

OpenCourseWare
Teoría de Máquinas

CRISTINA CASTEJÓN, EDUARDO CORRAL, RAÚL GISMEROS, MARIA JESÚS GÓMEZ,
JESÚS MENESES, HIGINIO RUBIO, ABRAHAM VADILLO

Mecanismos de levas



Índice

- Introducción.
- Nomenclatura
- Clasificación
- Ley de la leva y diagrama de desplazamientos
- Síntesis de la leva
- Verificación del mecanismo
 - Angulo de presión
 - Radio de curvatura
- Fabricación de levas

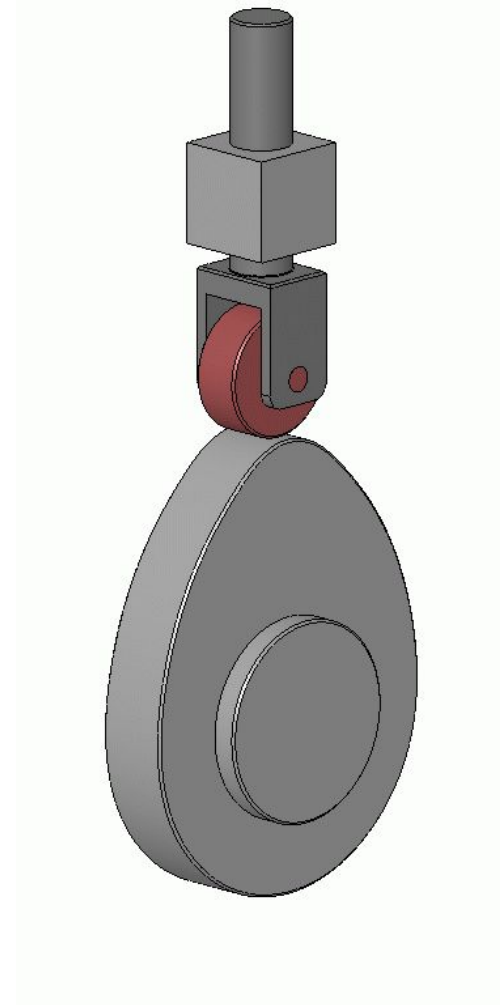
Introducción. Mecanismos leva seguidor

- Objetivo 1:

¿qué configuración topológica Deben tener los diferentes pares cinemáticos?

- Objetivo 2:

¿qué forma debe tener la superficie o curva de la leva?



Introducción. Definiciones

- Definición de **leva**:

- Elemento mecánico que sirve para impulsar por contacto directo a otro elemento mecánico, llamado **palpador o seguidor**, para que desarrolle un movimiento especificado.

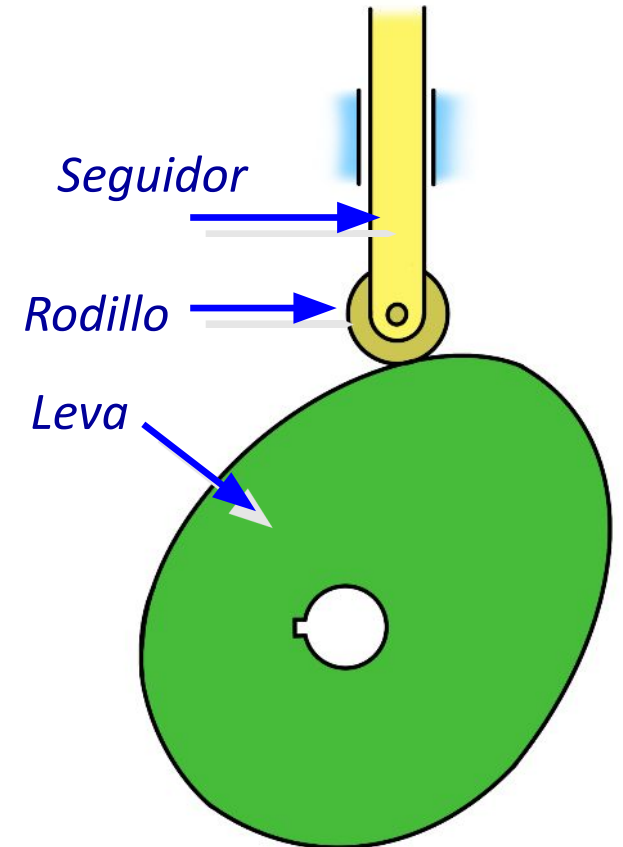
- Definición de **mecanismo de leva**:

- Es un sistema mecánico, con dos miembros móviles en contacto (leva y seguidor), unidos a un bastidor, que **transforma el movimiento según una ley de dependencia**, denominada **ley de la leva**.

- El contacto leva-palpador es un par de orden superior.

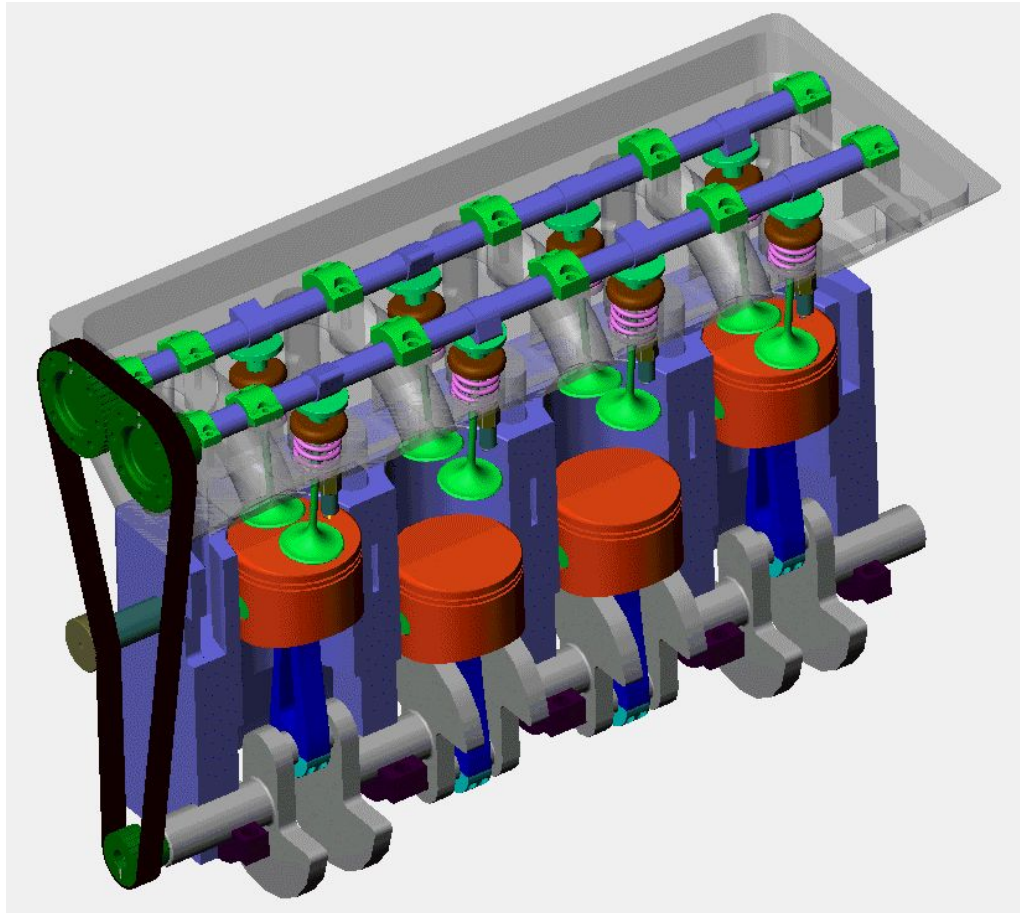
Sistema Leva-seguidor

- El conjunto de transmisión está formado por dos elementos:
 - **PALPADOR o SEGUIDOR.**
 - **LEVA.**
- Algunos tipos de levas llevan un tercer eslabón: el rodillo de contacto
- Son mecanismos sencillos, poco costosos, tienen pocas piezas y ocupan espacios reducidos.
- Ampliamente usados en la industria.
- Los mecanismos de leva se emplean como generadores de funciones. Estas funciones pueden tener casi cualquier característica deseada, además, no son difíciles de generar.



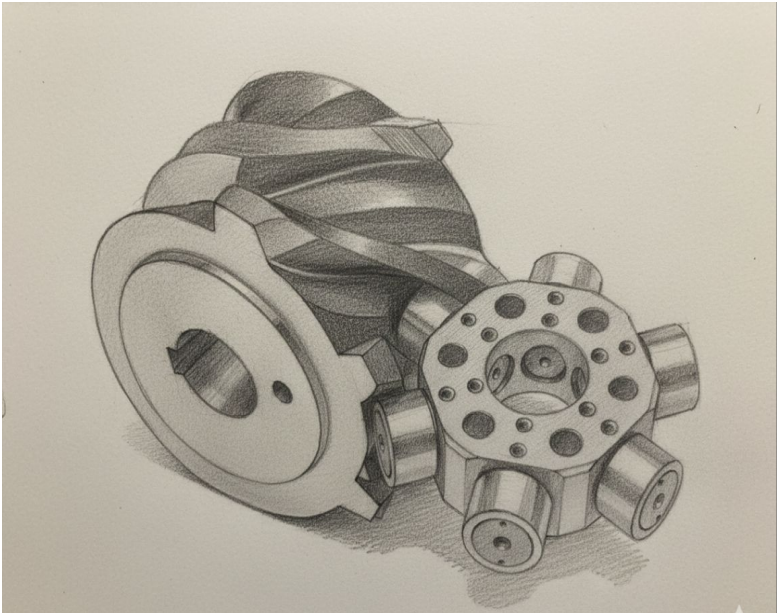
Aplicaciones

- Árbol de levas motor de combustión



Aplicaciones

- Automatización de maquinaria: indexador rotatorio
 - Industria de Envasado (Packaging)
 - Líneas de Ensamblaje de Componentes Pequeños
 - Fabricación de circuitos impresos

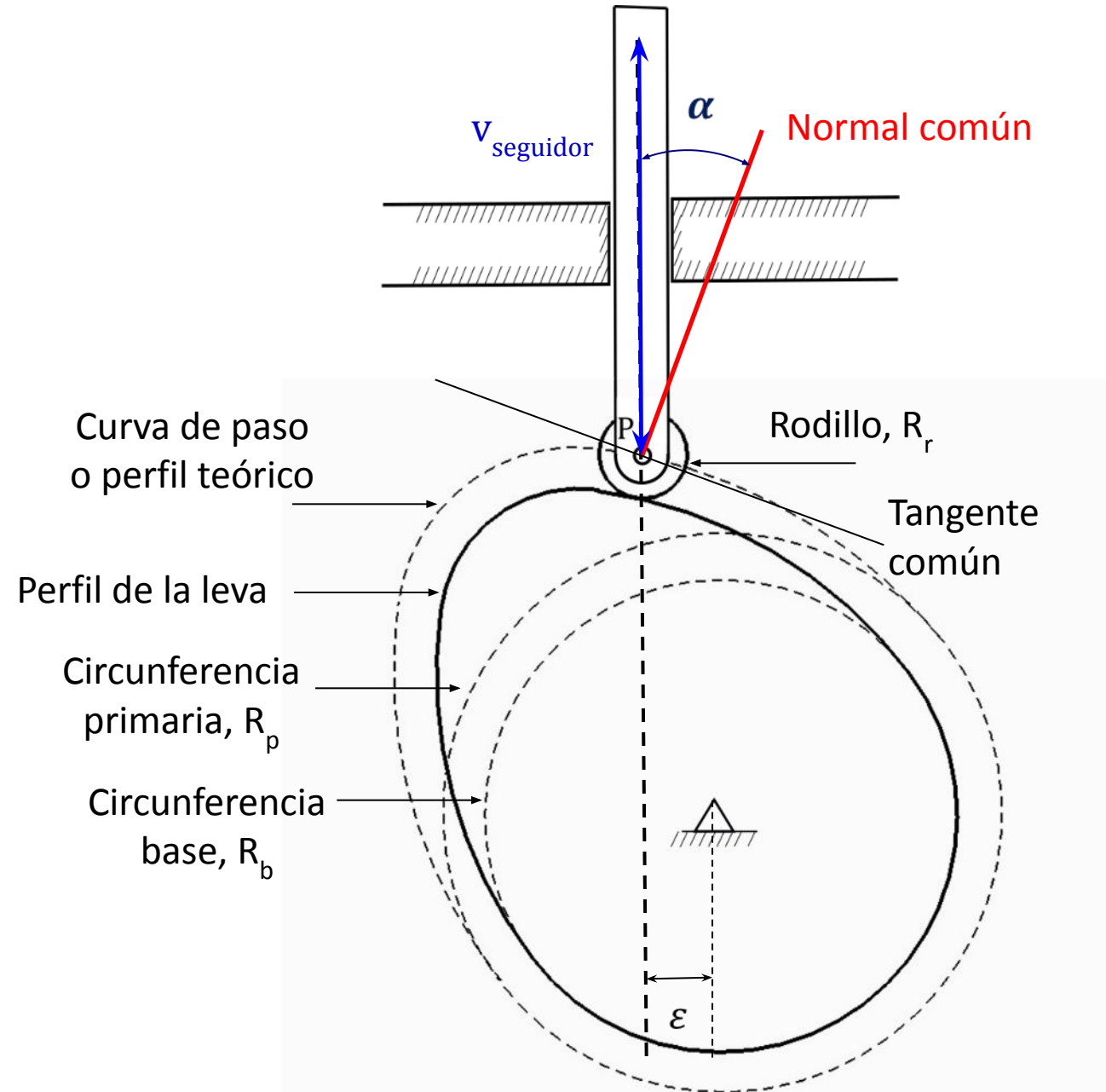


Ejemplo unidad de indexación de levas

[Sanco Automation](#)

Nomenclatura

- Curva de paso: trayectoria que describe el centro del rodillo del seguidor al recorrer el perfil de la leva
- Excentricidad (ϵ): distancia entre el eje del seguidor y el centro de rotación de la leva
- Normal en el contacto (normal común): perpendicular a la recta tangente en el contacto leva-seguidor.
- Ángulo de presión (α): ángulo comprendido entre la dirección de la velocidad del seguidor y la normal común en el contacto

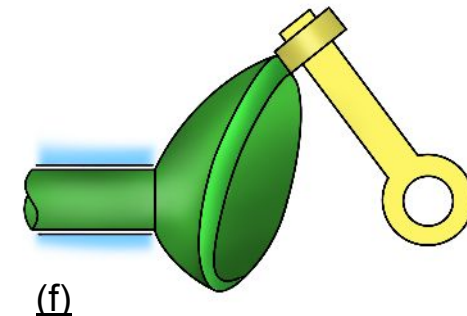
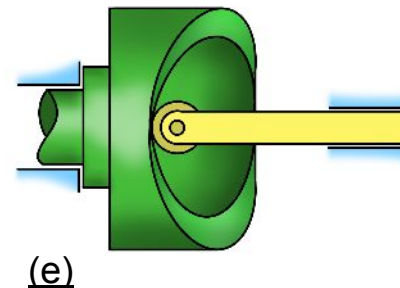
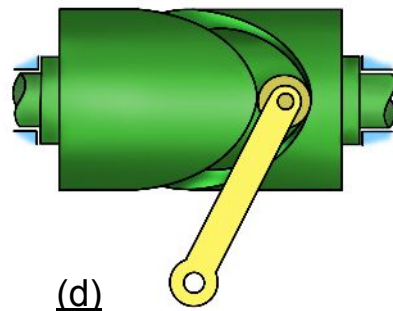
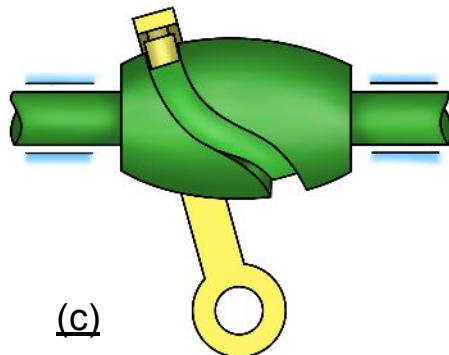
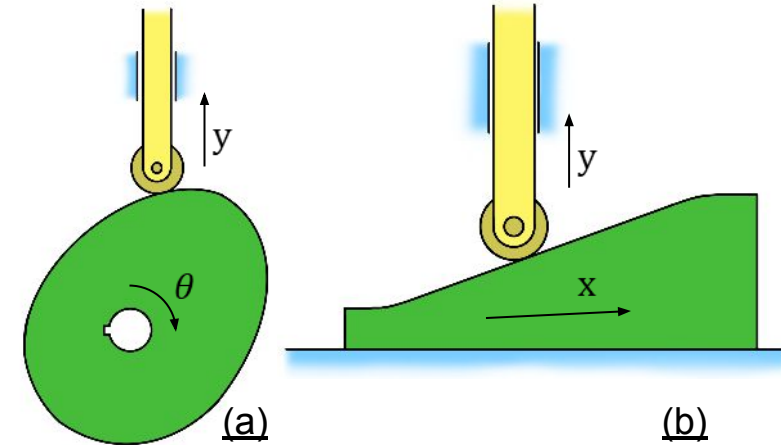


Clasificación de las levas

Clasificación en función de geometría

- Según sus formas básicas:

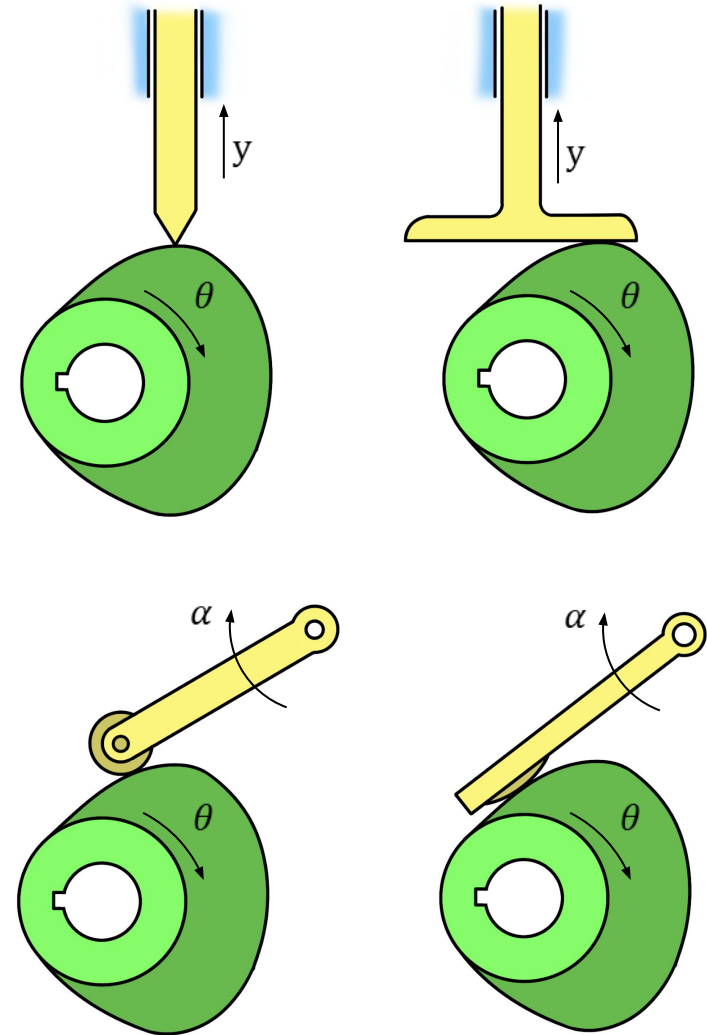
- Leva de placa (a) (de disco o radial), la más común
 - Leva de cuña(b) o de traslación, la menos utilizada
 - Leva glóbica (c) o globoidal
 - Leva cilíndrica (d) o de tambor
 - Leva frontal (e) cilíndrica
 - Leva frontal (f) esférica
- Planas o 2D
- Espaciales o 3D



Clasificación de las levas

Clasificación en función de geometría y movimiento del seguidor

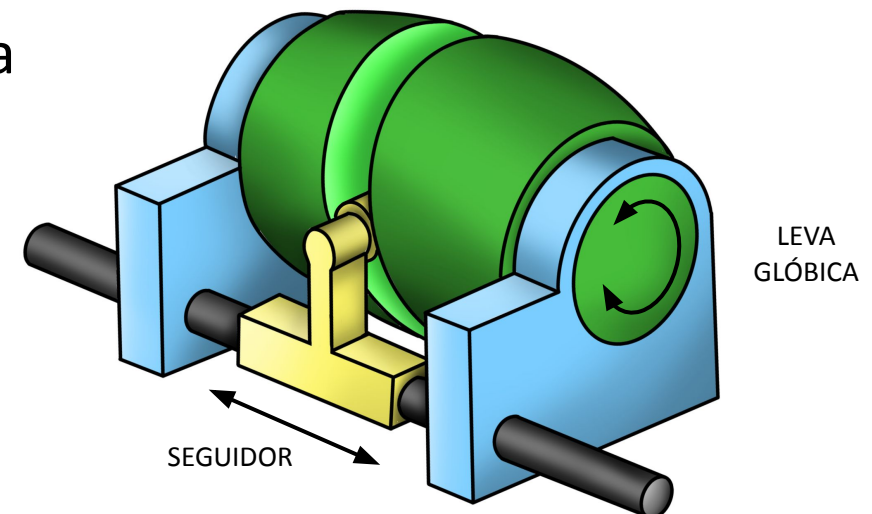
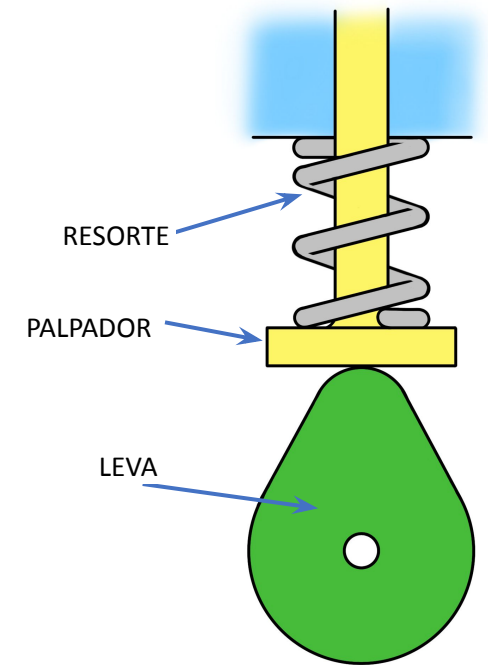
- Según sus formas básicas:
 - Seguidor de cuña (de punto), contacto puntual
 - Seguidor de cara plana, para levas de perfil simple
 - Seguidor de rodillo, minimiza el problema de rozamiento
 - Seguidor de cara esférica (o de zapata curva)



Clasificación de las levas

○ Clasificación según el tipo de cierre:

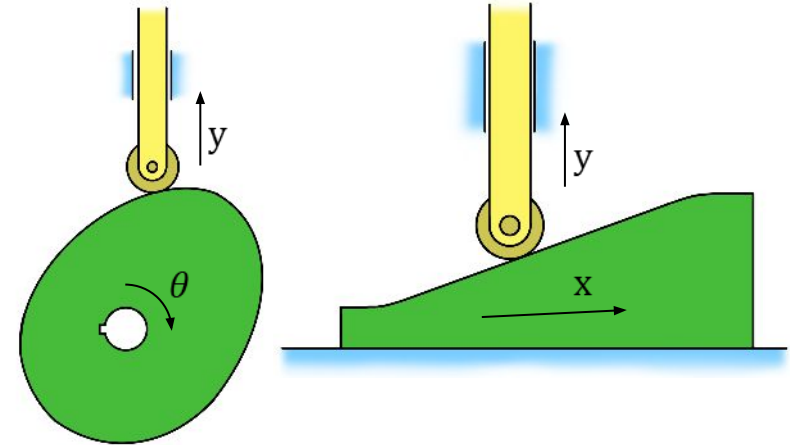
- Cierre de fuerza: la fuerza será ejercida en el seguidor.
 - Gravedad: para aceleraciones moderadas
 - Resorte: para aceleraciones mayores
- Cierre de forma: por la geometría de la leva



Clasificación de las levas

- Clasificación según el movimiento:

- De translación o alternativa
 - Excéntrico
 - Radial
- De rotación o rotatoria



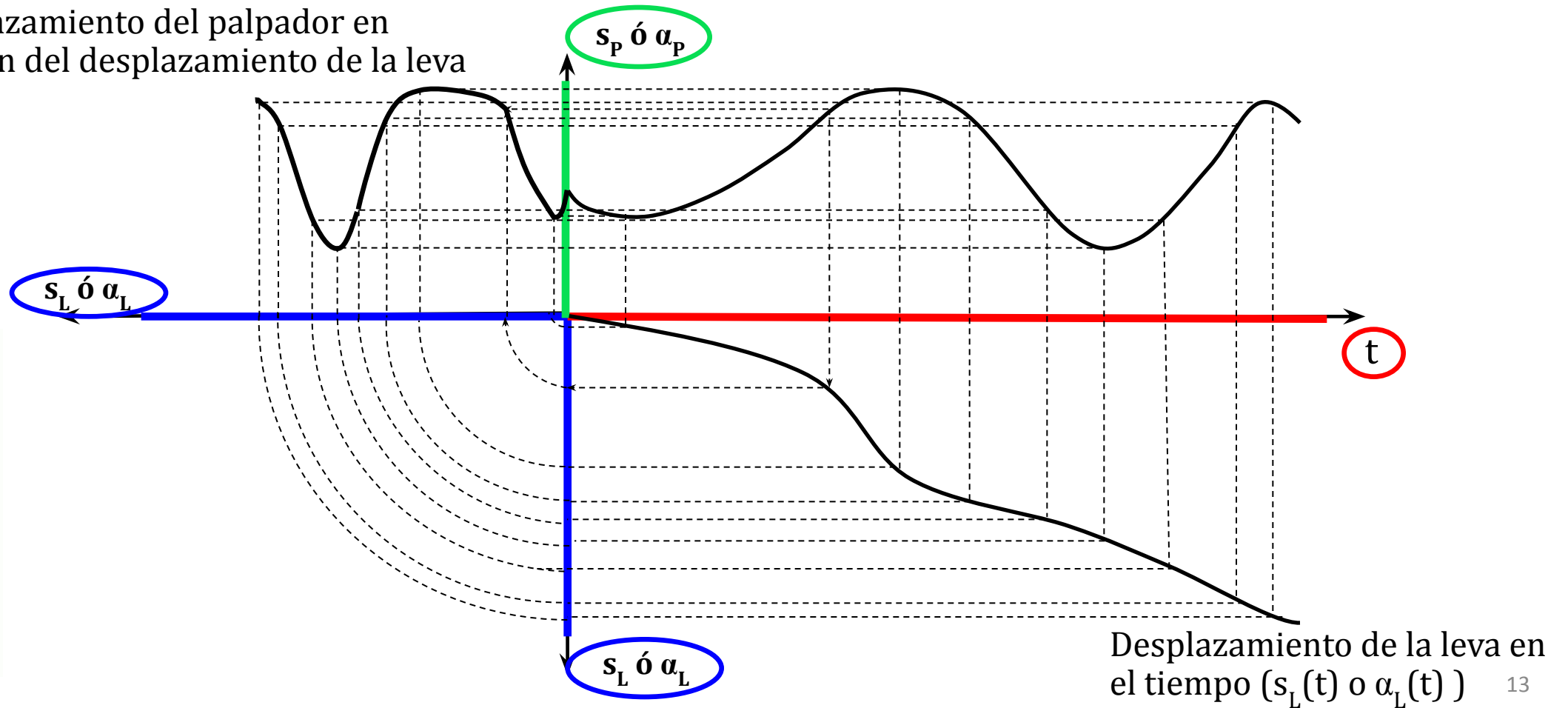
- Clasificación según el elemento que imprima el movimiento al otro:

- Leva directa (la leva mueve el palpador).
- Leva inversa (el palpador mueve la leva).

Ley de la Leva

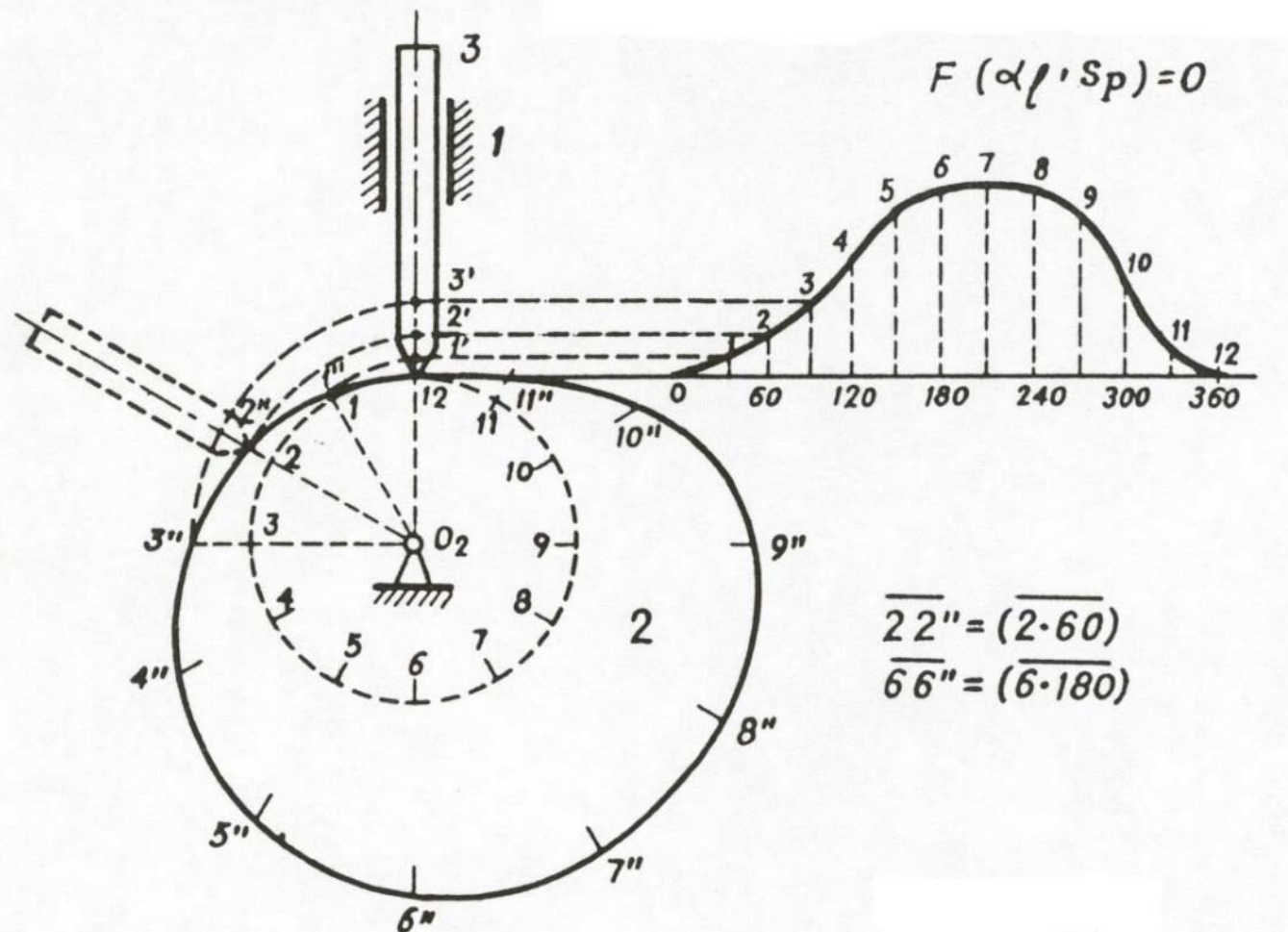
- Es la función que relaciona el desplazamiento de la leva, lineal o angular (s_L o α_L) y el desplazamiento del palpador, lineal o angular (s_p o α_p).

Desplazamiento del palpador en
función del desplazamiento de la leva



Ley de la Leva

- Construcción gráfica de la LEY DE LA LEVA para una leva de rotación que propulsa un palpador



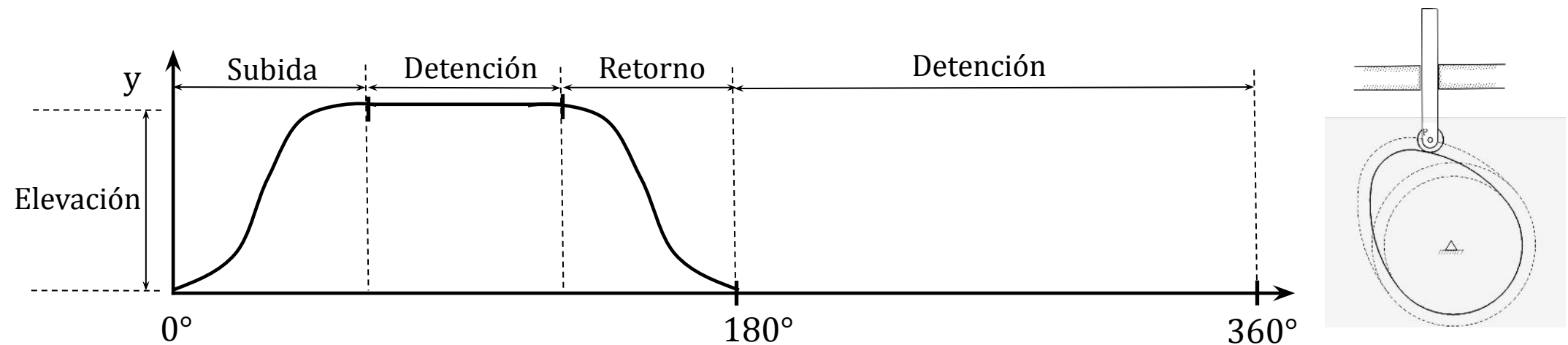
Desplazamiento del palpador
en función del desplazamiento
de la leva

Diagrama de desplazamientos

- La ley del movimiento o ley de la leva viene dada por el perfil de la leva.
 - El movimiento del palpador o seguidor, al recorrer una trayectoria obligada, viene prefijado por el tipo de perfil de la leva que se adopte.
- El **diagrama de desplazamientos** es la representación gráfica de la ley de desplazamiento en un sistema de coordenadas.
- En el diagrama de desplazamientos, se representan el desplazamiento angular o lineal del palpador (eje de ordenadas) en función del desplazamiento angular o lineal de la leva (eje de abscisas).
- A partir del diagrama de desplazamientos, se determina el perfil de la leva: teórico o real (considerando las características del palpador).

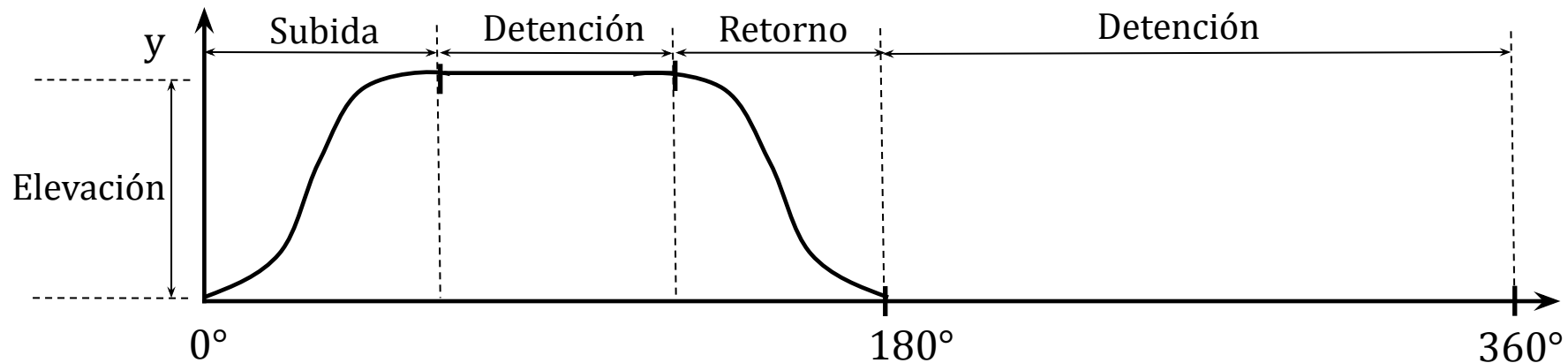
Etapas de diseño: Diagrama de desplazamientos

- En el diagrama de desplazamientos se trazan curvas de acuerdo entre los recorridos efectuados durante las etapas de **subida, detención y retorno**.



Programas de movimiento

- Cuando la **leva** completa un **ciclo de movimiento**, el palpador ejecuta una serie de **eventos: alejamientos (S) o subidas, acercamientos (B) o retornos y detenciones (D)**.
- La secuencia de estos eventos, durante una vuelta completa de la leva, determina el **programa de movimiento** para el palpador.
- Se establecen tres programas de movimiento, la combinación de los cuales permite generar cualquier programa de movimiento deseado.
 - Alejamiento-Acercamiento (**S-B**).
 - Alejamiento-Acercamiento-Detenimiento (**S-B-D**).
 - Alejamiento-Detenimiento-Acercamiento-Detenimiento (**S-D-B-D**).

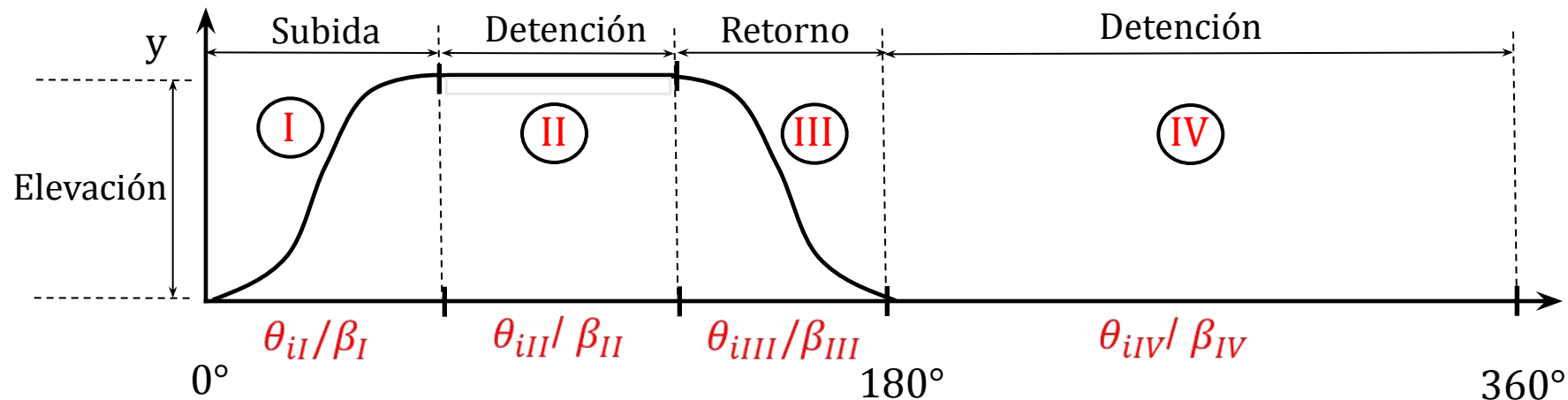


Función de desplazamiento

- Ley o función desplazamiento: $y = y(\theta)$
 - Define el movimiento de salida que rige al seguidor.
 - La **variable dependiente** es el desplazamiento del seguidor (típico) y la **variable independiente** es el ángulo girado por la leva (leva giratoria) o el desplazamiento (levas alternativas)
 - El desplazamiento depende del tipo de seguidor.
 - En un seguidor traslacional es la **longitud**.
 - En un seguidor oscilante se emplea un **ángulo** (raras veces se utiliza una longitud: la distancia de un punto del seguidor al centro de giro de la leva).

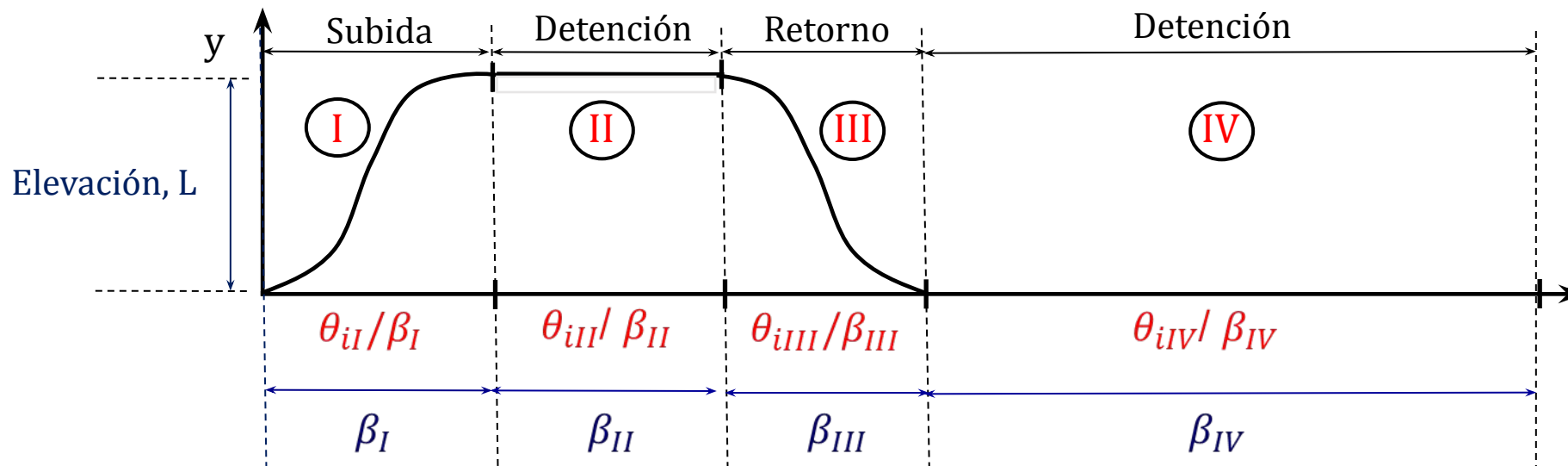
Función de desplazamiento

- El perfil de la leva está creado a partir de la yuxtaposición de varios diagramas de desplazamiento, cada uno de los cuales es válido durante un giro o movimiento alternativo completo de la leva.
- En las levas planas rotativas, cada intervalo se trata de manera independiente definiendo una variable adimensional como cociente de dos ángulos: el numerador θ_i corresponde al ángulo parcial recorrido dentro de un intervalo y el denominador β_i es el ángulo total de rotación del intervalo.
- El cociente θ/β varía de 0 a 1, siendo 0 el punto inicial y 1 el punto final del tramo.
- La función desplazamiento se construye por la unión de diferentes tipos de tramos y está completa cuando están definidos todos los tramos parciales necesarios para completar un ciclo completo (en las levas planas de rotación: 360°).



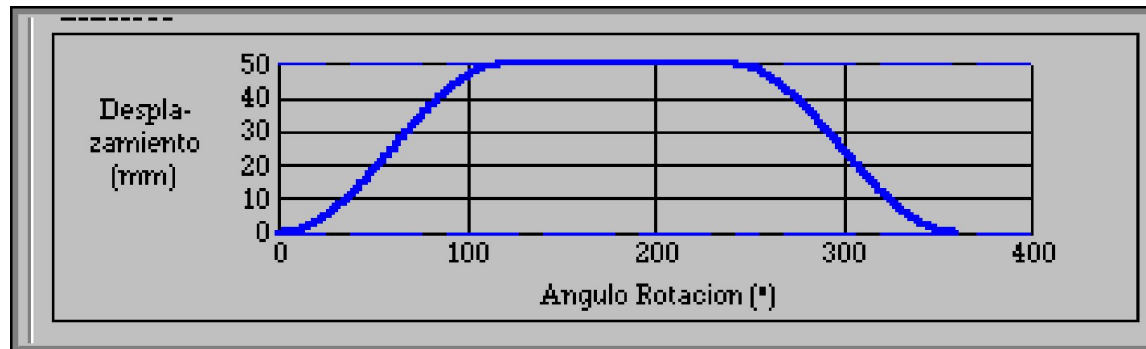
Función de desplazamiento

- Cada tramo parcial debe contener la siguiente información:
 - **El tipo de movimiento para el tramo.** Hay diferentes curvas que son comúnmente empleadas en la síntesis de levas: armónica simple y doble, cicloidal, polinómica, de velocidad constante, etc.
 - **El ángulo parcial de rotación β** sobre el que se construye el tramo.
 - **La magnitud del movimiento lineal** (con seguidores traslacionales) **o angular** (con seguidores oscilantes) y su sentido. A este valor se le llamará **L** (elevación).

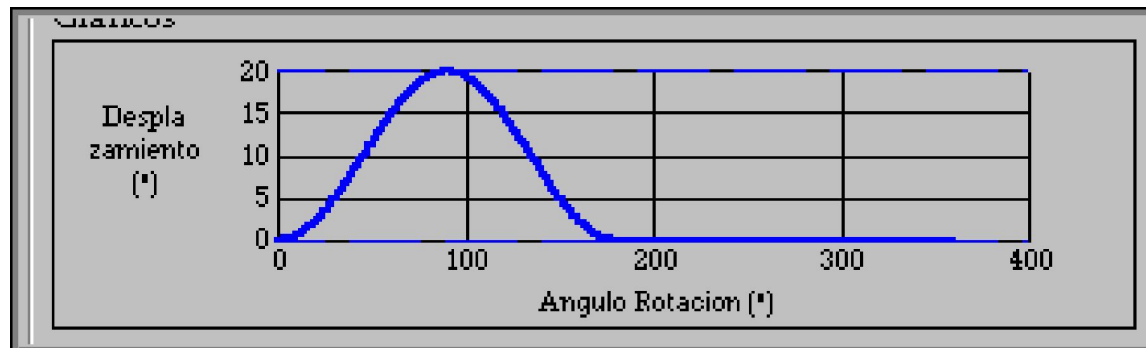


Función de desplazamiento: ejemplo

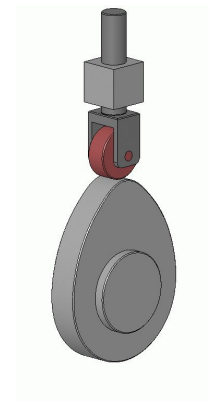
- Función desplazamiento: $y = y(\theta)$
 - Movimiento de salida que rige al seguidor.
 - Leva: unión de diferentes tramos (tipo, ángulo, elevación).



Ejemplo 1: Tres tramos de 120° cada uno



Ejemplo 2: Tres tramos: 90°, 90° y 180°

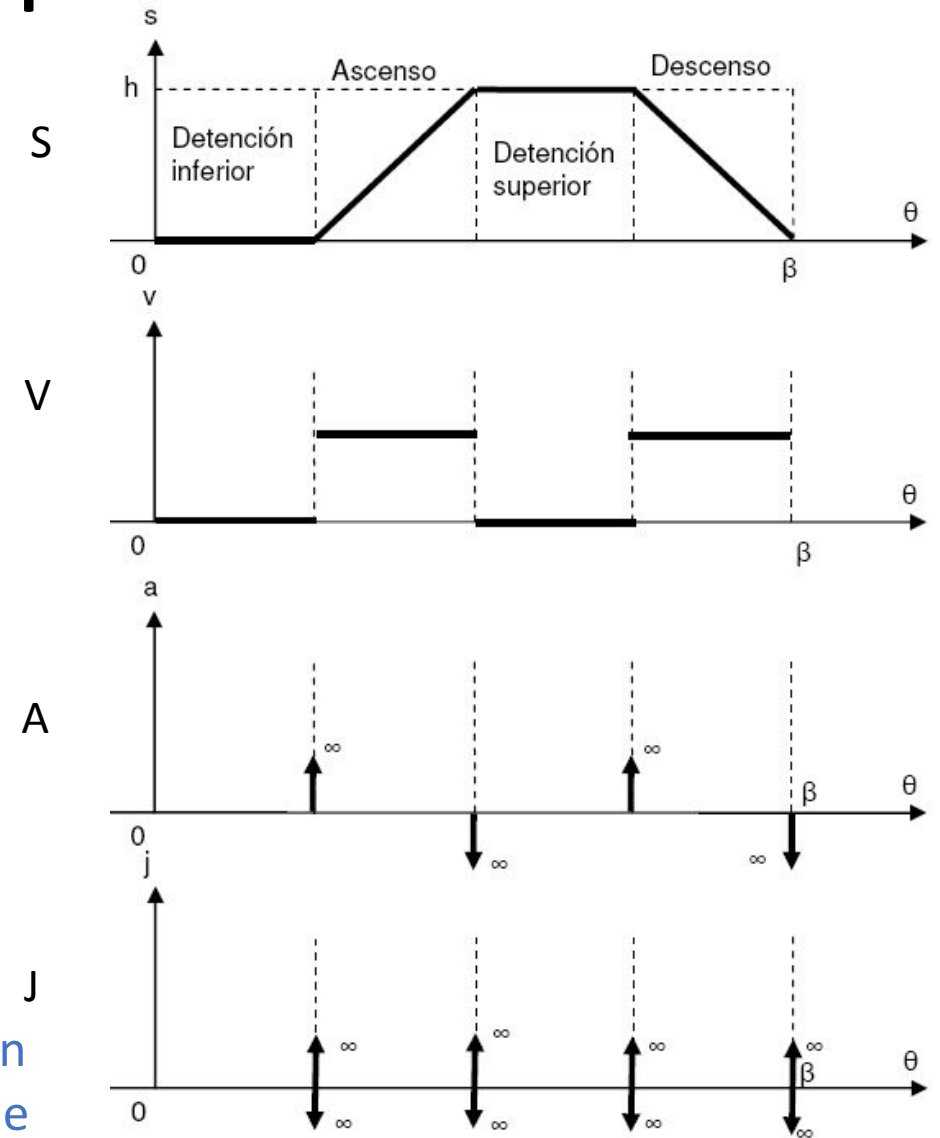


Derivadas de la Función de desplazamiento

Diagramas S-V-A-J:

- Para verificar que se cumple la ley de continuidad, se especifican los diagramas SVAJ:
 - **S** Función Desplazamiento
 - **V** Función Velocidad
 - **A** Función Aceleración
 - **J** Función Sobreaceleración o de golpeteo

Ejemplo de diagramas SVAJ para un diseño de leva que no cumple la ley de continuidad



Derivadas de la Función de desplazamiento

- Derivadas de la función de desplazamientos $y = y(\vartheta)$

Derivadas cinemáticas

$$\left\{ \begin{array}{l} y' = \frac{dy}{d\vartheta} \\ y'' = \frac{d^2y}{d\vartheta^2} \\ y''' = \frac{d^3y}{d\vartheta^3} \end{array} \right.$$

Derivadas respecto al tiempo

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{d\vartheta} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = y' \cdot \omega \\ \ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2} = y'' \cdot \omega^2 + y' \cdot \alpha \\ \dddot{y} = \frac{d^3y}{dt^3} = y''' \cdot \omega^3 + 3y'' \cdot \omega \cdot \alpha + y' \cdot \alpha \end{array} \right.$$

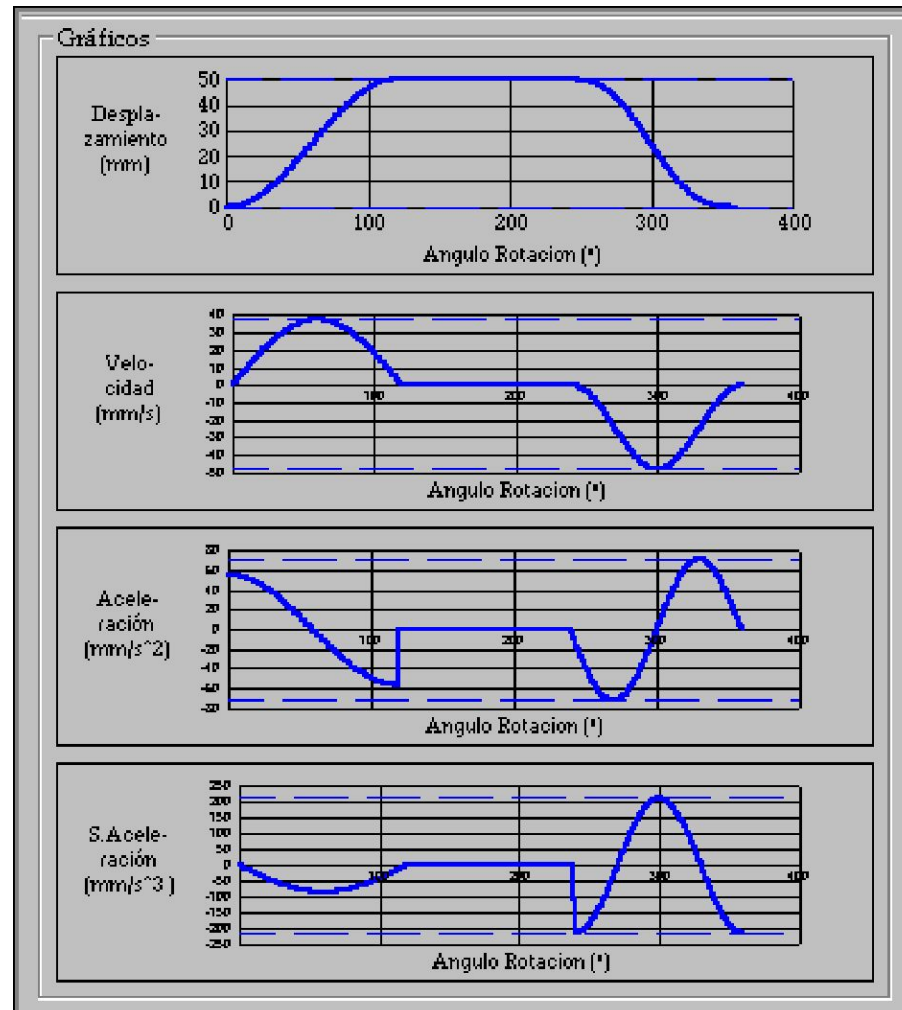
Si ω es cte:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{y} = y' \cdot \omega \\ \ddot{y} = y'' \cdot \omega^2 \\ \dddot{y} = y''' \cdot \omega^3 \end{array} \right.$$

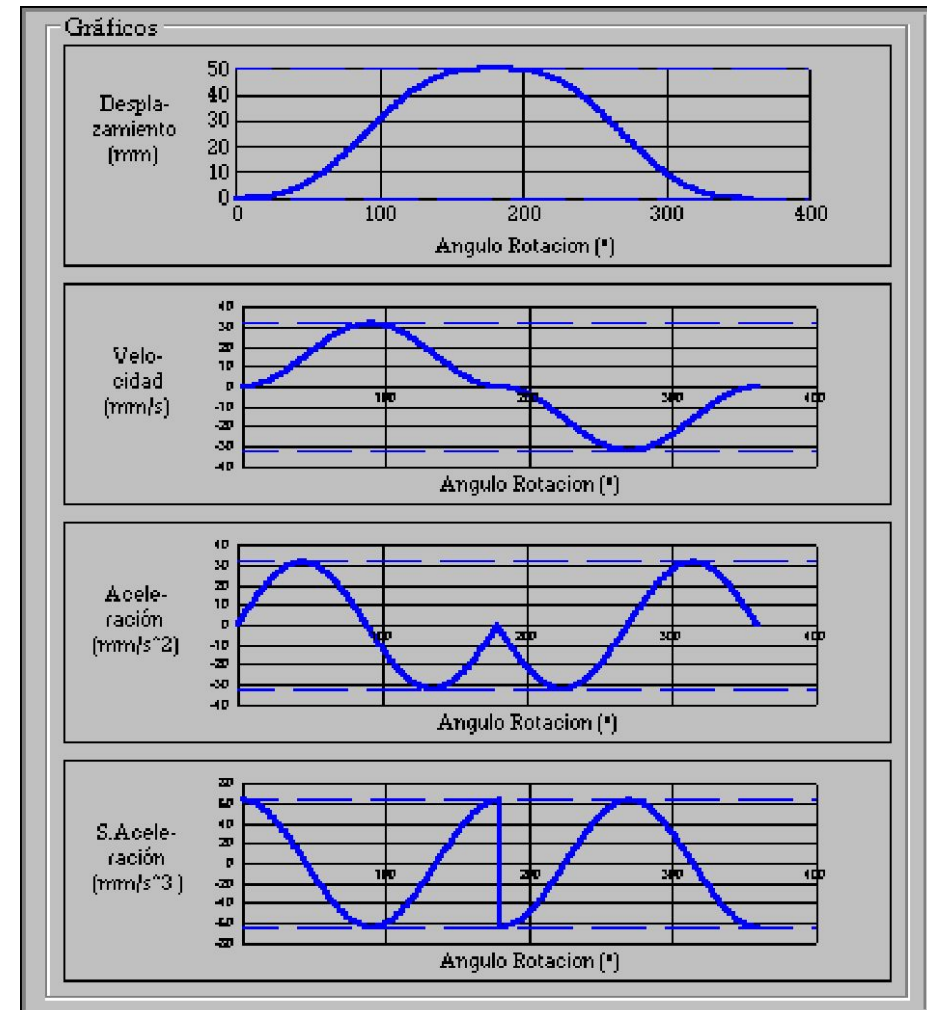
Ley de continuidad

- La ley fundamental de la leva es que la función de desplazamientos debe cumplir la **ley de la continuidad**:
 - Las funciones de desplazamiento, velocidad y aceleración deben ser continuas.
 - Se admite una función de sobreaceleración discontinua, pero esto ocasiona vibraciones que serán más graves cuanto más elevada sea la velocidad de la leva.
 - Los valores pico de velocidad y aceleración deben ser lo más bajos posibles, para minimizar el consumo energético y los esfuerzos dinámicos.

Ley de continuidad



Discontinuidad en aceleración: no aceptable



Discontinuidad en sobreaceleración: aceptable

Funciones de desplazamiento más comunes usadas

Las funciones o curvas
más comunes usadas
en levas

Armónico simple

Cicloidal

Polinómicas

- Velocidad constante
- Aceleración constante

Movimientos de medio período

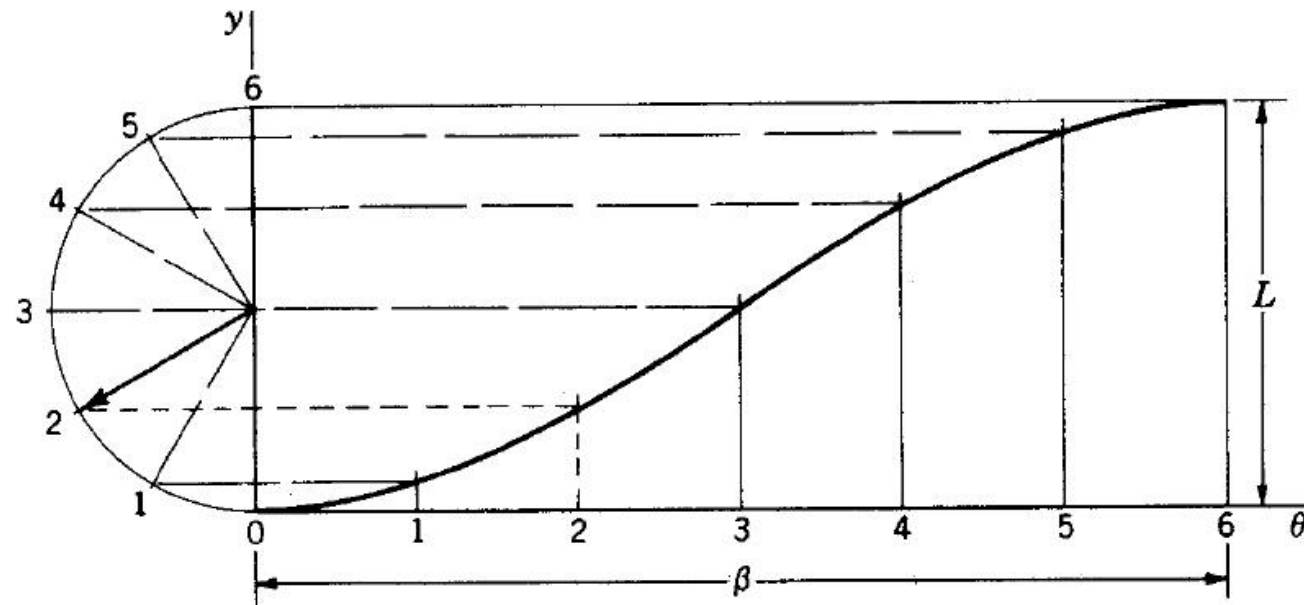
- Semiarmónico de velocidad final nula
- Semiarmónico de velocidad inicial nula
- Semicicloidal de velocidad final nula
- Semicicloidal de velocidad inicial nula

Armónico doble

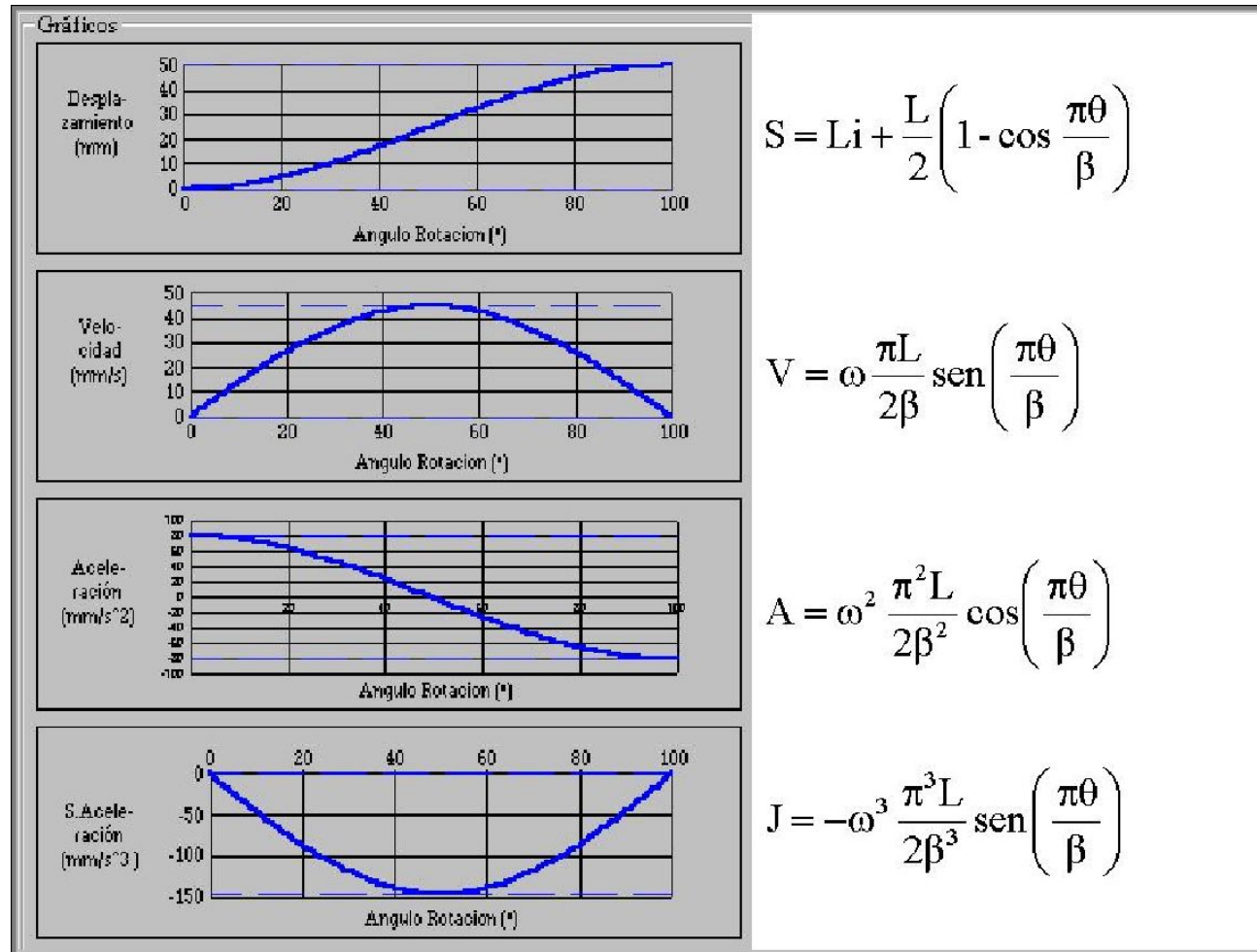
Perfil armónico simple

- **Armónico simple.**

- Uno de los más sencillos y se pueden alcanzar altas velocidades.
- Imposible combinar con detenimiento (discontinuidad en aceleración).
- Si se decide ascenso y descenso consecutivos se debe emplear dos tramos de 180° : Leva aceptable que no viola la ley de continuidad (excéntrica).



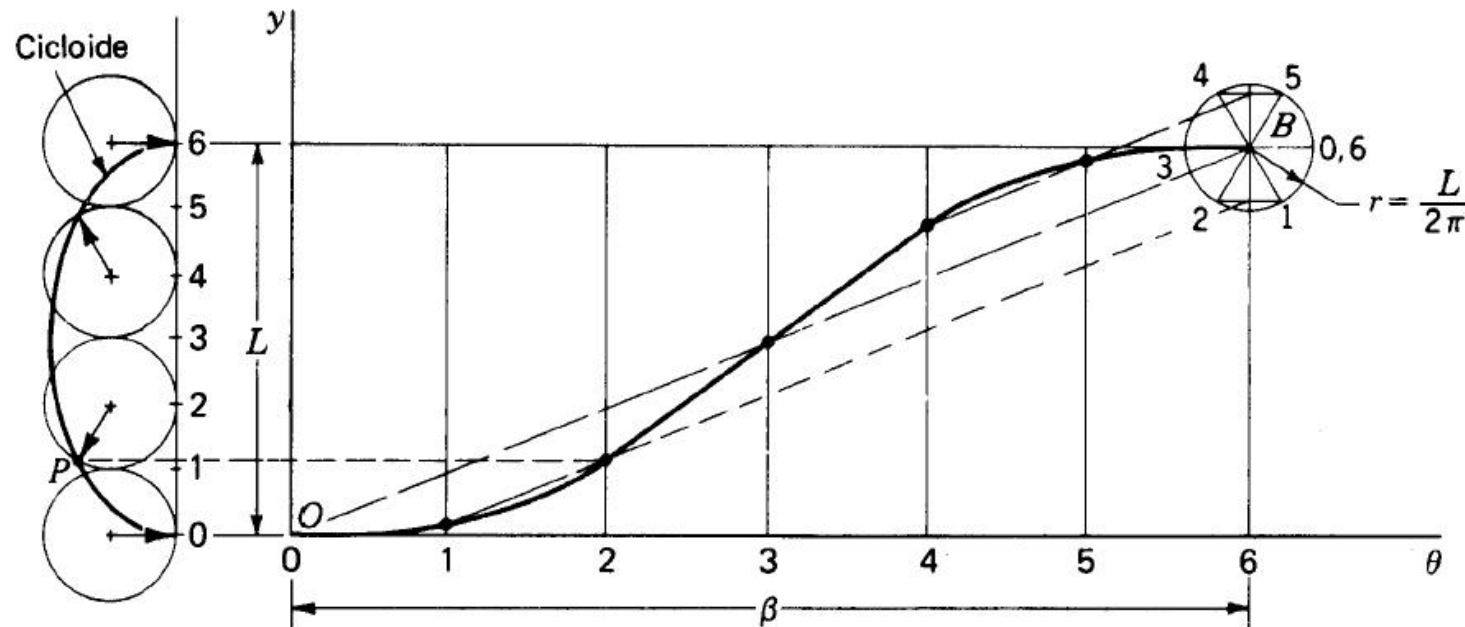
Perfil armónico simple



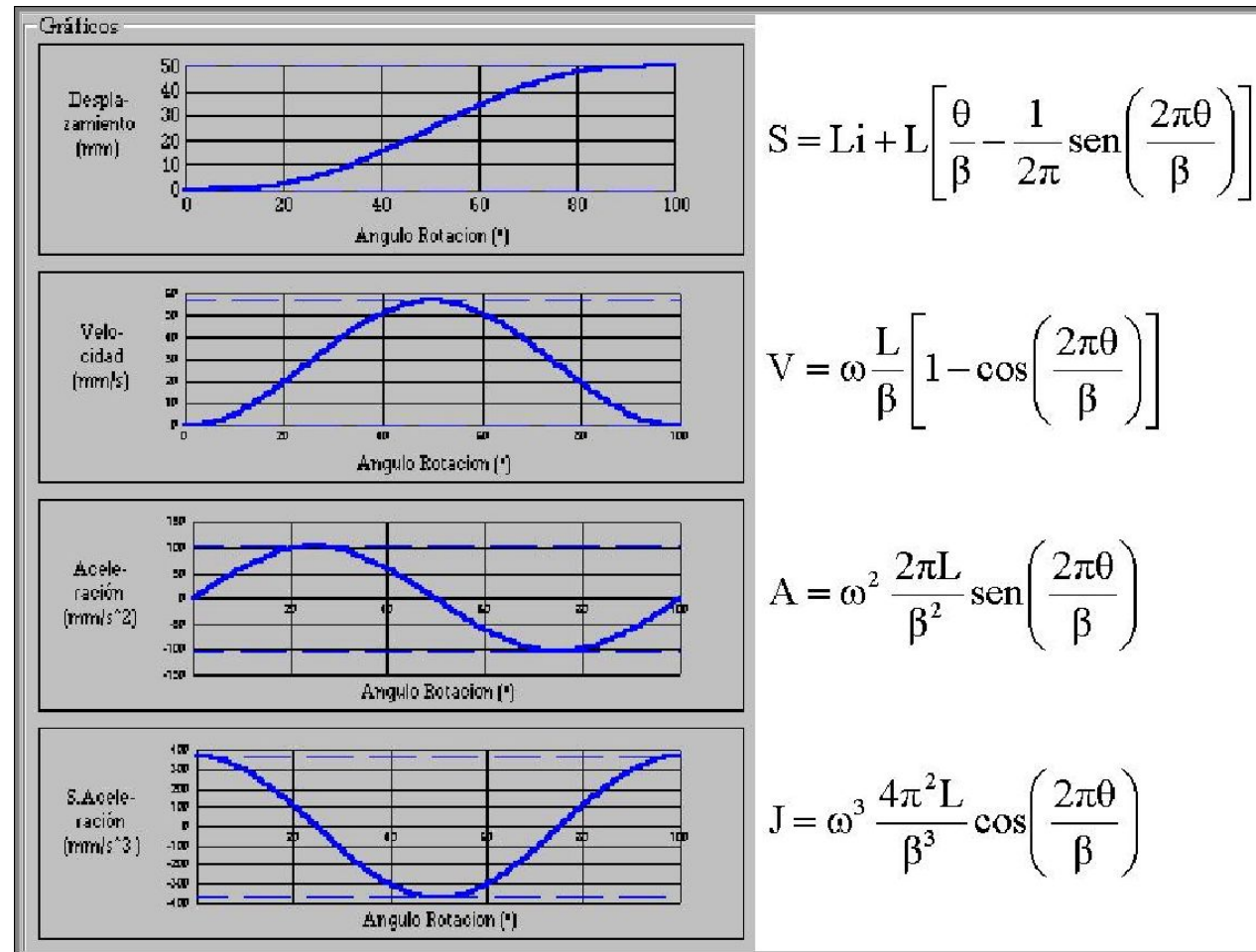
Perfil Cicloidal

- **Cicloidal.**

- Todas las funciones son continuas.
- Mala elección si ascenso y descenso consecutivos: valores pico de velocidad y aceleración superiores al caso de emplear perfil armónico simple.



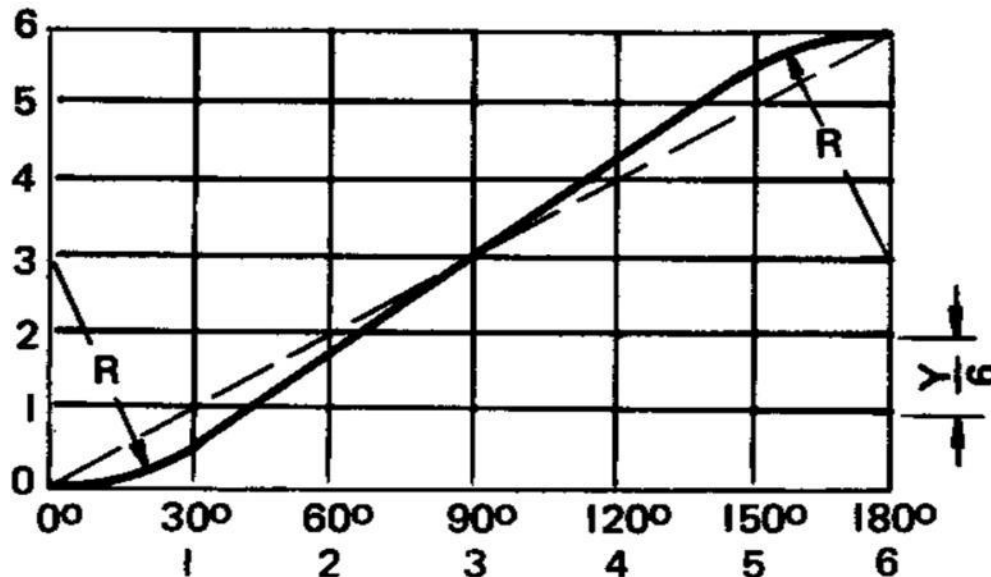
Perfil Cicloidal



Perfil de Velocidad Constante

- **Velocidad constante**

- Consiste en un desplazamiento lineal.
- No combinable con detenimientos (incumpliría continuidad).
- Se emplea con movimientos de medio período.



**Función de velocidad
constante
modificada**

Funciones polinómicas

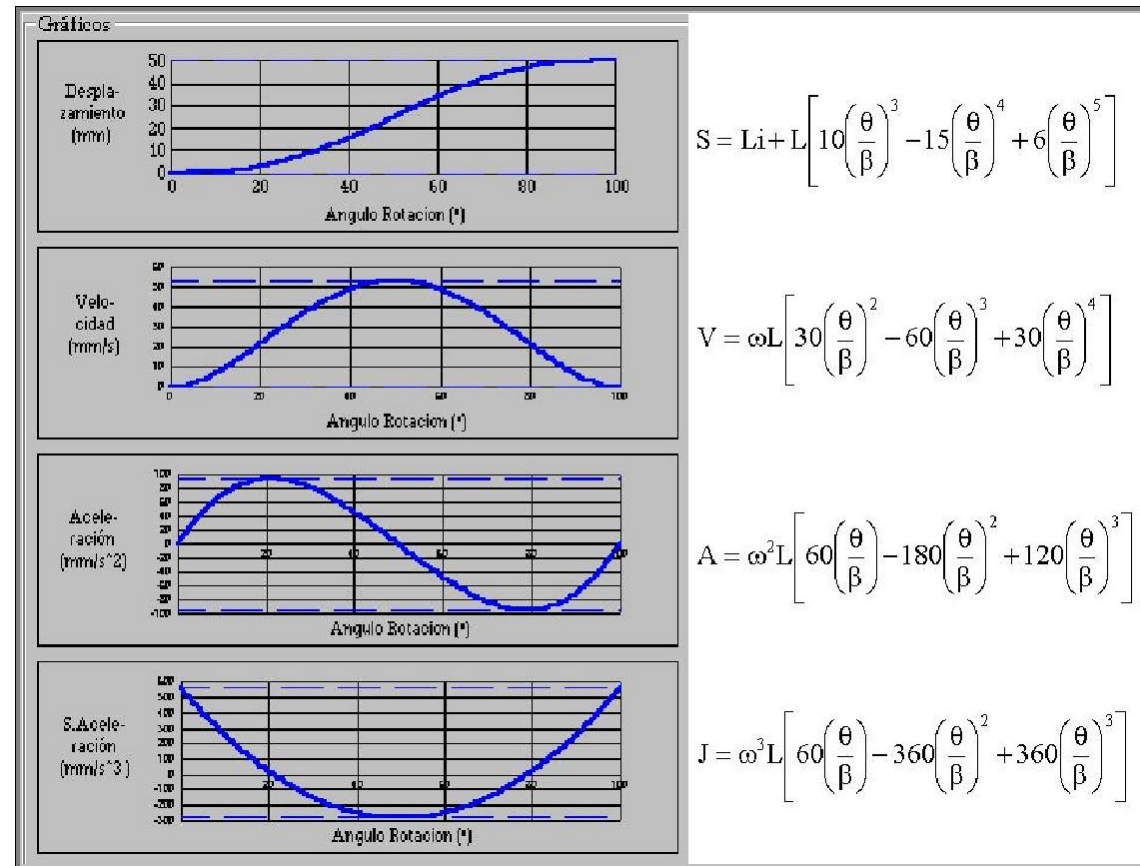
- **Polinómico de 5º grado.**

- Se cumple ley de continuidad si se impone la continuidad en desplazamiento, velocidad y aceleración en los extremos del intervalo.
- Caso particular: velocidad y aceleración nulas.

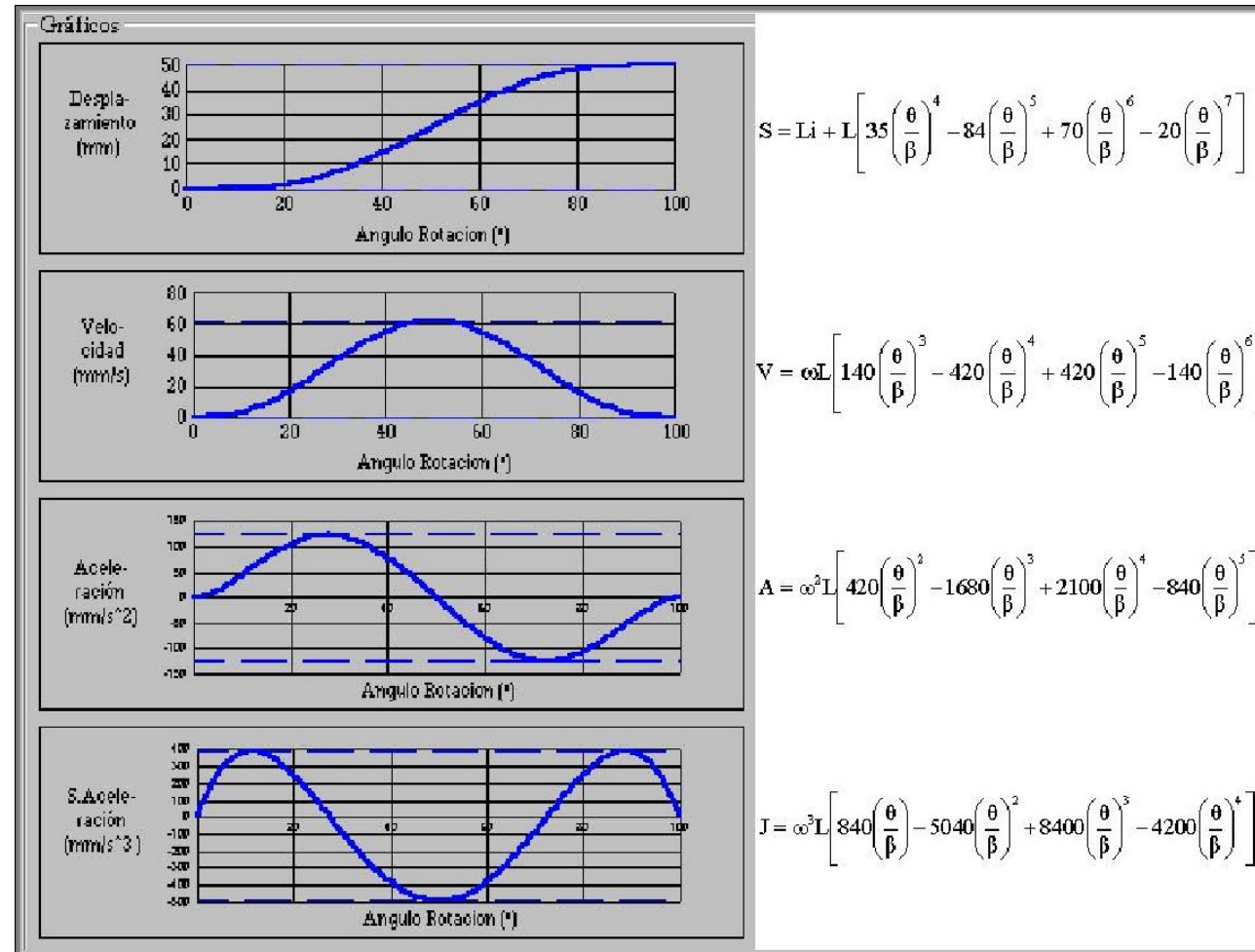
- **Polinómico de 7º grado.**

- Se impone la continuidad en desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración en los extremos del intervalo.
- Caso particular: velocidad, aceleración y sobreaceleración nulas.

Funciones polinómicas 3-4-5



Funciones polinómicas 4-5-6-7

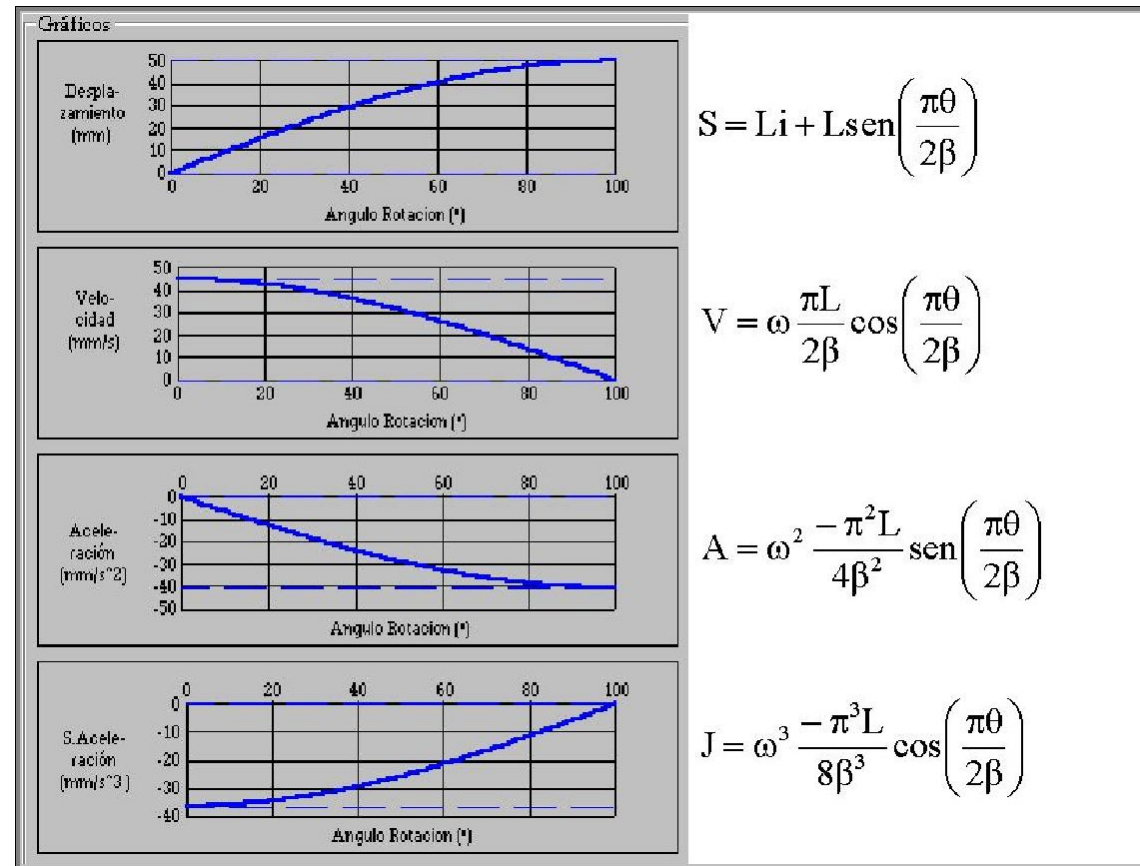


Otras Funciones: movimientos de semiperiodo

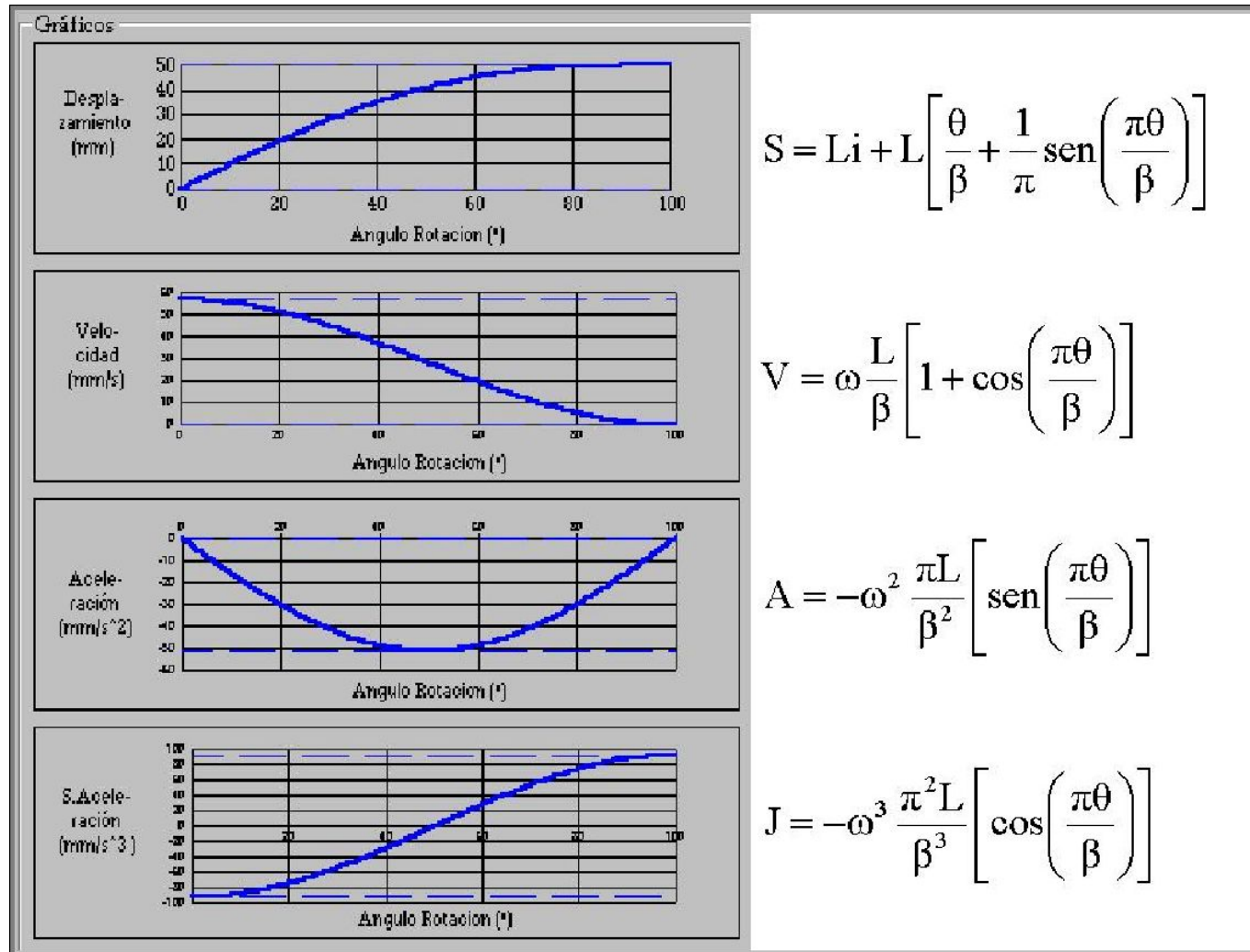
- **Movimientos de semiperiodo.**

- El armónico simple y el cicloidal presentan velocidades nulas en sus extremos: no son combinables con tramos de velocidad constante. Por esta razón se emplean los de semiperiodo.
- Velocidad no nula en uno de sus extremos.
- **Semiarmónicos:** aceleración no nula en el extremo opuesto al de velocidad nula.
- **Semicicloidales:** aceleración nula en ambos extremos.

Perfil semiarmónico $V_{\text{Final}} = 0$



Perfil Semicicloidal de $V_{\text{Final}} = 0$



Otras funciones

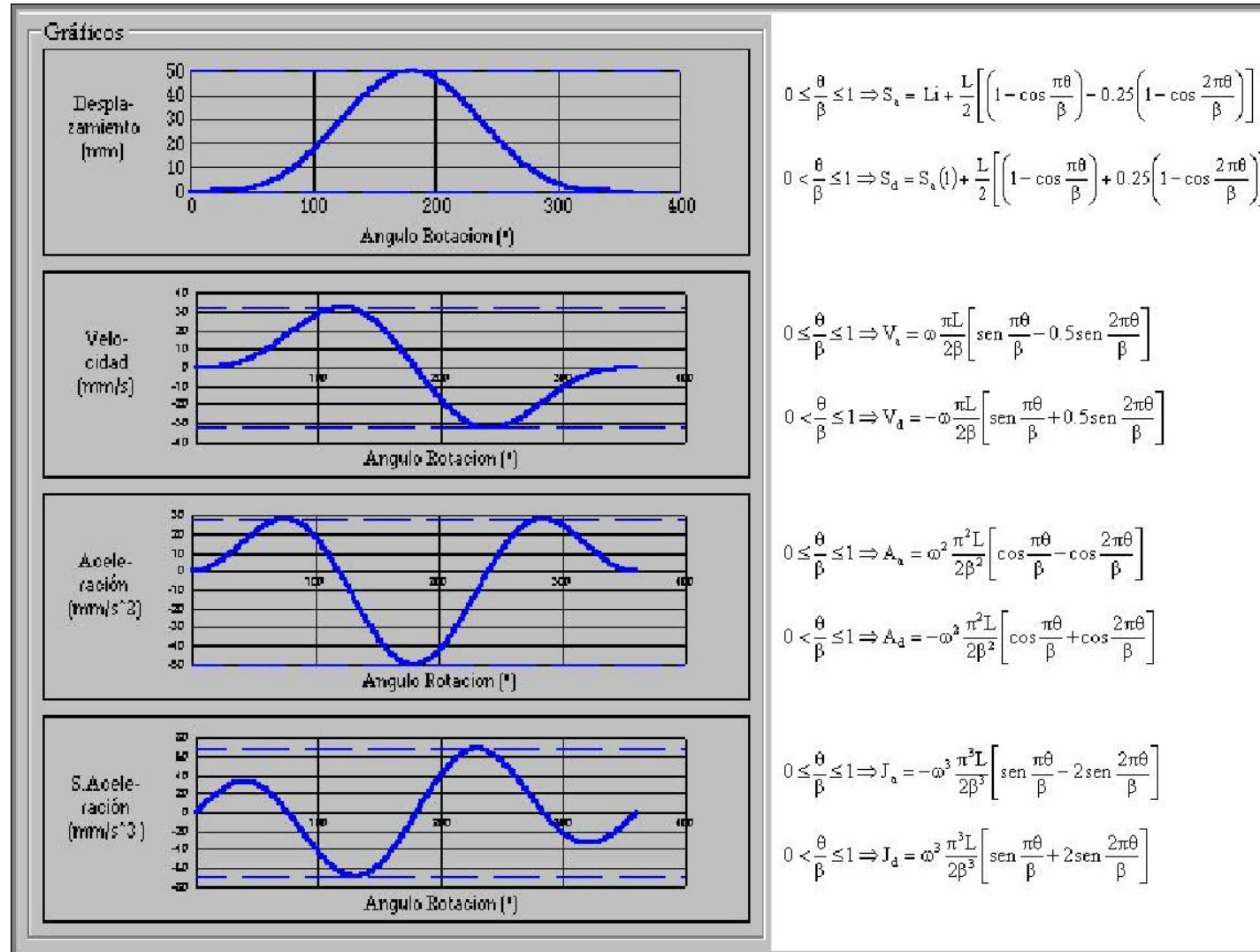
- **Armónico doble.**

- Movimiento combinado de ascenso y descenso.

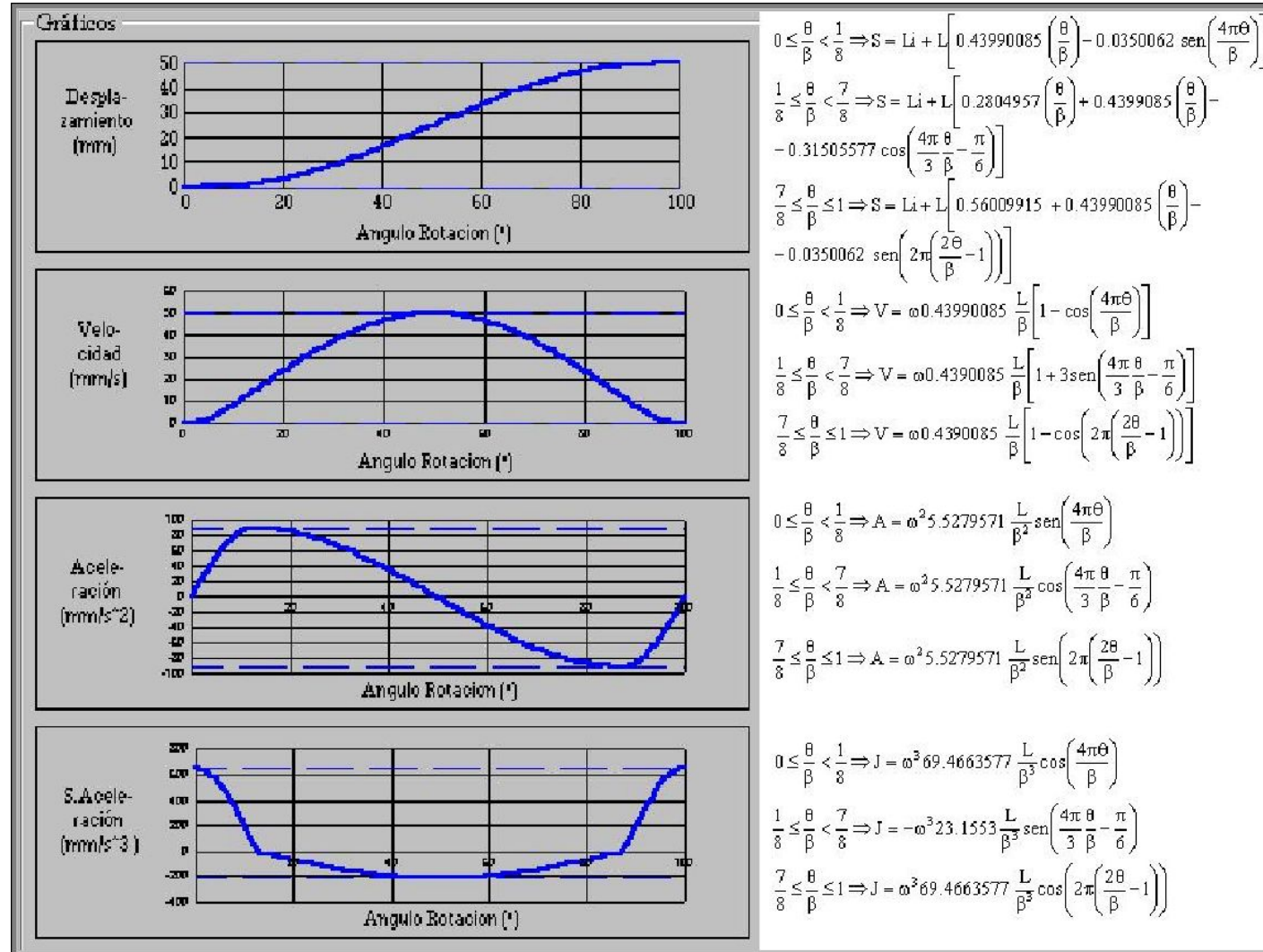
- **Movimientos compuestos.**

- Aceleración de onda senoidal modificada: aceleración como combinación de dos ondas senoidales de frecuencias distintas.
 - Aceleración de onda trapecial modificada: generada a partir de aceleración de onda cuadrada.

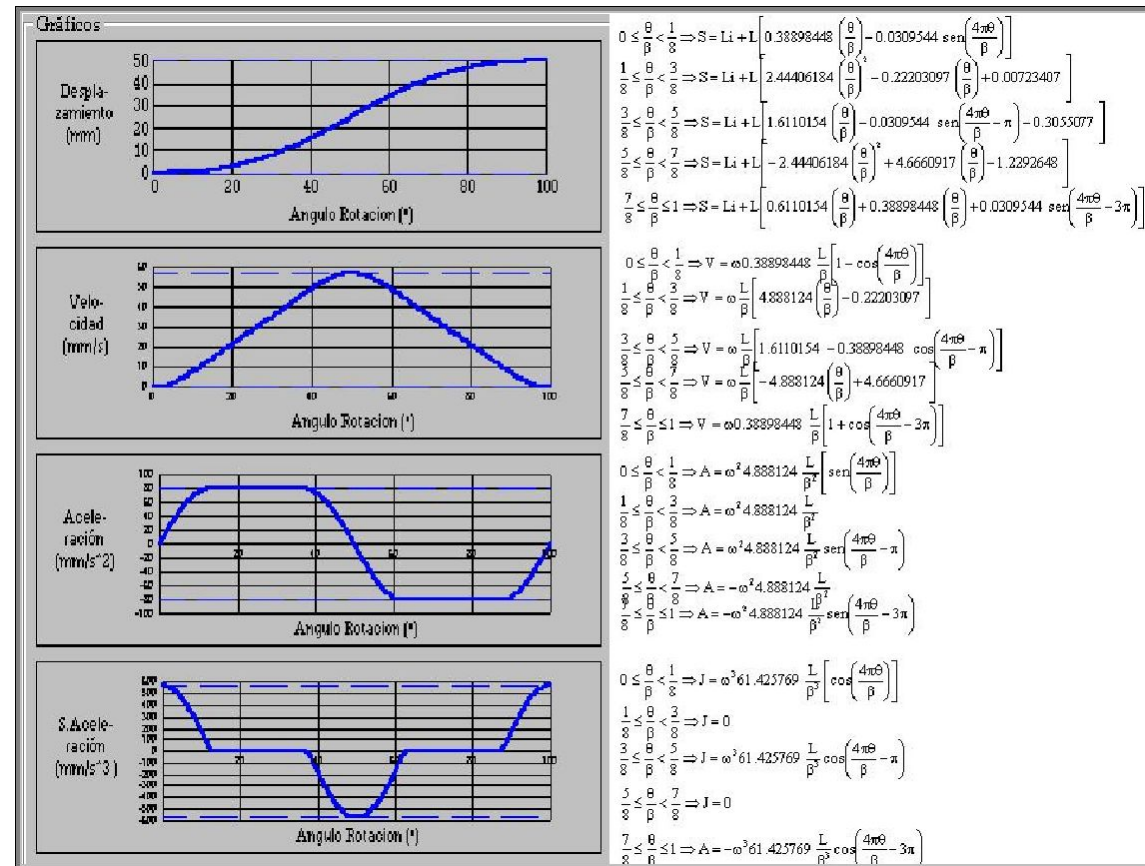
Perfil armónico doble



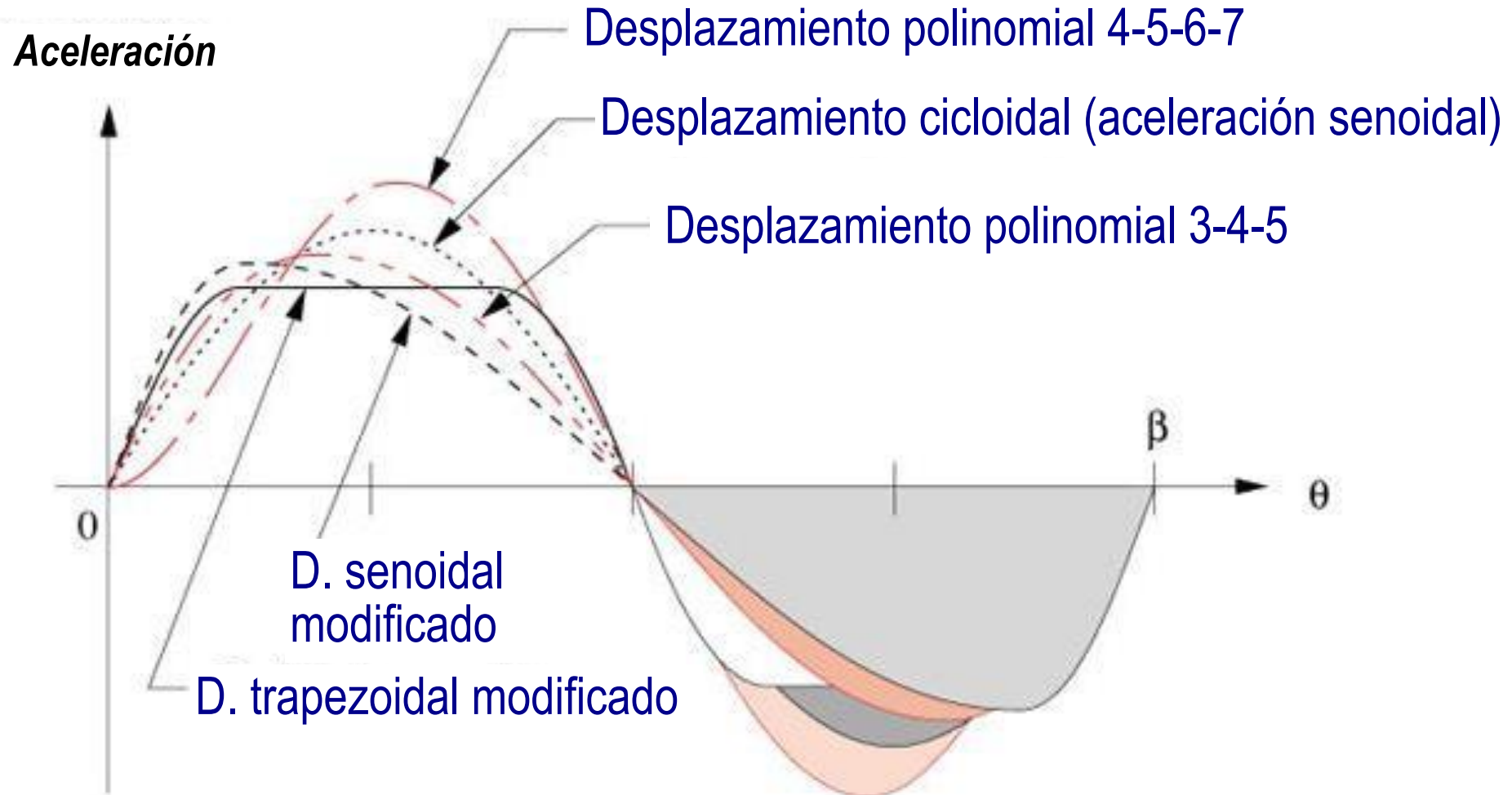
Aceleración de onda senoidal modificada



Aceleración de onda trapezoidal modificada

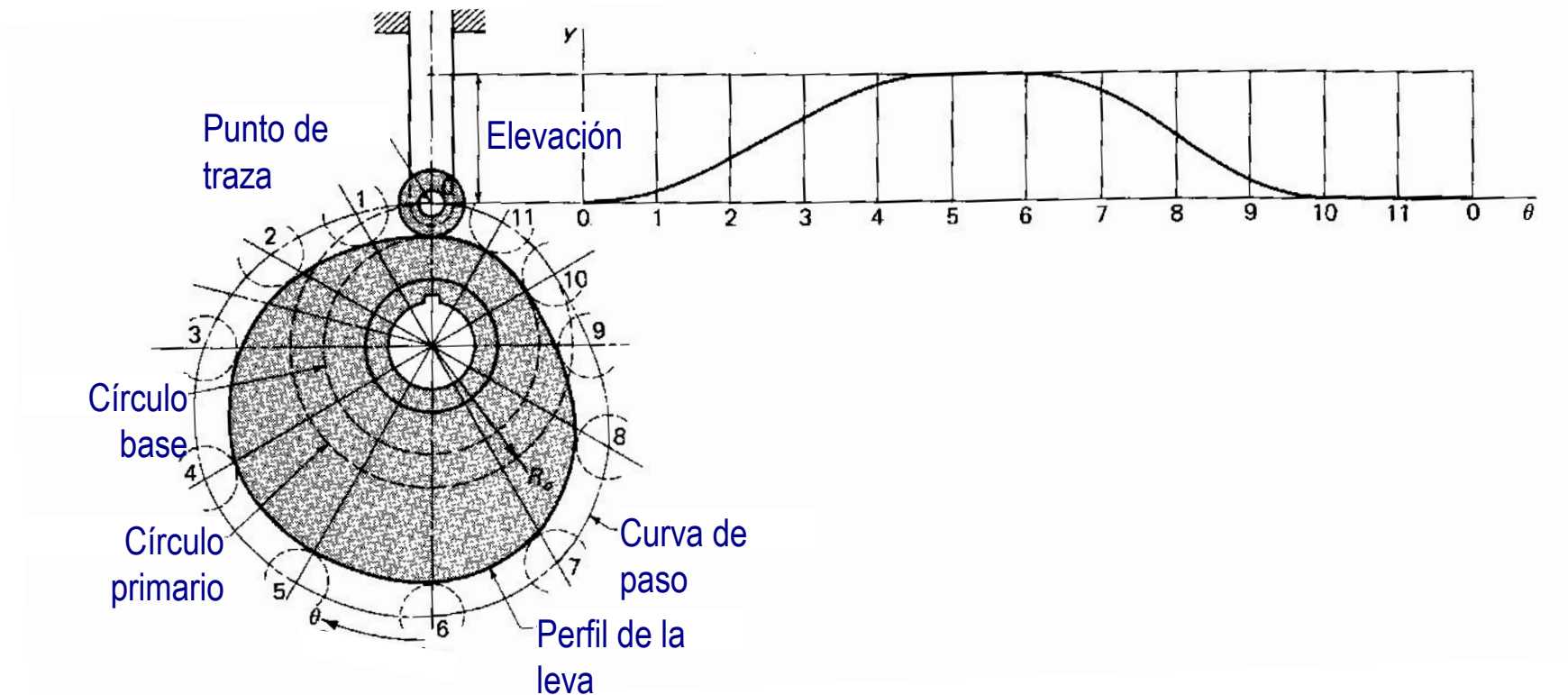


Funciones aceleración. Comparativa

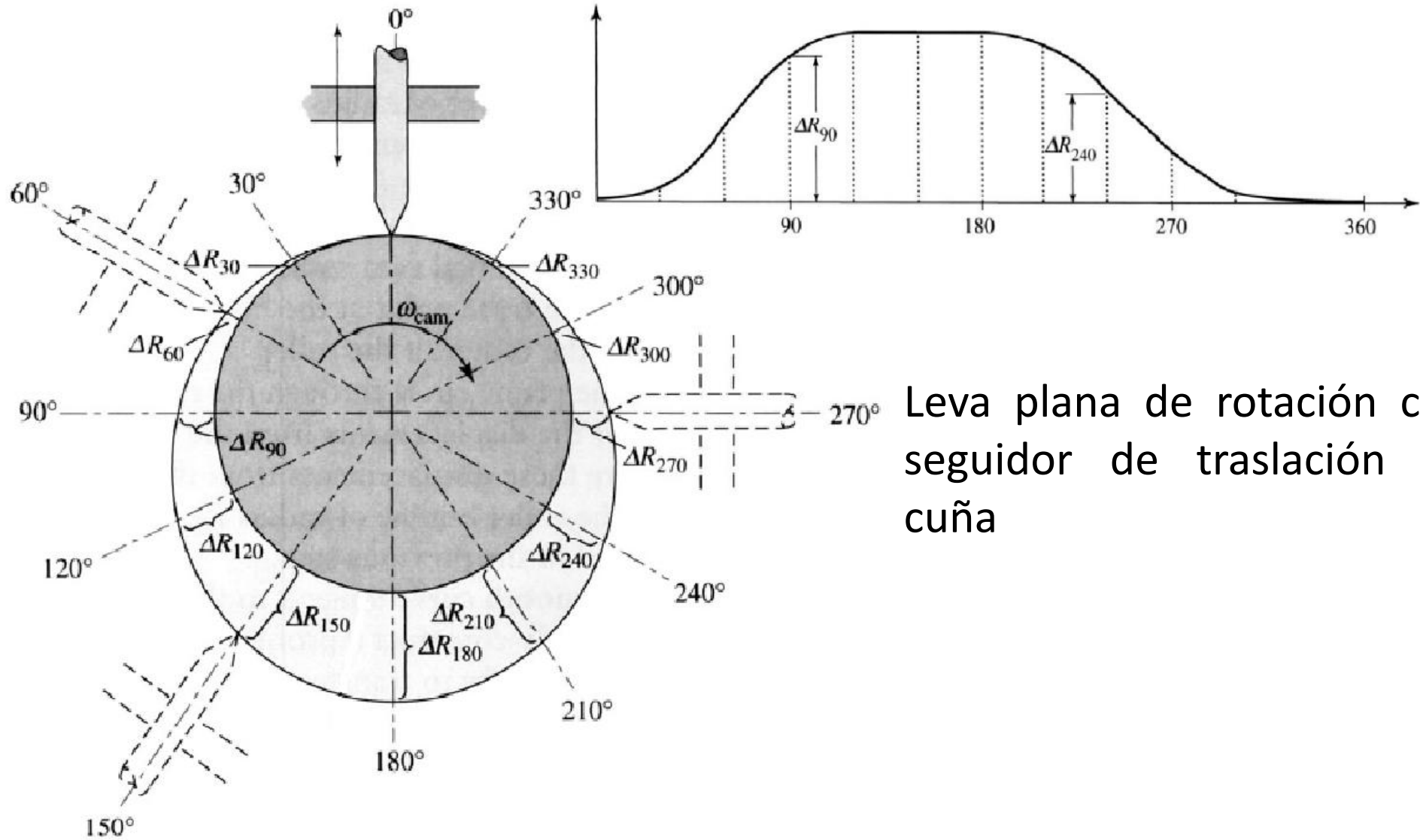


Obtención del perfil de una leva

- En **levas planas de rotación con seguidor de translación de rodillo**, a partir del diagrama de desplazamiento se determina la curva de paso y restándole a esta el radio del rodillo se calcula el perfil de la leva.

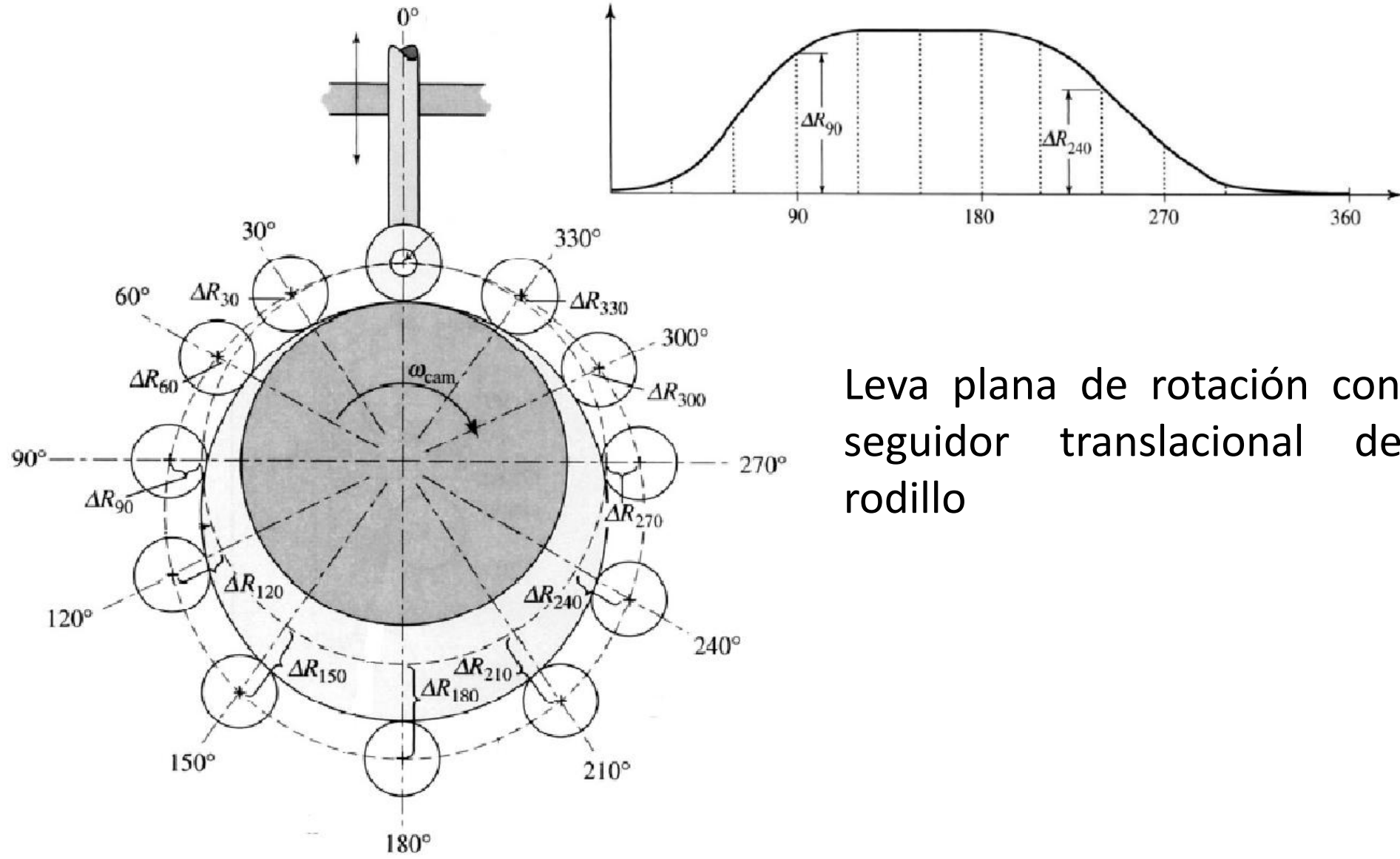


Obtención del perfil de una leva



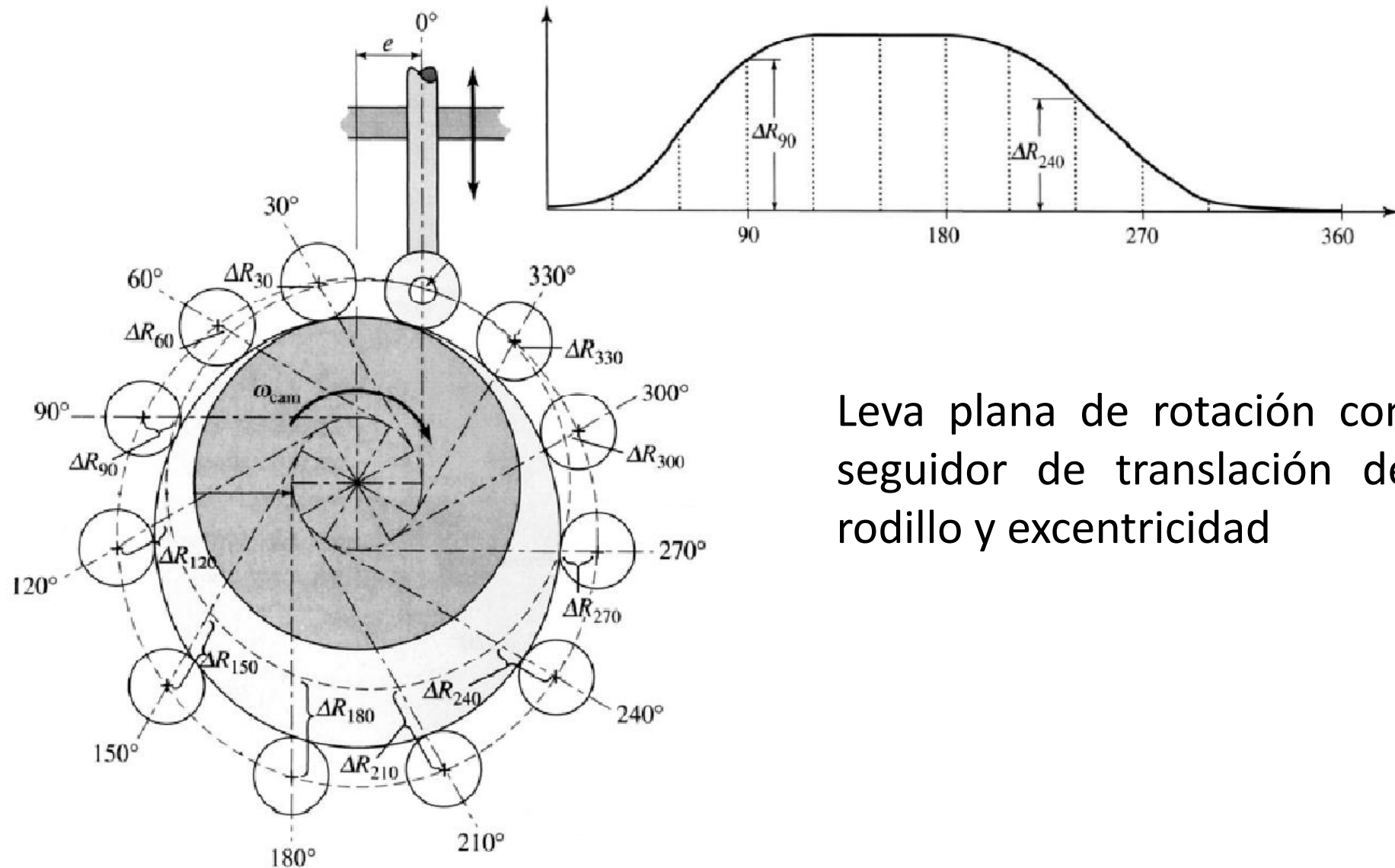
Leva plana de rotación con seguidor de traslación de cuña

Obtención del perfil de una leva



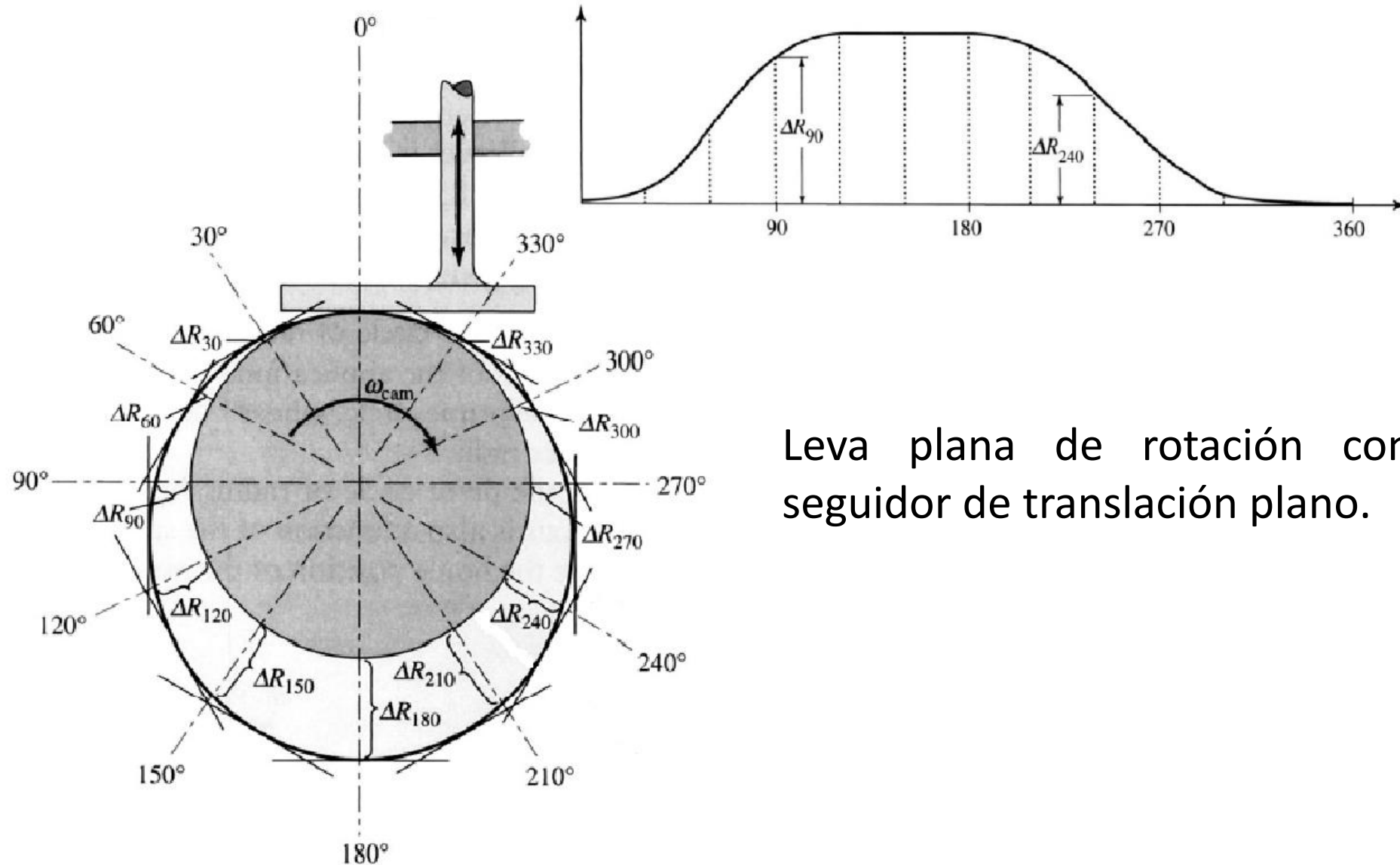
Leva plana de rotación con seguidor translacional de rodillo

Obtención del perfil de una leva



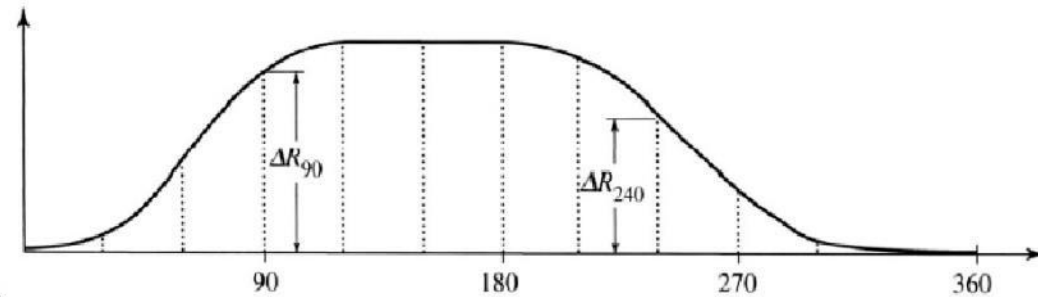
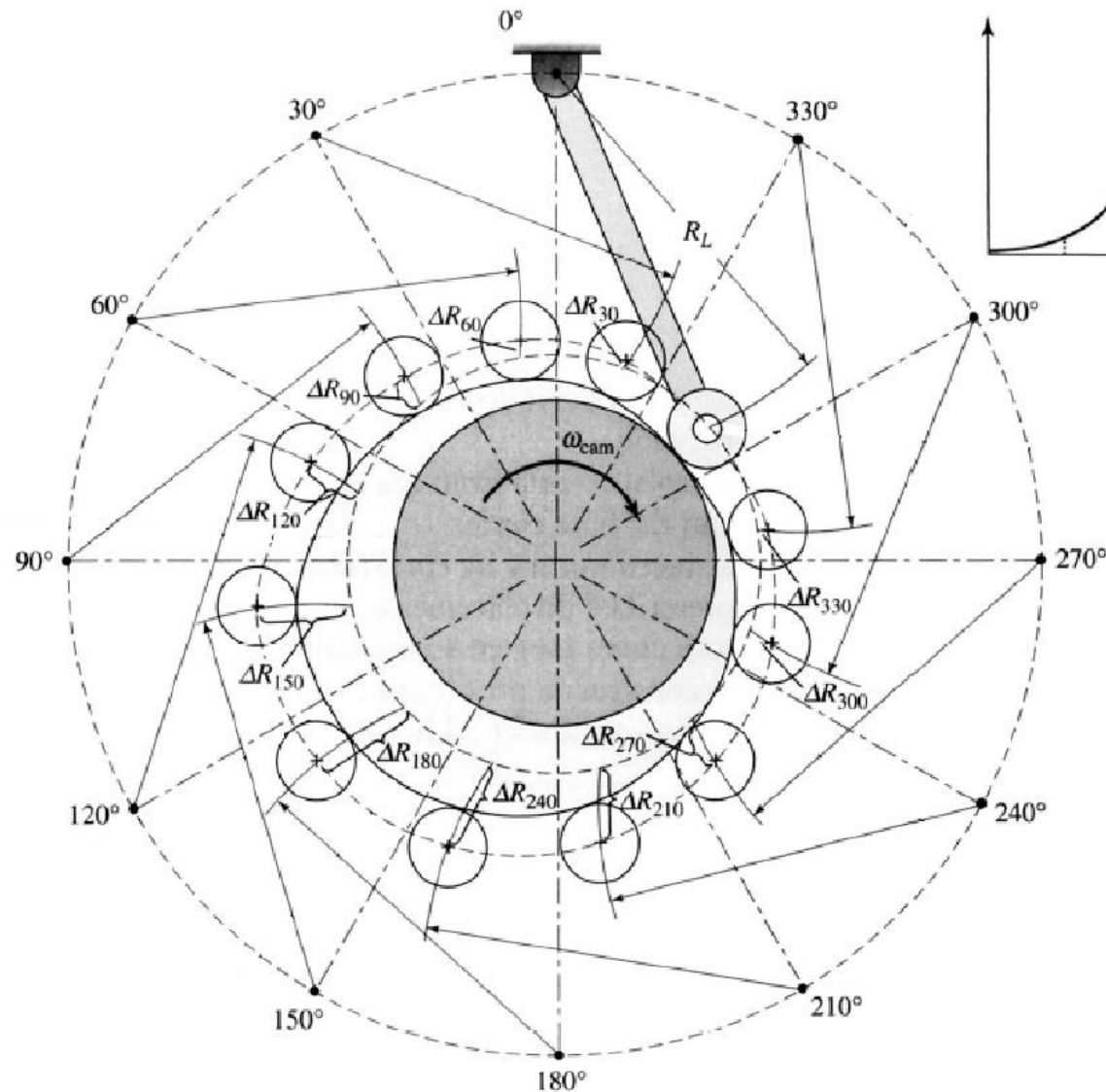
Leva plana de rotación con seguidor de translación de rodillo y excentricidad

Obtención del perfil de una leva



Leva plana de rotación con seguidor de translación plano.

Obtención del perfil de una leva

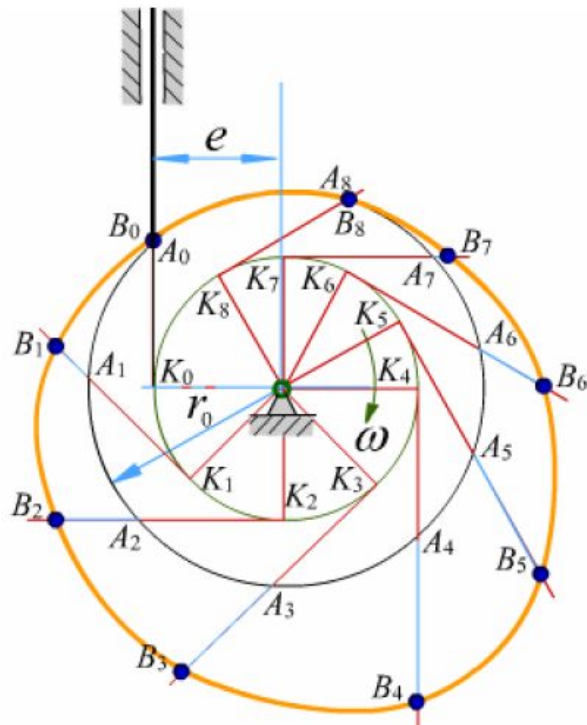


Leva plana de rotación
con seguidor rotacional
de rodillo

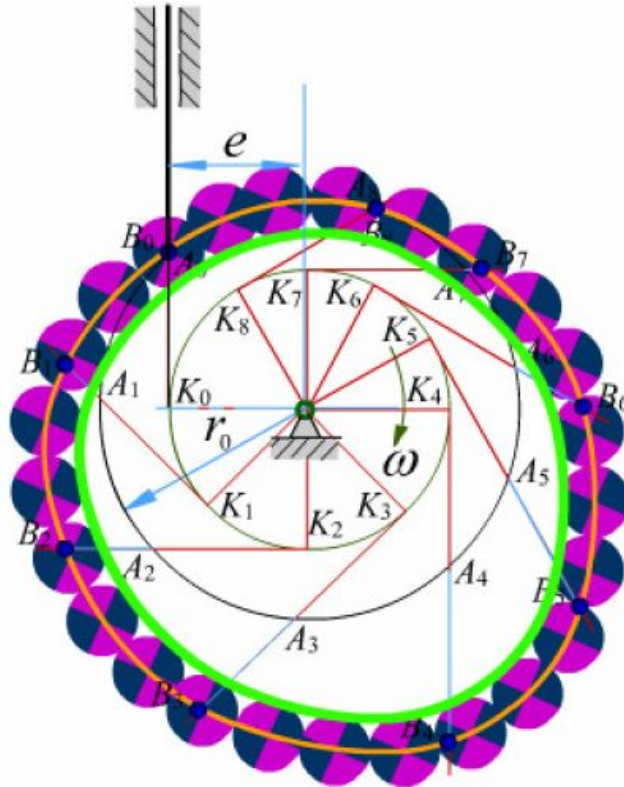
Obtención del perfil de una leva

- Levas con igual diagrama de desplazamientos, pero con diferentes palpadores y excentricidad

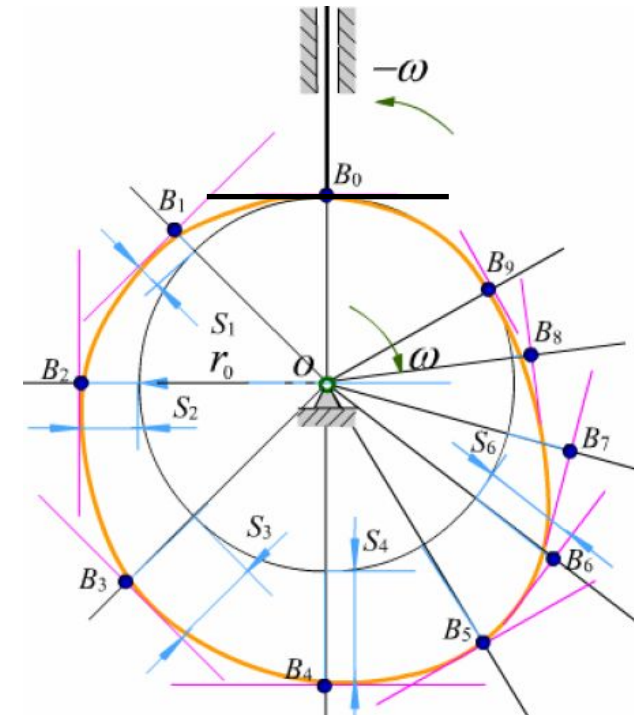
Leva para palpador de
cuña con excentricidad



Leva para palpador de
rodillo con excentricidad

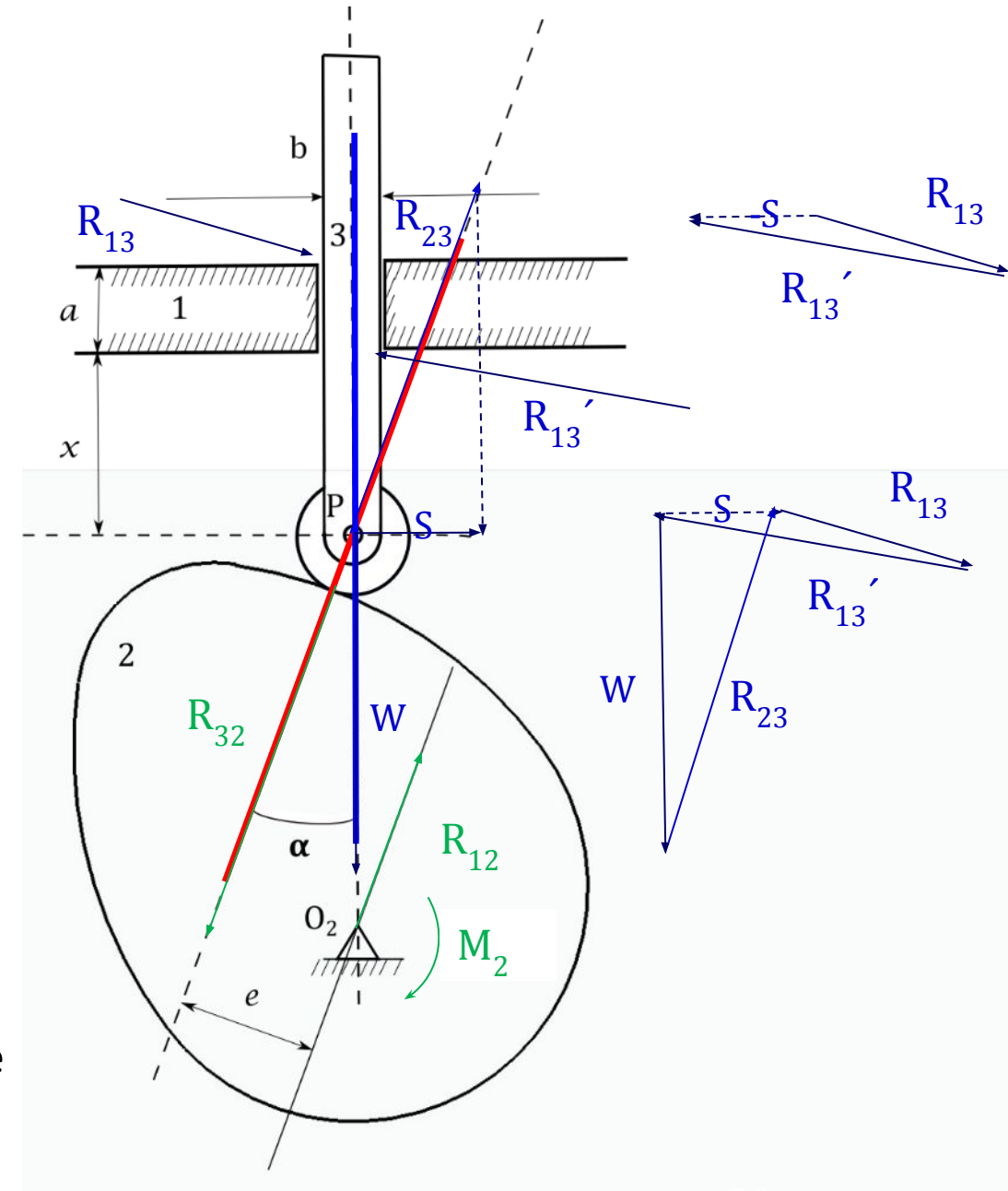


Leva para palpador
plano sin excentricidad



Ángulo de presión

- Ángulo α formado por la dirección de aplicación de la fuerza y la dirección del movimiento del seguidor
- Relaciona la fuerza de contacto leva-palpador con la fuerza útil (componente en la dirección de movimiento)
- Debe ser pequeño, para evitar autorretención
- En la práctica, con **palpadores de traslación**, no se deben sobrepasar los 30° y con los rotatorios son aceptables ángulos de presión de hasta 35° .
- Valores elevados de α aumentan el deslizamiento entre la leva y el palpador lo que origina un incremento del rozamiento, pudiendo llevar a la autorretención del palpador. El ángulo de presión es más crítico en el tramo de subida que en el de bajada ya que el palpador se mueve en sentido contrario a las cargas externas y es necesaria mayor fuerza útil.



Ángulo de presión

- El ángulo de presión se puede expresar como:

$$\tan(\alpha) = \frac{d'(\theta) - \epsilon}{d(\theta)}$$

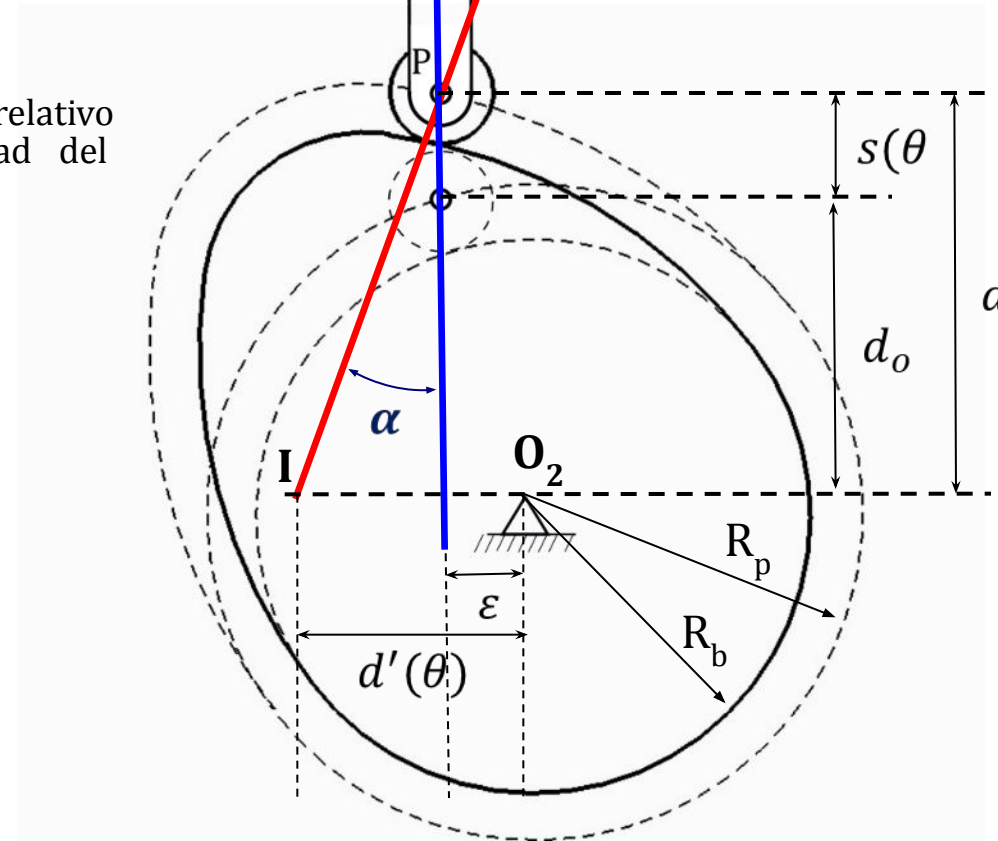
La distancia del CIR de la leva $\mathbf{O}_2$ al CIR relativo leva-palpador $\mathbf{I}$ es igual a la velocidad del palpador $\mathbf{d}'(\theta)$ (unidades $\square$ m/rad).

Por geometría: $d(\theta) = d_0 + s(\theta)$

$$d_0 = \sqrt{R_p^2 - \epsilon^2}$$

$$R_p = R_b + R_r$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{s'(\theta) - \epsilon}{s(\theta) + \sqrt{R_p^2 - \epsilon^2}} \right)$$

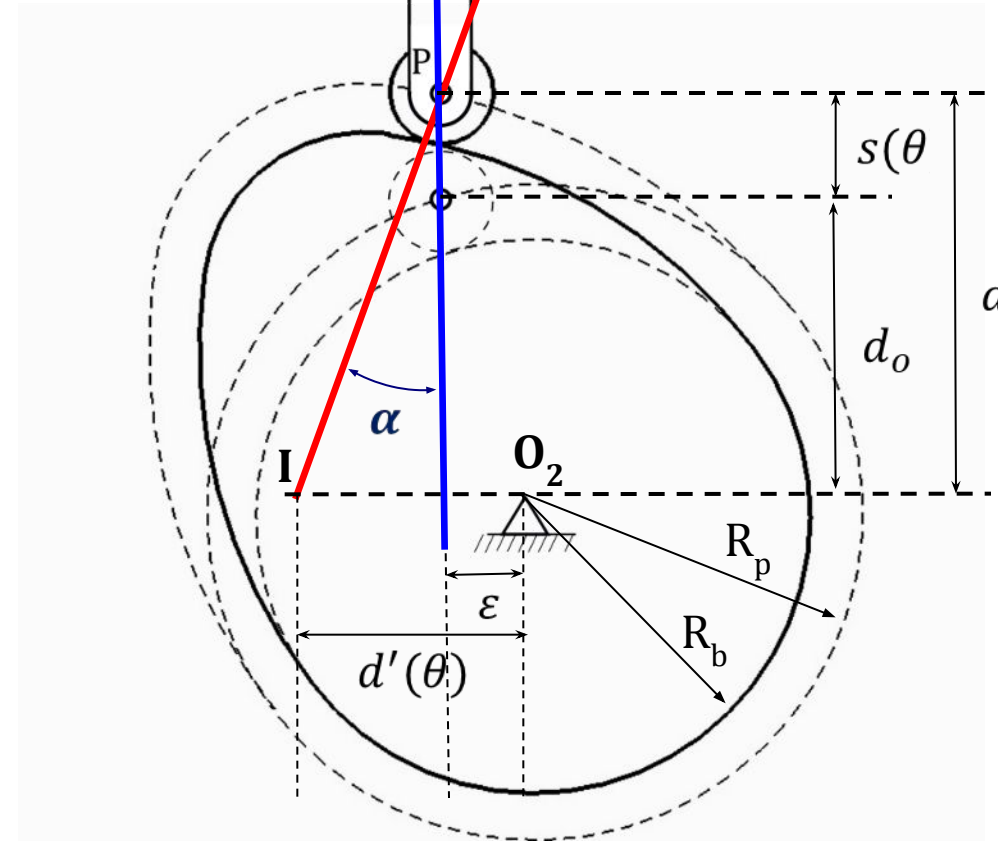


Ángulo de presión

- Indica la facilidad de atascarse del sistema leva-palpador.
- Modificaciones a aplicar para corregir un ángulo de presión elevado:
 - Radio base mayor.
 - Radio del rodillo mayor.
 - Modificar la excentricidad.

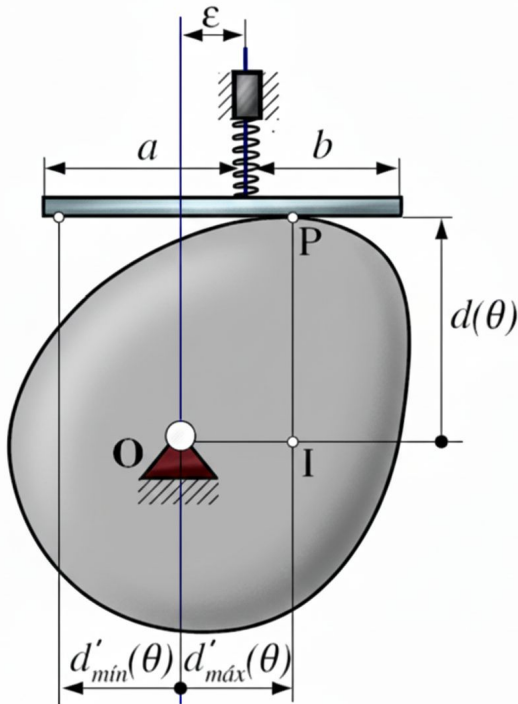
$$R_P = R_b + R_r$$

$$\tan(\alpha) = \frac{s'(\theta) - \epsilon}{s(\theta) + \sqrt{R_P^2 - \epsilon^2}}$$



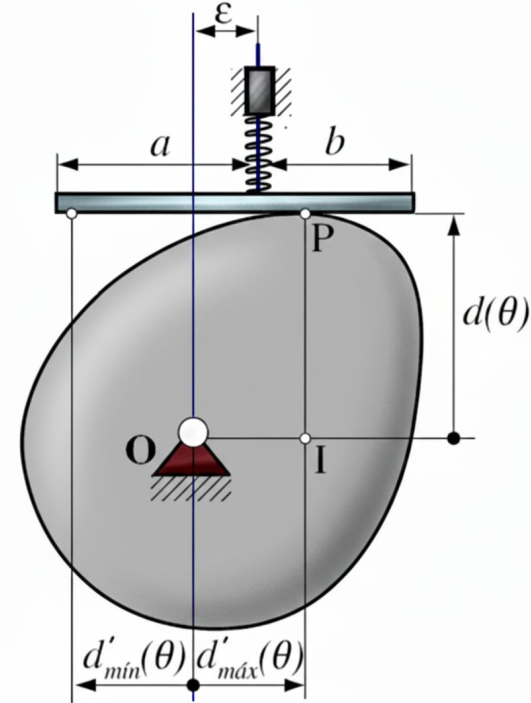
Ángulo de presión

- Cuando el palpador es plano de translación se debe asegurar que el punto de contacto **P** esté siempre en la superficie física del palpador. Para ello debe cumplirse que:



$$a > \varepsilon - d'_{min}(\theta)$$

$$b > d'_{max}(\theta) - \varepsilon$$

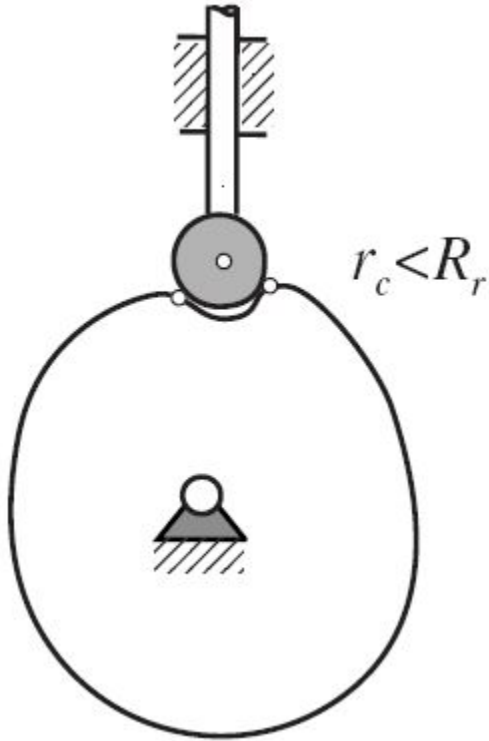


- Palpador plano recto ($\alpha = 0$). La fuerza de contacto leva-palpador F presenta siempre la dirección de la guía Acuñamiento difícil.
- Palpador plano con inclinación β . El ángulo de presión es constante y coincide con esa inclinación ($\alpha = \beta$).

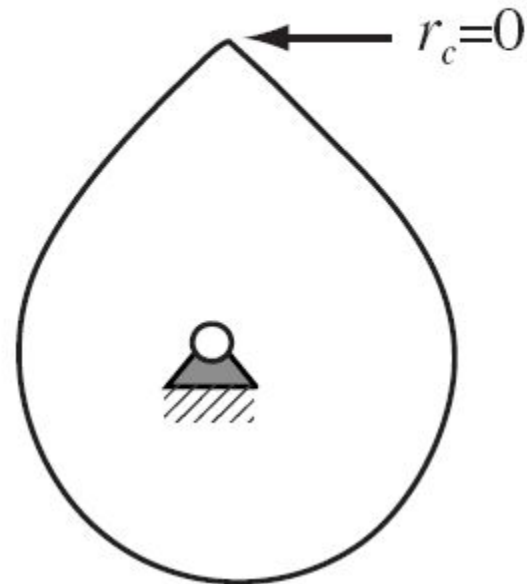
Comprobación del perfil de la leva

- Hay que comprobar que el perfil de la leva permite un contacto leva-palpador correcto.
 - Imposibilidad del palpador de acceder a un determinado punto de la leva sin invadir el perfil de la leva.
 - Doble contacto del palpador en la leva.
 - Existencia de degeneraciones en el perfil de la leva. Presencia de vértices o autoinserciones.
 - Presencia de un pico o cúspide en la leva.
 - Presencia de un rebaje o degeneración en la leva.

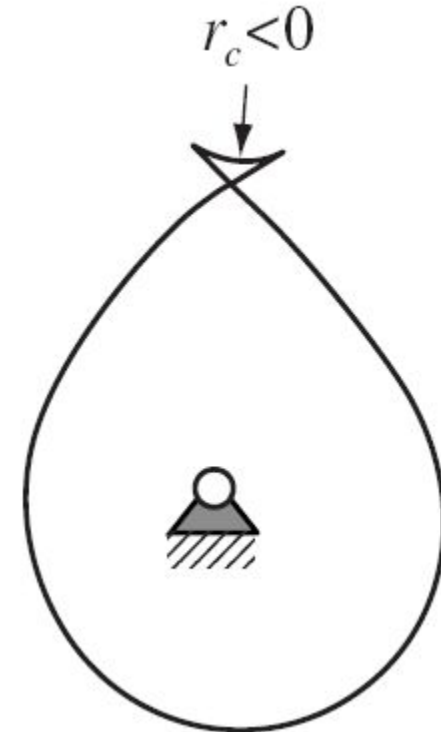
Comprobación del perfil de la leva



Doble contacto del palpador en la leva



Presencia de un pico o cúspide en la leva



Presencia de un rebaje o degeneración en la leva

Radio de curvatura

Representa numéricamente la concavidad-convexidad de una función en un punto.

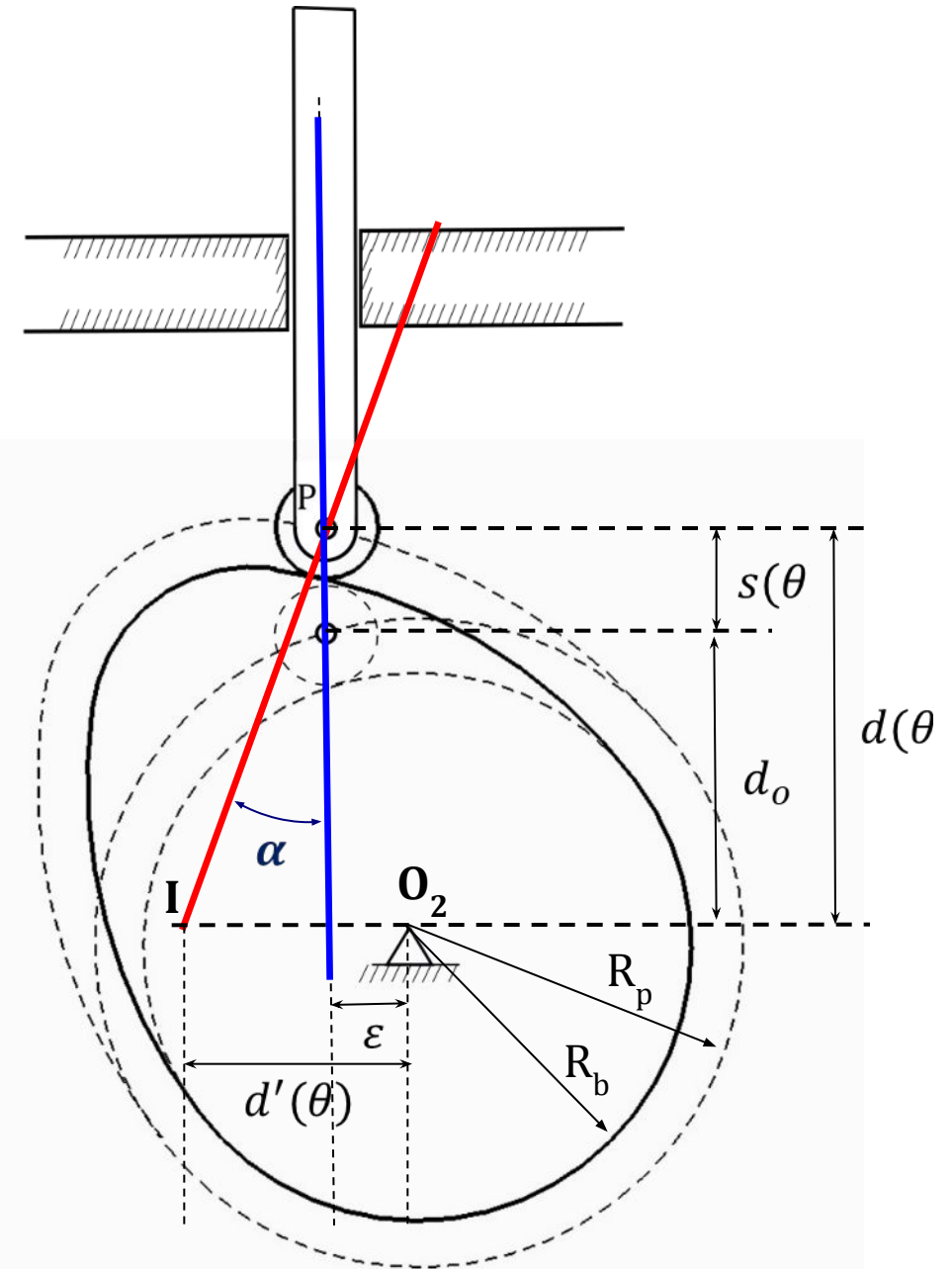
- Recta: infinito.
- Circunferencia: constante e igual al radio.
- Indica la presencia de rebajes y cúspides, fenómenos a evitar.
- Se calcula para cada tipo de leva-seguidor.
- Leva rotativa y seguidor de translación de rodillo.
 - El valor absoluto del radio de curvatura mínimo de la leva debe ser 2 o 3 veces mayor que el radio del seguidor

$$\rho_{PASO} = \frac{\left[(R_p + s)^2 + (s')^2 \right]^{3/2}}{(R_p + s)^2 + 2 \cdot (s')^2 - (R_p + s) \cdot s''}$$

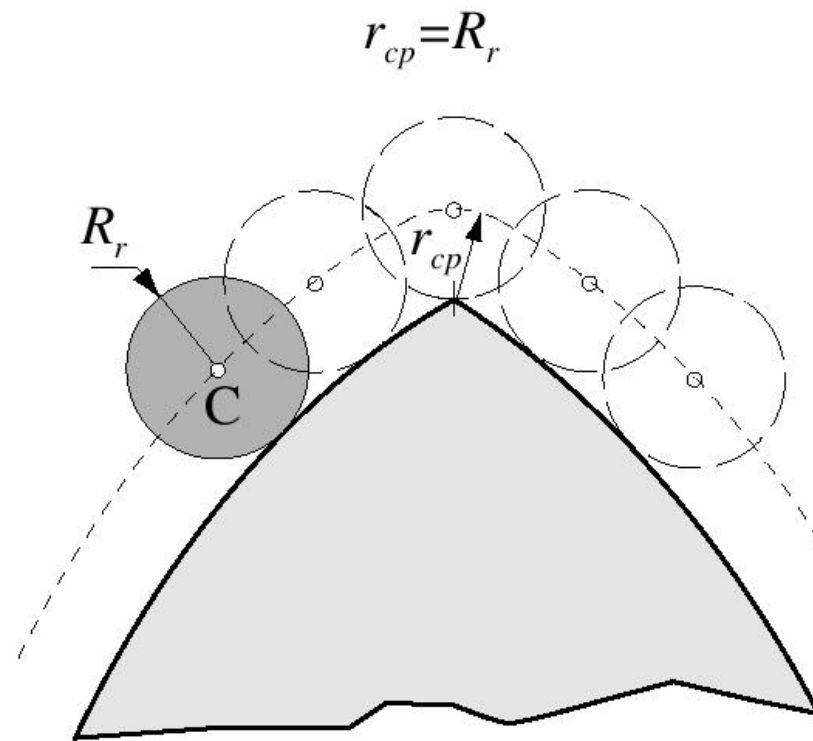
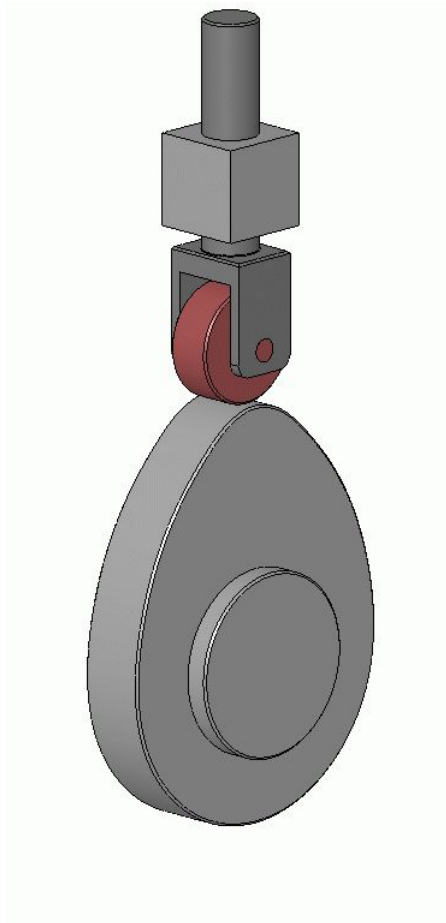
$$\rho_{PASO} = R_p + s + s''$$

$$\rho_{min} = R_p + (s + s'')_{min}$$

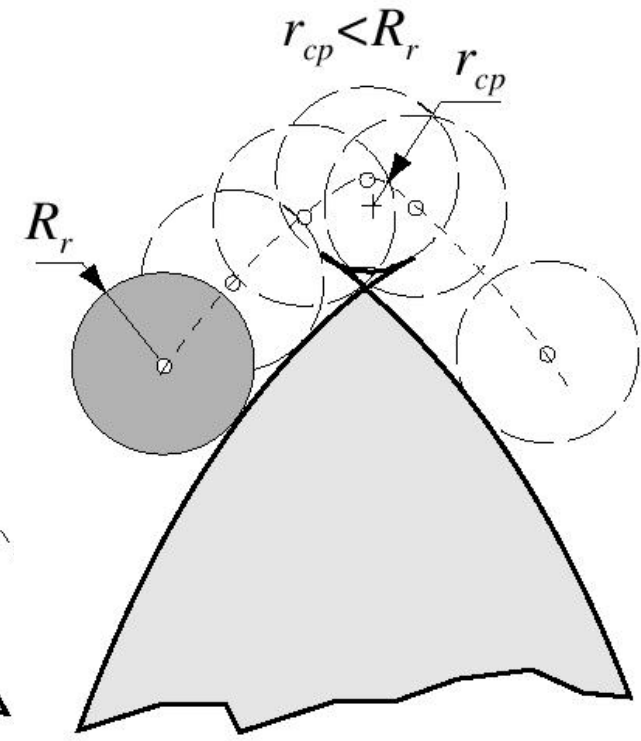
- Leva rotativa y seguidor de translación de cara plana



Radio de curvatura



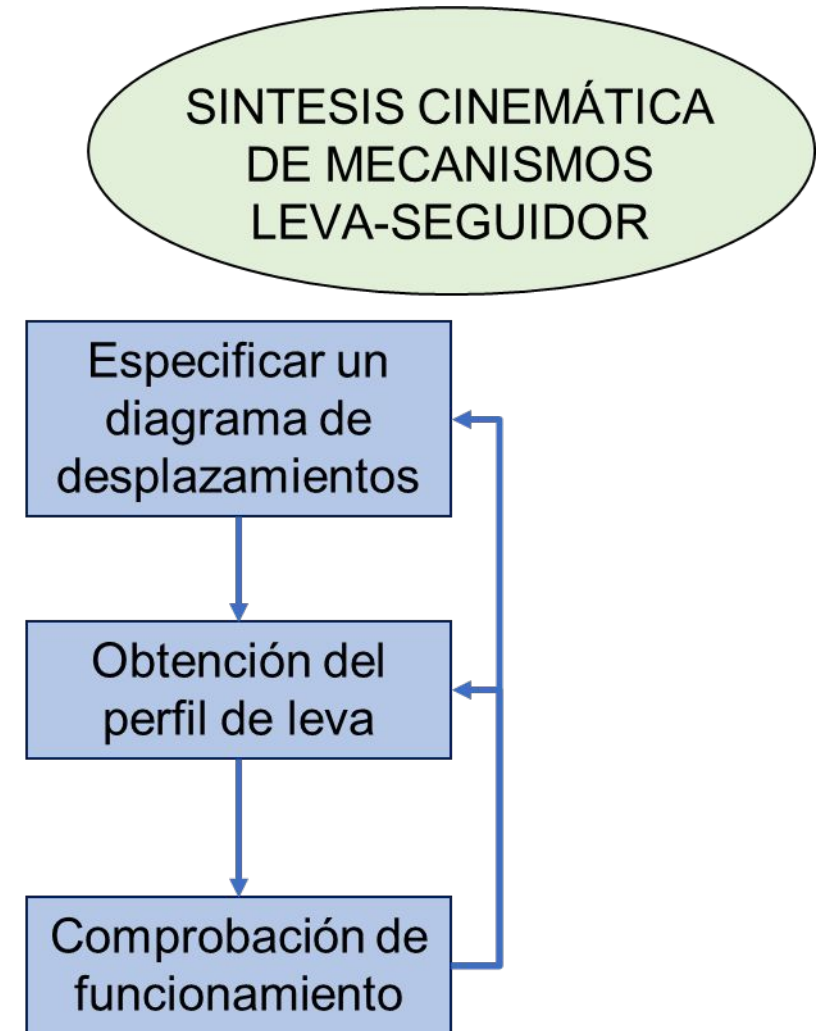
Cúspide



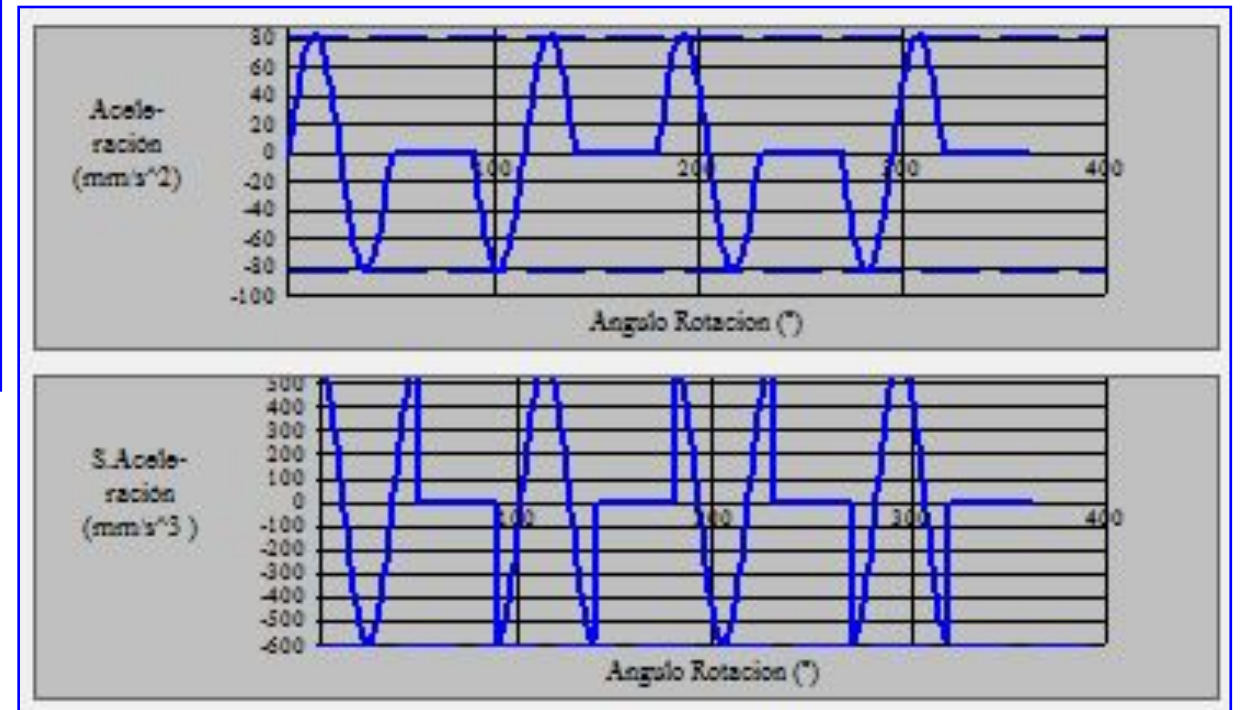
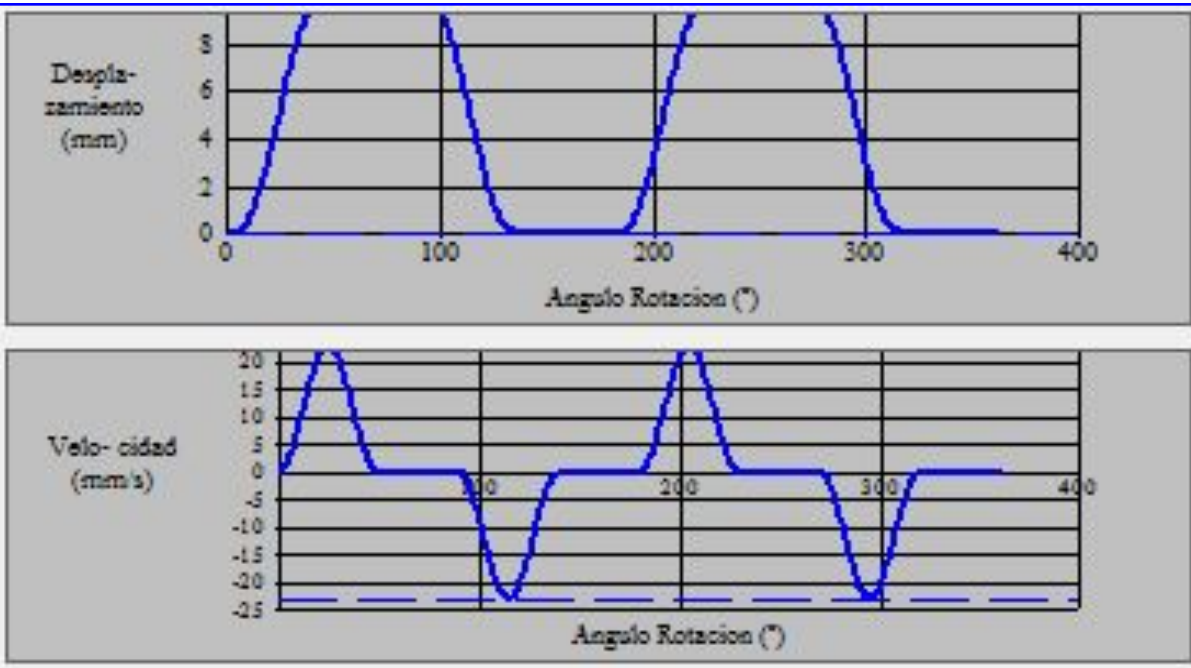
Rebaje

Secuencia de diseño de un sistema leva-seguidor

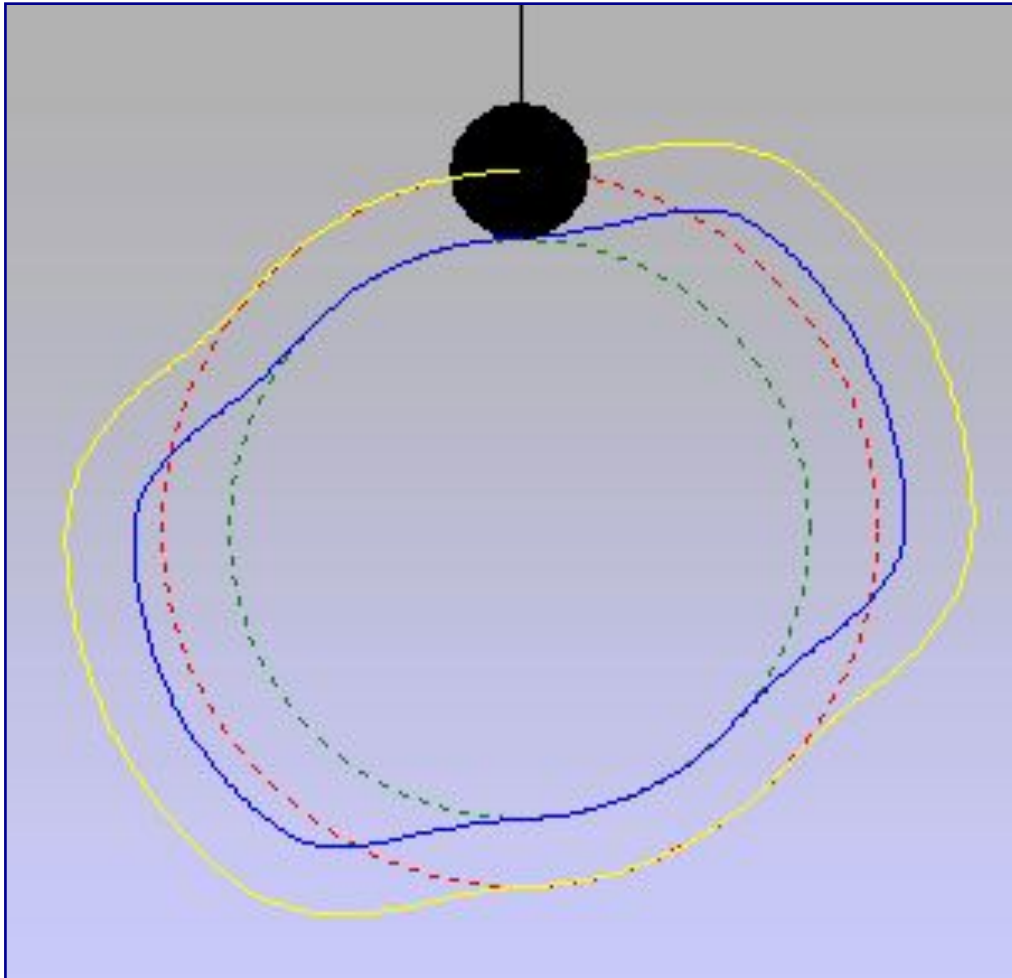
1. Diseño de la ley de desplazamiento leva-palpador para unas condiciones dadas.
 - Utilización de los generadores de función.
2. Obtención del perfil de la leva, para el palpador seleccionado, según la ley de desplazamiento diseñada.
 - Métodos gráficos y analíticos.
3. Comprobación que el perfil de la leva obtenido no presente características que impidan un contacto leva-palpador correcto.
 - Radios de curvatura y ángulos de presión adecuados.



1ª Fase: Diseño de la ley de desplazamiento

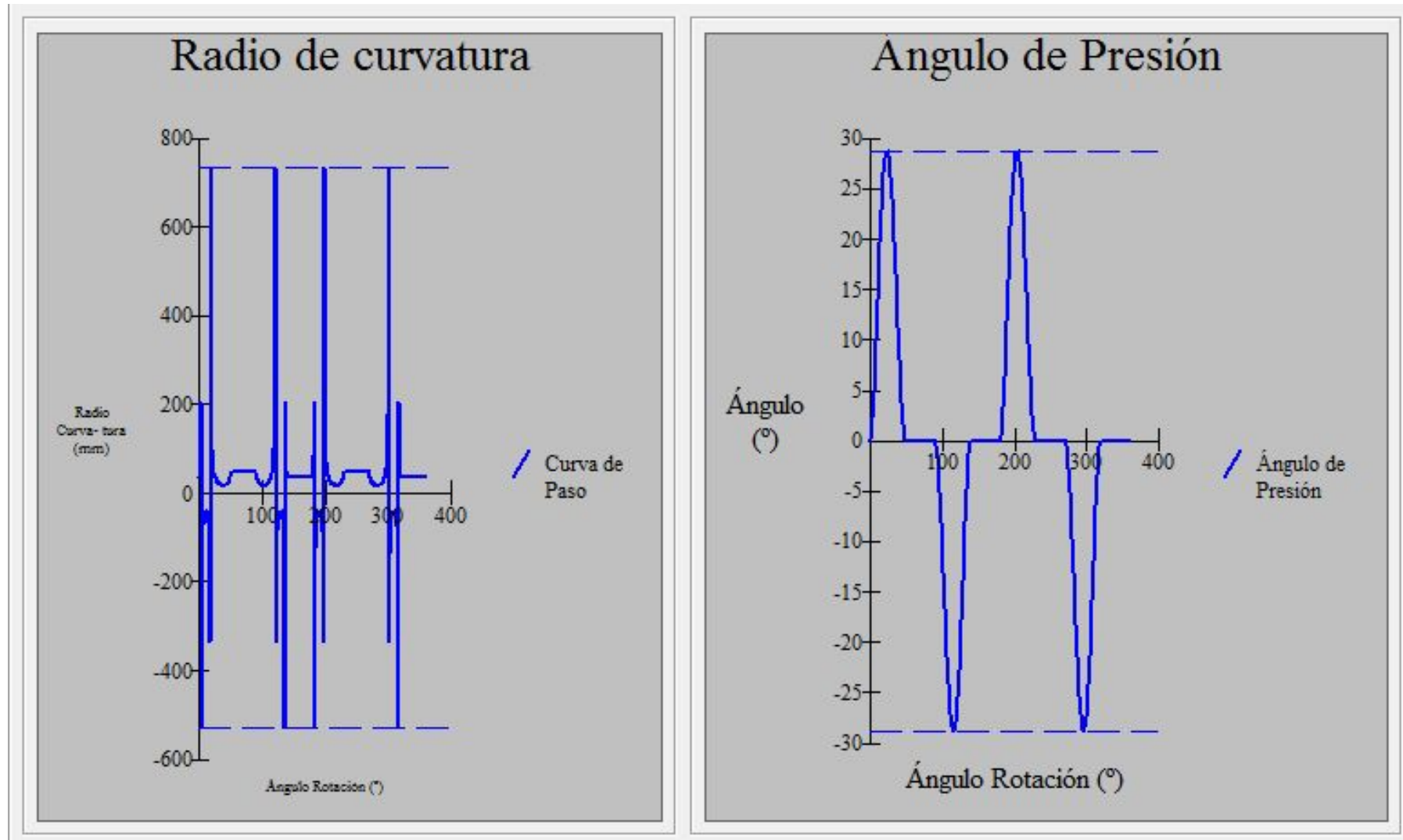


2ª Fase: Obtención del perfil de la leva



- Curva amarilla: Curva de paso
- Curva azul: Perfil de la leva
- Curva verde: Círculo base
- Curva roja: Círculo primario

3ª Fase: Comprobación del perfil



Fabricación de levas

- Generación geométrica. Maquinado continuo como por ejemplo el torneado de una leva excéntrica.
- Mecanizado con Control Numérico Continuo (CNC) con interpolación lineal o circular.
- Por copiado o duplicación. Primero se crea una leva patrón y después se copian las levas con máquinas duplicadoras.

Créditos imágenes

Pág. 6: Imagen [Yapparina](#), CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons.

Pág. 7: Imagen generada con Nano Banana.

Pág. 14: Imagen adaptada de A. Lamadrid y A. Corral, *Cinemática y dinámica de máquinas*, Madrid: ETSI Industriales sección de publicaciones UPM, 1969.

Págs. 43-48: Imágenes generadas con Gemini 2.5

Pág. 53: Imágenes reutilizadas de Zayas Figueras, E. E. (2001). Aportación al estudio de levas desmodrómicas. Universitat Politècnica de Catalunya.
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-93718> (PONE QUE TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS Buscar alternativa)