

# Aportaciones a la síntesis de levas desmodrómicas

Enrique Ernesto Zayas Figueras\*, Salvador Cardona i Foix\*\*,  
Heriberto Maury Ramírez\*\*\*

## Resumen

Los mecanismos de leva-palpador se utilizan ampliamente en diferentes industrias como la automotriz, la de maquinaria, la textil, etc., por las ventajas que poseen; sin embargo, los mecanismos de levas desmodrómicas son en general poco tratados en la bibliografía especializada. En este artículo se presenta el estado del arte del tema Levas con Cierre Geométrico, y se hace énfasis en el estudio de levas de anchura constante y levas conjugadas. Se exponen dos métodos analíticos desarrollados por los autores para la obtención del perfil de los dos tipos de levas antes citados. Se establecen las restricciones en el diseño para la generación del perfil de levas de anchura constante como caso particular de las conjugadas. Los métodos analíticos de perfilado se proponen para mecanismos en los que el palpador tiene movimiento de traslación. **Palabras clave:** Cierre geométrico, levas conjugadas, anchura constante, desmodrómico, perfilado de levas.

## Abstract

Cam-follower mechanisms are widely used in different industries like, ie., automotive industry, machinery one, the textile one, etc., for the advantages that possess; however, the desmodromic cam mechanisms are in general not very treated in the bibliography that approaches the topic. In this paper the state of the art of cam mechanisms with form-closed higher pair is presented, making emphasis in the study of the constant-breadth and conjugated cams. In order to obtain the profile of these kind of cams, two analytical methods are proposed. Constrains in the design of the constant-breadth cam as a particular case of the conjugate cams are established. The analytical methods are applied to cam mechanisms with translating follower.

**Key words:** Geometric closed, conjugated cams, constant breadth, desmodromic, cam profiles.

Fecha de recepción: 3 de septiembre del 2001

\* Doctor Ingeniero Industrial. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín (Cuba). Departamento de Ingeniería Mecánica, ETSII Barcelona. UPC, (zayas@em.upc.es.)

\*\* Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático del Departamento de Ingeniería Mecánica, ETSII Barcelona. UPC. Av. Diagonal, 647. 08028. Barcelona. Tel. 93 401 65 88. Fax: 93 401 58 13. (cardona@em.upc.es.)

\*\*\* Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Grupo de Investigación en Materiales y Procesos (GIMYP). Km. 5 carretera a Puerto Colombia, Barranquilla (Colombia). (hmaury@uninorte.edu.co.)

## 1. INTRODUCCIÓN

Los mecanismos de leva-palpador se utilizan frecuentemente en muchas clases de máquinas, por ejemplo: en motores de combustión interna, telares, máquinas herramientas, sistemas robóticos, etc. Estos mecanismos son sencillos y poco costosos, tienen pocas piezas móviles y son compactos. Además no son difíciles de diseñar leyes de movimientos del palpador que tengan cualquier característica deseada y los perfiles de levas que proporcionan el movimiento al palpador según la ley requerida son mecanizados por máquinas de control numérico. Todo ello hace que se utilicen ampliamente en la maquinaria actual.

El enlace leva-palpador es en principio unilateral, ya que se establece por contacto directo, puntual o lineal, entre las superficies de ambos elementos (par cinemático superior). Para garantizar el contacto entre superficies (cierre del par) se recurre, si es necesario, a elementos adicionales como por ejemplo muelles que comprimen el palpador contra la leva. Otra alternativa, es utilizar dos pares superiores conjugados (*cierre geométrico o levas desmodrómicas*) de manera que ambos impongan la misma restricción cinemática garantizando la bilateralidad global: la pérdida de contacto en uno de los pares queda impedida por el otro par.

La mayor parte de la bibliografía que aborda el tema de los mecanismos de levas de anchura constante y de levas conjugadas lo hace de manera breve. Rothbart [1956] realiza una clasificación importante de estos mecanismos e introduce ejemplos de los métodos gráficos de obtención del perfil de la leva. Kozhenikov [1981] presenta ejemplos de aplicación de levas demodrómicas, sin exponer los métodos de perfilado de las mismas. Wilson y Sadler [1993] estudian las levas demodrómicas de manera muy breve. Koloc y Váklavík [1993] tratan someramente estas levas; sólo exponen un análisis donde se deduce que una leva de anchura constante es un caso particular de un mecanismo de levas conjugadas. Huang [1993] analiza la combinación de curvas de desplazamiento para la síntesis de perfiles conjugados. Chang [1994] realiza el análisis y la síntesis de un mecanismo de barras en el cual se introducen dos pares leva-rodillo como pares de movimiento. Chunhong, *et al.* [1996] exponen el diseño analítico de un mecanismo de levas conjugadas utilizadas en el mecanismo tejedor usual de los telares. Hong-Sen y Hung-Ming [1996] estudian los efectos de los errores de fabricación para levas planas conjugadas con palpadores oscilantes y establecen un modelo dinámico de tres grados de libertad. Neamtu *et al.* [1996] plantean que resultaría una aplicación interesante el diseño de perfiles de levas de diámetro constante con la utilización de las curvas splines focales. Zhang [1997] expone un ejemplo de diseño analítico de un mecanismo de levas conjugadas utilizadas en un accionamiento para los telares flexibles. En la bibliografía citada se utilizan métodos analíticos de perfilado de levas donde el diseñador se ve involucrado en desarrollos matemáticos engorrosos.

El objetivo del presente trabajo es exponer dos métodos analíticos propuestos por los autores para la generación de perfiles de levas conjugadas y de anchura constante, sin desarrollos matemáticos complejos.

## 2. ASPECTOS GENERALES

Los mecanismos de levas se clasifican teniendo en cuenta varios criterios. De acuerdo al tipo de cierre del par cinemático superior formado entre la leva y el palpador, los mecanismos de leva-palpador son:

1. *Con cierre por fuerza:* Se requiere la aplicación de una fuerza externa que actúa sobre el palpador (el peso del palpador o la fuerza de un muelle) con el objetivo de mantener el contacto leva-palpador (figura 2.1).
2. *Con cierre geométrico o por forma:* Se garantiza el contacto permanente leva-palpador a través de la configuración geométrica de dichos elementos. Existen dos casos: uno en que leva y el palpador mantienen siempre dos puntos opuestos en contacto (figura 2.2a) y otro en el que existe una doble leva que contacta con un doble palpador, impulsándolo en todo el ciclo de movimiento (figura 2.2b). Estas levas se denominan *desmodrómicas*.

Existen cuatro tipos de mecanismos de leva-palpador desmodrómicos planos: el de leva de cara ranurada, de anchura constante, de diámetro constante y de levas conjugadas. En este artículo se hace referencia a los tres últimos mencionados.

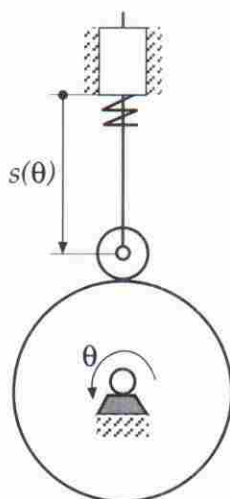


Fig 2.1 Mecanismo de leva con cierre por fuerza

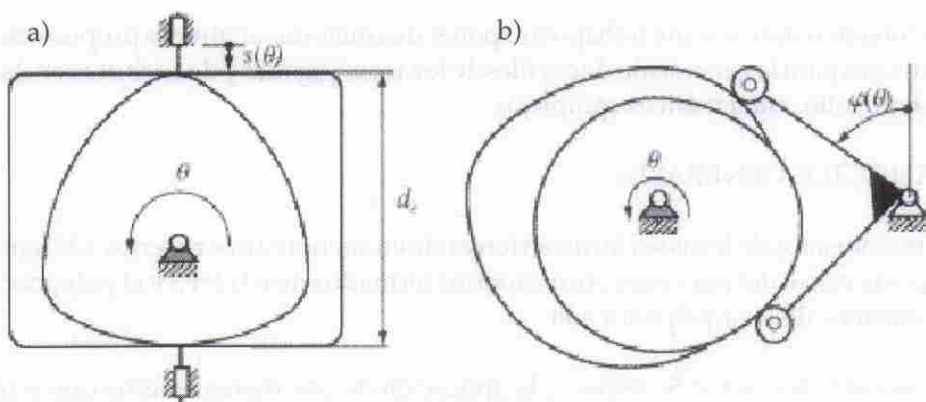


Fig. 2.2 Levas desmodrómicas: a) De anchura constante y b) Conjugadas

Los mecanismos de leva de anchura y de diámetro constante tienen la característica de mantener una distancia constante  $d_c$  entre dos puntos opuestos de contacto leva-palpador. Si el doble palpador es de cara plana, entonces la distancia  $d_c$  se mide entre dos tangentes al perfil de la leva, trazadas de manera que éstas sean paralelas; esta leva se denomina de *anchura constante* (figura 2.2a). Una leva de excéntrica, cuyo perfil es un círculo de un diámetro determinado, constituye un ejemplo sencillo de leva de anchura constante. En el caso de un doble palpador de rodillo o puntual (caso particular donde el radio del rodillo es cero), la distancia  $d_c$  se mide diametralmente entre los puntos de contacto leva-palpador; en estos casos, el perfil de leva se denomina de *diámetro constante*.

Los mecanismos desmodrómicos se utilizan en diferentes tipos de máquinas. Por ejemplo, la cadena cinemática de las máquinas de coser tradicionales disponen de dos levas de anchura constante, la primera de las cuales está montada en el árbol principal de la máquina y a través de ella se controla en movimiento de avance de los dientes que arrastran la tela. La segunda leva de anchura constante permite, a través del eslabonamiento que acciona, controlar el movimiento de subida y bajada de los dientes de arrastre. Con la conjugación de los movimientos antes mencionados se logra controlar el espaciado entre puntadas.

Los mecanismos de levas conjugadas (también llamadas dobles o adjuntas) constan de dos levas montadas sobre un mismo árbol, cuyos perfiles son conjugados entre sí (figura 2.2b). Estas levas accionan un doble palpador de rodillo, plano o puntual con movimientos de rotación o de traslación. El doble palpador de rodillo proporciona un mejor funcionamiento respecto al doble palpador plano y al puntual, debido al movimiento de rodadura que introduce el par superior, lo cual disminuye el desgaste entre la leva y el palpador y aumenta la eficiencia del mecanismo. Estos

mecanismos son empleados en trenes de válvulas de motores de combustión interna de automóviles y motocicletas, en máquinas textiles, etc.

La ventaja principal de los mecanismos de leva desmodrómicos es que no necesitan resorte de retorno, y por tanto pueden funcionar a mayores velocidades que los mecanismos con cierre del par superior por fuerza, en los cuales el comportamiento dinámico del sistema muelle-palpador, para ciertas velocidades de la leva, puede producir la pérdida de contacto leva-palpador, aspecto éste no deseado.

### 3. MÉTODO DE PERFILADO PARA LEVAS DE ANCHURA CONSTANTE DE ARCO CIRCULAR

El perfil de las levas de anchura constante puede estar formado por arcos de círculos o por curvas convexas no circulares.

El método que se expone para la obtención de perfiles de anchura constante de arco circular consiste en tomar un número cualquiera de rectas (tres en el ejemplo que se expone) de inclinación creciente, que se cortan dos a dos y haciendo centro en el punto de intersección de dos rectas consecutivas trazar un arco de circunferencia con un radio determinado, quedando el arco limitado por dichas rectas. Cada arco de circunferencia trazado entre dos rectas consecutivas se enlaza con el siguiente con continuidad  $C^1$ , ya que los centros de curvatura de cada arco y el punto de unión entre ellos están alineados (ver figura 3.1a).

Para determinar la ley de desplazamiento del palpador se parte de considerar la base móvil 1, 2 solidaria a la leva girando junto con esta, y la base fija  $x, y$  solidaria al palpador. Se hace girar la leva respecto al palpador un cierto ángulo  $\theta$  en el sentido de las agujas del reloj (ver figura 3.1a). El desplazamiento está dado por la primera componente del vector  $\overline{CP}$  en la base fija  $x, y$ . La expresión general para el cálculo del vector  $\overline{CP}$  en la base fija es:

$$\{\overline{CP}\}_{x,y} = [S_\theta] \cdot \{\overline{CP}_i\}_{1,2} + \{\overline{P_iP}\}_{x,y} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

$\theta$  ángulo de giro de la leva,

$i$  subíndice de los puntos de intersección entre las rectas

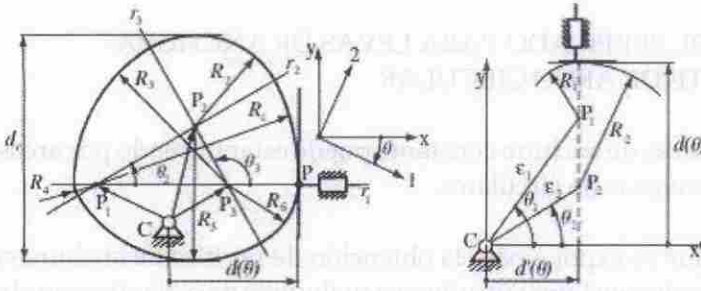
La ley de desplazamiento del palpador  $d(\theta)$  así obtenida tiene la característica de que el movimiento del palpador desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , es el inverso del que realiza desde  $180^\circ$  a  $360^\circ$ , de manera que se cumple:  $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$ . Ésta se denomina *ley de anchura constante*.

Del análisis de la figura 3.1b se observa que en el punto de unión de dos tramos sucesivos:

$$d(\theta_1) = \varepsilon_1 \sin \theta_1 + R_1; \quad d'(\theta_1) = \varepsilon_1 \cos \theta_1; \quad d''(\theta_1) = -\varepsilon_1 \sin \theta_1; \quad \varepsilon_1 = \overline{CP_1} \quad (2)$$

$$d(\theta_2) = \varepsilon_2 \sin \theta_2 + R_2; \quad d'(\theta_2) = \varepsilon_2 \cos \theta_2; \quad d''(\theta_2) = -\varepsilon_2 \sin \theta_2; \quad \varepsilon_2 = \overline{CP_2} \quad (3)$$

Es fácil ver que  $d'(\theta_1) = d'(\theta_2)$  y que  $d''(\theta_1) \neq d''(\theta_2)$ , de lo cual se deduce que la ley de desplazamiento tiene continuidad, si los cambios de curvatura de los tramos son finitos.



**Figura 3.1.** Figuras de análisis: a) Generación de levas de anchura constante, b) Continuidad de la ley de desplazamiento del palpador.

#### 4. MÉTODO GENERAL PERFILES DE LEVAS CONJUGADAS Y DE ANCHURA CONSTANTE

La generación analítica del perfil de levas se basa en la teoría de las envolventes. En Cardona y Clos [2000] se expone el método analítico general para obtener el perfil de la leva teniendo el palpador cualquier perfil. Para palpadores de tipo plano, circular y puntual, se expone un método basado en el análisis cinemático que proporciona la expresión explícita del perfil. El método de perfilado para levas conjugadas y de anchura constante, que se expone, se basa en este método.

Se parte de una ley de movimiento del palpador requerida  $S(\theta)$  y de los parámetros geométricos:  $d_0$  (distancia desde el centro de rotación de la leva hasta el punto en que comienza a desplazarse el palpador),  $\varepsilon$  (excentricidad del palpador),  $R_r$  (radio de los rodillos, para palpadores de rodillos) y  $d_c$  (distancia que existe entre el palpador superior y el palpador inferior).

En el método que se expone, los perfiles de las levas que forman el mecanismo se obtienen secuencialmente. Primero se obtiene el perfil de la leva que está en contacto con el palpador superior, y luego se genera el perfil de la leva que está en contacto con el palpador inferior.

El método se expone tomando como ejemplo un mecanismo de levas planas conjugadas con doble palpador plano con movimiento de traslación (ver figura 4.1).

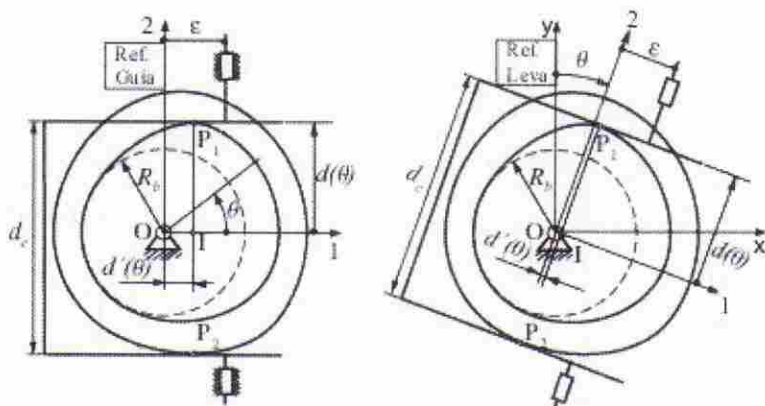


Figura 4.1. Esquema de análisis. *Inversión cinemática*

Para el primero y segundo perfil, las expresiones de cálculo son las siguientes:

- En la base móvil 1, 2 el vector  $\overline{OP}_i$  tiene por componentes:

$$\left\{ \overline{OP}_i(\theta) \right\}_{1,2} = \begin{Bmatrix} d'_i(\theta) \\ d_i(\theta) \end{Bmatrix}_{1,2} \quad d_1(\theta) = d_0 + S(\theta); \quad d_2(\theta) = (d_0 - d_c) + S(\theta) \quad (4)$$

donde:  $i = 1, 2$  subíndices correspondientes al primer y segundo perfil,

$d_i(\theta), d'_i(\theta)$  desplazamiento y velocidad del palpador  $i$ .

- En la base fija  $x, y$  solidaria a la leva, la ecuación paramétrica del perfil es:

$$\left\{ \overline{OP}_i(\theta) \right\}_{x,y} = [S_\theta] \left\{ \overline{OP}_i(\theta) \right\}_{1,2} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Utilizando este método e imponiendo las restricciones: distancia  $d_c = 2 \cdot R_b + S(\theta)_{\max}$ , ley de movimiento del palpador tipo anchura constante y excentricidad cero  $\epsilon = 0$  (en el caso de palpadores de rodillos o puntuales), se obtienen perfiles de anchura y de diámetro constante (ver figura 4.2.).

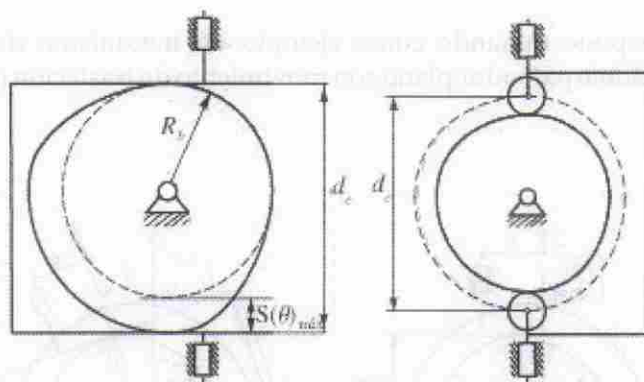


Figura 4.2. Levas de anchura y diámetro constante

## CONCLUSIONES

- En la bibliografía que aborda el tema se ha estudiado poco los mecanismos de levas con cierre geométrico, así como los métodos analíticos para la generación del perfil de leva en los mismos.
- Se ha propuesto un método analítico para generar perfiles de anchura constante. La ley de movimiento del palpador que se obtiene con los perfiles así generados tiene continuidad  $C^1$  y en ella se cumple que:  
 $d(q) + d(q + p) = \text{constante}$ . Ésta se ha denominado *ley de anchura constante*.
- Se ha formulado un método analítico general para obtener perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, como caso particular de las conjugadas, con desarrollos matemáticos pocos complejos.
- Los métodos propuestos han sido validados aplicándolos a casos concretos, pero por limitaciones de espacio no se describen.

## Bibliografía

- CARDONA, S. Y CLOS, D. (2000). *Teoría de Màquines*(segunda edición en catalán). Barcelona: Ediciones UPC, P. 248.
- CHUNHONG, L. *et al.* (1996). The Design of a New Outside Conjugate Cams for Shedding Mechanism. *Journal of China Textile University*, Vol. 13, N° 1, p. 38-44.
- HONG-SEN, Y. & HUNG-MING, T. (1996). The Effects of Manufacturing Errors on Planar Conjugates Cams. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. 17, N° 2, p. 145-153.



- HUANG, G. (1993). Investigation of Conjugate-cam Desing for the Beat-up Mechanism. *Journal of Textile Institute* (Tianjin Institute of Textile Science and Technology), Vol. 84, N° 3. p. 387-393.
- KOZHEVNIKOV, S. N. (1981). Mecanismos de Levas". en Kozhevnikov, *Mecanismos*. Barcelona: Gustavo Gili, p. 307-367. 579-585.
- KOLOV, Z. & VÁCLAVIK, M. (1993). 'Specials Cams<sup>a</sup> en Studies in Mechanical Engineering 14. *Cam Mechanisms*. Polygrafia, a.s. Praga, p. 349-353.
- NEAMTU, M., POTTMAN, H. & SCHUMAKER, L. (1996). Homogeneous Splines and Rotational Curves whit Rotational Offsets. Technische Universität Wien. Institut für Geometrie. Technical Report. N° 29, p. 17.
- ROTHBART, H. (1956). *Cams, Design, Dynamics and Accuracy*. New York: John Wiley & Sons.
- ZHANG, J. & BI, L. (1997) Conjugate Cam with Five-bar Linkage Mechanism for Rapier Drive of Flexible Rapier Looms. *Journal of China Textile University*, Vol. 14. N° 4, 1997, p. 71-75.