

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y objetivos

La Tesis Doctoral **Aportación al estudio de levas desmodrómicas** se enmarca en la línea de investigación Teoría de Máquinas y Vibroacústica que se desarrolla en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSEIB en la Universidad Politécnica de Cataluña.

El interés del tema se debe a la importancia que tienen los procedimientos de síntesis y análisis de mecanismos dentro del diseño de máquinas, que apoyados en las posibilidades de los medios actuales de cálculo, permiten sintetizar los mecanismos, simular su funcionamiento y evaluarlos. Así, se puede seleccionar la disposición más adecuada antes de la fabricación con las consiguientes ventajas tanto desde el punto de vista económico como funcional.

En el estudio de los mecanismos leva-palpador, objeto de investigación en el presente trabajo, se ha determinado que la bibliografía especializada que los trata, aborda fundamentalmente a los mecanismos leva-palpador planos en los que el cierre del par se realiza por fuerza, debido a que son los más utilizados en la práctica. Sin embargo, el estudio de los mecanismos leva-palpador planos desmodrómicos (con cierre geométrico del par superior), es un tema de manera general poco analizado, fundamentalmente en lo referente a los mecanismos de levas de anchura constante y conjugadas, también utilizados en diferentes industrias como la textil, la del automóvil, etc. Esto ha sido el motivo para desarrollar la presente tesis, en la cual se realiza la síntesis del perfil de levas y se analizan las características de las leyes de desplazamiento del palpador en los mecanismos desmodrómicos antes citados.

En el trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

- Aportar fundamentos teóricos relacionados con el análisis y la síntesis de los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, en los casos de levas conjugadas y de anchura constante.
- Desarrollar un método analítico-geométrico para la generación del perfil de las levas de anchura constante. Estudiar las características de las leyes de desplazamiento del palpador en los mecanismos de levas de anchura constante obtenidos a partir de este método.
- Desarrollar un método analítico-vectorial de obtención del perfil de levas conjugadas y de anchura constante a partir de la definición de las leyes de desplazamiento del palpador con técnicas CAGD (*Computer Aided Geometric Design*).

Se considera prioritario que el usuario pueda obtener el perfil de las levas según el tipo de mecanismo que necesita, de levas conjugadas o de anchura constante, sin verse involucrado en desarrollos gráficos o analíticos complicados de manera que se facilite el diseño de estos mecanismos desmodrómicos.

En la misma línea de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica se desarrolló, una tesis doctoral titulada «Técnicas de Diseño Geométrico Asistido por Ordenador para Mecanismos Leva-palpador» [Reyes, 2000], que estudia la definición de las leyes de desplazamiento del palpador, y constituye una base para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

1.2 El mecanismo leva-palpador

Una *leva* es un elemento mecánico que sirve para impulsar a otro, por contacto puntual o lineal, llamado palpador o seguidor, para que este desarrolle una ley de movimiento especificada.

Un *mecanismo leva-palpador* consiste en dos miembros móviles, cada uno de ellos en principio con un grado de libertad y una coordenada generalizada independiente q_l y q_p para leva y palpador respectivamente, que se ponen en contacto a través de un par superior, ambos están unidos a un miembro fijo, llamado bastidor, a través de pares inferiores (Figura 1.1). De esta manera se obtiene un mecanismo de un sólo grado de libertad que establece una ley de dependencia $q_p(q_l)$ entre las coordenadas generalizadas que describen el movimiento de la leva y del palpador. Esta ley, se denomina usualmente *ley de desplazamiento del palpador*.

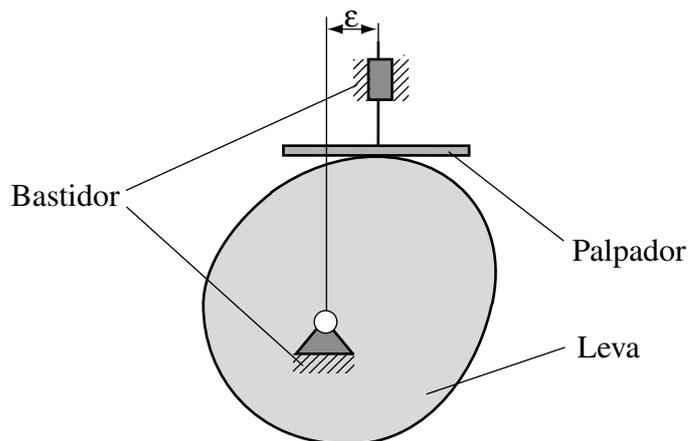


Fig. 1.1 Mecanismo leva-palpador

El movimiento de la leva, usualmente de rotación, se transforma en movimiento de rotación o traslación del palpador. Los mecanismos leva-palpador generalmente son utilizados como generadores de función. Estos son mecanismos sencillos y poco costosos, tienen pocas piezas

móviles y ocupan espacios muy reducidos. Además no son difíciles de diseñar leyes de movimiento del palpador que tengan casi cualquier característica deseada y los perfiles de leva que proporcionan el movimiento al palpador según la ley requerida son mecanizados por máquinas de control numérico. Por estas razones los mecanismos de leva-palpador se utilizan ampliamente en la maquinaria moderna.

1.3 Clasificación de los mecanismos leva-palpador

La versatilidad y flexibilidad en el diseño de los mecanismos leva-palpador se encuentran entre sus características más importantes. Ello conduce a una gran variedad de perfiles y combinaciones de leva-palpador, y a la necesidad de establecer una clasificación para diferenciar un mecanismo de otro.

La clasificación de los mecanismos leva-palpador puede hacerse teniendo en cuenta varios criterios, como son: la geometría de la leva, la geometría del extremo del palpador, el tipo de movimiento del palpador, el tipo de cierre del par superior y otros.

1.3.1 Según la geometría de la leva

De acuerdo a la geometría que tienen las levas, estas pueden ser: de disco (Figura 1.2 a), de cuña (Figura 1.2 b), cilíndricas (Figura 1.2 c), globoidales (Figura 1.2 d) y frontales –esféricas (Figura 1.2 e) y cilíndricas (Figura 1.2 f).

1.3.2 Según la geometría del extremo del palpador

De acuerdo con la geometría que presenta el extremo del palpador, estos se clasifican en:

1. Palpador circular o de rodillo (Figura 1.3 a)
2. Palpador puntual (Figura 1.3 b)
3. Palpador plano o de cara plana
 - Recto (Figura 1.3 c)
 - Inclinado (Figura 1.3 d)
4. Palpador curvo o en forma de hongo
 - Simétrico o de casquete esférico (Figura 1.3 e)
 - Asimétrico (Figura 1.3 f)

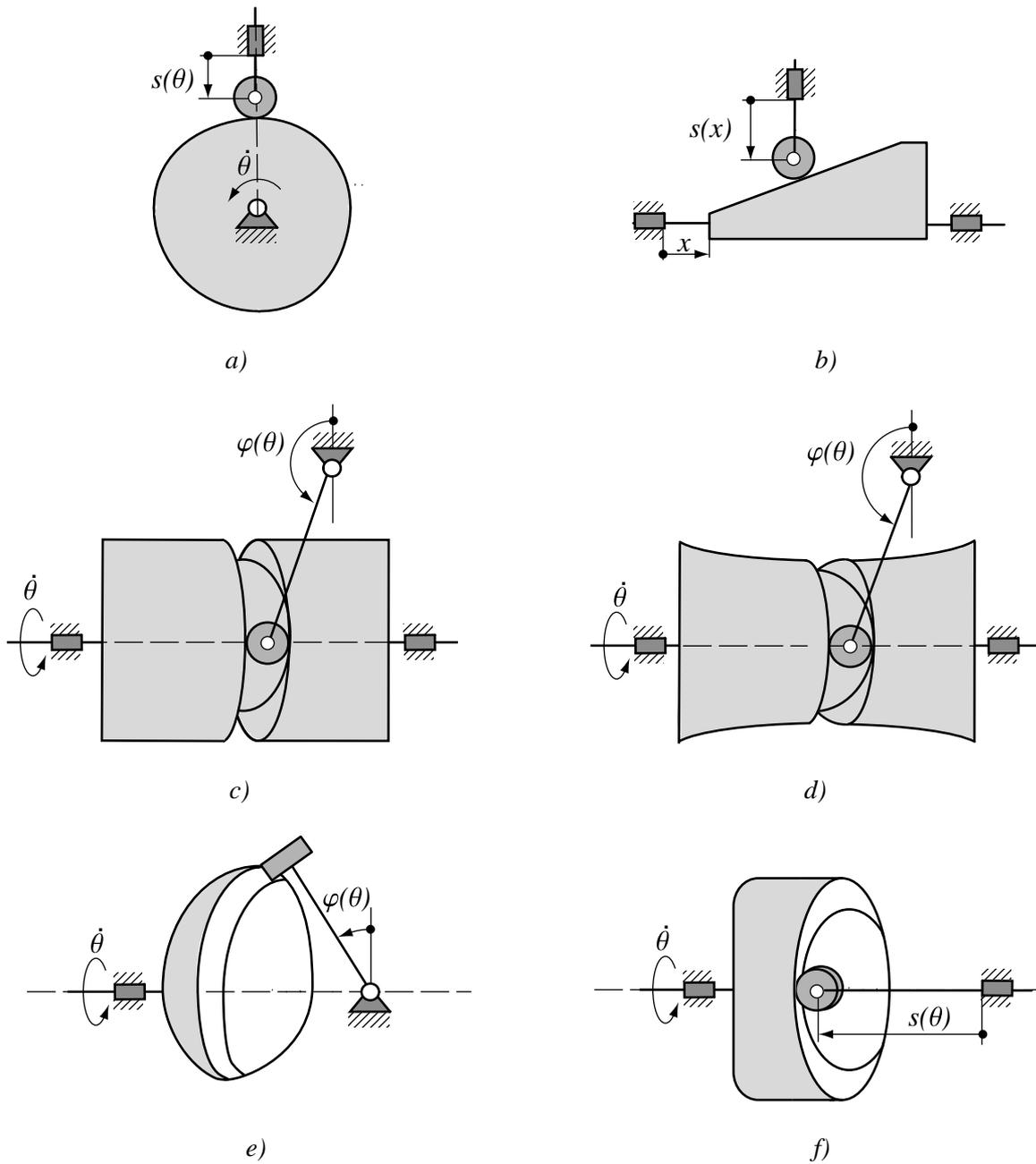


Fig. 1.2 Tipos de levas

1.3.3 Según el tipo de movimiento del palpador

De acuerdo con el tipo de movimiento que realiza el palpador, estos son:

1. Palpador con movimiento de traslación:
 - Excéntrico (Figura 1.1)
 - Axial (Figura 1.2 a)
2. Palpador con movimiento de rotación (Figura 1.3 g).

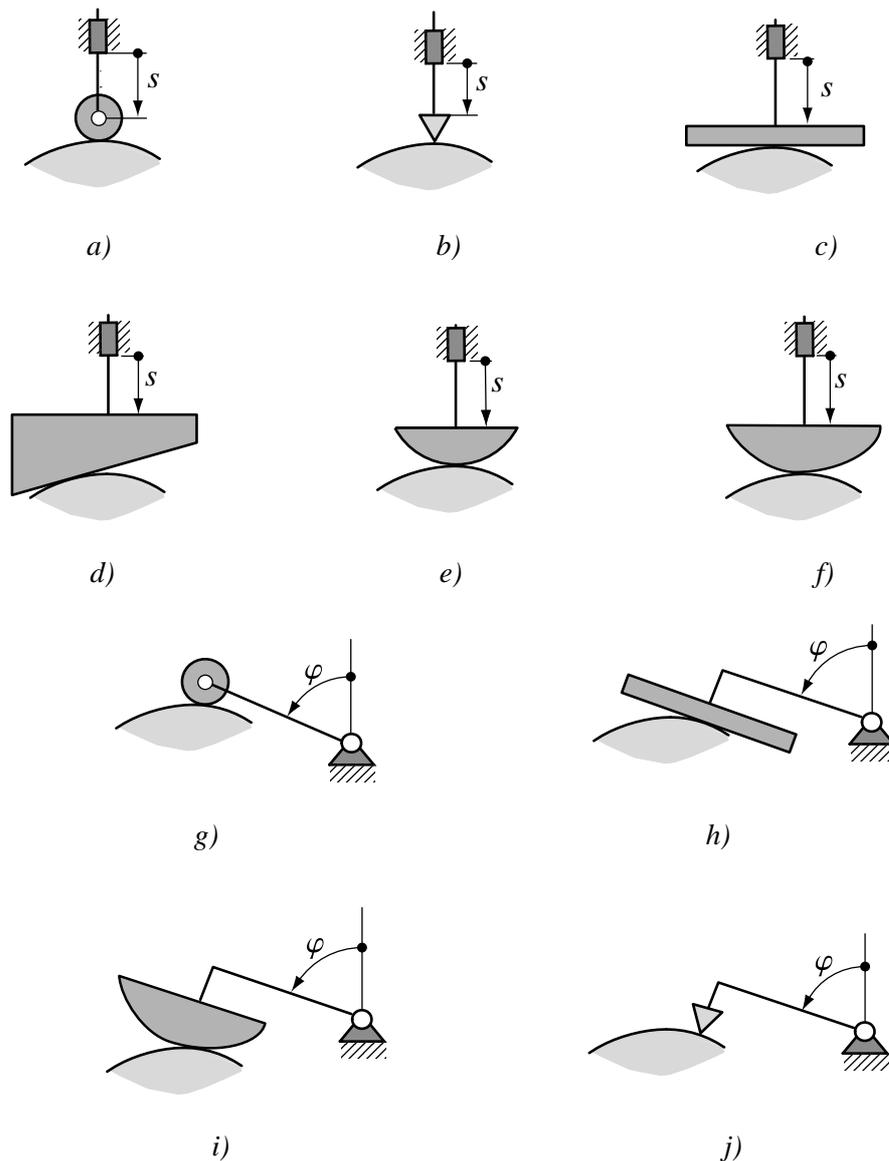


Fig. 1.3 Tipos de palpadores

1.3.4 Según el tipo de cierre del par superior

El enlace leva-palpador es, en principio, unilateral ya que se produce por contacto directo, puntual o lineal, entre las superficies de ambos elementos formando un par cinemático superior. El contacto permanente leva-palpador se puede conseguir de dos formas, estas 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 1.4).
2. *Con cierre 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 y otro en el que existe una doble leva que contacta con un doble palpador, impulsándolo en todo el ciclo de movimiento. Estas levas se denominan *desmodrómicas* (Figuras 1.5 a y b).

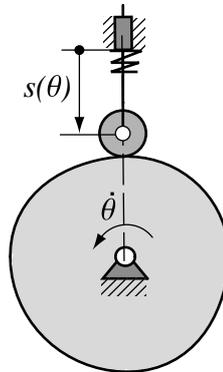


Fig. 1.4 Mecanismo de leva con cierre por fuerza

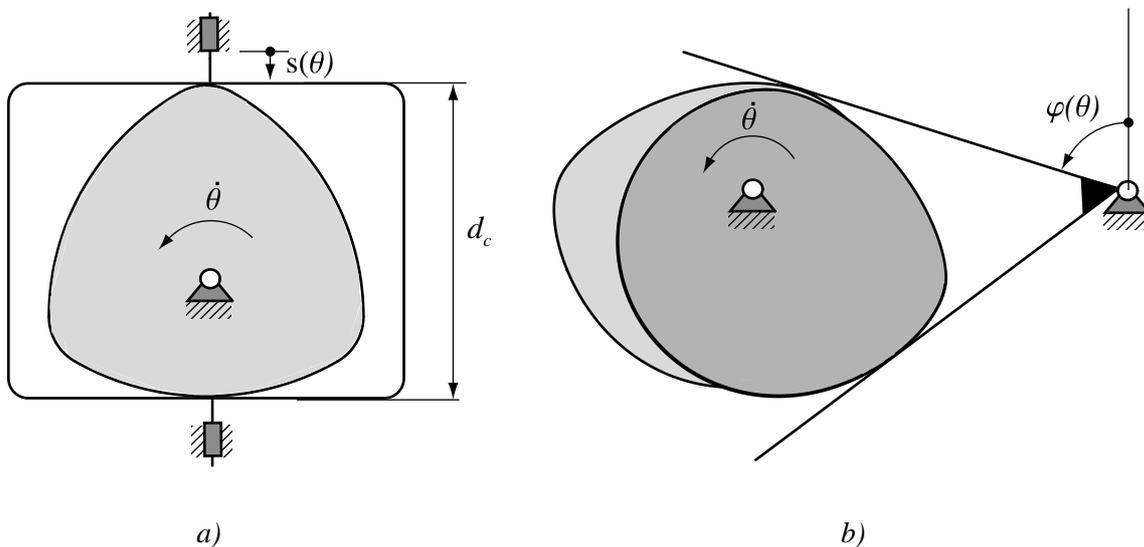


Fig. 1.5 Levas desmodrómicas: a) de anchura constante y b) conjugadas

1.3.5 Según el plano de movimiento de la leva y del palpador

En dependencia del plano de movimiento de la leva y del palpador, el mecanismo puede ser:

1. *Mecanismo leva-palpador plano:* Los movimientos de la leva y del palpador se realizan en un mismo plano o en planos paralelos, como son por ejemplo los mecanismos de la Figura 1.5.
2. *Mecanismo leva-palpador espacial:* Los movimientos de la leva y del palpador se realizan en planos diferentes no paralelos.

1.3.6 Según las restricciones impuestas al movimiento del palpador

En Norton [1995], se plantea una clasificación de los mecanismos leva-palpador de acuerdo con las restricciones impuestas al movimiento del palpador:

1. *De posición extrema crítica:* En las especificaciones de diseño de la ley de movimiento del palpador se definen sólo las posiciones inicial y final del mismo, pero no se especifica ninguna restricción al movimiento de la trayectoria entre ellas. Este es el caso más fácil en la definición de la ley del movimiento ya que el diseñador puede elegir según su criterio que función utilizar.
2. *De movimiento de trayectoria crítica:* Se especifican las posiciones inicial y final del movimiento del palpador, además de la trayectoria entre ellas, durante todo el intervalo de movimiento o parte de él. La definición de la ley de movimiento la impone la tarea tecnológica a realizar.

1.3.7 Según el tipo de programa de movimiento que ha de cumplir el palpador

Cuando la leva realiza un ciclo de movimiento, el palpador ejecuta una serie de eventos que consisten en alejamientos (S), acercamientos (B) y detenciones (D). Se toma como referencia las levas rotatorias por ser las más comunes. El alejamiento S es el movimiento que realiza el palpador al alejarse del centro de rotación de la leva, el acercamiento B es el movimiento que realiza el palpador al acercarse al centro de rotación de la leva y la detención D es el evento de movimiento durante el cual el palpador permanece a una misma distancia del centro de rotación de la leva mientras esta gira. La secuencia de estos eventos durante una vuelta completa de la leva determina un programa de movimiento para el palpador.

De acuerdo con lo planteado en la bibliografía consultada [Reyes, 2000; Norton, 1995 y Chen, 1982] se pueden establecer tres programas de movimiento para el palpador, estos son:

- *Alejamiento-Acercamiento ($S-B$):* Este es el programa más simple, aquí el palpador se aleja y se acerca al centro de rotación de la leva sin realizar ningún detenimiento durante el ciclo de movimiento. Este programa se adapta a una leva de excéntrica.
- *Alejamiento-Acercamiento-Detenimiento ($S-B-D$):* En este programa existe una detención antes del evento de alejamiento S y después del de acercamiento B , no hay detenimientos entre estos eventos.
- *Alejamiento-Detenimiento-Acercamiento-Detenimiento ($S-D-B-D$):* Existe un detenimiento en el movimiento del palpador después de los eventos alejamiento S y acercamiento B .

Los dos últimos programas de movimiento del palpador son los más adecuados siempre que se desea una detención del movimiento y son generalmente los más utilizados en la práctica. La combinación de dichos programas permite generar un nuevo programa de movimiento deseado.

1.3.8 Levas especiales

Existen mecanismos leva-palpador en los que la leva realiza tanto una rotación alrededor de su eje longitudinal como una translación a lo largo del mismo. En este caso, la posición del palpador depende de dos variables: el ángulo de giro θ de la leva y su desplazamiento longitudinal s . Este tipo de leva es llamada leva tridimensional o camoide (Figura 1.6).

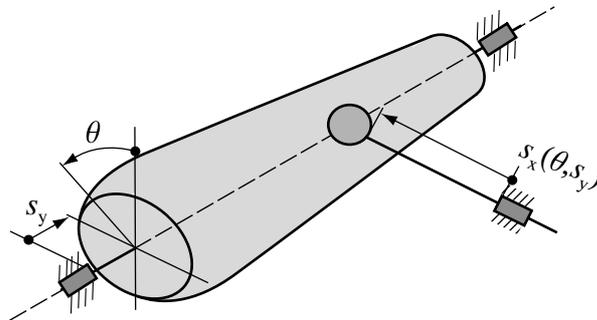


Fig. 1.6 Camoide

1.4 Mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos

En el apartado anterior se ha realizado una amplia clasificación de los mecanismos leva-palpador que permite diferenciarlos. En él se señalan los mecanismos de leva desmodrómicos como un tipo particular de estos.

El desarrollo de la presente tesis se centra en el estudio de los *mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos*, específicamente en los mecanismos de levas conjugadas o dobles y en los mecanismos con levas de anchura y diámetro constante. Por esta razón, a continuación se hace una caracterización más detallada de estos mecanismos.

Es importante destacar que estos mecanismos, en la bibliografía que los trata, son denominados de diferentes maneras; éstos son llamados: *mecanismos de leva con cierre geométrico del par superior* por Shigley (1988, p. 206) y por Norton (1995, p. 332), *levas de accionamiento positivo* por Rothbart (1956, p. 5) y Wilson y Sadler (1993, p. 378), *levas especiales* por Koloc y Vlákavík (1993, p. 349) o *levas desmodrómicas* por Cardona y Clos (2001, p. 23).

De acuerdo con el significado de *desmodrómico*: Adjetivo que establece una unión entre dos puntos de un mecanismo de manera que la velocidad de uno da lugar a una velocidad bien determinada del otro, presentado en el Diccionari de la Llengua Catalana (1995, p. 598), en la tesis se asume la denominación de mecanismos de levas desmodrómicas, utilizada por Cardona y Clos [2001]. A continuación se define este concepto.

Mecanismo de leva desmodrómico: es aquel mecanismo de leva que utiliza dos pares superiores conjugados (cierre geométrico) de manera que ambos imponen la misma restricción cinemática garantizando la bilateralidad global: la pérdida de contacto en uno de los pares queda impedido por el otro par.

Existen cuatro tipos de mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, estos son: el de leva de cara ranurada, de anchura constante, de diámetro constante y de levas conjugadas.

1.4.1 Mecanismo de leva de cara ranurada

En este mecanismo la cara de la leva presenta una ranura dentro de la cual se coloca el rodillo del palpador. Durante el movimiento de subida, la superficie interior de la ranura impulsa al palpador obligándolo a subir, mientras que en el movimiento de bajada o retorno, la superficie exterior de la ranura obliga al palpador a bajar (Figura 1.7).

Según Rothbart [1956], autor que más estudia los mecanismos desmodrómicos en la bibliografía consultada, este tipo de leva desmodrómica puede presentar ciertas dificultades que le son inherentes durante su funcionamiento, que pueden excluir la posibilidad de utilizarla. En este mecanismo de leva ranurada, el rodillo debe de tener el juego necesario para que gire libremente sobre su eje. Sin embargo, ese juego no produce una restricción real del palpador ya que el rodillo contactará alternativamente con cada lado de la ranura de la leva, cambiando su dirección de rotación. La ausencia de una restricción perfecta, permite que haya presencia de movimientos de rodadura y deslizamiento en todos los palpadores de rodillos que utilizan las levas de cara ranurada.

Norton [1995] expone ciertas consideraciones prácticas de diseño de este tipo de levas, dentro de ellas cabe señalar: es más costosa de fabricar, debido a que hay dos superficies que maquinar y pulir; el tratamiento térmico con frecuencia distorsiona la ranura de la leva, estrechándola o ensanchándola de modo que el rodillo no se ajustará adecuadamente, lo que implica un rectificad posterior e indica que en la leva ocurrirá el choque cada vez que la aceleración cambia de signo. Lo último dicho proviene del impacto que se produce cuando el palpador cambia súbitamente de una superficie de la ranura a la otra, cuando la fuerza cambia de sentido. Este impacto provoca ruidos, esfuerzos considerables y desgaste local. Se recomienda que estos mecanismos posean una buena lubricación.

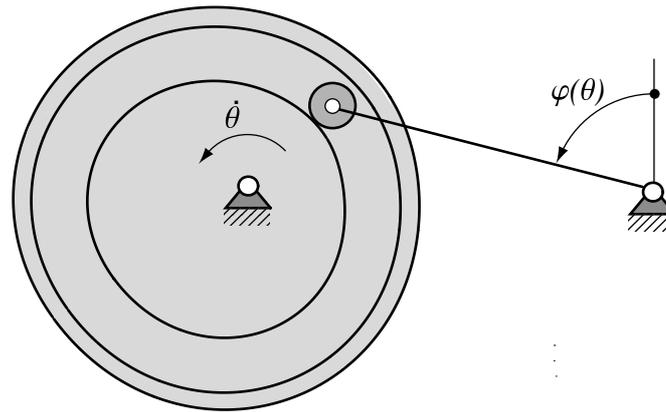


Fig. 1.7 Mecanismo de leva de cara ranurada

Rohrbart [1956] expone una mejora práctica para la eliminación del juego presente entre el rodillo y la ranura, que consiste en colocar dos rodillos sobre el mismo eje perteneciente al palpador de manera que cada uno de ellos contacte con una superficie o cara de la ranura. El autor presenta tres tipos de palpadores de doble rodillo. Uno de ellos consiste en dos rodillos excéntricos, montados sobre un mismo eje, colocados en una ranura simple (Figura 1.8 a), los rodillos tienen igual diámetro y son libres de girar sobre su eje y rodar sobre las superficies opuestas de la ranura. Los rodillos se colocan con cierta excentricidad que permite reducir el juego y precargar los rodillos. Un segundo tipo de palpador consta de dos rodillos concéntricos del igual diámetros como se ve en la Figura 1.8 b, en el fresado se hace difícil lograr la precisión. Un último tipo y se plantea como el más razonable, consta de dos rodillos concéntricos de diámetros diferentes como se muestra en la Figura 1.8 c.

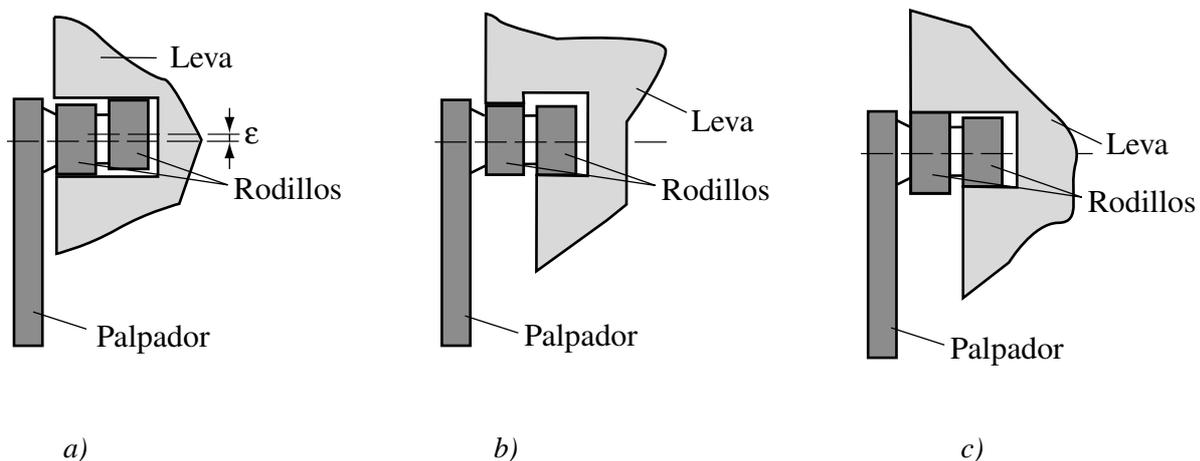


Fig. 1.8 Diseños prácticos de palpadores de rodillos para levas ranuradas

En la Figura A-1 del Anexo A se muestran varias levas desmodrómicas, algunas de ellas son levas ranuradas.

1.4.2 Mecanismo de leva de anchura y de diámetro constante

Este tipo de mecanismo desmodrómico tiene 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 estas sean paralelas, esta leva se denomina de *anchura constante*. Una leva de excéntrica, cuyo perfil es una circunferencia de un diámetro determinado, constituye un ejemplo sencillo de leva de anchura constante (Figura 1.9 a). 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* (Figuras 1.9 b y c).

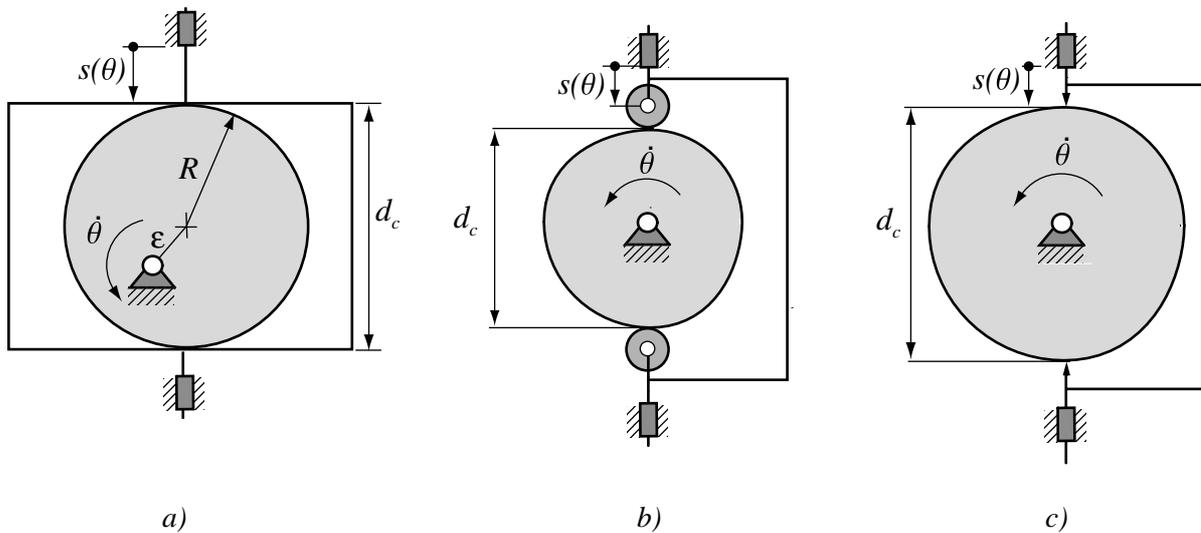


Fig. 1.9 Mecanismos de levas: a) de anchura constante, b) y c) de diámetro constante

Estos mecanismos en ocasiones son llamados sólo como mecanismos de anchura constante.

El doble palpador puede tener movimiento de traslación o de rotación. La ley de desplazamiento del palpador que garantiza obtener el perfil de leva en estos tipos de mecanismo está sujeta a ciertas restricciones.

En el caso de doble palpador de traslación la ley de desplazamiento sólo se puede definir en los primeros 80° de rotación de la leva, desde 80° hasta 360° su forma debe de ser tal que garantice que el perfil de la leva mantenga la distancia constante d_c entre los palpadores. En el capítulo tres de la presente tesis se estudia con más detalle las características de esta ley de desplazamiento aquí denominada *ley de anchura constante*.

La utilización de mecanismos de levas de diámetro constante, con doble palpador de rodillo, proporciona un funcionamiento más eficiente respecto a los de palpadores puntuales y a los de anchura constante, debido al movimiento de rodadura presente en el par superior, lo que disminuye el desgaste entre la leva y el palpador.

Dentro de las levas de anchura constante cabe señalar las levas denominadas por Rothbart (1956, p. 10) *armónicas*, que son un tipo de levas de arcos circulares; el autor le llama así debido al tipo de movimiento que describe el palpador que accionan. Si el palpador encierra completamente a la leva, de manera que ésta se desliza sobre los lados del mismo, el palpador describirá un movimiento en forma de polígono según la geometría que presente (Figura 1.10). Dichas levas pueden hacer que el palpador describa trayectorias geométricas tales como: cuadrados, pentágonos, etc., que pueden ser utilizadas para taladrar orificios que tengan las formas geométricas antes señaladas. Normalmente en este tipo de mecanismos el palpador tiene más lados que la leva.

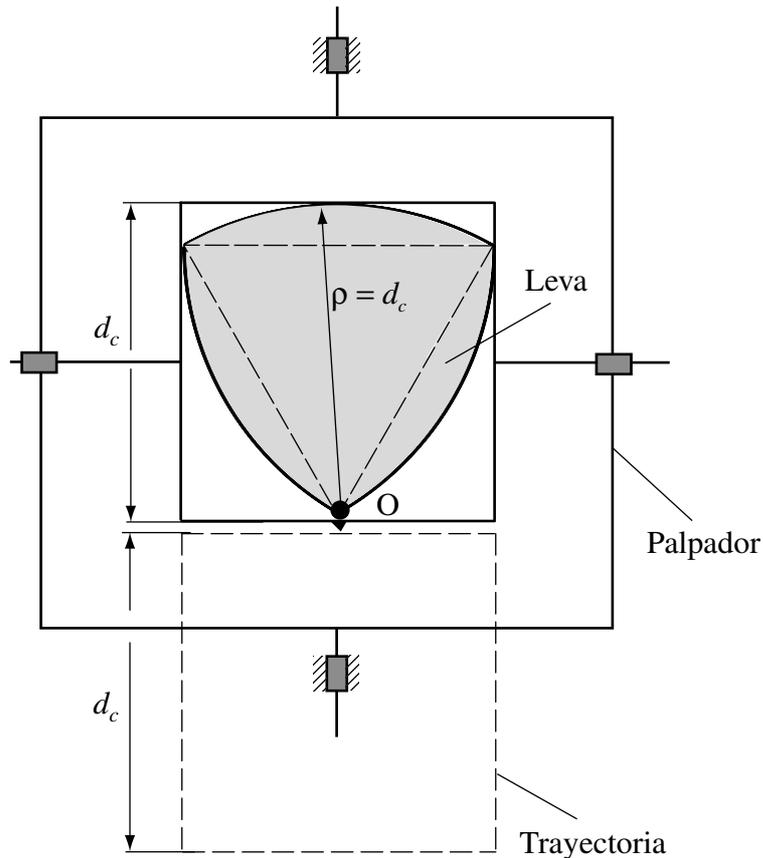


Fig. 1.10 Leva desmodrómica de arcos circulares

En la Figura 1.10 la leva se construye sobre la base de un triángulo equilátero, sus lados son arcos de círculos de radio ρ igual a la anchura d_c del palpador con forma de cuadrado. Este palpador describe una trayectoria en forma de cuadrado durante su movimiento. Aquí el desplazamiento total del palpador es igual a la anchura d_c de la leva. De manera similar puede utilizarse cualquier número de lados para las levas de este tipo. Existe una dificultad práctica ya que la línea de centro del árbol O está sobre la esquina de la leva, lo cual no siempre proporciona un espacio suficiente para el árbol. Esta limitación puede aliviarse a través del diseño mostrado en la Figura 1.11.

El mecanismo de leva desmodrómica que se muestra en la Figura 1.11, es más práctico que el de la Figura 1.10, ya que presenta un espacio para la colocación del árbol de leva y un radio

R_1 en cada esquina de la leva, lo cual reduce el desgaste. Este mecanismo ha sido utilizado con éxito en máquinas de coser, máquinas para películas, en bombas para combustibles y otros (Rothbart, 1956). En la figuras A-2, A-3, A-4 y A-5 del Anexo A se muestran varios mecanismos de levas de anchura constante.

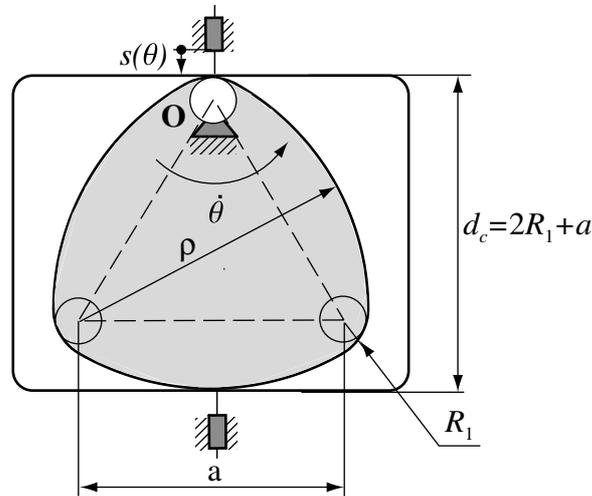


Fig. 1.11 Leva de arco circular con esquinas redondeadas

Por otro lado, si se realiza una inversión cinemática en los mecanismos de las Figuras 1.10 y 1.11, dejando fijo el palpador la leva sería capaz de desplazarse restringida por la pista de este. Así, por ejemplo, cualquier punto de la leva mostrada en la Figura 1.10 describiría una trayectoria geométrica similar a la que se expone en dicha figura. La trayectoria será mayor o menor en función de la distancia desde el centro de rotación de la leva al punto que se toma en la leva. Este principio se ha aplicado en el taladrado de orificios con formas de polígonos.

Un ejemplo del uso del principio antes mencionado para taladrar agujeros con forma de cuadrado con vértices redondeados, lo constituye la llamada broca de Watts, cuya sección transversal es una leva de arco circular de tres lados, de la cual se elimina parte del contorno curvo para definir un filo cortante (Figura 1.12). Koshevnikov (1981, p. 326) muestra otros ejemplos de levas de arco circular.

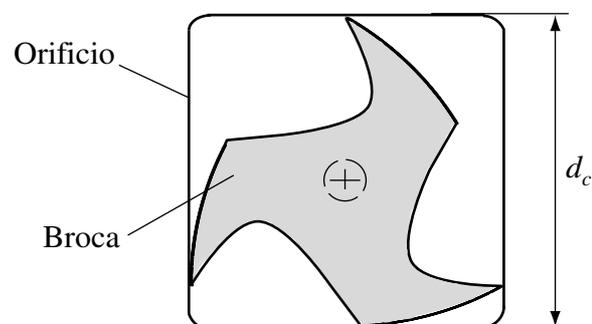


Fig. 1.12 Sección transversal de la broca de Watts

Chakraborty y Dhande [1977] demuestran analíticamente que sólo es posible obtener un perfil de leva de anchura constante con palpadores rotatorios cuando estos son planos. Estos autores exponen que no es posible lograr un perfil de anchura constante que accione correctamente un doble palpador de rodillo. En la bibliografía consultada no se dan que características debe tener la ley de desplazamiento en estos casos.

En el capítulo tres de este trabajo se analiza un mecanismo de anchura constante que acciona un doble palpador plano paralelo, y se determina la condición que debe de cumplir la ley de desplazamiento así como la forma de obtenerla. Así, se obtiene un perfil de anchura constante adecuado. En la Figura 1.13 se muestra un mecanismo de leva de este tipo.

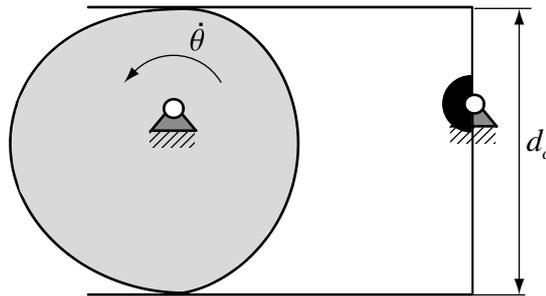


Fig. 1.13 Mecanismo de leva anchura constante con doble palpador plano rotatorio

1.4.3 Mecanismos de levas conjugadas

Los mecanismos de levas conjugadas son también llamados mecanismos de levas doble o adjuntas. Estos constan de dos levas montadas sobre un mismo árbol, cuyos perfiles son conjugados entre sí (Figura 1.14). 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, debido al movimiento de rodadura que introduce el par superior, disminuyendo el desgaste entre la leva y el palpador y aumentando la eficiencia del mecanismo.

En los mecanismos de levas conjugadas una leva impulsa al primer palpador, el que en el presente trabajo se le llama palpador superior, en un sentido y la otra leva impulsa al segundo palpador, el inferior, en el sentido de movimiento contrario al primero. La utilización de dos levas con un doble palpador permite precargar uno contra el otro eliminando el juego. La precarga obliga al doble palpador a permanecer en contacto con las levas durante todo el ciclo de funcionamiento del mecanismo, garantizando el cierre del par superior, aún cuando este funciona a altas velocidades o bajo la acción de altas cargas dinámicas. Con la precarga se logra un excelente control sobre el doble palpador y se reduce el ruido, la vibración y el desgaste. En este tipo de mecanismo la ley de desplazamiento del palpador puede diseñarse desde 0 hasta 360° de rotación de la leva. Este mecanismo garantiza que se cumpla la ley de desplazamiento del palpador diseñada y es confiable trabajando a velocidades elevadas y sometido a grandes esfuerzos. Por las razones expuestas se considera el mecanismo

desmodrómico que mejor funciona, sin embargo, generalmente requiere mayores dimensiones y es más caro de producir que los otros.

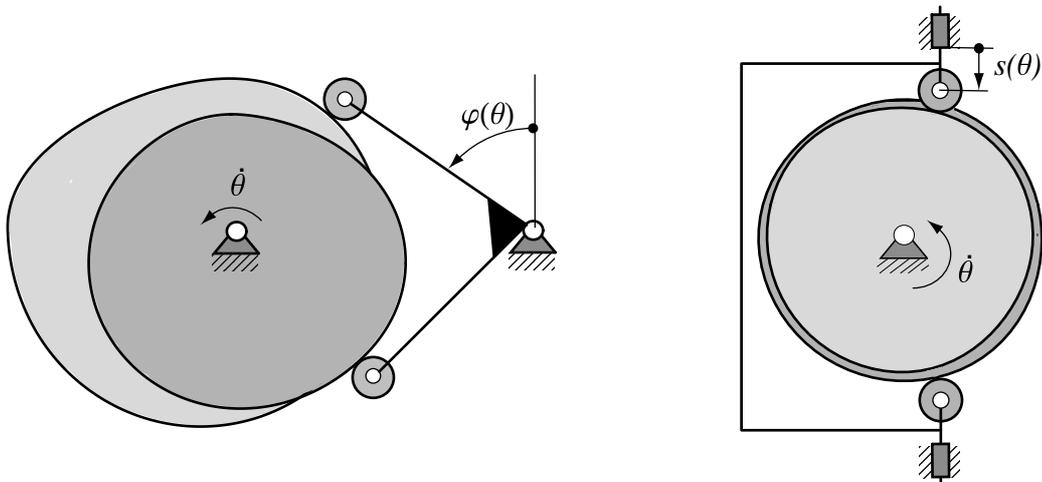


Fig. 1.14 Mecanismos de levas conjugadas con doble palpador de rodillo.

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 este no deseado.

1.5 Secuencia de diseño de un mecanismo leva-palpador

La propia definición de mecanismo leva-palpador expuesta al inicio del apartado 1.2, permite establecer la misión del mismo, la cual consiste en impulsar al palpador según una ley de desplazamiento $q_p(q_l)$ deseada, en función de la coordenada independiente q_l de la leva.

La secuencia de diseño de un mecanismo leva-palpador en lo que se refiere a aspectos geométricos y cinemáticos según Cardona y Clos [2001] es la siguiente:

- Diseño de la ley de desplazamiento $q_p(q_l)$.
- Obtención del perfil de la leva que impulsa a un palpador determinado según la ley de desplazamiento diseñada.
- Comprobación de que el perfil obtenido no presenta características que impiden un contacto leva-palpador correcto.

1.5.1 Diseño de la ley de desplazamiento del palpador

En el diseño de una ley de desplazamiento $q_p(q_l)$ para el palpador, existen especificaciones obligadas y otras recomendables. La elección de las especificaciones no impuestas por la funcionalidad es el aspecto al que debe prestársele especial atención en el diseño de un mecanismo de leva, ya que la ley de desplazamiento $q_p(q_l)$ resultante determinará además del contorno de la leva, la cinemática del palpador y, por tanto, la dinámica del mecanismo.

Los mecanismos leva-palpador más utilizados en la práctica son aquellos en los cuales la leva tiene movimiento de rotación, ya que este es fácil de obtener. De esta manera la coordenada generalizada independiente q_l que caracteriza a la leva puede llamarse θ –ángulo de giro de la leva. La coordenada generalizada independiente q_p que caracteriza al palpador será s si el palpador tiene movimiento de traslación y φ si tiene movimiento de rotación. Así, la ley de desplazamiento del palpador será $s(\theta)$ para mecanismos leva-palpador en los que el palpador se traslada y $\varphi(\theta)$ para aquellos en los que rota.

En el presente estudio se utiliza de manera genérica $d(\theta)$ para la ley de desplazamiento del palpador.

Al representar la ley de desplazamiento $d(\theta)$ gráficamente en un sistema de coordenadas, colocando la variable independiente en el eje de las abscisas y la variable dependiente en el eje de las ordenadas, se obtiene el *diagrama de desplazamiento*.

Normalmente, la función $d(\theta)$ se diseña a partir de un conjunto de especificaciones de movimiento (Figura 1.15). Las especificaciones más utilizadas son:

- Puntos de paso, o sea, valores concretos del desplazamiento para ciertos valores de θ .
- Tramos horizontales, $d(\theta) = \text{constante}$, en los que el palpador se encuentra en reposo.
- Rampas de pendiente constante en que el palpador se desplaza con velocidad constante.

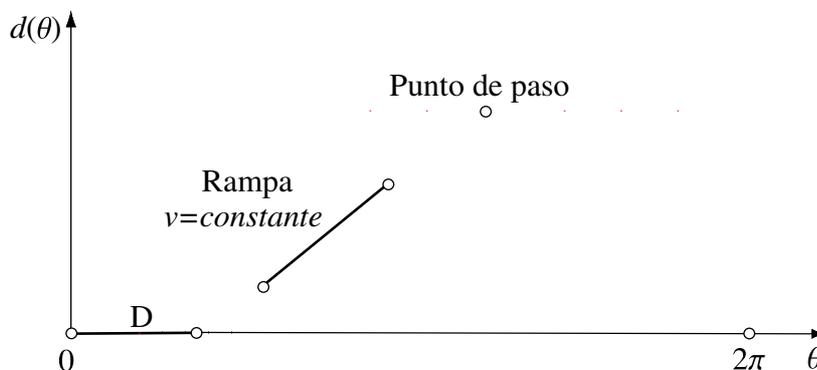


Fig. 1.15 Especificaciones de la ley de desplazamiento del palpador

Ejemplos típicos de leyes de desplazamiento son:

Leva con detención simple: El palpador parte de la posición de reposo, sube hasta un cierto valor máximo e inmediatamente inicia el descenso hasta llegar de nuevo a la posición inferior de reposo (Figura 1.16). Ley tipo *S-B-D*.

Leva con doble detención: el palpador parte de una posición de reposo, sube hasta alcanzar el valor máximo, se mantiene allí durante un cierto intervalo de tiempo y finalmente baja hasta llegar a la posición de reposo inicial (Figura 1.17). Ley tipo *S-D-B-D*.

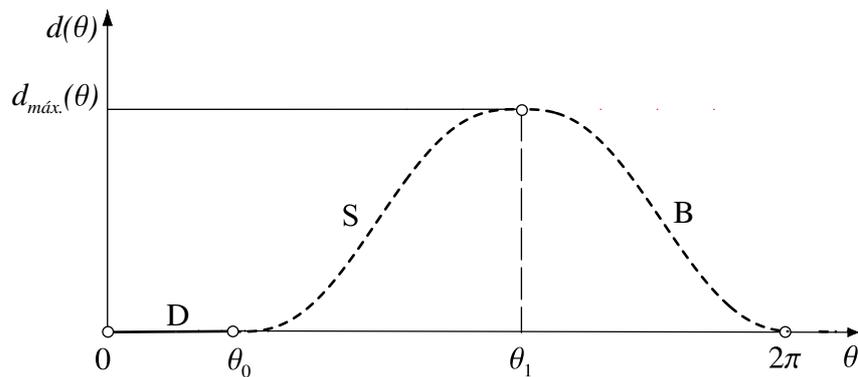


Fig. 1.16 Ley de desplazamiento del palpador con detención simple

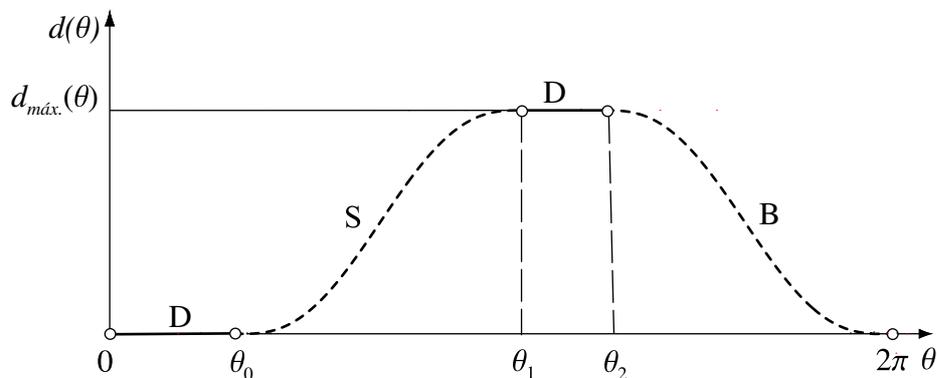


Fig. 1.17 Ley de desplazamiento del palpador con doble detención

La ley de desplazamiento del palpador $d(\theta)$ es pues, en general, una unión de tramos de curvas. En ella, los puntos de paso o tramos rectilíneos se han de unir de manera adecuada mediante tramos curvilíneos.

1.5.2 Condiciones de continuidad en la ley de desplazamiento

Las leyes de desplazamiento han de verificar ciertas condiciones de continuidad en el tiempo, en particular en las uniones entre tramos [Cardona y Clos, 2001]:

- Es imprescindible que la velocidad del palpador sea una función continua, lo cual significa que la ley de desplazamiento del palpador $d(\theta)$ sea una función al menos de tipo C^1 . Discontinuidades en la velocidad originan aceleraciones en teoría infinitas y fuerzas elevadas que podrían, excepto en máquinas muy lentas, conducir a la destrucción del mecanismo o a la pérdida del contacto leva-palpador cuando el cierre del par es por fuerza.
- Es muy conveniente, que la aceleración sea una función continua, lo que implica que la función de desplazamiento del palpador sea una función al menos de tipo C^2 . Si la aceleración presenta saltos bruscos –sobreaceleraciones teóricas infinitas o variaciones muy grandes– se producirían variaciones importantes en las fuerzas que actúan en el mecanismo, y a causa de la elasticidad y los juegos surgen ruidos y vibraciones que darían lugar a roturas, fatiga, etc. y al desajuste entre el movimiento real del palpador y el requerido.

Estas condiciones de continuidad en el tiempo se traducen en las mismas condiciones respecto a θ si $\theta(t)$ es suficientemente continua.

$$\dot{d}(\theta(t)) = d'(\theta) \cdot \dot{\theta}(t) \quad (1.1)$$

$$\ddot{d}(\theta(t)) = d''(\theta) \cdot \dot{\theta}^2(t) + d'(\theta) \cdot \ddot{\theta}(t) \quad (1.2)$$

$$\dddot{d}(\theta(t)) = d'''(\theta) \cdot \dot{\theta}^3(t) + 3d''(\theta) \cdot \dot{\theta}(t) \cdot \ddot{\theta}(t) + d'(\theta) \cdot \ddot{\theta}(t) \quad (1.3)$$

Las ecuaciones de velocidad (Ec. 1.1), aceleración (Ec. 1.2) y sobreaceleración (Ec. 1.3), relacionan las *derivadas cinemáticas* con las *derivadas temporales* de la ley de desplazamiento $d(\theta)$. Las primeras son las derivadas de la ley respecto al ángulo de giro θ de la leva, se identifican con un apóstrofo y se relacionan con la geometría del mecanismo. Las segundas, se indican mediante un punto sobre el carácter de la función, se utilizan para el análisis del comportamiento dinámico del mecanismo.

1.5.3 Definición matemática de la ley de desplazamiento del palpador

Para definir matemáticamente los tramos de la curva de desplazamiento, en principio se pueden utilizar cualquier tipo de funciones; se han utilizado clásicamente funciones polinómicas, sinusoidales, cicloïdales, etc.

Los métodos para la definición de las leyes de movimiento [Reyes, 2000] se dividen en *métodos tradicionales*:

- polinomios algebraicos en base canónica.
- polinomios trigonométricos en base de Fourier.

y métodos propios para el CAGD (*Computer Aided Geometric Design*):

- polinomios algebraicos con base de Bernstein.
- polinomios definidos a trozos con base B-spline.
- polinomios trigonométricos con base análoga a la de Bernstein.
- polinomios trigonométricos definidos a trozos con base análoga a la B-spline.

Según Reyes (2000, p. 131) es más adecuado definir la ley de desplazamiento del palpador con los métodos propios para el CAGD que con los métodos tradicionales, por la facilidad que ofrecen al diseñar la ley, pues constituyen una herramienta geométrica e intuitiva que facilita ese proceso. En esta tesis se utilizan polinomios algebraicos con base de Bernstein –curvas de Bézier no paramétricas– y polinomios definidos a trozos con base B-spline para la definición de las leyes de desplazamiento del palpador, en el capítulo dos se abunda más sobre este tema.

1.5.4 Obtención del perfil de la leva

Una vez definida la ley de desplazamiento del palpador y escogido el tipo de palpador a utilizar el siguiente paso es determinar el perfil de la leva que garantiza la ley especificada.

La obtención del perfil se puede lograr de manera gráfica o analítica. En la actualidad los métodos gráficos de diseño de levas han sido sustituidos por los métodos analíticos dada las ventajas que representan y que por otra parte son fáciles de implementar en un ordenador.

En esta tesis se utiliza el método analítico, según el enfoque planteado por Cardona y Clos [2001], que al igual que el método gráfico hace uso de la *inversión cinemática* del mecanismo, que consiste para levas de rotación en estudiar el problema desde la referencia solidaria a la leva y respecto a la cual el soporte del palpador gira un ángulo θ con velocidad angular ω opuesta a la de la leva respecto a la referencia de estudio.

A modo de ilustración del proceso de perfilado analítico se toma un mecanismo de leva con palpador puntual (Figura 1.18). En este caso, el perfil de la leva es la trayectoria que describe el vértice del palpador en la referencia leva. Desde dicha referencia se observa que el palpador y su guía giran un ángulo θ en sentido contrario al de la leva, a la vez que el palpador se desplaza según la función $d(\theta)$. La curva que dibuja el vértice P del palpador al hacer el movimiento descrito constituye el perfil de la leva. En la base 1,2 de orientación fija a la guía:

$$\{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2} = \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon \\ d(\theta) \end{array} \right\}_{1,2} \quad (1.4)$$

En la base x, y de orientación fija a la leva, la ecuación paramétrica del perfil es:

$$\{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{x,y} = [S_\theta] \{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

donde $[S_\theta]$ es la matriz de cambio de la base 1,2 a la base x,y correspondiente a una rotación θ en sentido antihorario.

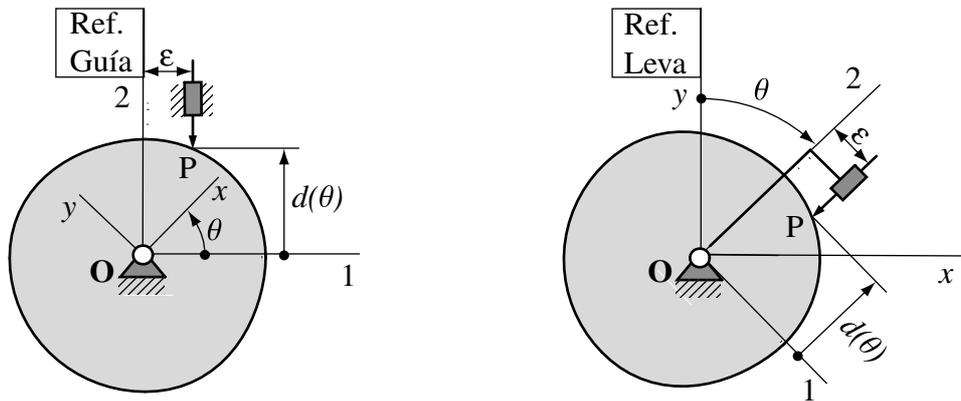


Fig. 1.18 Generación del perfil de leva para un palpador puntual

Si el palpador no es puntual, el conjunto de posiciones del mismo que se obtiene al realizar la inversión cinemática describe un *haz de curvas*. En este caso, el perfil de la leva se obtiene al ir trazando una curva tangente a las sucesivas posiciones del palpador, esta curva se llama *envolvente del haz de curvas*. La base del método analítico general para la generación del perfil es la *teoría de las envolventes*.

En términos matemáticos si el palpador se define mediante una curva implícita $F(x, y) = 0$, los sucesivos perfiles del palpador que conforman, en la referencia leva, el haz de curvas, se representan por:

$$F(x, y, \theta) = 0 \quad (1.6)$$

El perfil de la leva ha de ser en todo momento una curva tangente a cada una de las curvas del haz, al avanzar por dicha curva para todos los valores de θ el valor de la función $F(x, y, \theta)$ se mantiene nulo y, por tanto, se verifica que:

$$\frac{\delta F}{\delta \theta} = 0 \quad (1.7)$$

La ecuación del perfil de la leva viene dada por el sistema formado por la Ec. 1.6 –ya que los puntos del perfil son puntos del haz– y por la Ec. 1.7, así:

$$\begin{cases} F(x, y, \theta) = 0 \\ \frac{\delta F}{\delta \theta} = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

En el mecanizado de la leva, no siempre es posible disponer de una herramienta con la forma del palpador y que pueda ser impulsada con el movimiento de corte apropiado. Para poder definir la trayectoria de otro tipo de herramienta de corte, es necesario reconvertir el sistema 1.8 a la ecuación paramétrica explícita del perfil de la leva:

$$\begin{cases} x = X(\theta) \\ y = Y(\theta) \end{cases} \quad (1.9)$$

La ecuación paramétrica 1.9 puede obtenerse directamente, sin necesidad de plantear el sistema 1.8, para palpadores sencillos –como es el caso de un palpador plano o de un palpador de cabeza circular o de rodillo–, aplicando los resultados del análisis cinemático del mecanismo leva-palpador, el cual se muestra en el apartado 1.5.7.

En el capítulo dos se exponen de manera detallada los procedimientos gráficos y analíticos de obtención del perfil para los palpadores más habituales (circular, plano y puntual) con movimiento de rotación o de translación.

1.5.5 Comprobación del perfil de leva

Una vez obtenido el perfil de la leva se ha de comprobar que este no presente características geométricas indeseadas que impidan un contacto leva-palpador correcto. Se pueden presentar básicamente dos problemas:

- Imposibilidad de acceso del palpador al punto teórico de contacto a causa de que el palpador invada tramos de la leva al intentar acceder a este punto (Figura 1.19 a).
- Existencia de degeneraciones en el perfil de la leva. A pesar de que la ley de movimiento del palpador sea continua y suave, es posible que el perfil de la leva presente vértices o autointersecciones (Figura 1.19 b y c).

Para detectar los posibles problemas del perfil de la leva se ha de determinar su radio de curvatura r_c , así:

$$r_c = \frac{|\overline{\mathbf{OP}}'|^2}{\overline{\mathbf{OP}}''|_n} \quad (1.10)$$

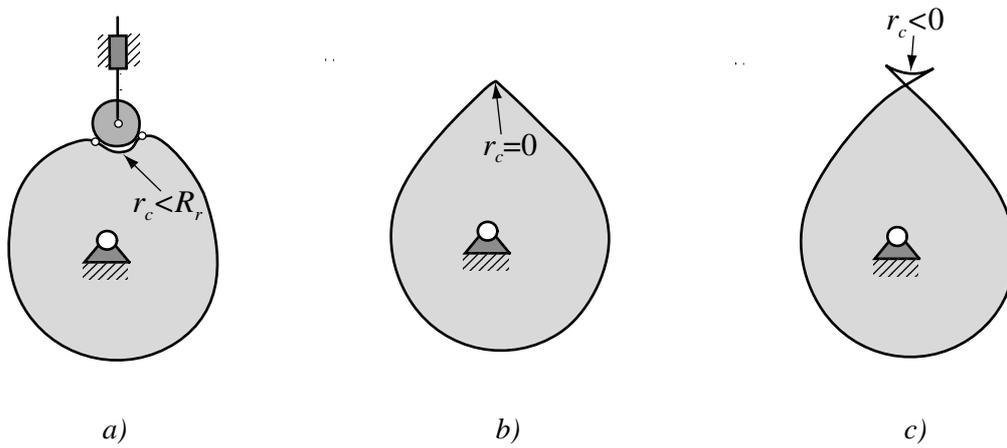


Fig. 1.19 Características geométricas que impiden un contacto correcto leva-palpador

Los perfiles de las levas pueden tener porciones cóncavas, convexas o planas. Ya que el perfil de la leva es una curva cerrada y con el objetivo de facilitar el análisis se asume el convenio de considerar $r_c > 0$ para los tramos convexas y $r_c < 0$ para los tramos cóncavos. Los puntos de inflexión son aquellos en los que se pasa de $r_c = \infty$ a $r_c = -\infty$. De acuerdo con este convenio de signos, el subíndice en el denominador de la ecuación 1.10 indica la componente normal de $\overline{\mathbf{OP}}''$ dirigida hacia la zona interior cerrada dentro de la curva (Figura 1.20).

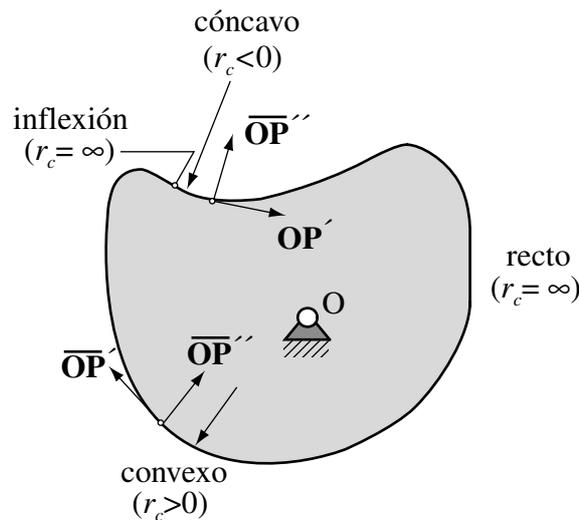


Fig. 1.20 Radio de curvatura

Las derivadas de la ecuación 1.10 son en la referencia leva y respecto al parámetro θ utilizado para expresar $\overline{\mathbf{OP}}$. Para su cálculo, resulta más cómodo utilizar la base 1,2 solidaria a la guía –en la cual se conocen las componentes de $\overline{\mathbf{OP}}$ –, si bien entonces al derivar $\overline{\mathbf{OP}}$ se ha de añadir a la derivada componente a componente de $\overline{\mathbf{OP}}$ el término correspondiente a la derivación en base móvil:

$$\{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{x,y} = [S_\theta] \{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2}$$

$$\{\overline{\mathbf{OP}}'(\theta)\}_{x,y} = \{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{x,y}' = [S'_{\theta}]\{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2} + [S_{\theta}]\{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2}'$$

y multiplicando por $[S_{\theta}]^{-1}$ tenemos:

$$\{\overline{\mathbf{OP}}'(\theta)\}_{1,2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2} + \{\overline{\mathbf{OP}}(\theta)\}_{1,2}' \quad (1.11)$$

El radio de curvatura del perfil es de interés con independencia del tipo de palpador, sin embargo, las consideraciones a tener en cuenta son diferentes según la geometría del extremo del palpador. En el capítulo dos se muestran las expresiones de cálculo del radio de curvatura correspondiente para mecanismos de levas con palpadores plano y circular.

1.5.6 Terminología en los mecanismos leva-palpador

En la Figura 1.21 se muestra un mecanismo de leva plano con palpador de rodillo y la terminología asociada al mismo que se utiliza en el desarrollo de la tesis.

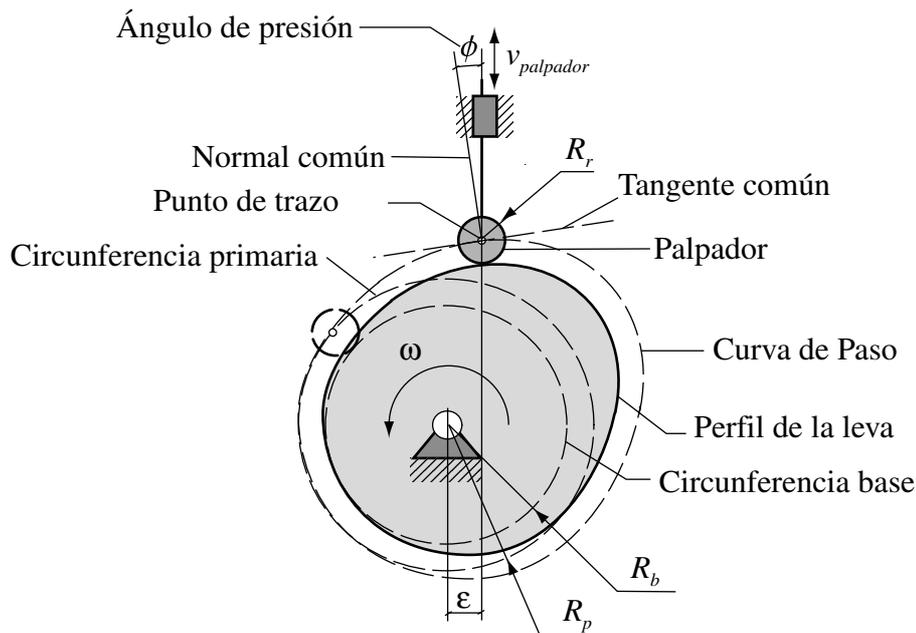


Fig. 1.21 Terminología estándar de los mecanismos leva-palpador

La terminología utilizada en los mecanismos leva-palpador, es la siguiente:

Circunferencia base: Es la circunferencia más pequeña, de radio R_b , que puede trazarse con centro en el eje de rotación de la leva y tangente a la superficie física de ésta. En el caso de un palpador de rodillo es más pequeña que la circunferencia primaria, siendo la diferencia el radio del rodillo R_r .

Circunferencia primaria: Es la circunferencia más pequeña, de radio R_p , que se puede trazar con centro en el eje de rotación de la leva y tangente a la curva de paso. Esta sólo se aplica en el caso de palpadores circulares o curvos.

Curva de paso: Es la trayectoria que describe el centro del rodillo en la referencia solidaria a la leva, al completarse una vuelta de esta. Corresponde a la curva *offset* al perfil de la leva, separada una distancia igual al radio del rodillo R_r . En el caso de un palpador puntual ($R_r = 0$), esta curva coincide con el perfil de la leva.

Punto de trazo: Es un punto del palpador que al realizar la inversión cinemática describe la trayectoria que constituye el perfil de la leva –cuando el palpador es puntual–, o la curva *offset* al perfil –curva de paso– cuando el palpador es circular.

Ángulo de presión: Es el ángulo ϕ entre la normal común a los perfiles de la leva y del palpador en el punto geométrico de contacto y la dirección de la velocidad de dicho punto del palpador. Si el palpador es de rodillo debe considerarse la dirección de la velocidad de su centro.

Excentricidad: Es la distancia ε entre el eje a lo largo del cual se traslada el palpador y el centro de rotación de la leva. Su valor puede ser nulo ($\varepsilon = 0$, palpador axial o alineado). Sólo está presente en palpadores con movimiento de traslación.

1.5.7 Análisis del mecanismo leva-palpador

El objetivo del análisis del mecanismo leva-palpador consiste en estudiar el movimiento de dos sólidos –la leva y el palpador– de perfiles conocidos.

El estudio del mecanismo leva-palpador permite determinar:

- La ecuación geométrica de enlace –ley de desplazamiento del palpador–, que relaciona el desplazamiento o giro del palpador con el de la leva.
- La ecuación cinemática de enlace, que relaciona las velocidades de la leva y del palpador en una configuración dada.
- La velocidad de deslizamiento en el punto de contacto leva-palpador.
- El ángulo de presión, un índice del buen funcionamiento del mecanismo.

La ecuación geométrica de enlace es la ley de desplazamiento definida por el diseñador si se parte de ella para el diseño y por tanto es conocida, así el análisis se reduce a los dos últimos puntos, ya que la ecuación cinemática de enlace se obtiene simplemente por derivación de la ley de desplazamiento.

Cuando se presentan un palpador y una leva de perfiles arbitrarios y de proceso de diseño desconocido, encontrar la ecuación geométrica de enlace no resulta sencillo. Para un palpador de translación, la distancia $d(\theta)$ se obtiene al ir variando la distancia d a la cual se encuentra hasta conseguir que sea tangente a la leva en un cierto punto P (Figura 1.22), cuando esta ha girado un ángulo θ . Este es un problema matemático que, en principio, se ha de resolver numéricamente y que no lleva a una expresión explícita de la función $d(\theta)$. Además, pueden presentarse problemas de acceso al punto teórico P de contacto, por ejemplo, en los tramos cóncavos de una leva que acciona un palpador plano.

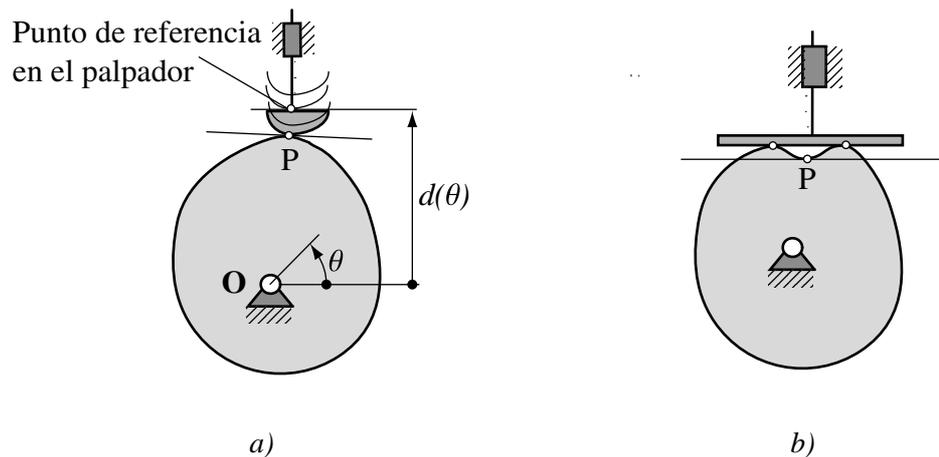


Fig. 1.22 a) Obtención del valor de $d(\theta)$ y b) Problema de acceso del palpador a la leva

Sin embargo, para palpadores con perfiles sencillos que son los más empleados, la ecuación geométrica de enlace puede formularse con facilidad. En el caso de palpadores de translación se tiene:

- Palpador puntual: $d(\theta)$ es la altura del punto P, intersección del eje de la guía con la leva (Figura 1.23 a).
- Palpador plano horizontal: $d(\theta)$ es la altura del punto P de la leva más elevado (Figura 1.23 b).
- Palpador de rodillo de radio R_r : El centro C del rodillo se encuentra siempre a una distancia R_r de la leva, es decir, sobre la *curva de paso o curva offset*. Si se dispone de la ecuación paramétrica del perfil $\mathbf{OP}(\theta)$, la expresión de la *curva offset* es $\mathbf{OC}(\theta) = \mathbf{OP}(\theta) + R_r \mathbf{n}_e(\theta)$, donde $\mathbf{n}_e(\theta)$ es la normal unitaria exterior a la leva. La altura $d(\theta)$ es la correspondiente a la intersección del eje de la guía con la curva de paso (Figura 1.23 c).

Para palpadores de rotación la formulación es similar.

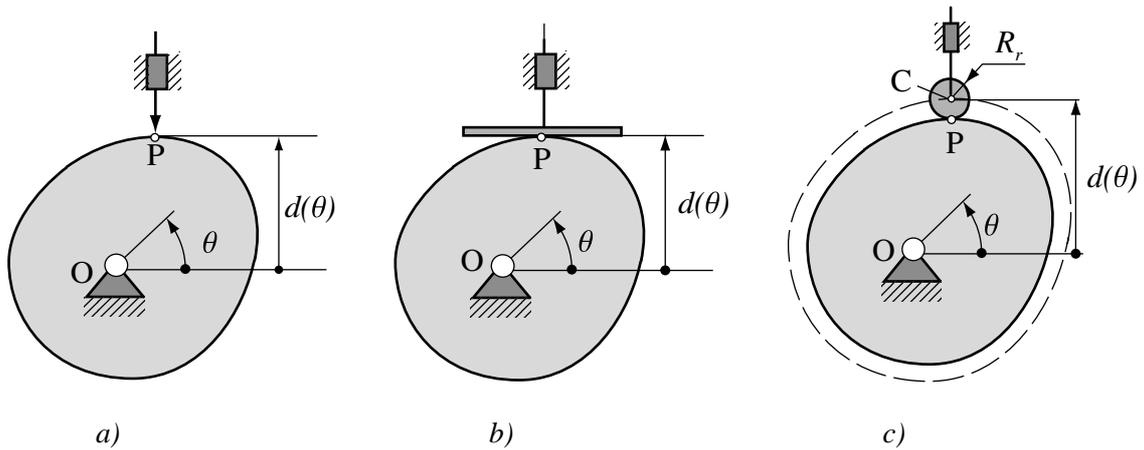


Fig. 1.23 Análisis de leva con palpadores: a) puntual, b) plano y c) de rodillo

Si se dispone de una expresión explícita de $d(\theta)$, la velocidad del palpador se obtiene simplemente por derivación. Si no se tiene esta expresión el análisis se hace a partir del estudio del par superior formado por la leva y el palpador. La condición de contacto puntual en un punto P implica que la velocidad relativa entre los puntos de contacto P_1 de la leva y P_2 del palpador es tangente a las superficies de contacto. Así, según el teorema de los tres centros, el centro instantáneo I de rotación relativo leva-palpador será el punto de intersección de las rectas siguientes:

- Línea de presión o empuje: línea que pasa por P y es perpendicular a la tangente común leva-palpador.
- Línea de centros: línea que une los centros de rotación \mathbf{O} de la leva y \mathbf{O}' del palpador en mecanismos con palpadores de rotación (Figura 1.24 a). Para un palpador de translación, \mathbf{O}' se encuentra en el infinito en la dirección perpendicular a la guía (Figura 1.24 b).

Los puntos I_1 de la leva y I_2 del palpador que coinciden con el centro instantáneo relativo I tienen la misma velocidad, así se tiene:

$$v(I_1) = v(I_2) \rightarrow \dot{\theta}_1 l_L = \dot{\theta}_2 l_P \quad (1.12)$$

Donde l_L y l_P son las distancias desde los centros \mathbf{O} y \mathbf{O}' a I. Se asume el convenio de signos contrarios para cada una de las velocidades, para evitar que aparezca un signo negativo.

Por lo tanto, para un palpador de rotación, su velocidad angular $\dot{\theta}_2$ en función de la velocidad angular de la leva $\dot{\theta}_1$, o sea, la ecuación de enlace cinemática, es:

$$\dot{\theta}_2 = \frac{l_L}{l_P} \dot{\theta}_1 \quad (1.13)$$

Para un palpador con movimiento de translación, su velocidad \dot{d} en función de la velocidad angular $\dot{\theta}$ de la leva es:

$$\dot{d} = l_L \dot{\theta} \quad (1.14)$$

De la expresión 1.14 observamos que la distancia l_L es la derivada $-d'(\theta)$ de la función $d(\theta)$ respecto a θ , o sea, $l_L = d'(\theta)$.

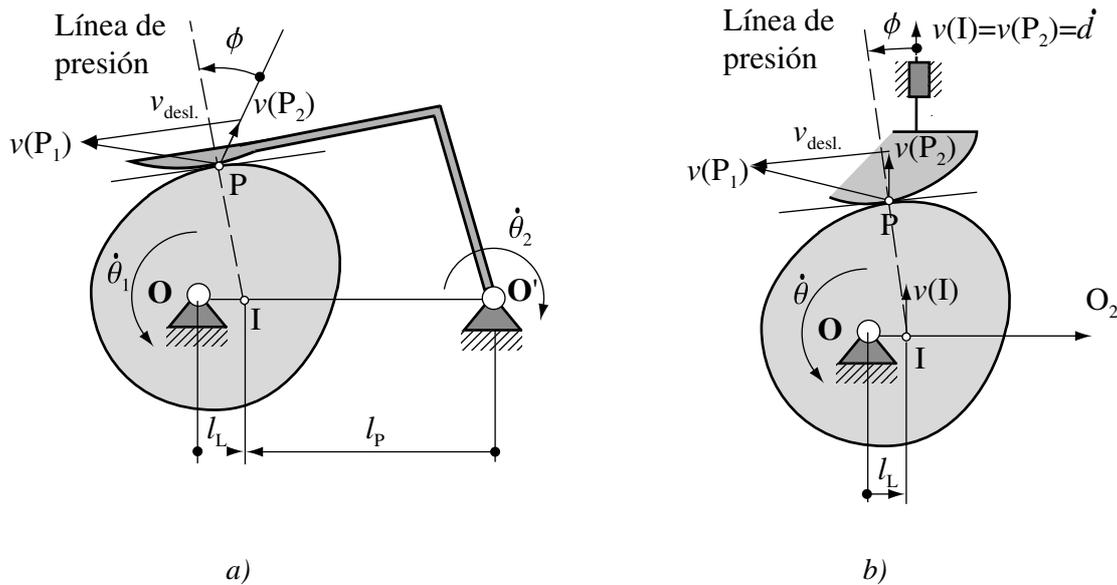


Fig. 1.24 Análisis de velocidades: a) palpador de rotación, b) palpador de translación

Interesa además conocer la velocidad de deslizamiento $v_{desl.}$ en el punto P de contacto leva-palpador, ésta debe ser lo menor posible para que el mecanismo funcione con más eficiencia.

$$v_{desl.} = v(P_1) - v(P_2) \quad (1.15)$$

La velocidad de deslizamiento es la misma en cualquier referencia. En particular, en la referencia relativa al palpador, $v_{desl.} = v(P_1)$, donde vale el producto de la distancia del punto P al centro instantáneo de rotación relativo I de la leva respecto al palpador por la velocidad angular relativa de la leva:

$$\text{– Palpador de rotación: } v_{desl.} = \overline{IP} [\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2] \quad (1.16)$$

$$\text{– Palpador de translación: } v_{desl.} = \overline{IP} \dot{\theta} \quad (1.17)$$

1.5.8 Dimensionado del mecanismo leva-palpador

Al dimensionar el mecanismo leva-palpador hay que escoger adecuadamente varios parámetros, como son: el límite del ángulo de presión, la excentricidad, las dimensiones de las

$$\phi = \arctan \left[\frac{d'(\theta) - \varepsilon}{d(\theta)} \right]$$

donde:

$$d(\theta) = d_o + s(\theta), \quad d_o = \sqrt{(R_b + R_r)^2 - \varepsilon^2} \quad (1.18)$$

Del análisis de la expresión 1.18 se observa que el radio del círculo base R_b está relacionado con el ángulo de presión ϕ . Al aumentar el valor de R_b disminuye el valor de ϕ , pero aumentan las dimensiones de la leva. Obsérvese que el desplazamiento del palpador $s(\theta)$ se toma a partir de $R_b + R_r$, que son parámetros a escoger en el dimensionado.

Cuando se utiliza un palpador plano de translación, hay que asegurar que el punto de contacto P leva-palpador se encuentre siempre sobre la superficie física del perfil del palpador, para ello se debe verificar que las dimensiones a y b cumplen las desigualdades:

$$a > \varepsilon - d'_{\min.}(\theta) \quad \text{y} \quad b > d'_{\max.}(\theta) - \varepsilon \quad (1.19)$$

Para un palpador plano recto (Figura 1.26 a) con movimiento de translación, donde $\phi = 0$, la fuerza F de contacto leva-palpador tiene la dirección de la guía, hecho que disminuye las posibilidades de acuñaamiento. Cuando el palpador es plano con inclinación arbitraria β , el ángulo de presión coincide con esta inclinación $-\beta = \phi$ y por lo tanto es constante (Figura 1.26 b).

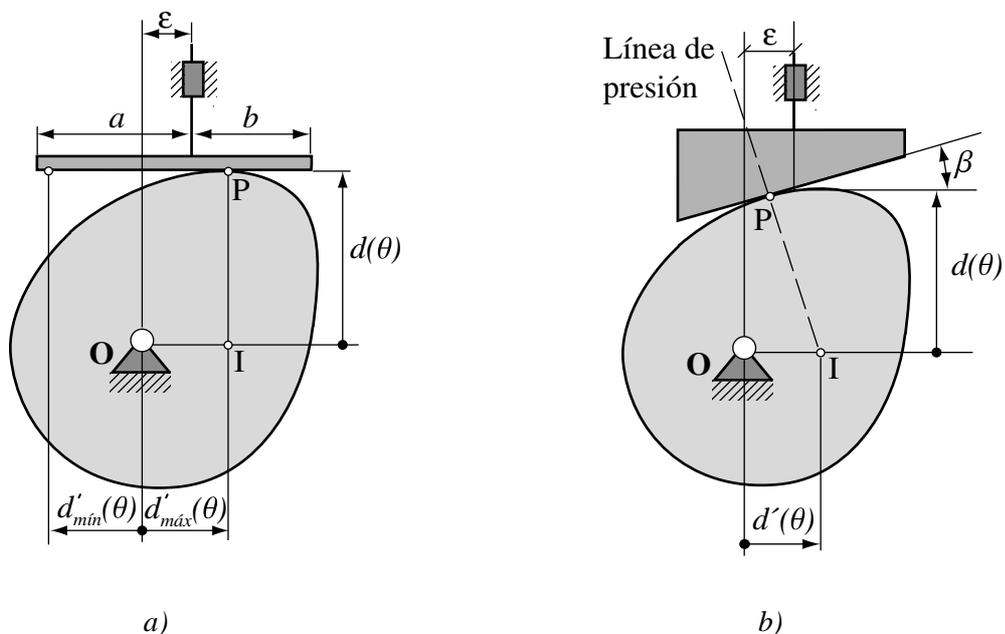


Fig. 1.26 Parámetros del dimensionado en mecanismos de leva con palpadores planos

1.5.9 Fabricación de levas

Las levas suelen fabricarse, en principio, a partir de materiales como el acero y el hierro fundido, sobre todo si estarán sometidas a grandes cargas y a velocidades altas. La fabricación de las levas se hace en general con procesos de mecanizado –torneado, fresado y rectificado o pulido– y de tratamiento superficial –térmico, etc.– que garantizan el acabado, la exactitud geométrica y la dureza superficial de las mismas.

Existen varios métodos de fabricación de levas, dentro de ellos se tienen:

- *Generación Geométrica*: Este método se refiere al maquinado continuo de una superficie, como por ejemplo al torneado un cilindro. Se plantea como un modo ideal de fabricar una leva, porque crea una superficie verdaderamente continua, con una exactitud limitada sólo por la calidad de la máquina herramienta y de las herramientas de corte utilizadas. Sin embargo, se usa rara vez para fabricar levas ya que la presencia de detenimientos hace extremadamente difícil aplicarlo. La aplicación más obvia de este método, es la de una leva de excéntrica que puede ser torneada y esmerilada en un torno. Norton [1995] plantea que es lo mejor que puede obtenerse en la manufactura de una leva, ya que la función de desplazamiento es virtualmente perfecta, donde los errores sólo son visibles en la medición de la función de aceleración del palpador.
- *Mecanizado con Control Numérico Continuo (CNC) con interpolación lineal o circular*: En el proceso de mecanizado con CNC la fabricación es precisa y de alta productividad. Aquí la herramienta de corte realiza el proceso de corte del metal de manera continua, manteniendo un contacto permanente con la pieza a maquinar. Un ordenador controla el movimiento de la pieza de posición a posición, según se tiene programado. Al ordenador –controlador– de la máquina se le puede suministrar la información del perfil mediante una lista de puntos, mientras mayor sea el número de puntos mayor será la precisión. La máquina sólo tiene la localización x , y de los puntos del perfil, por lo que tiene que calcular como pasar de un punto a otro mientras corta el material, para ello se utilizan algoritmos de interpolación lineal o circular. De este modo, la trayectoria de la herramienta entre los puntos sucesivos es una línea recta (Figura 1.27) o un arco de circunferencia (Figura 1.28).

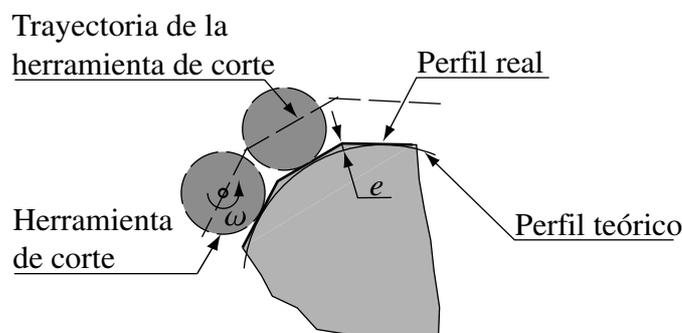


Fig. 1.27 Maquinado del perfil leva con CNC con interpolación lineal

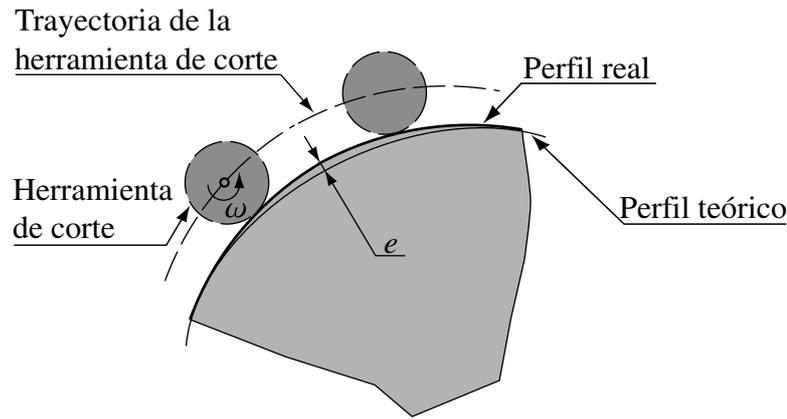


Fig. 1.28 Maquinado del perfil de leva con CNC con interpolación circular

- *Por Copiado o Duplicación:* Este método implica la creación de una leva maestra o patrón, generalmente mayor que la de escala natural, la cual se utiliza en una máquina duplicadora para producir grandes cantidades de levas. La máquina consta de dos ejes o husillos, la leva maestra se monta en uno y la pieza a mecanizar en el otro. A la leva maestra se le aplica un palpador que mediante un pantógrafo gobierna la herramienta de corte. A medida que la leva patrón y la pieza a maquinar giran lenta y conjuntamente, de manera sincronizada, el palpador sigue el contorno de la leva patrón y se elabora correspondientemente la pieza. Este proceso puede efectuarse mediante fresado o rectificado de la superficie de la leva. Generalmente la leva se corta sin mucha precisión y luego se trata térmicamente y se rectifica hasta su acabado final al tamaño preciso. La leva patrón se fabrica por uno de los métodos antes mencionados. Aquí, los errores del perfil de la leva obtenida generalmente provienen del perfil de la leva maestra, aunque también se introducen errores debido a deflexiones, desvíos de la herramienta, etc.

Referente a la fabricación de leva Fauroki, Manjunathaiah y Jee [1996], proponen un método para diseñar levas con curvas PH (*Phytagorean Hodograph*) que son unas curvas racionales con offset racional, con las cuales se eliminan las limitaciones para lograr la precisión en la fabricación de la leva. Plantean que estas curvas permiten una representación exacta en sistemas CAD (*Computer Aided Design*) y que su principal ventaja está en que las levas pueden ser fabricadas utilizando directamente la expresión analítica del perfil, a través de máquinas CNC en las que se implementen interpoladores de curvas PH. Este método propone obtener primero el perfil y después la ley de desplazamiento y sus derivadas.

Lo expuesto por los autores antes citados contradice el proceso lógico de diseño de un mecanismo de leva, ya que no se puede saber a priori que ley de desplazamiento debe de cumplir el palpador para satisfacer un movimiento requerido por una aplicación práctica. Además tampoco se puede conocer antes de obtener el perfil cual es la cinemática del palpador, ni predecir el comportamiento dinámico del mecanismo, al no poder establecer las condiciones de continuidad en la ley desplazamiento. El método propuesto por dichos autores no permite evaluar los parámetros relacionados con el dimensionado, tales como el ángulo de presión y la excentricidad, los cuales controlados adecuadamente hacen más eficiente el funcionamiento del mecanismo. Tampoco permite realizar una comprobación de las

características geométricas del perfil con el fin de garantizar un contacto leva-palpador correcto.