

Diseño virtual y paramétrico de leva y seguidor

Virtual and parametric cam and follower design

JIMÉNEZ-RABIELA, Homero†*, VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, Benjamín, GARCÍA-SEGURA, Pedro y BRAVO-ACOSTA, Adrian Gustavo

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Energía, San Pablo número 180 Colonia Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco C. P. 02200 Ciudad de México

ID 1^{er} Autor: *Homero, Jiménez-Rabiela* / ORC ID: Eflkjm13091998, Researcher ID Thomson: S-2299-2018, CVU CONACYT ID: 123386

ID 1^{er} Coautor: *Benjamín, Vázquez-González* / ORC ID: 0000-0002-9030-5662, Resercher ID Thomson: S-2417-2018

ID 2^{do} Coautor: *Pedro, García-Segura* / ORC ID: 0000-0003-4947-084X, Reearcher ID Thomson: S-2360-2018, CVU CONACYT ID: 371233

ID 3^{er} Coautor: *Adrian Gustavo, Bravo-Acosta* / ORC ID: 0000-0001-57975317, Reearcher ID Thomson: 2272-2018, CVU CONACYT ID: 334391

Recibido 20 Abril, 2018; Aceptado 30 Junio, 2018

Resumen

En este trabajo se muestran resultados de la aplicación de técnicas computacionales novedosas, al diseño tridimensional y paramétrico de un sistema de leva de placa y seguidor con rodillo, que permiten la simulación dinámica del sistema. Se obtienen los perfiles de leva con base en el diagrama de desplazamientos, la curva de trazo y la familia de circunferencias que representan al rodillo. Se diseñan los eslabones y el mecanismo para las simulaciones y pruebas virtuales del prototipo. A partir del diagrama de desplazamiento obtenido, se calcularon las coordenadas de la curva de trazo. Se determinaron las ecuaciones de las circunferencias que representan al rodillo, en sus diferentes posiciones y secciones. Al resolverlas con su derivada, se determinaron las coordenadas de los perfiles interior y exterior de la leva. Con una hoja electrónica de cálculo, se controlaron los archivos gráficos de los eslabones y del mecanismo, asegurando el diseño amigable. Los resultados virtuales medidos coinciden razonablemente con los calculados. El procedimiento descrito puede aplicarse en ambientes industriales y académicos con alta exactitud. Al cambiar los datos de entrada, los archivos gráficos se actualizan haciendo posible el rediseño y optimización en un tiempo relativamente pequeño.

Diseño, Parametrización, Sistema

Abstract

In this paper we show the results of the application of new computational techniques, to the three-dimensional and parametric design of a plate cam system and follower with roller, that allows dynamic simulation of the system. The cam profiles are obtained based on the displacement diagram, the stroke curve and the family of circumferences that represent the roller. The links and the mechanism are designed for simulations and virtual tests of the prototype. From the displacement diagram obtained, the coordinates of the stroke curve were calculated. The equations of the circumferences that represent the roller were determined, in their different positions and sections. When solving them with their derivative, the coordinates of the inner and outer profiles of the cam were determined. With an electronic calculation sheet, the graphic files of the links and the mechanism were controlled, ensuring the friendly design. The virtual results measured coincide reasonably with those calculated ones. The described procedure can be applied in industrial and academic environments with high accuracy. By changing the input data, the graphic files are updated making possible the redesign and optimization in a relatively small time.

Design, Parameterization, System

Citación: JIMÉNEZ-RABIELA, Homero, VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, Benjamín, GARCÍA-SEGURA, Pedro y BRAVO-ACOSTA, Adrian Gustavo. Diseño virtual y paramétrico de leva y seguidor. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-7: 13-20.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: hjr@correo.azc.uam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En el diseño de sistemas de leva y seguidor, cuando la primera tiene perfiles especiales, el proceso es complejo. Nosotros partimos de la hipótesis de que tal proceso puede simplificarse con el uso de técnicas computacionales. En el marco de referencia de la ingeniería mecánica; este trabajo es una contribución para resolver el problema, mostrando lo relativamente fácil y amigable que pueden ser los procesos de diseño en general, cuando se usa procedimientos como el mostrado en este artículo.

Cuando el sistema que deberá diseñarse puede ser virtual, tridimensional y paramétrico; del número infinito de soluciones, para un conjunto dado de datos, pueden simularse tantas como se desee. Con base en un análisis comparativo de las simulaciones, optimizar el sistema es rápido. La importancia de estas técnicas radica en la exactitud de las mismas y en la reducción de personal y recursos materiales necesarios para su implantación; adicionalmente es ratificada por las publicaciones sobre el tema por otros investigadores.

Gudiño-L, Jorge et al. (2016), afirman que los entornos virtuales con imágenes interactivas en tres dimensiones permiten analizar situaciones reales en un entorno no real. Esto los convierte en una excelente herramienta para el análisis previo a la construcción, de esta manera se pueden detectar errores en el diseño o realizar ajustes con lo que se ahorra una cantidad de dinero considerable.

Zhang G. et al. (2013), proponen un método para diseñar levas globoidales basado en el modelado paramétrico.

Aziz E. S. (2008), afirma que las tecnologías de la información juegan un papel importante en el desarrollo de ambientes de enseñanza aprendizaje, en su artículo presenta el diseño e implementación de métodos más activos y colaborativos.

Bi J. P. y Wang X. L. (2012), desarrollaron un sistema para diseño y simulación de levas, con base en los valores de entrada obtienen los de salida y grafican curvas de velocidades y aceleraciones, sus resultados muestran que el proceso puede facilitar las aplicaciones en el diseño de levas.

Liu Q. L. et al. (2012), utilizaron un método de simulación paramétrica para crear un perfil de leva conjugada en 3D; en su artículo describen los principios básicos para simular el movimiento de los mecanismos de levas usando Creo Parametric Software.

Liu Y. X. y Peng R. S., presentaron un método rápido y fácil para diseñar perfiles de levas con el Software Pro/E., probado con la simulación del movimiento.

Sanmiguel-Rojas, E. Hidalgo-Martínez, M. (2016), proponen un nuevo mecanismo de leva de anchura constante con un seguidor de doble rodillo de radio negativo; diseñan el perfil de la leva con un método de optimización basado en las curvas de Bézier.

Sun J., Tang Z. (2011), utilizaron la función gráfica de datos de Pro / E, para crear el diagrama de desplazamientos del seguidor y para controlar de manera paramétrica el perfil de la leva. Adicionalmente usaron tecnología de ensamble y simulación virtual.

Han L., He P. (2011), desarrollaron un sistema rápido de simulación del diseño y fabricación de levas.

Aan A., Heinloo M., Allas J. (2014), describieron un método para diseñar una leva radial en la hoja de cálculo Mathcad que incluye; el cálculo de desplazamientos del seguidor, valores de sus velocidades y aceleraciones, la optimización del contorno y la simulación del mecanismo.

Sandu G., Cofaru C., Jelenschi L. (2012), presentaron un método para diseñar el perfil de leva para tren oscilante de válvulas y seguidor con rodillo, utilizando Virtual Lab LMS y Autocad.

Acevedo P. C., Cardona F. S., Bris C. J. (2004) describen la utilización de las curvas de Bézier definidas por polinomios de Bernstein, para el diseño de la ley de desplazamientos.

Hasimoto B. R., Ashfaq A. K. (2006), presentaron un esquema de ocultamiento de error geométrico para datos de imagen / video basados en la Transformada de Coseno Discreta (TCD) basado en las curvas de Bézier (CB).

Cardona F. S., Zayas F. E., Jordi N. L. (2009), describen un procedimiento para definir la ley de desplazamiento y la continuidad global deseada. Muestran leyes de desplazamiento diseñadas con curvas de Bézier no paramétricas y los perfiles de levas de anchura constante que corresponden a dichas leyes.

Yañez V. R., et al. (2017), describen el proceso de diseño del sistema leva seguidor desmodrónico espacial centrado en i) el diseño de la ley de desplazamiento, ii) la obtención del perfil de la leva y iii) la comprobación del perfil de la leva.

Harold A. R. (2004), afirma que en una leva involuta el contacto siempre ocurre en el mismo punto sobre la cara plana del seguidor; si localizamos dicho punto sobre la línea de movimiento del seguidor, los momentos que tiende a flexionar al seguidor son mínimos.

Las secciones 2 – 8 del artículo se utilizan para el desarrollo del trabajo. En la 2 se define la metodología y los parámetros a utilizar. En la 3 describimos el proceso de obtención del diagrama de desplazamientos. La curva de trazo es obtenida en la 4. La ecuación de la familia de circunferencias se obtiene en la 5. En la 6 se obtienen las coordenadas de los puntos que definen los perfiles de la leva y se grafican éstos. La 7 se utiliza para mostrar el proceso paramétrico para la obtención de los eslabones. En la 8 se muestra el ensamble y una secuencia de su simulación.

Metodología

Sistema de unidades: longitudes en pulgadas, tiempo en segundos, ángulos en radianes. Como ejemplo se consideró; una leva de placa en rotación a velocidad angular constante (ω) y un seguidor, descentrado, con rodillo que debe acelerar hasta una velocidad uniforme (v), mantener esta velocidad a lo largo de L_2 pulgadas de ascenso, desacelerar hasta la parte superior de su ascenso, retornar y quedar en reposo ($L_5 = 0$) durante T_5 segundos; el ascenso deberá ser de L_4 pulgadas. Para evitar cambios bruscos en los diagramas de velocidades y aceleraciones, se utilizó los movimientos siguientes: cicloidal de ascenso inicial, uniforme, armónico simple de ascenso final, armónico modificado de retorno completo y detención respectivamente, para las secciones de la 1 a la 5.

Considerando lo aseverado por Harold A. R., se decidió que la excentricidad fuese igual al radio de la circunferencia primaria (R_p) de la leva. El radio del rodillo (R_r) se seleccionó lo suficientemente pequeño, respecto de R_p , para evitar problemas geométricos al contactar el rodillo con la leva cuando ésta tiene, en su perfil, una parte cóncava; con posibilidad de que contenga un radio local reducido.

Se calculó β_2 y β_5 con relaciones funcionales del dominio público. Igualando velocidades y aceleración por la izquierda y por la derecha; velocidades en las fronteras entre las secciones 1-2 y 2-3, aceleración entre las secciones 3-4; se calculó β_3 , β_4 , β_1 , L_1 y L_3 .

Se construyó el diagrama de desplazamientos y se determinaron las coordenadas de la curva de trazo, así como las ecuaciones de las familias de circunferencias representando al rodillo en sus diferentes posiciones y secciones considerando la inversión del mecanismo. Con las ecuaciones de las familias y sus derivadas, se determinaron las coordenadas de los perfiles, tangentes a las circunferencias, interior y exterior de la leva. Se parametrizó la geometría de los eslabones, generando cada uno de éstos, los cuales fueron ensamblados y se simuló su comportamiento.

Se comparó los desplazamientos calculados con los medidos usando la simulación. Con diferentes datos de entrada, se diseñaron las levas y bases correspondientes; con la geometría y dimensiones del rodillo y del seguidor constantes

Diagrama de desplazamientos

Se utilizó subdivisión recursiva para discretizar, en cada sección, el ángulo β correspondiente. En particular; el incremento normal ($\Delta\theta_n$) del ángulo de giro local de la leva (θ_L) fue tal que:

$$0 \leq \theta_L \leq \beta_i, i = 1, 2, 3, 4, 5; \Delta\theta_n = 0.01\beta_i \quad (1)$$

El incremento mínimo ($\Delta\theta_m$) correspondiente:

$$0 \leq \theta_L \leq 0.01\beta_i, \Delta\theta_m = 0.0001\beta_i \quad (2)$$

Se aplico para el primero y para el último de los incrementos normales en cada sección.

Cada β_i se discretizó con 98 $\Delta\theta_n$ y 200 $\Delta\theta_m$.

Para cada sección, discretizada, se calculó el desplazamiento local con:

$$s_{L1} = L_1 \left[\frac{\theta_L}{\beta_1} - \frac{1}{\pi} \text{sen} \left(\frac{\pi\theta_L}{\beta_1} \right) \right] \quad (3)$$

$$s_{L2} = \frac{v}{\omega} \theta_L \quad (4)$$

$$s_{L3} = L_3 \text{sen} \left(\frac{\pi\theta_L}{2\beta_3} \right) \quad (5)$$

$$s_{L4} = \frac{L_4}{2} \left\{ \left[1 + C \left(\frac{\pi\theta_L}{\beta_4} \right) \right] - \frac{1}{4} \left[1 - C \left(\frac{2\pi\theta_L}{\beta_4} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

Donde $C \equiv \cos$.

Se consolidaron las cinco secciones obteniendo el ángulo de giro global de la leva (θ) variando entre 0 y 2π . Para la sección i , $\theta = \theta_L - \beta_i + \sum \beta_i$. Para cada θ , se calculó el desplazamiento global (s). Para la sección 1 $s = s_{L1}$, para la sección 2 $s = L_1 + s_{L2}$, para la sección 3 $s = L_1 + L_2 + s_{L3}$, para la sección 4 $s = s_{L4}$.

Se graficó s en función de θ para obtener el diagrama de desplazamientos, ver Figura 1.

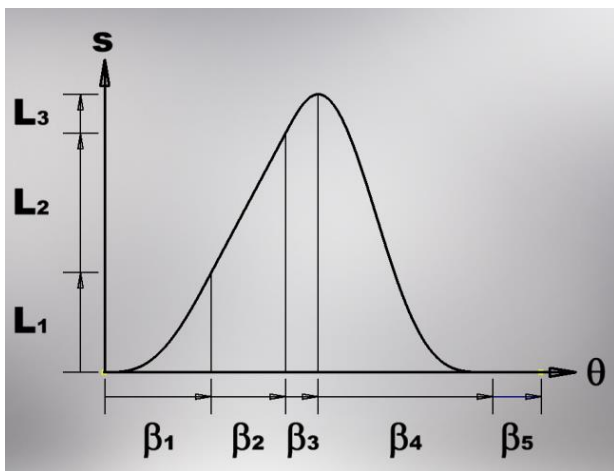


Figura 1 Diagrama de desplazamientos
Fuente: Elaboración Propia

Curva de trazo

En la Figura 2, el vector de posición de A con respecto de O (marco de referencia inercial) tiene una magnitud igual a R_p , el vector de posición de C con respecto de A (marco de referencia no inercial) tiene una magnitud igual a s , el vector de posición del punto de trazo (C) con respecto de O para un valor particular de θ es representado por el vector R .

Por inversión del mecanismo; las coordenadas de la curva de trazo, coincidiendo con el centro del rodillo (h, k), con respecto a O en función de θ son:

$$h = R_p \cos\theta + (s) \cos(1.5\pi + \theta) \quad (7)$$

$$k = R_p \text{sen}\theta + (s) \text{sen}(1.5\pi + \theta) \quad (8)$$

Con las ecuaciones (7) y (8), evaluadas para 298 (98 + 200) valores de θ en cada sección, se graficó la curva de trazo; ver Figura 2.

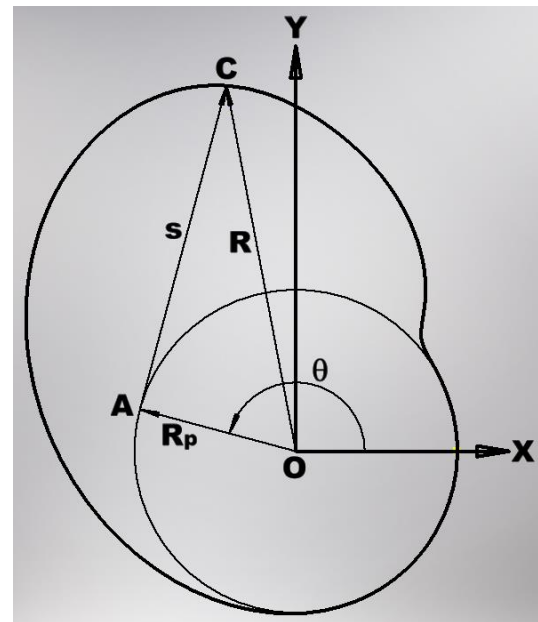


Figura 2 Curva de trazo
Fuente: Elaboración Propia

Familia de circunferencias

La ecuación de la familia de circunferencias que representan al rodillo, en sus diferentes posiciones, es:

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = (R_r)^2 \quad (9)$$

Parte de la familia de circunferencias se muestran en la Figura 3, los perfiles interior y exterior de la leva deben ser tangentes a todos los miembros de la familia.

Para lograr tal tangencia, es necesario resolver simultáneamente la ecuación (9) y su derivada como se indica en la sección siguiente; obteniendo así una solución teóricamente exacta, cuya inexactitud dependerá solo de la discretización. Usar un offset para generar los perfiles interior y exterior de la leva, produciría una solución con mucha menor exactitud.

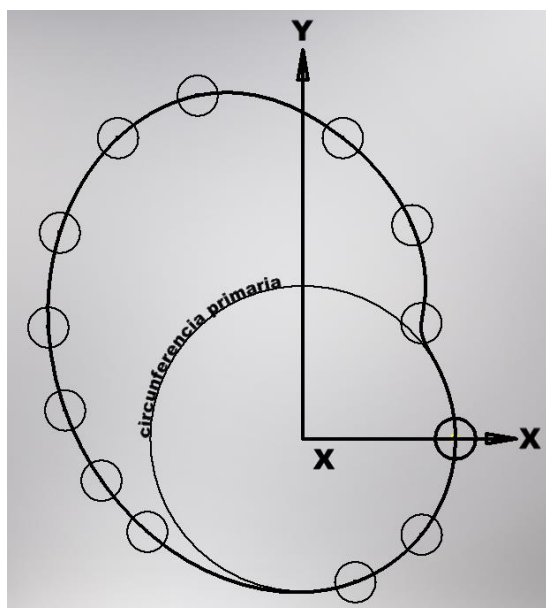


Figura 3 Circunferencias representando al rodillo
Fuente: Elaboración Propia

Perfiles de leva

Usando $\frac{dh}{d\theta} = h'$, $\frac{dk}{d\theta} = k'$, y $\frac{ds}{d\theta} = s'$; la derivada de la ecuación (9) es:

$$2(x - h)(-h') + 2(y - k)(-k') = 0 \quad (10)$$

Al resolver simultáneamente las ecuaciones (9) y (10), se obtienen las ecuaciones (11) y (12) para las coordenadas de los perfiles, tangentes a la familia de circunferencias.

$$y = k \pm \sqrt{\frac{(R_r)^2(h')^2}{(h')^2 + (k')^2}} \quad (11)$$

$$x = h \pm \sqrt{(R_r)^2 - (y - k)^2} \quad (12)$$

En las cuales, de las ecuaciones (7) y (8):

$$k' = R_p \cos\theta + s' \sin(1.5\pi + \theta) + (s) \cos(1.5\pi + \theta) \quad (13)$$

$$h' = -R_p \sin\theta + (s') \cos(1.5\pi + \theta) - (s) \sin(1.5\pi + \theta) \quad (14)$$

Para las diferentes secciones, la derivada de s con respecto a θ es:

$$s' = \left(\frac{L_1}{\beta_1}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\theta}{\beta_1}\right)\right] \quad (15)$$

$$s' = \frac{v}{\omega} \quad (16)$$

$$s' = \left(\frac{\pi L_3}{2\beta_3}\right) \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\beta_3}\right) \quad (17)$$

$$s' = -\left(\frac{\pi L_4}{2\beta_4}\right) \left[\sin\left(\frac{\pi\theta}{\beta_4}\right) + \frac{1}{2}\sin\left(\frac{2\pi\theta}{\beta_4}\right)\right] \quad (18)$$

Usando las ecuaciones (11) a (14) y una de las ecuaciones de la (15) a la (18), de acuerdo a la sección correspondiente, se obtienen las coordenadas de los perfiles de la leva, ver Figura 4. Dadas las dos soluciones de la ecuación de segundo grado, para determinar los perfiles interior y exterior, se seleccionaron de manera lógica las raíces positiva y negativa de las ecuaciones (11) y (12).

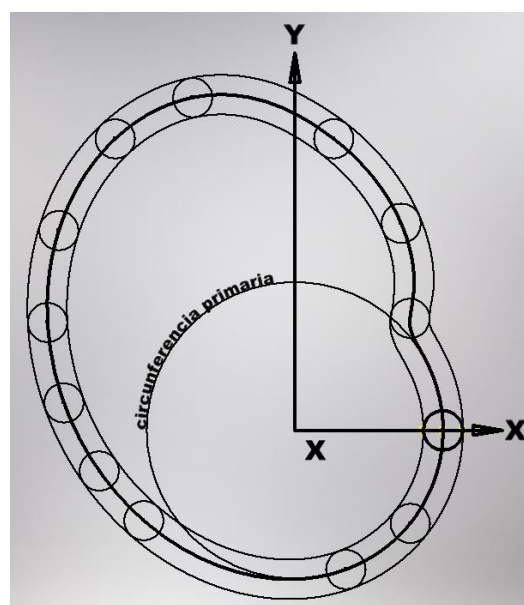


Figura 4 Perfiles de leva
Fuente: Elaboración Propia

Eslabones

Los archivos gráficos de base, leva, rodillo y seguidor; se controlaron geoméricamente en función de los parámetros, registrados en una hoja electrónica de cálculo, R_p y R_r . En la Figura 5 se muestra un ejemplo.

Es posible parametrizar todas las dimensiones angulares o longitudinales de los eslabones del sistema; el usuario deberá decidir cuantos y cuales se parametrizan y cuantos y cuales son parametrizados de manera directa o indirecta; en la Figura 5 el radio del barreno en el rodillo se parametrizó de manera indirecta.

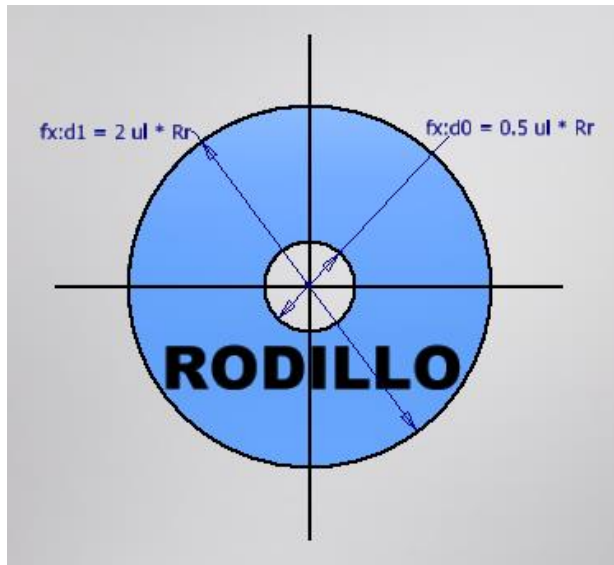


Figura 5 Ejemplo del parametrizado, rodillo
Fuente: Elaboración Propia

Ensamble y simulación

Considerando los grados de libertad, se instalaron las restricciones correspondientes para ensamblar los eslabones y simular la operación del mecanismo. La tangencia entre el perfil interior de la leva y el rodillo, junto con el ángulo dirigido entre el eje X de la base y el eje X de la leva; son las restricciones más importantes; esta última se manejó variando θ de 3 en 3 grados desde 0 hasta 360. Establecida la restricción de tangencia anterior, resultará redundante intentar establecer la tangencia entre el perfil exterior de la leva y el rodillo. El sistema ensamblado se muestra en la Figura 6. Una secuencia de la simulación se muestra en las Figuras 7 y 8. Con la regla, instalada a la derecha en las Figuras 6 a 8, pueden medirse los desplazamientos producidos por la rotación de la leva y compararlos con los calculados.

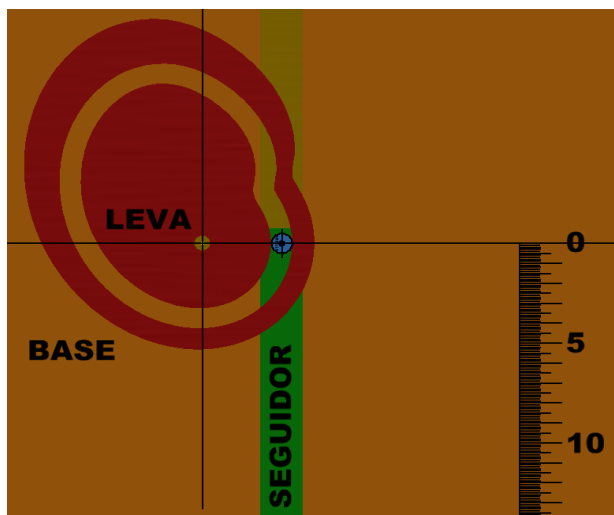


Figura 6 Ensamble en posición inicial, $\theta_2 = 0^\circ$
Fuente: Elaboración Propia

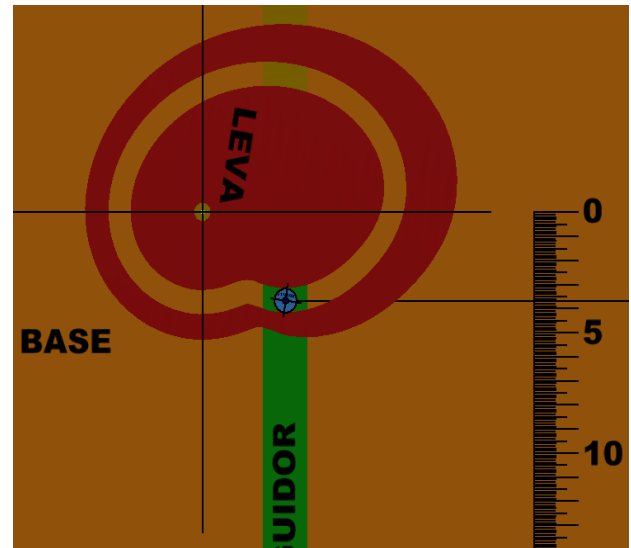


Figura 7 Simulación del sistema $\theta_2 = 100^\circ$
Fuente: Elaboración Propia

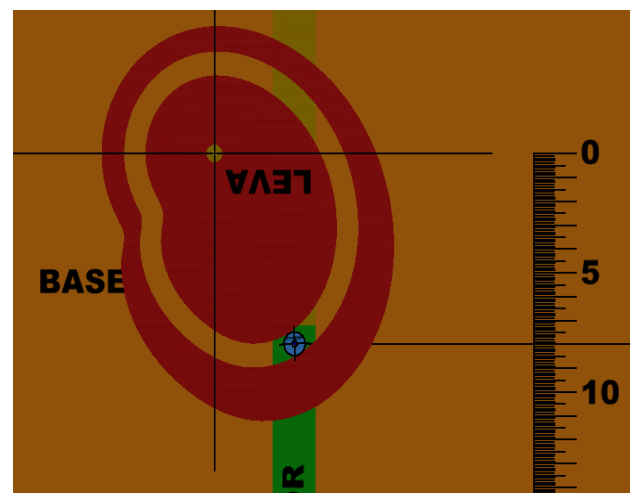


Figura 8 Simulación del sistema $\theta_2 = 180^\circ$
Fuente: Elaboración Propia

En las tres Figuras anteriores las posiciones del sistema corresponden a la carrera de ascenso del seguidor.

Resultados y discusión

E. Sanmiguel-Rojas y M. Hidalgo-Martínez^[7], proponen un nuevo mecanismo de leva de anchura constante con un seguidor de doble rodillo de radio negativo; diseñan el perfil de la leva con un método de optimización basado en las curvas de Bézier.

Harold A. R.^[16] afirma que en una leva involuta el contacto siempre ocurre en el mismo punto sobre la cara plana del seguidor; si localizamos dicho punto sobre la línea de movimiento del seguidor, los momentos que tiende a flexionar al seguidor son mínimos.

De manera análoga a los trabajos de E. Sanmiguel-Rojas y M. Hidalgo-Martínez; Acevedo P. C., Cardona F. S. y Bris C. J.; Cardona F. S., Zayas F. E. y Jordi N. L.; el diagrama de desplazamientos, la curva de trazo y los perfiles de leva tangentes a la familia de circunferencias se generaron con curvas spline graficadas por la computadora utilizando curvas de Bézier no paramétricas, definidas por polinomios de Berstein.

Considerando el concepto de mecanismo de leva de anchura constante utilizado por E. Sanmiguel-Rojas y M. Hidalgo-Martínez, cada integrante de la familia de circunferencias en las secciones 1, 3, 4, y 5 está sometido a dos fuerzas de la misma dirección y de sentido contrario que, en el mejor de los casos se anularán mutuamente.

De acuerdo a lo aseverado por Harold A. R. en relación a leva con perfil evoluta, puesto que el presente diseño lo consideró; el ángulo de presión en aquellos integrantes de la familia de circunferencias en la sección 2 es 0° . Deberá observarse que en la Figura 7 correspondiente a una imagen de posiciones en la sección 2, efectivamente el ángulo de presión es cero. Con la hoja electrónica de cálculo controlamos los archivos gráficos tanto de los eslabones como del mecanismo.

Es posible cambiar los parámetros de entrada (ω , v , L_2 , T_5 y L_4) y actualizar los cálculos de las coordenadas de la curva de trazo. Las coordenadas de los perfiles interior y exterior de la leva pueden actualizarse relativamente fácil, considerando con criterio geométrico el uso lógico de los signos positivo y negativo de la doble solución de la ecuación de segundo grado. Es importante hacer notar que del valor particular de v dependerá la excentricidad del sistema para lograr ángulo de presión igual a cero, en todas las imágenes de posiciones del sistema correspondientes a la sección 2 y, por lo tanto, el valor de R_p .

La diferencia de los desplazamientos medidos, usando la simulación del ensamble, y los calculados fue mínima; por ejemplo, para $\theta_2 = 100^\circ$ el desplazamiento medido es 3.7 (ver Figura 7) y el calculado 3.67632389399866, para $\theta_2 = 180^\circ$ la medición es 8 (ver Figura 8) y el cálculo es 7.98422161502756; constatándose la exactitud del procedimiento gráfico, el cual es función de la discretización del ángulo de giro de la leva.

Por lo amigable del procedimiento fue posible obtener un diseño en el cual la parte concava de la leva, con radio variable, es tal que el radio del rodillo resultó siempre menor a los radios en dicha parte concava de la leva; ver Figura 7.

Conclusiones

Tanto para ambientes académicos o industriales los resultados del presente trabajo permiten el diseño, tan exacto como se requiera, fácil y amigable de sistemas leva seguidor análogos en forma al presentado; permitiendo cambios lógicos en los parámetros de entrada. La simulación permite hacer pruebas del mecanismo en poco tiempo. En caso de existir radios de curvatura, menores que el radio del rodillo, en partes cóncavas del perfil interior de la leva, pueden detectarse fácilmente y corregirse; aspectos importantes desde el punto de vista de la cinemática, de la fabricación, instalación, operación, capacitación y mantenimiento pueden resaltarse visualmente para optimizar el mecanismo así como los procesos industriales mencionados. El presente trabajo puede mejorarse si se logra vincular las coordenadas de las curvas correspondientes a los perfiles interior y exterior de la leva.

Agradecimiento

Los autores agradecemos el apoyo institucional de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la Unidad Azcapotzalco, en particular a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería y al Departamento de Energía.

Referencias

- Aan A., Heinloo M., Allas J. (2014). Design of a Radial Cam for the Cam-Follower Mechanism, *9th International DAAAM Baltic Conference INDUSTRIAL ENGINEERING, Tallinn, Estonia*, 11-16.
- Acevedo P. C., Cardona F. S., Bris C. J. (2004), Diseño de perfil de levas por curvas de Bézier, *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte*. 16, 20-31.
- Aziz E. S., (2008). Teaching and Learning Enhancement in Undergraduate Machine Dynamics, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cae.20306>, 244-255.

- Bi J. P., Wang X. L. (2012), Development of Cam Design and Simulation System, *Advances Materials Research*, 476-478, 805-808.
- Cardona F. S., Zayas F. E., Jordi N. L. (2009). Síntesis de leyes de desplazamiento en levas de anchura constante con palpador plano en traslación, *Noveno Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 15, 19-26.
- Gudiño-L, Jorge, Linares-Ramírez, E., Charre, S. y Duran, M. (2016). Desarrollo de entornos virtuales aplicados a dispositivos hápticos. *Revista de Sistemas Computacionales y TIC's*, 2-6; 124-131.
- Han L., He P. (2011), A Rapid Cam Design and Manufacturing System and Its Verification, *Advanced Materials Research*, 320, 185-190.
- Harold A. R. (2004). *CAM DESIGN HANDBOOK*. Teaneck, New Jersey: Mc Graw-Hill HANDBOOKS, pp. 459-460.
- Hasimoto B. R., Ashfaq A. K. (2006). Spatial Error Concealment Base don Bézier Curves. *Computación y Sistemas*, 9(3), 256-269.
- Liu Q. L. et al. (2012). The Parametric Simulation Design Method of Conjugate Cams of Automatic Pin Insertion Machine Based on Creo Parametric Software, *Applied Mechanics and Materials*, 236-237, 1201-1204.
- Liu Y. X. y Peng R. S., Design for Deep Groove Ball Bearing Assambly Machine's Cam Drive System Based on Parametric Modeling, *Advances Materials Research*, 328-330, 63-66.
- Sandu G., Cofaru C., Jelenschi L. (2012). Design of the Cam Profile for a Roller Finger Follower Valve Train, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series I: Engineering Sciences*. 5, 19-24.
- Sanmiguel-Rojas, E., Hidalgo-Martínez, M. (2016). Cam mechanisms based on a double roller translating follower of negative radius, *Mechanism and Machine Theory*, 95, 93-101.
- Sun J., Tang Z. (2011), The Parametric Design and Motion Analysis about Line Translating Tip Follower Cam Mechanism Based on Model Datum Graph. *Procedia Engineering*, 23, 439-444,.
- Yañez V. R., Bautista M. L., Cuenca J. F., López P. M. (2017), Diseño de un sistema leva seguidor cilíndrico desmodrómico para generar desplazamientos lineales recíprocos, *Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 326-333.
- Zhang G., et al., (2013). Parametric Modeling for Globoidal Cam Based and NC Machining, *TELKOMNIKA*, 11(2), 797-802.