechanism; kinematics; trajectory.

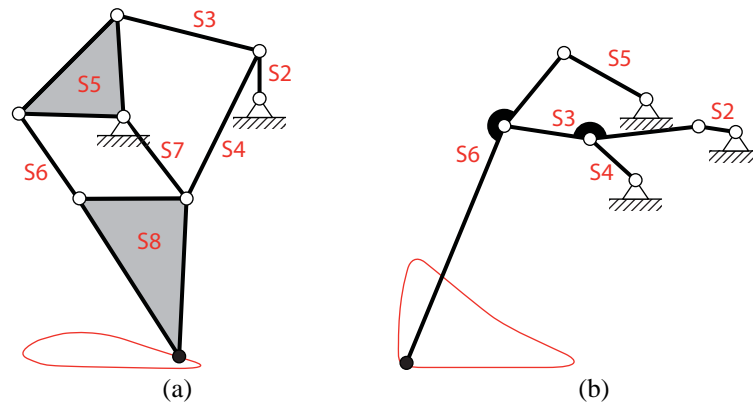
## 1. Introducción

En el diseño de robots móviles, las ruedas son el mecanismo de desplazamiento más habitual. Por razones de simplicidad y facilidad de automatización se han impuesto frente a otros sistemas. Sin embargo, en algunas situaciones como terrenos irregulares o escaleras, la opción de incorporar mecanismos andadores que simulen el movimiento de los pies humanos o de animales parece una opción más razonable [1].

En el diseño de los mecanismos andadores, se utilizan habitualmente mecanismos de barras en los que la trayectoria de uno de sus puntos se asemeja al

movimiento de un punto representativo del pie. Diversos autores han propuesto mecanismos de este tipo a lo largo de la historia y, algunos, se han convertido en mecanismos clásicos como los de Theo Jansen [2] o Klann [3]. La figura 1 muestra el esquema de ambos mecanismos, tomando como bancada el cuerpo del robot al que estaría unido el mecanismo andador.

Cuando se desea modificar algunos tramos de la trayectoria del punto representativo del pie, se recorre, usualmente, a variar la longitud de alguna de las barras.



**Figura 1.** (a) Mecanismo de Theo Jansen y (b) Mecanismo de Klann. Fuente: elaboración propia.

Esta estrategia provoca un impacto global en toda la trayectoria del pie.

Diversos autores [4-7] han propuesto la utilización de mecanismos combinados de barras y levas para la síntesis precisa de mecanismos. En los mecanismos andadores antes mencionados, sustituyendo una de las barras por un mecanismo combinado, formado por dos sólidos unidos mediante un par prismático y un mecanismo leva-palpador [4], se puede conseguir un mecanismo capaz de replicar el comportamiento del mecanismo original en una parte de la trayectoria, y modificar el trazado en la otra parte.

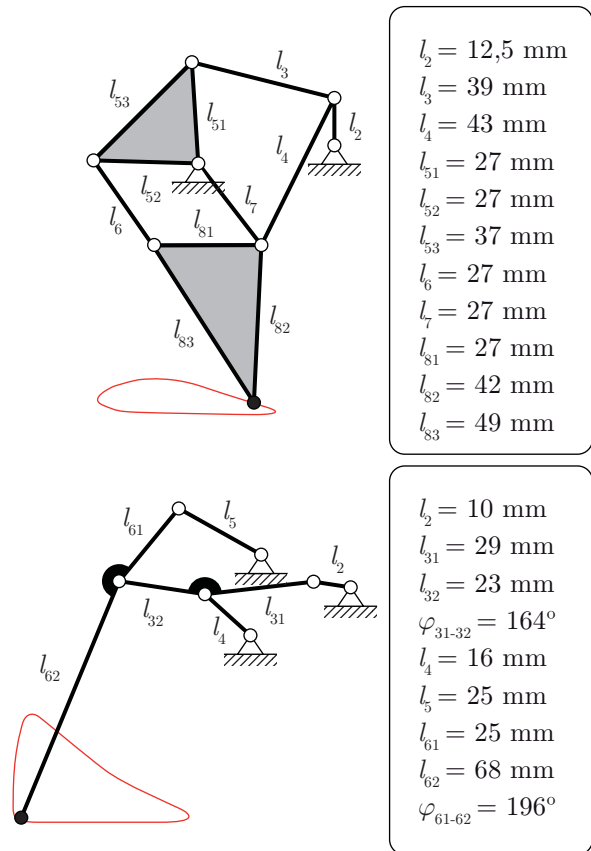
En este trabajo, se analizan, mediante simulación, las posibilidades de modificación de los mecanismos andadores sustituyendo algunas de las barras por mecanismos combinados de barras y levas. La sustitución de una barra del mecanismo por un mecanismo combinado tiene por objetivo conseguir que la distancia entre los extremos de la barra, que en el mecanismo original era constante, pase a ser variable. Dicha longitud, será función del ángulo formado entre la barra sustituida y el elemento al que estaba articulada dicha barra. Así, el control de la distancia entre los extremos de la barra sustituida se consigue con una leva, del perfil adecuado, fija al elemento al que estaba articulada la barra. En este trabajo se evalúa la viabilidad de estos cambios en los mecanismos de Theo Jansen y Klann.

## 2. Metodología

Para realizar la simulación de los dos mecanismos analizados, se ha utilizado el programa de simulación PAM [8].

El mecanismo de Theo Jansen está compuesto por ocho sólidos, incluyendo la bancada como sólido fijo, mientras que el mecanismo de Klann está compuesto

por seis sólidos, también incluyendo el sólido fijo. Todas las uniones entre las barras son de revolución. Las dimensiones iniciales de los mecanismos se presentan en la figura 2. En la tabla 1 se muestran las coordenadas de los puntos fijos a la bancada de los dos mecanismos.



**Figura 2.** Dimensiones de los mecanismos de Theo Jansen, y de Klann, en mm.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1.** Dimensiones iniciales de los mecanismos.

Mecanismo de Theo Jansen	
Punto	(x, y)
RB-2	(0 mm, 0 mm)
RB-5	(36 mm, 5 mm)
Mecanismo de Klann	
Punto	(x, y)
RB-2	(0 mm, 0 mm)
RB-4	(-26 mm, -13 mm)
RB-5	(-23 mm, 8 mm)

Fuente: elaboración propia.

Para determinar las barras del mecanismo más adecuadas para ser sustituidas, se determinan, primeramente, los ángulos girados entre cada par de elementos articulados del mecanismo. Estos ángulos controlan la distancia entre los extremos de la barra sustituida.

Para evaluar las trayectorias posibles mediante la sustitución de barras, se han realizado simulaciones de ambos mecanismos. Para cada uno de ellos y para cada barra susceptible de ser sustituida, se han llevado a cabo tres simulaciones: una con las dimensiones originales de las barras, otra aumentando en 2,5 mm la longitud de la barra sustituida, y una tercera reduciendo en 2,5 mm dicha longitud. Para cada simulación se ha obtenido la trayectoria de un punto representativo del pie tras haber sustituido la barra seleccionada por el mecanismo combinado de barras y levas.

La metodología propuesta permite modificar la trayectoria del punto representativo del pie moviéndose dentro de la zona delimitada por las distancias máxima y mínima que se obtendrán por la sustitución de una barra por un mecanismo combinado. El trabajo concluye con dos ejemplos de posibles modificaciones:

- Una modificación del mecanismo de Theo Jansen en la que se pretende realizar la misma longitud de zancada que el mecanismo original, pero elevando el punto representativo del pie lo máximo posible.
- Una modificación del mecanismo de Klann en la que se pretende alargar la longitud de la zancada partiendo del mecanismo original.

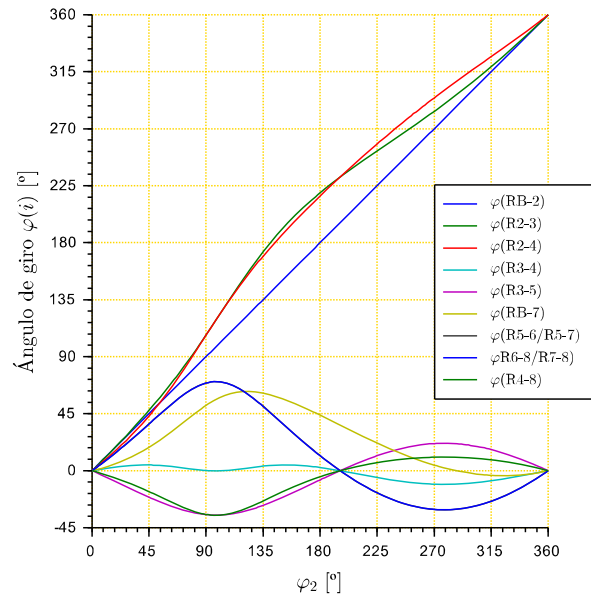
Para ambos casos se presenta el diseño de la leva utilizada y se muestra la trayectoria del punto del pie obtenida.

### 3. Resultados

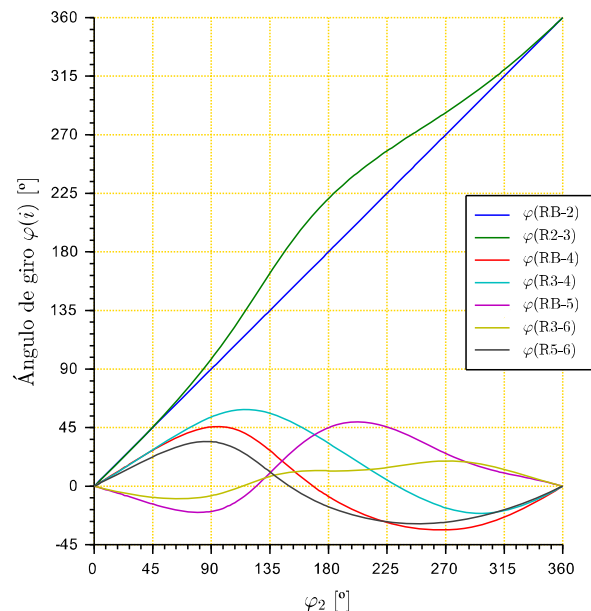
#### 3.1. Selección de barras a sustituir

La figura 3 y la figura 4 muestran la variación de los ángulos relativos  $\varphi(i)$  entre las distintas barras de los mecanismos. El índice  $i$  indica las articulaciones R entre dos barras; así, por ejemplo  $\varphi(\text{RB-2})$  se refiere al

ángulo relativo entre la bancada B y el sólido 2. La evolución de estos ángulos relativos se grafica con respecto al ángulo girado por la manivela (sólido 2),  $\varphi_2$ , tomando como configuración inicial la configuración en la cual la manivela está orientada verticalmente hacia arriba.

**Figura 3.** Ángulos de giro, para un ciclo del mecanismo de Theo Jansen, de las articulaciones estudiadas.

Fuente: elaboración propia.

**Figura 4.** Ángulos de giro, para un ciclo del mecanismo de Klann, de las articulaciones estudiadas.

Fuente: elaboración propia.

Tal como puede observarse, en los dos mecanismos existen articulaciones en las que el ángulo relativo girado entre los dos sólidos articulados es creciente

desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  para una zancada del mecanismo y articulaciones en las que el ángulo presenta algún punto muerto. En estas segundas, el mismo valor del ángulo relativo ocurre para dos posiciones de la zancada y, por lo tanto, la distancia entre los extremos deberá ser la misma en ambas posiciones. Así, aunque sería posible sustituir cualquier barra articulada del mecanismo, es preferible sustituir las que están unidas a articulaciones que giran  $360^\circ$ .

En el mecanismo de Theo Jansen, las articulaciones en las que el ángulo relativo entre barras llega a los  $360^\circ$  son: la articulación entre la bancada y el sólido 2 (RB-2), la articulación entre el sólido 2 y el sólido 3 (R2-3) y la articulación entre el sólido 2 y el sólido 4 (R2-4). De todos los sólidos implicados en estas articulaciones, los que son barras son los sólidos 2, 3 y 4. Si se sustituye la barra 2, el ángulo de control podrá ser el de las articulaciones RB-2, R2-3 y R2-4; si se sustituye la barra 3, el ángulo de control podrá ser únicamente el de la articulación R2-3; y si se sustituye la barra 4, el ángulo de control podrá ser únicamente el de la articulación R2-4.

En el mecanismo de Klann, las articulaciones en las que el ángulo relativo entre barras llega a los  $360^\circ$  son la articulación entre la bancada y la barra 2 (RB-2) y la articulación entre la barra 2 y la barra 3 (R2-3). En este caso, los sólidos que son barras son los sólidos 2 y 3. Si se sustituye la barra 2, el ángulo de control podrá ser el de las articulaciones RB-2 y R2-3 mientras que, si se sustituye la barra 3, el ángulo de control deberá ser el de la articulación R2-3.

### 3.2. Trayectorias posibles

Como se ha explicado en el apartado de metodología, para cada mecanismo y cada posible barra a sustituir, se han realizado tres simulaciones. La tabla 2 muestra las longitudes modificadas en cada uno de los análisis realizados.

Mediante estos análisis, se pretende encontrar la zona en la que puede definirse la trayectoria mediante la sustitución de una barra por un mecanismo combinado. La leva de dicho mecanismo se supone que puede tener una variación de radio de  $\pm 2,5$  mm respecto de su radio base.

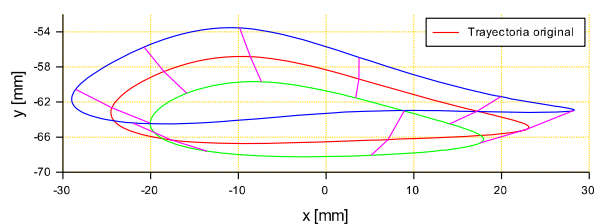
### 3.3. Trayectorias en el mecanismo de Theo Jansen

La figura 5a muestra el análisis de modificación de la barra 2 en el mecanismo de Theo Jansen. En ella se pueden observar las trayectorias que seguiría el punto representativo del pie para las tres longitudes distintas de la barra 2.

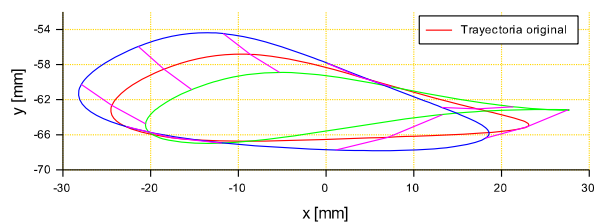
**Tabla 2.** Longitudes modificadas en cada uno de los análisis realizados.

Mecanismo de Theo Jansen	
Modificación de la barra 2	Longitud S2 = 12,5 mm
	Longitud S2 = 15 mm
	Longitud S2 = 10 mm
Modificación de la barra 3	Longitud S3 = 39 mm
	Longitud S3 = 41,5 mm
	Longitud S3 = 36,5 mm
Modificación de la barra 4	Longitud S4 = 43 mm
	Longitud S4 = 45,5 mm
	Longitud S4 = 40,5 mm
Mecanismo de Klann	
Modificación de la barra 2	Longitud S2 = 10 mm
	Longitud S2 = 12,5 mm
	Longitud S2 = 7,5 mm
Modificación de la barra 3 (distancia de R2-3 a R3-4)	Longitud S3 = 29 mm
	Longitud S3 = 31,5 mm
	Longitud S3 = 26,5 mm

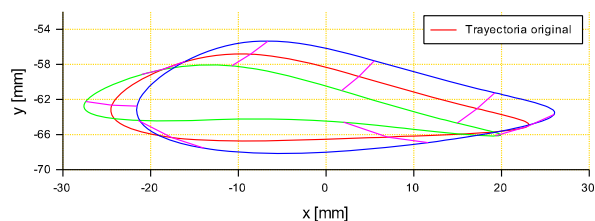
Fuente: elaboración propia.



(a) Modificación de la barra 2



(b) Modificación de la barra 3



(c) Modificación de la barra 4

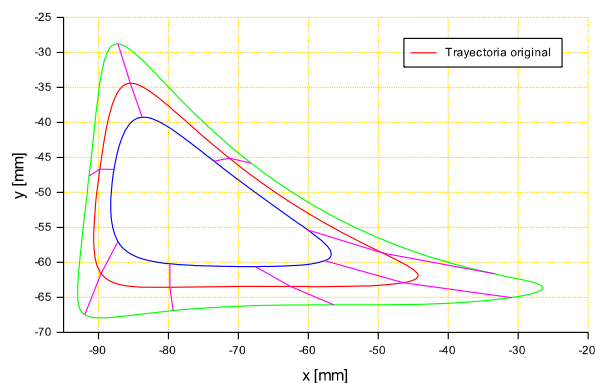
**Figura 5.** Área de posibles trayectorias para el mecanismo de Theo Jansen con la modificación de distintas barras.

Fuente: elaboración propia.

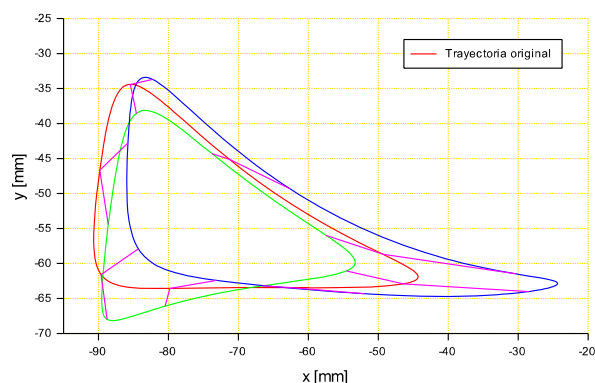
La trayectoria de color rojo es la que seguiría el mecanismo con las dimensiones originales. Las líneas de color magenta unen las tres trayectorias enlazando las posiciones equivalentes para un mismo ángulo de la manivela. Se han marcado únicamente para ángulos múltiples de  $45^\circ$ . El área que barrerían estas líneas sería la zona de posibles trayectorias para esta modificación.

Las figuras 5b y 5c muestran los análisis de modificación de las barras 3 y 4 respectivamente para el mecanismo de Theo Jansen. Estos análisis son equivalentes al caso anterior.

Si bien se puede abordar la sustitución de cualquiera de las tres barras, para el caso de las barras 3 y 4 existen diversos puntos equivalentes de las trayectorias que presentan una variación muy pequeña, o nula, al modificar la longitud de la barra. Para el análisis de la modificación de la longitud de la barra 2, en casi todos los puntos de la trayectoria existe una posibilidad amplia de variación de la trayectoria del punto representativo del pie. Esto convierte la variación de la longitud de la barra 2 en la opción más adecuada para la modificación de la trayectoria.



(a) Modificación de la barra 2



(b) Modificación de la barra 3

**Figura 6.** Área de posibles trayectorias para el mecanismo de Klann con la modificación de distintas barras.

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Trayectorias en el mecanismo de Klann

La figura 6 muestra los análisis de modificación de las barras 2 y 3 para el mecanismo de Klann.

Igual que en el caso del mecanismo de Theo Jansen, la modificación de la barra 2, que es la manivela del mecanismo, es la que proporciona la posibilidad de variar la trayectoria en todos los puntos de esta. La modificación de la barra 3, que es la otra opción estudiada, presenta en algunos puntos de la trayectoria una posibilidad de variación muy reducida.

### 3.5. Ejemplo de modificación en el mecanismo de Theo Jansen

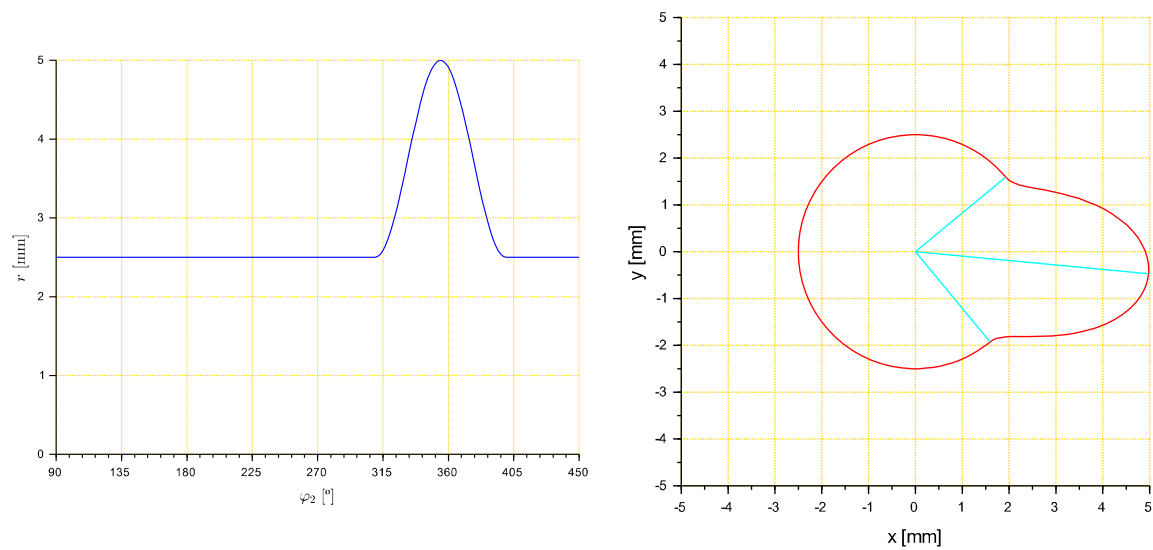
Se realiza una modificación de la barra 2 del mecanismo de Theo Jansen partiendo de la trayectoria del mecanismo original (en rojo en la figura 5a). Como el objetivo es elevar al máximo el punto representativo del pie, se busca el valor máximo de la coordenada vertical de las trayectorias calculadas en la figura 5a. Dicho punto corresponde al punto más elevado de la trayectoria de color azul, que es la trayectoria para una longitud de la barra 2 de 15 mm. Se llega a dicho punto cuando el ángulo de la barra 2 respecto a la horizontal es de  $354,6^\circ$ .

Una vez determinado el punto de paso, se define una zona de transición que, en este caso, se toma  $45^\circ$  previos al punto máximo y  $45^\circ$  posteriores al punto máximo. Con estas características se define una leva con continuidad C2 para el mecanismo combinado que modifique la distancia entre los extremos de la barra sustituida, de forma que partiendo de una distancia de 12,5 mm empiece a aumentar cuando el ángulo sea de  $309,6^\circ$ , llegue a una distancia de 15 mm cuando el ángulo sea de  $354,6^\circ$  y disminuya hasta llegar otra vez a 12,5 mm cuando el ángulo sea de  $39,6^\circ$  ( $399,6^\circ$ ). Se trata de una leva de detención simple. Su perfil puede verse en la figura 7, donde  $r$  es la variable que describe la evolución del radio de la leva.

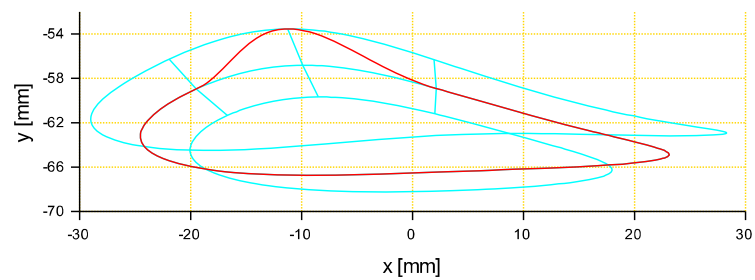
La figura 8 muestra la trayectoria obtenida con la modificación propuesta para el mecanismo de Theo Jansen.

### 3.6. Ejemplo de modificación en el mecanismo de Klann

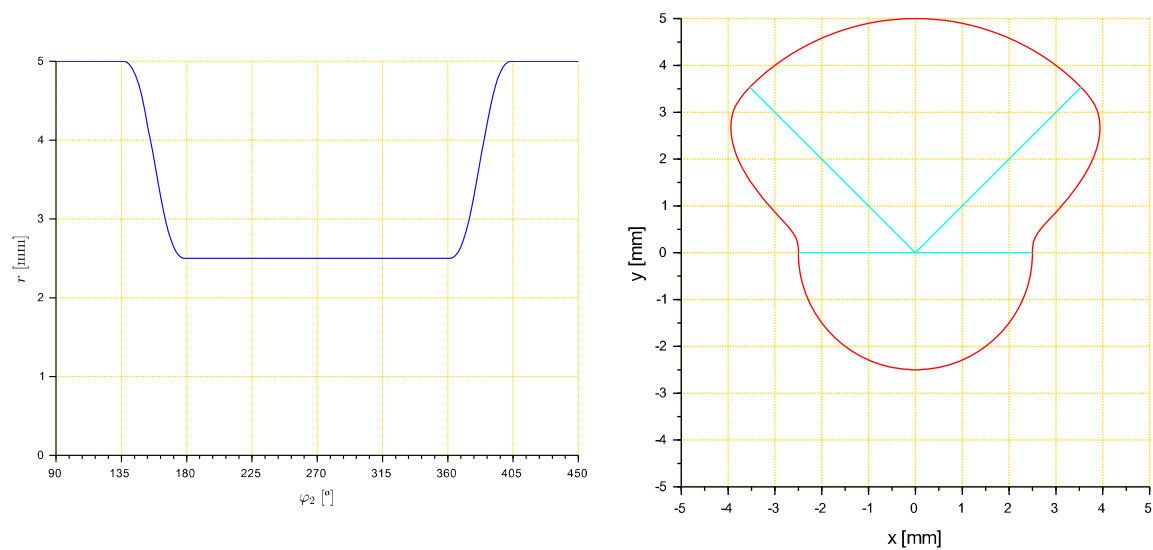
Se realiza una modificación de la barra 2 del mecanismo de Klann partiendo de la trayectoria del mecanismo original (en rojo en la figura 6a). En este caso, el objetivo es alargar la zancada, de forma que se va a seguir la estrategia de saltar de la trayectoria del mecanismo inicial a la trayectoria de color verde en la parte plana inferior del recorrido del punto representativo del pie.



**Figura 7.** Radio en función del ángulo y perfil de la leva utilizada para el ejemplo de modificación del mecanismo de Theo Jansen.  
Fuente: elaboración propia.

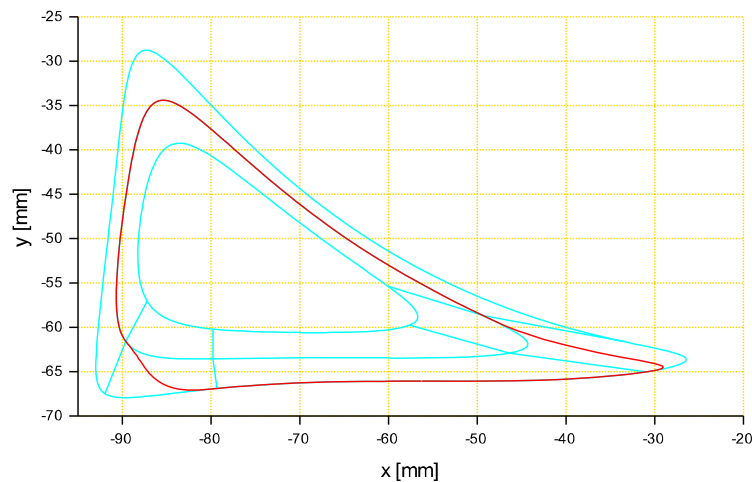


**Figura 8.** Trayectoria obtenida a partir de la modificación de la manivela del mecanismo de Theo Jansen.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 9.** Radio en función del ángulo y perfil de la leva utilizada para el ejemplo de modificación del mecanismo de Klann.  
Fuente: elaboración propia.





**Figura 10.** Trayectoria obtenida a partir de la modificación de la manivela del mecanismo de Klann.  
Fuente: elaboración propia.

La leva necesaria para controlar la distancia entre los extremos de la barra sustituida deberá garantizar que dicha distancia sea de 10 mm en la mayor parte del ciclo, pasando de esta distancia a una distancia de 12,5 mm cuando la barra 2 se mueve entre un ángulo de  $0^\circ$  y  $45^\circ$  respecto a la horizontal, manteniéndose constante la distancia para un ángulo entre  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , para volver a disminuir la distancia entre  $135^\circ$  y  $180^\circ$  hasta llegar nuevamente a 10 mm. Se ha definido una trayectoria con continuidad C2 y, en este caso, se trata de una leva de doble detención con el perfil mostrado en la figura 9, donde de nuevo puede verse la evolución del radio de la leva  $r$  respecto al ángulo girado por la manivela.

Finalmente, la figura 10 muestra la trayectoria obtenida con la modificación propuesta para el mecanismo de Klann.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha planteado la posibilidad de sustituir una de las barras en dos de los mecanismos andadores clásicos como son el mecanismo de Theo Jansen y el mecanismo de Klann.

Del análisis de las distintas posibilidades de sustitución, se ha obtenido el área donde se puede redefinir la trayectoria del punto representativo del pie, respecto a la trayectoria de dicho punto del mecanismo original.

De todas las posibles sustituciones de barras, la que ofrece una zona de posibles trayectorias más amplia y más equilibrada es la sustitución de la manivela del mecanismo en los dos mecanismos andadores estudiados.

Finalmente, como ejemplo de las posibilidades que ofrece la metodología planteada, se han presentado dos posibles sustituciones, una para el mecanismo de Theo Jansen en la que se plantea redefinir la trayectoria con un punto de paso forzado y otra para el mecanismo de Klann para saltar de la trayectoria original a otra de las posibles durante un tramo del ciclo. Con estos dos ejemplos se concluye que las posibilidades de redefinición de la trayectoria con precisión son muy amplias, pudiéndose realizar cualquier trayectoria dentro del área definida.

Aunque se han escogido los mecanismos de Theo Jansen y de Klann, la metodología planteada se podría aplicar a cualquier otro mecanismo andador, siendo esta una posibilidad de trabajo futuro.

#### 5. Referencias

- [1] J. A. Tenreiro Machado, M. Silva. An overview of legged robots. International symposium on mathematical methods in engineering pp. 1-40, 2006.
- [2] S. Nansai, N. Rojas, M. R. Elara, R. Sosa, M. Iwase. On a Jansen leg with multiple gait patterns for reconfigurable walking platforms. Advances in Mechanical Engineering vol. 7(3), 2015.
- [3] J. Kulandaivasan Sheba, M. R. Elara, E. Martínez-García, L. Tan-Phuc. Trajectory Generation and Stability Analysis for Reconfigurable Klann. Mechanism Based Walking Robot. Robotics vol. 5(3):13, 2016.
- [4] J. Puig-Ortiz, L. Jordi Nebot, E. E. Zayas Figueras. Análisis de los índices de prestaciones en mecanismos

combinados de barras y levas. Actas del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Jaén, 2021.

[5] R.-C. Soong, S.-B. Chang. Synthesis of function-generation mechanisms using variable length driving links. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46(11), pp. 1696–1706, 2011 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.06.011>

[6] G. Gatti, D. Mundo. Optimal synthesis of six-bar cammed-linkages for exact rigid-body guidance. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42(9), pp. 1069–1081, 2007 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.09.006>

[7] D. Mundo, D., J. Y. Liu, H. S. Yan. Optimal Synthesis of Cam-Linkage Mechanisms for Precise Path Generation. *Journal of Mechanical Design*, vol. 128(6), pp. 1253–1260, 2006 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.2337317>

[8] D. Clos, J. Puig. PAM. un programa de análisis de mecanismos planos de  $n$  grados de libertad enfocado a la docencia universitaria, *Anales de Ingeniería Mecánica*, vol. 15(1), pp. 757-765, 2004.