



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN  
DE LEVAS PLANAS.  
APLICACIÓN INFORMÁTICA **CAM-DAS**

Autor: Alejandro Marco Serrano Muñoz

Tutor: Higinio Rubio Alonso

Leganés, octubre de 2010



Título: DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LEVAS PLANAS.  
APLICACIÓN INFORMÁTICA **CAM-DAS**

Autor: Alejandro Marco Serrano Muñoz

Director: Higinio Rubio Alonso

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_ de \_\_\_\_\_  
de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de  
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

*A mis padres, Alejandro e Isabel, por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles, hacerme disfrutar de los buenos y por guiarme hasta este momento, el cual, compartir con vosotros es algo único. A mi hermano, Maximiliano, por acompañarme siempre en todo lo que he hecho. A mi novia, Verónica, por tus ánimos siempre sinceros. A mi tía Mónica, siempre estarás cerca.*

*A mis amigos porque sin ellos los descansos en la biblioteca y el mus no hubieran tenido sentido.*

*A mi tutor, D. Higinio Rubio Alonso, por su confianza al darme la oportunidad de hacer este proyecto, su comprensión durante la realización del mismo y por el tiempo que me ha dedicado.*

*Madrid, Octubre de 2010*

*Alejandro Marco Serrano Muñoz*



# ÍNDICE GENERAL

<b>Índice general</b> .....	<b>5</b>
<b>Capítulo 1: Introducción y objetivos</b> .....	<b>9</b>
1.1. Ámbito de proyecto.....	9
1.2. Objetivos.....	15
1.3. Fases del proyecto.....	18
1.4. Estructura del documento.....	20
<b>Capítulo 2: Introducción a las levas</b> .....	<b>22</b>
2.1. Clasificación de los mecanismos leva-seguidor.....	23
2.2. Descripción de las levas estudiadas.....	27
2.2.1. Levas Planas de Rotación (con cierre de fuerza).....	27
2.2.2. Mecanismos Desmodrómicos.....	30
2.2.3. Levas alternativas o traslacionales.....	34
2.3. Secuencia de diseño de un mecanismo leva-palpador.....	36
<b>Capítulo 3: Definición de la ley de la leva</b> .....	<b>36</b>
3.1. Función de desplazamiento. Aspectos generales.....	36
3.2. Relación cinemática leva-seguidor.....	40
3.3. Selección de la función matemática para el perfil de la leva.....	41
3.3.1. Ley fundamental de continuidad.....	41
3.3.2. Valores pico de velocidad y aceleración.....	44
3.4. Funciones matemáticas que definen la ley de desplazamiento.....	45
3.4.1. Armónico simple.....	47
3.4.2. Cicloidal.....	49
3.4.3. Polinómico 5º grado.....	51
3.4.3.1. Caso general.....	51
3.4.3.2. Caso particular: polinomio 3-4-5.....	55
3.4.4. Polinómico 7º grado.....	56
3.4.4.1. Caso general.....	56
3.4.4.2. Caso particular: polinomio 4-5-6-7.....	58
3.4.5. Velocidad constante.....	59
3.4.6. Movimientos de medio periodo.....	60
3.4.6.1. Semiarmónicos.....	61
3.4.6.2. Semicicloidal.....	64
3.4.7. Armónico doble.....	68
3.4.8. Movimientos compuestos.....	69
3.4.8.1. Aceleración de Onda Senoidal Modificada.....	69
3.4.8.2. Aceleración de Onda Trapecial Modificada.....	70

**Capítulo 4: Obtención del perfil de una leva.....71**

4.1. Obtención gráfica del perfil en mecanismos desmodrómicos..... 71

    4.1.1. Leva de anchura constante doble palpador de rodillo traslacional..... 72

    4.1.2. Levas conjugadas con doble palpador de rodillo traslacional..... 74

4.2. Métodos analíticos para la obtención de perfiles de leva..... 76

    4.2.1. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo traslacional..... 77

    4.2.2. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo oscilante..... 83

    4.2.3. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana traslacional..... 86

    4.2.4. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana oscilante..... 89

    4.2.5. Levas conjugadas con doble seguidor plano de traslación..... 92

    4.2.6. Levas conjugadas con doble seguidor de rodillo traslacional..... 94

    4.2.7. Levas conjugadas con doble seguidor plano oscilatorio..... 95

    4.2.8. Levas conjugadas con doble seguidor de rodillo oscilatorio..... 99

    4.2.9. Levas planas de rotación de anchura constante..... 101

    4.2.10. Levas planas de rotación de diámetro constante..... 103

    4.2.11. Levas alternativas o traslacionales..... 104

**Capítulo 5: Análisis de verificación del perfil obtenido ..... 107**

5.1. Radio de curvatura ..... 107

    5.1.1. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana de movimiento oscilante o seguidor de rodillo traslacional (excéntrico)..... 109

    5.1.2. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana de movimiento traslacional..... 110

    5.1.3. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de movimiento traslacional (no excéntrico)..... 110

    5.1.4. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de movimiento oscilante..... 111

    5.1.5. Análisis de la función radio de curvatura..... 112

        5.1.5.1. Levas planas de rotación con seguidores de rodillo..... 113

        5.1.5.2. Levas planas de rotación con seguidores de cara plana..... 115

5.2. Ángulo de presión ..... 117

    5.2.1. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de traslacional..... 117

    5.2.2. Leva plana de rotación con seguidor de rodillo oscilante..... 118

    5.2.3. Análisis del ángulo de presión..... 119

        5.2.3.1. Leva plana de rotación con seguidore de rodillo traslacional..... 119

        5.2.3.2. Leva plana de rotación con seguidore de rodillo oscilante..... 120

        5.2.3.3. Leva alternativa o traslacional..... 121

5.3. Longitud de seguidores de cara plana ..... 122

    5.3.1. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana traslacional..... 122

    5.3.2. Leva plana de rotación con seguidor de cara plana oscilante..... 123

## **Capítulo 6: Entorno software y diagramas de funcionamiento ..... 124**

6.1. Entorno software: Visual Basic 6.0.....	124
6.2. Diagramas de funcionamiento .....	129

## **Capítulo 7: Manual de usuario del programa CAM-DAS..... 136**

7.1. Introducción .....	136
7.2. Requisitos del equipo informático .....	138
7.3. Uso y descripción de CAM-DAS .....	139
7.3.1. Datos iniciales .....	139
7.3.2. Diagramas cinemáticos.....	156
7.3.3. Perfil de leva.....	158
7.3.4. Parámetros .....	159
7.3.5. Conclusiones .....	161
7.3.6. Simulación de movimiento.....	162
7.3.7. Menú, Barra de Herramientas y Barra de Estado.....	165
7.3.8. Cálculo de levas conjugadas .....	174
7.3.8.1. Leva conjugada con seguidor de cara plana traslacional.....	174
7.3.8.2. Leva conjugada con seguidor de cara plana oscilatorio .....	176
7.3.8.3. Leva conjugada con seguidor de rodillo traslacional.....	177
7.3.8.4. Leva conjugada con seguidor de rodillo oscilatorio .....	178
7.3.8.5. Leva de anchura constante con palpador plano traslacional.....	180
7.3.8.6. Leva de anchura constante con palpador de rodillo traslacional ...	181
7.3.9. Retorno a la leva inicial.....	182
7.4. Biblioteca de ejemplos incluidos en CAM-DAS .....	183
7.4.1. Ejemplo1RT.lev .....	183
7.4.2. Ejemplo2RO.lev .....	185
7.4.3. Ejemplo3PT.lev .....	187
7.4.4. Ejemplo4PO.lev.....	188
7.4.5. Ejemplo5ACRT.lev .....	190
7.4.6. Ejemplo6ACPT.lev .....	191
7.4.7. Ejemplo7CRT.lev.....	193
7.4.8. Ejemplo8DA.lev .....	194
7.4.9. Ejemplo9RT.lev.....	199
7.4.10. Ejemplo10EX.lev .....	201
7.4.11. Ejemplo11RO.lev .....	204
7.4.12. Ejemplo12PO.lev.....	205

**Capítulo 8: Versión en inglés. User guide CAM-DAS..... 208**

8.1. Computer’s Requirements..... 208  
8.2. Instructions for use and description ..... 209  
    8.2.1. Initial information ..... 209  
    8.2.2. Cinematic graphs ..... 220  
    8.2.3. Cam profile..... 221  
    8.2.4. Parameters ..... 222  
    8.2.5. Conclusions ..... 225  
    8.2.6. Simulation of movement ..... 225  
    8.2.7. Menu, Toolbar and Bar of condition ..... 226  
    8.2.8 Calculate conjugate cams ..... 231  
    8.2.9. Come back to the initial cam ..... 231

**Capítulo 9: Conclusiones y trabajos futuros ..... 232**

9.1. Conclusiones ..... 232  
9.2.Trabajos futuros..... 235

**Bibliografía y recursos de internet ..... 237**

B1.Principales referencias bibliográficas ..... 237  
B2.Principales referencias a páginas web..... 237  
B3.Principales artículos consultados ..... 238



## Capítulo 1: Introducción y objetivos

### 1.1 Ámbito del proyecto

Las levas son un elemento mecánico muy utilizado desde la revolución Industrial. Su enorme potencial se centraba en que podían imponer un tipo de movimiento muy preciso con el simple desarrollo de la ley de la leva (o función desplazamiento) y su eficacia no ha sido igualada hasta la aparición de la electrónica y la aplicación de programas de control de los actuadores.

Esta propiedad hizo que, desde hace muchos años, fuera empleada en muchos dispositivos avanzados: las primeras máquinas de calcular (mecánicas) fueron creadas apoyándose en controles efectuados por mecanismos de levas (figura 1.1).

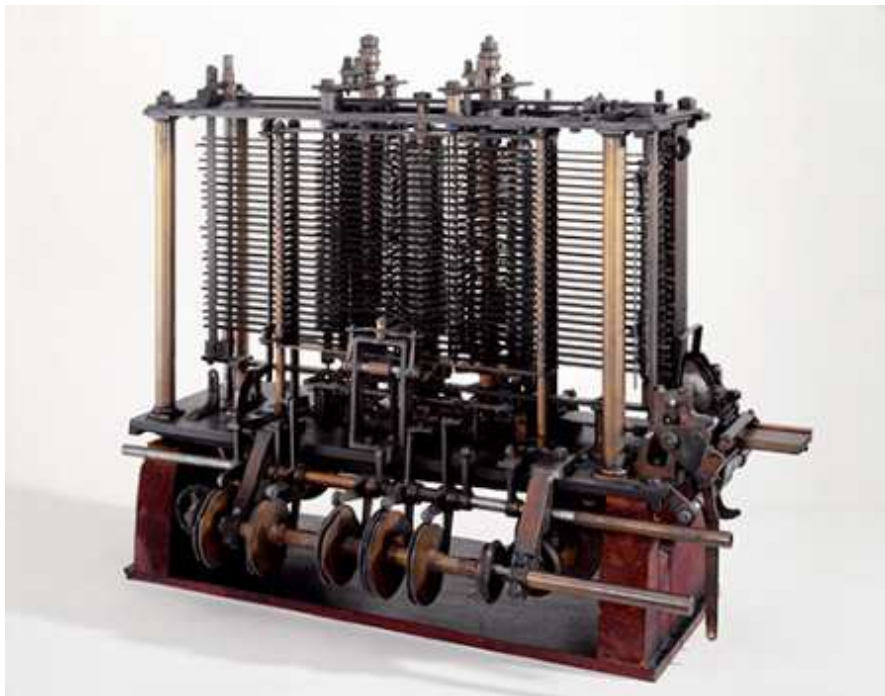


Fig.1.1: Modelo experimental de Máquina Analítica, 1.871.

La figura 1.1 muestra un ejemplo que ilustra lo expuesto anteriormente: la “Máquina Diferencial” creada por Charles Babbage y presentada en la Royal Astronomical Society en 1.822. La máquina diferencial es un dispositivo de naturaleza mecánica que calcula el valor numérico de una función polinómica sobre una progresión aritmética obteniendo una tabla de valores que se aproxima a la función real (basado en que cualquier función puede ser aproximada por polinomios).

Un modelo mejorado de la máquina diferencia de Babbage, la “Difference Engine No. 2” contenía, entre otros mecanismos, un conjunto de levas consistente en 14 parejas de levas conjugadas que dirigían y controlaban los movimientos internos de la máquina. Su función era análoga a la de un microprograma.

En la figura 1.2 se muestra una reproducción del conjunto de levas de una reconstrucción de la Máquina Diferencial N° 2 de Babbage, expuesta en el Museo de ciencias de Londres.



Fig.1.2: Detalle de la Máquina Diferencia N° 2. Museo de Ciencias de Londres.

Debido a que la máquina diferencial no puede hacer multiplicaciones, no puede calcular el valor de un polinomio. Sin embargo, si el valor inicial del polinomio (y sus derivadas) es calculado por algunos medios para un cierto valor de X, la máquina diferencial puede calcular cualquier número de valores próximos, usando el método conocido generalmente como el método de las diferencias finitas.

El principio de una máquina diferencial es método de Newton de diferencias divididas. El cual puede ser ilustrado con un pequeño ejemplo. Considere el polinomio cuadrático:

$$P(x) = 2x^2 - 3x + 2$$

y suponga que deseamos tabular los valores  $p(0)$ ,  $p(0,1)$ ,  $p(0,2)$ ,  $p(0,3)$ ,  $p(0,4)$  etc. La tabla de abajo se construye como sigue:

- la primera columna contiene los valores del polinomio
- la segunda columna contiene las diferencias de los dos vecinos izquierdos en la primera columna, y
- la tercera columna contiene las diferencias de los dos vecinos en la segunda columna:

Polinomio	Diferencias	Diferencias
P(0)= 2,0		
	2,0-1,72=0,28	
P(1)= 1,72		0,28-0,24=0,04
	1,72-1,48=0,24	
P(2)= 1,48		0,24-0,20=0,04
	1,48-1,28=0,20	
P(3)= 1,28		0,20-0,16=0,04
	1,28-1,12=0,16	
P(4)= 1,12		

Note cómo los valores en la tercera columna son constantes. Ésta no es una mera coincidencia. De hecho, si usted comienza con cualquier polinomio de grado  $n$ , la columna número  $n + 1$  siempre será constante. Este crucial hecho hace que el método funcione, como veremos a continuación.

Construimos esta tabla de izquierda a derecha, pero ahora podemos continuarla de derecha a izquierda para poder computar más valores de nuestro polinomio.

Para calcular  $p(0,5)$  usamos los valores de la diagonal más baja. Comenzamos con el valor 0,04 de columna de la derecha. Entonces continuamos a la segunda columna, restando 0,04 de 0,16 para obtener 0,12. Después continuamos con la primera columna tomando su valor anterior, 1,12 y restándole el 0,12 de la segunda columna. Así que  $p(0,5)$  es  $1,12 - 0,12 = 1,0$ . Para computar  $p(0,6)$ , iteramos el mismo algoritmo sobre los valores de  $p(0,5)$ : tome el 0,04 de la tercera columna, reste ese valor 0,12 de la segunda columna para obtener 0,08, Luego reste eso del valor 1,0 de la primera columna para obtener 0,92, que es el resultado de  $p(0,6)$ .

Este proceso puede ser continuado ad infinitum. Los valores del polinomio son producidos sin siquiera tener que multiplicar, una máquina diferencial solamente necesita poder restar. A partir de un lazo al siguiente, en nuestro caso, necesita almacenar 2 números (los pasados elementos en las primera y segunda columnas); si deseásemos tabular polinomios de grado  $n$ , necesitaríamos suficiente almacenamiento para tener  $n$  números.

La máquina diferencial No. 2 de Babbage, finalmente construida en 1991, podía tener 7 números de 31 dígitos decimales cada uno y por lo tanto podía tabular polinomios de 7° grado con esa precisión. Las mejores máquinas de Scheutz podían almacenar 4 números con 15 dígitos cada uno.

Los valores iniciales de las columnas pueden ser calculados de la siguiente manera: Primero calculando manualmente  $N$  valores consecutivos de la función, y por vuelta atrás (backtracking), es decir, calculando las diferencias requeridas.

La columna  $1_0$  consigue el valor de la función al comienzo del cómputo  $f(0)$ . La columna  $2_0$  es la diferencia entre  $f(1)$  y  $f(0)$ ...

Un método más general y en muchos casos más útil, es el de calcular los valores iniciales de los valores de las derivadas de la función al inicio del cómputo. Así, cada valor es representado como serie potencias de diferentes derivadas. Las constantes de

las series pueden ser calculadas al expresar primero una función como una serie de Taylor, es decir, una suma de sus derivadas. Fijando 0 como el inicio del cómputo obtenemos las series de Maclaurin:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} (x)^n.$$

Calculando los valores numéricamente, conseguimos las siguientes representaciones seriales para los valores iniciales de las columnas:

Sean  $f, f', f'', f''', f'''' \dots$  los valores de la función y sus derivadas al inicio del cómputo

- Col 1<sub>0</sub> =  $f$
- Col 2<sub>0</sub> =  $f' + 1/2f'' + 1/6f''' + 1/24f'''' + 1/120f''''' + \dots$
- Col 3<sub>0</sub> =  $f'' + f''' + 14/24f'''' + 23/120f''''' + \dots$
- Col 4<sub>0</sub> =  $f''' + 36/24f'''' + 171/120f''''' + \dots$

Charles Babbage puede ser considerado por algunos como el padre de las computadoras modernas, pero sin duda también puede ser considerado el padre de las impresoras modernas. Más de 150 años después de sus planos y un trabajo minucioso del Museo de Ciencias de Londres, dieron como resultado la construcción de la Máquina Analítica. Los planos del matemático y científico incluían un componente de impresión, el cual ha sido reconstruido por el Museo y es funcional. Esta impresora consta de 8.000 piezas mecánicas y pesa aproximadamente 2,5 toneladas.

Fue tan innovadora para su época y podemos apreciarlo hoy, que es capaz de imprimir automáticamente los resultados de un cálculo y un usuario puede cambiar parámetros como espacio entre líneas, elegir entre dos tipografías, número de columnas y otros. Su sofisticación llega a tal punto que puede generar (fabricar) los moldes de las impresiones que podrían ser usados por las imprentas aún hoy en día. Esta impresora lamentablemente no lleva un nombre ya que Babbage la incluyó en sus planos de la Máquina Analítica, pero basta con aludir a ella como la impresora de Babbage para reconocer en este hombre un visionario.

Hoy en día los mecanismos leva-seguidor también son un elemento ampliamente utilizado en la maquinaria actual, por ejemplo: en motores de combustión interna, telares, máquinas herramientas, sistemas robóticos, etc. Estos sistemas 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 casi cualquier característica deseada y los perfiles de levas que proporcionan el movimiento requerido son mecanizados por máquinas de control numérico.

Las levas son un tipo de par de cinemático en el que el contacto entre los dos elementos se produce en un único punto (o línea en tres dimensiones). Es habitual llamar leva al elemento conductor y seguidor al elemento conducido.

Antes de que los ordenadores se empleasen en el estudio de este tipo de mecanismos, el método utilizado se basaba en tediosas técnicas gráficas que generaban el perfil mediante la envolvente de las sucesivas posiciones del seguidor alrededor de la leva.

Este estudio cinemático es una parte importante en el diseño de este tipo de mecanismos, por esta razón es fundamental que se lleve a cabo de un modo lo más exacto y completo posible.

Para conseguir una optimización de todos estos cálculos, tanto en su modo y su agilidad de realización, y aprovechando las herramientas informáticas de las que se dispone actualmente, se implementará una aplicación informática que simplificará enormemente la tarea a desarrollar.

Tras haber dedicado tiempo a la búsqueda por internet de algún tipo de herramienta que facilitará el estudio cinemático que se pretende, se han encontrado aplicaciones que no cumplen el objetivo que se buscaba. Existen programas para el diseño de levas con limitaciones en cuanto a la función a seguir para obtener el perfil deseado; es decir, la función de movimiento está implícita en el programa por lo que no puede ser modificada por el usuario, con CAM-DAS se intentará conseguir que el programa admita la introducción de cualquier función matemática dependiente de una variable

(ángulo de giro de la leva) para dibujar el perfil de la leva, esto facilitará en gran forma la digitalización del perfil de la leva y por ende la obtención del diagrama de desplazamientos y sus derivadas sucesivas.

Los programas existentes sólo visualizan el perfil de la leva y el diagrama de desplazamiento como una imagen, lo que dificulta la posibilidad de realizar modificaciones o utilizarla con otros fines como el de animación.

Si se toma como ejemplo el software desarrollado por Robert L. Norton denominado Dynacam, que de acuerdo a los datos de subida, detenimiento y bajada permite seleccionar las ecuaciones de movimiento y hace el dibujo de la leva junto a los diagramas SVAJ, además de calcular las fuerzas dinámicas que actúan sobre la leva, se observa que el programa aborda no solo el cálculo cinemático sino también la parte dinámica del mecanismo, esto conlleva que el usuario deba tener una buena base teórica de mecánica.

## 1.2 Objetivos

Después de lo expuesto en la introducción, queda claro que el uso de los programas para el diseño y cálculo de levas se ve limitado a un grupo de usuarios especializados en el tema y sin ser demasiado detallados no son intuitivos, tienen un difícil uso.

Así, el principal objetivo de este proyecto es cubrir esta necesidad: se creará una herramienta útil, intuitiva y detallada para el diseño, simulación y análisis cinemático de levas planas. Para ello, se ha desarrollado el programa CAM-DAS, una interfaz gráfica programada en Visual Basic 6.0, que sirve como herramienta didáctica que ayuda a la visualización, estudio y comprensión de los diferentes factores que deben tenerse en cuenta a la hora de calcular un mecanismo leva-seguidor. La aplicación es el resultado de la implementación de la teoría básica de levas planas a un entorno informático de ventanas gráficas.

Como principales características de CAM-DAS se considerarán las siguientes:

- Debería estar diseñada para que resultase de fácil uso, intuitiva: no tendrían que ser necesarios grandes conocimientos previos sobre la teoría de levas para hacer uso del programa.
- La interacción entre el usuario y CAM-DAS debe llevarse a cabo de un modo lo más interactivo posible, presentando el cálculo y unas conclusiones tanto de levas planas de rotación, como de los mecanismos desmodrómicos (como son las levas conjugadas, las levas de rotación de anchura constante, las levas de diámetro constante) y de las levas alternativas.
- Una de las principales características que debía poseer, era la posibilidad de visualizar el movimiento del mecanismo leva-seguidor calculado, para así ayudar a la mejor comprensión del mismo, y poder observar resultados; algunos son fundamentales para una correcta aplicación de la teoría y otros, aparentemente obvios, pueden no tenerse en cuenta al estudiar estos mecanismos, y pueden llevar al traste lo que se creía iba a ser una leva de comportamiento aceptable. La observación de su movimiento al tiempo que se presentan el resto de magnitudes cambiantes haría posible un elevado nivel de comprensión.
- CAM-DAS es un programa que no se limitará a desempeñar un papel pasivo, sino que, ante el cálculo de una leva, presentará sus propias conclusiones e informa al usuario de posibles incoherencias en los datos introducidos.
- Todos los resultados obtenidos no sólo serían visibles desde la propia aplicación sino que, además de permitir imprimirlos, debería tener en cuenta la posibilidad de exportarlos a Microsoft Excel. De este modo se tendría acceso a los resultados numéricos obtenidos en el análisis de la leva.



- Cada uno de los mecanismos leva-seguidor considerados serán diseñados en todos sus aspectos geométricos, que son tanto las magnitudes que definen sus dimensiones, como el movimiento de salida que requiere el seguidor.
- Con el fin de que la aplicación pueda ser utilizada con la misma facilidad por estudiantes de intercambio que se manejen mejor con el inglés, se traducirá CAM-DAS, tanto el programa como el manual del usuario. Gracias a la bibliografía en inglés que existe sobre el diseño de levas, la traducción se ha llevará a cabo con la terminología adecuada.

El programa CAM-DAS tomará como referencia el programa SCLevas, desarrollado en 2001 por D. Enrique Llamazares Aparicio, bajo la tutela de D. Juan Carlos García Prada y D. Pedro José Lorca Hernando. La herramienta CAM-DAS pretende ser una evolución muy avanzada del citado programa, cambiando hasta la versión del programa de software en el cual se implementará.

Las principales diferencias que va a presentar la herramienta CAM-DAS respecto a la de referencia SCLevas, serán:

- Programación en Visual Basic 6.0.
- Eliminación del proceso de instalación.
- Incorporación del diseño y cálculo de levas alternativas.
- Incorporación del diseño y cálculo de levas desmodrómicas (levas conjugadas, levas de anchura constante y levas de diámetro constante).
- Generar una ayuda interactiva que defina las variables geométricas particulares de cada mecanismo leva-seguidor.
- Aunque se usará el entorno gráfico del programa de referencia (intuitivo y amigable), se introducirán múltiples mejoras de edición, visualización, nuevas ventanas, impresión de los resultados, etc.
- Implementación del programa CAM-DAS en inglés.
- Realización de un nuevo manual de usuario (con versión en inglés).
- Incorporación del manual de usuario a la ayuda del programa.
- Biblioteca de ejemplos de mecanismos leva-seguidor.

- **1.3 Fases del proyecto**

Para la implementación de la herramienta informática durante el proyecto se han seguido las siguientes fases:

- Fase 1. Estudios previos y documentación.

En primer lugar durante esta fase se realizó un estudio teórico detallado de la teoría de levas, para determinar el tipo de levas que se deseaban obtener.

Se analizaron con detalle los antecedentes del proyecto tomando todo aquello que pudiera aprovecharse para optimizar la implementación del programa. En este apartado cabe destacar el gran apoyo que ha ofrecido el programa SCLevas, implementado por Enrique Llamazares Aparicio.

A continuación se llevo a cabo el aprendizaje de Visual Basic 6.0, lenguaje de programación seleccionado previamente para la creación del CAM-DAS. El planteamiento del programa fue el último paso en esta fase.

- Fase 2. Diseño y simulación por ordenador.

Una vez se tuvo el planteamiento del programa, se inicio el diseño de CAM-DAS. Este diseño tenía que ayudar a conseguir los objetivos planteados, cada uno de los interface del programa está diseñado de modo que el usuario de un simple vistazo puedo comprender en qué fase del estudio cinemático se encuentra.

Creada la cara externa del programa, se inició la programación del análisis cinemático, es decir se implementaron todos los cálculos matemáticos y geométricos necesarios con el lenguaje de programación seleccionado.

➤ Fase 3. Ensayos de prueba.

Se trata de una fase fundamental, con el programa ya implementado en Visual Basic 6.0 se realizaron diseños, análisis y simulaciones de todos los tipos de levas creados, y se depuró el código para comprobar si los resultados obtenidos eran coherentes con la teoría y en busca de posibles fallos o anomalías dentro del programa que originaran resultados erróneos.

➤ Fase 4. Traducción y biblioteca de ejemplos.

Hechas todas las comprobaciones y verificado el óptimo funcionamiento de CAM-DAS, se llevo a cabo la traducción al inglés de la herramienta.

Con el programa ya operativo se llevo a cabo la creación de una biblioteca de ejemplos con todos los tipos de levas disponibles en el programa, que serán incluidos en el manual del usuario.

➤ Fase 5. Finalización del proyecto.

Se procede a la redacción de la memoria documental y último retoques al software.

## 1.4 Estructura del documento.

El presente Proyecto Fin de Carrera se ha estructurado en 9 capítulos y bibliografía. A continuación se realiza un breve resumen de los contenidos:

➤ Capítulo 1. Introducción y objetivos.

Se explica el ámbito del proyecto, se exponen los objetivos que se fijan con la creación de CAM-DAS, y por último se enumeran las distintas fases por las que ha pasado el proyecto.

➤ Capítulo 2. Introducción a las levas.

Introducción que sirva para familiarizarse con la nomenclatura y terminología empleada en la teoría de levas planas y facilitar así el seguimiento de todo el documento

➤ Capítulo 3. Definición de la ley de la leva.

Capítulo donde se explica el modo en que se definirá la ley de desplazamiento o función de desplazamiento, ley que seguirá el palpador durante su movimiento.

➤ Capítulo 4. Obtención del perfil de una leva.

Se presenta diversos métodos que se aplican para la obtención del perfil de una leva, tanto métodos gráficos como analíticos.

➤ Capítulo 5. Análisis de verificación del perfil obtenido.

Se explican los distintos parámetros que deben analizarse para comprobar que el perfil obtenido es correcto o presenta ciertos problemas de diseño.

➤ Capítulo 6. Entorno software y diagramas de funcionamiento.

Este capítulo se centra en dar a conocer al lector el lenguaje de programación seleccionado, Visual Basic, mostrando sus características generales. También presenta los diagramas de funcionamiento de CAM-DAS

➤ Capítulo 7. Manual de usuario del programa CAM-DAS.

En este capítulo se ofrece la guía que puede seguir un nuevo usuario de CAM-DAS para conocer el entorno del programa.

➤ Capítulo 8. Versión en inglés. User guide CAM-DAS.

En esta ocasión el manual del usuario se presenta en inglés

➤ Capítulo 9. Conclusiones y trabajos futuros.

En este último capítulo se realiza un chequeo de todo el trabajo realizado para comprobar que se han alcanzado los objetivos propuestos en el primer capítulo. Así mismo se plantearán posibles trabajos futuros que completen el presente proyecto y sigan la línea de trabajo propuesta.

➤ Bibliografía y recursos de internet.

En esta sección de la memoria se enumeran las principales referencias consultadas para la realización del Proyecto Fin de Carrera y la escritura del documento.

## Capítulo 2: Introducción a las levas

Este capítulo pretende ser una introducción que sirva para familiarizarse con la nomenclatura y terminología empleada en la teoría de levas planas y facilitar así el seguimiento de todo el documento. A lo largo de todo este trabajo se han incluido numerosos gráficos y figuras que sirven de apoyo a las explicaciones.

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 pares inferiores (Figura 2.1). 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.

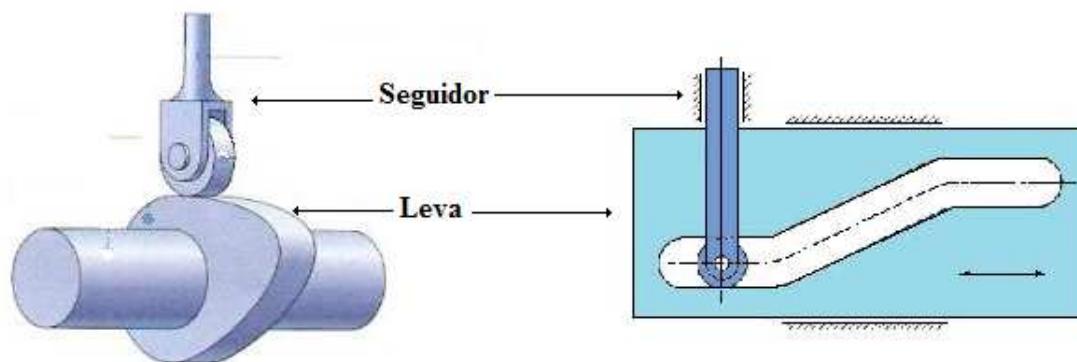


Fig. 2.1 Mecanismos leva-palpador

El movimiento de la leva, usualmente de rotación, se transforma en movimiento de rotación o traslación del palpador. Los mecanismos de leva-palpador generalmente son utilizados como generadores de función. Estos 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.

## 2.1 Clasificación de los mecanismos leva-seguidor

Las levas pueden clasificarse atendiendo a muchos y diferentes criterios. A continuación se exponen los más comunes:

- a) Según la geometría del extremo del seguidor.
  1. Palpador circular o de rodillo. (Figura 2.2a)
  2. Palpador puntual. (Figura 2.2b)
  3. Palpador plano o de cara plana.
    - Recto. (Figura 2.2c)
    - Inclinado. (Figura 2.2d)
  4. Palpador curvo o en forma de hongo.
    - Simétrico o de casquete esférico. (Figura 2.2e)
    - Asimétrico. (Figura 2.2f)

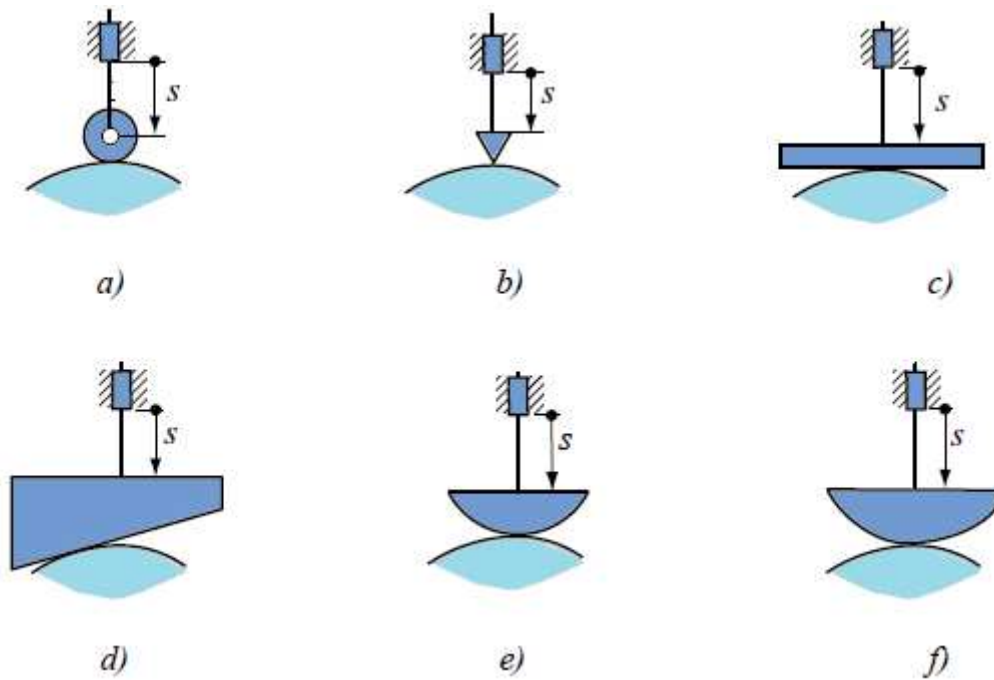


Fig.2.2 Tipos de levas según la forma del seguidor.

b) Según el tipo de cierre del par superior. Para mantener unidos dos elementos que se encuentran en movimiento es necesario asegurar en todo momento el contacto entre ambos o de lo contrario podría ocurrir que se perdiese el control sobre el seguidor, con lo cual éste ya no realizaría el movimiento pretendido. Tal situación puede evitarse de dos formas:

1. Cierre de fuerza: Se requiere la aplicación de una fuerza externa que actúa sobre el palpador, el peso del palpador o la fuerza de un muelle. (Figura 2.3)
2. Cierre de forma: en este caso el seguidor está en contacto con más de una superficie a la vez, es decir, se encuentra inmerso dentro de la propia leva en una ranura o canal por donde se mueve. El contacto está asegurado porque se dispone de una doble superficie de leva y el seguidor se encuentra aprisionado entre ambas. Existe una variante, denominada leva conjugada, en la cual, además de existir una doble superficie, se tiene un



doble seguidor: no existe ranura por la que discurran los seguidores, ambos lo hacen sobre el exterior, cada uno sobre una superficie, pero de tal modo que invierten su papel activo para conseguir que el otro mantenga su contacto con el contorno por el que se mueve. (Figura 2.4)

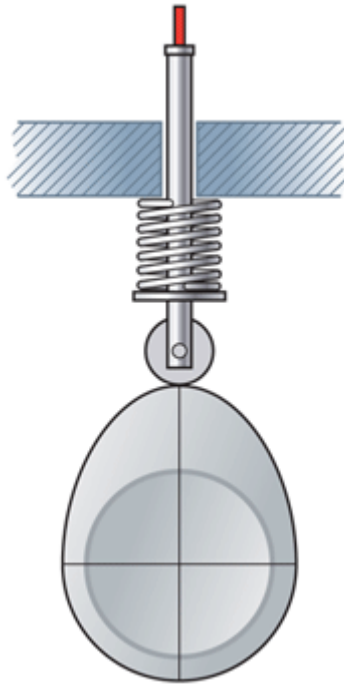


Fig. 2.3 Mecanismo de leva con cierre por fuerza.

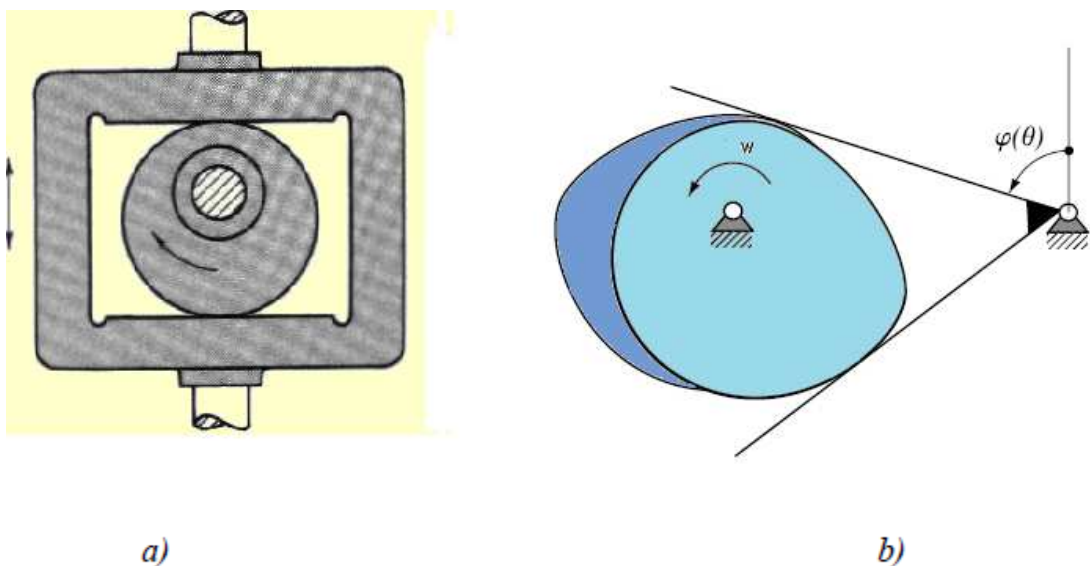


Fig. 2.4 Levas desmodrómicas: a) de anchura constante y b) conjugada

c) Según el movimiento propio del seguidor.

1. Palpador con movimiento de traslación:

- Excéntrico (Figura 2.1)
- Axial (Figura 2.5a)

2. Palpador con movimiento de rotación. (Figura 2.5b)

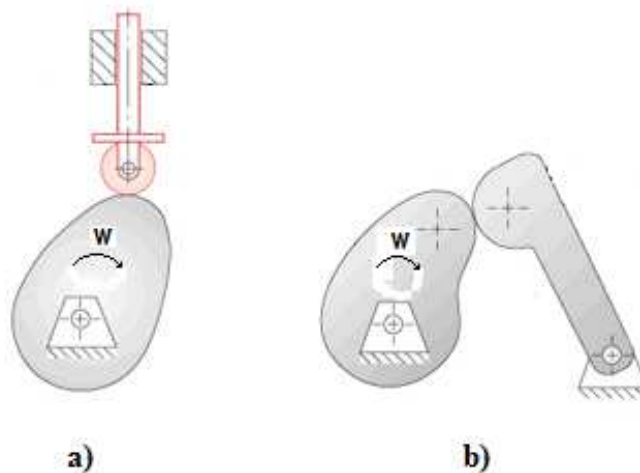


Fig. 2.5: Tipos de Leva

d) Según el movimiento del seguidor en relación con el de la leva. Se habla entonces de leva radial o axial: en el primero de los casos, el seguidor se mueve de forma perpendicular al eje de rotación de la leva; si ambas direcciones fuesen paralelas se estaría frente a una leva de tipo axial.

- Las levas radiales de uso más común tienen cierre de fuerza y se conocen como levas planas de rotación (también levas de placa o levas de disco). Sobre este tipo versa el presente proyecto.
- Las levas axiales pueden a su vez dividirse en dos grupos atendiendo al tipo de cierre que empleen, si éste es de forma se conocen como levas de cara (Figura 2.6a) y si es de fuerza se puede hablar de levas cilíndricas (Figura 2.6b)

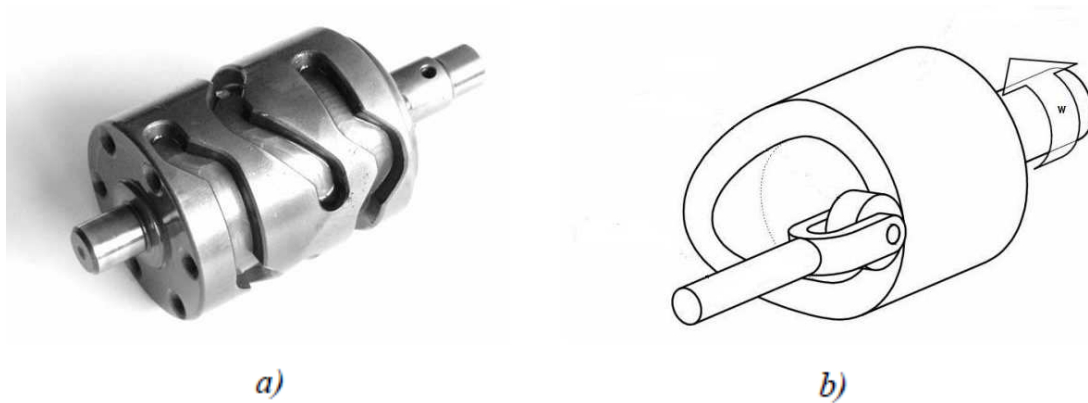


Fig. 2.6: a) Leva axial de cara. b) Leva axial cilíndrica.

- e) Según qué elemento imprima el movimiento en el otro. En este caso puede hablarse de levas directas o inversas. En el primer caso (el más común) es la leva la que ejerce el movimiento sobre el seguidor. Si se invierte la situación se habla de levas inversas.

## 2.2 Descripción de las levas estudiadas

### 2.2.1 Levas Planas de Rotación (con cierre de fuerza)

Llegados a este punto, se hace necesario definir algunos conceptos generales que hacen referencia a la geometría básica de las levas planas de rotación (con cierre de fuerza) con seguidores traslacionales y oscilantes de cara plana y de rodillo y que resultan indispensables para un correcto entendimiento de su comportamiento.

- Levas planas de rotación con seguidores de cara plana de movimiento traslacional.
- Levas planas de rotación con seguidores de cara plana de movimiento oscilante.
- Levas planas de rotación con seguidores de rodillo de movimiento traslacional.
- Levas planas de rotación con seguidores de rodillo de movimiento oscilante.

En la figura 2.7 puede observarse una leva plana de rotación con seguidor traslacional de rodillo.

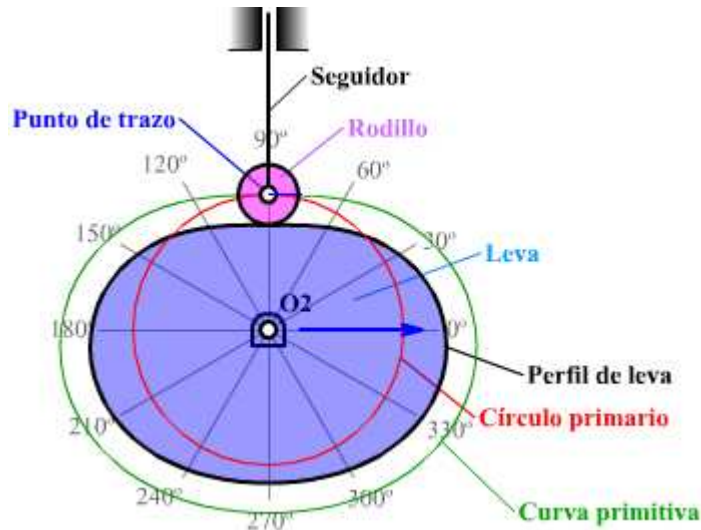


Fig. 2.7: Leva plana de rotación con seguidor traslacional de rodillo

En dicha figura se observan los siguientes conceptos:

- Punto de trazo: viene dado por el centro del rodillo que hace de seguidor.
- $R_r$ : radio del rodillo del seguidor.
- Círculo base: es el más pequeño que puede trazarse tangente a la superficie de la leva.
- $R_b$ : radio del círculo base.
- Curva de paso o primitiva: es la curva o trayectoria que describe el punto de trazo del seguidor al moverse siguiendo el perfil de la leva.
- Círculo primario: es el más pequeño que puede trazarse tangente a la curva de paso.
- $R_p$ : radio del círculo primario. Se puede observar que  $R_p = R_r + R_b$ .

La figura 2.8 representa el caso de una leva plana de rotación con seguidor de cara plana de movimiento traslacional. Se hace patente su mayor simplicidad, desaparecen la curva de paso y el círculo primario.

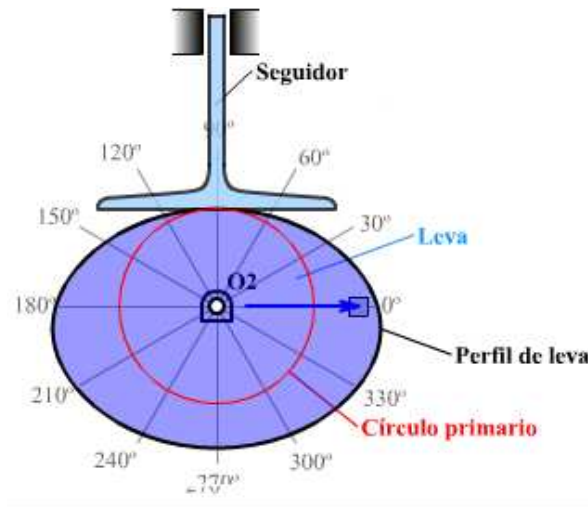


Fig. 2.8: Leva plana de rotación con seguidor traslacional de cara plana.

Las dos situaciones vistas para la leva de rodillo traslacional y la leva de cara plana traslacional son extensibles a sus parejas, leva de rodillo oscilante y leva de cara plana oscilante respectivamente. Sus representaciones aparecen en las figuras 2.9 y 2.10.

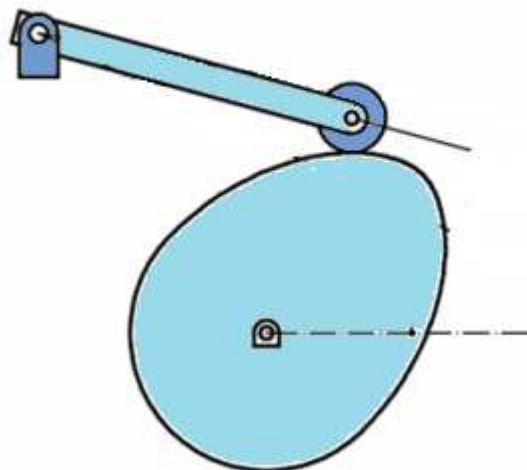


Fig. 2.9: Leva plana de rotación con seguidor oscilante de rodillo

En estos casos el movimiento de entrada sigue siendo una rotación para la leva. La salida que ahora se debe especificar y que determinará el perfil de la leva, es la oscilación del seguidor.

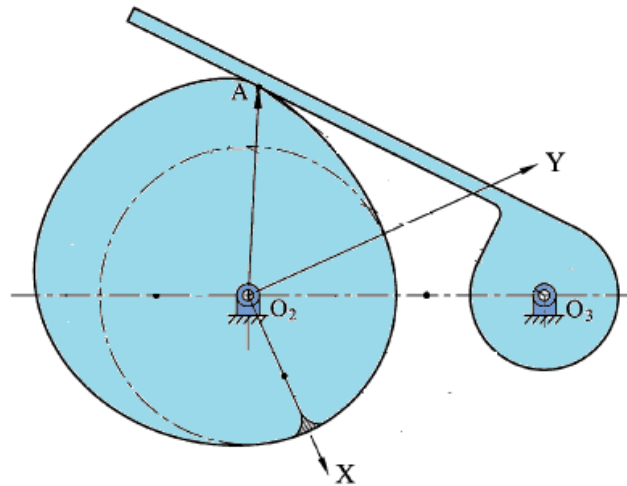


Fig. 2.10: Leva plana de rotación con seguidor oscilante de cara plana.

### 2.2.2 Mecanismos Desmodrómicos

La ampliación CAM-DAS se centra en incorporar al cálculo los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, específicamente los mecanismos de levas conjugadas o dobles y los mecanismos con levas de anchura y diámetro constante. Por esta razón, a continuación se hace una caracterización más detallada de estos mecanismos.

Se asumirá, durante el trabajo, la denominación de mecanismos de levas desmodrómicas utilizada por Cardona y Clos (2001), la cual a continuación se expone:

Mecanismos 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, éstos son el de leva cara ranurada, de anchura constante, de diámetro constante y de levas conjugadas, éstos tres últimos son los estudiados en el proyecto.

- **Mecanismos de leva de anchura constante 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-seguidor. 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. Una leva excéntrica, cuyo perfil es una circunferencia de un diámetro determinado, constituye un ejemplo sencillo de leva de anchura constante (Figura 2.11).

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 de leva-palpador, en estos casos el perfil de leva se denomina de diámetro constante (Figura 2.11)

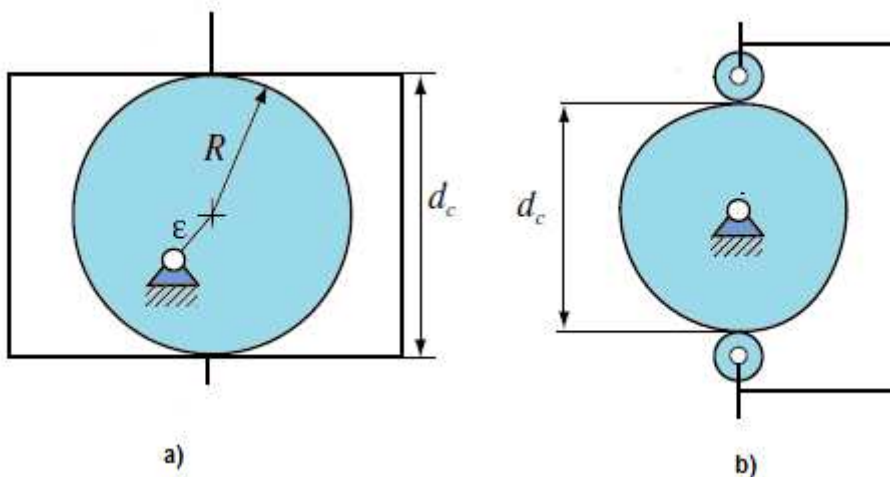


Fig. 2.11 Mecanismos de levas: a) de anchura constante, b) de diámetro constante

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

Dentro de las levas de anchura constante cabe señalar las levas denominadas por Harold A. Rothbart como levas armónicas, que son un tipo de levas de arcos circulares, son las que calcularemos en el programa, el autor las 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 2.12).

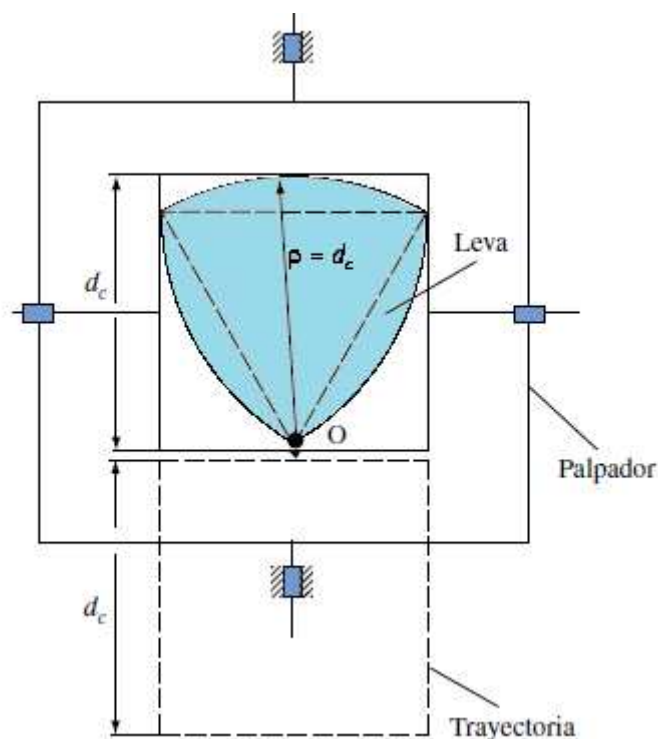


Fig. 2.12 Leva de anchura constante de arcos circulares

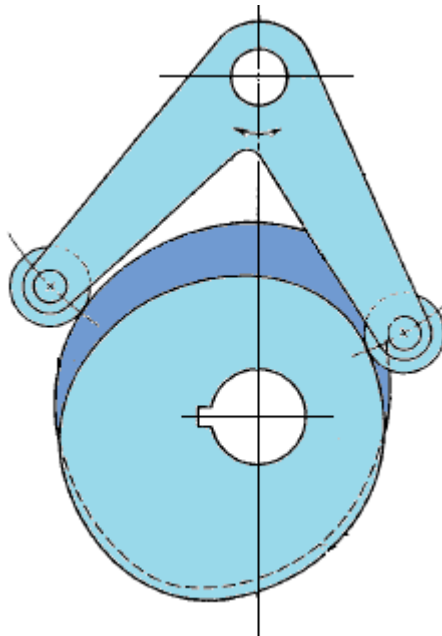
En la figura 2.12 la leva se construye sobre la base de un triángulo equilátero, sus lados son arcos de círculos de radio  $\rho$  igual a la anchura  $d_c$  del palpador con forma de cuadrado. Este palpador describe una trayectoria en forma de cuadrado durante su movimiento. Aquí el desplazamiento total 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.



- **Levas Conjugadas**

Los mecanismos de levas conjugadas (Figura 2.13) son también llamados mecanismos de levas dobles o adjuntas. 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 y por Norton, levas de accionamiento positivo por Rothbart y Wilson y Sadler, levas especiales por Koloc y Vlákavík o levas desmodrómicas por Cardona y Clos.



*Fig. 2.13 Levas conjugadas*

Estos mecanismos constan de dos levas montadas sobre un mismo árbol, cuyos perfiles son conjugados entre sí. 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 leva y palpador y aumentando la eficacia del mecanismo.

En los mecanismos de levas conjugadas una leva impulsa al primer palpador, al cual denominaremos 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.

La ventaja principal de los mecanismos de leva conjugadas 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.

### **2.2.3 Levas alternativas o traslacionales.**

En la bibliografía consultada a este tipo de levas se le da diversos nombres, levas de traslado, de cuña, traslacionales, etc. Todas estas denominaciones hacen referencia a las levas cuyo contorno o forma realiza un movimiento de traslación y dónde esta forma base quedará determinada por el movimiento específico del seguidor.

La denominación de levas alternativas se debe a que realizan un movimiento traslacional de manera alternativa. Estas levas transformarán su propio movimiento en un movimiento de traslación del seguidor, que en este proyecto tomaremos como seguidor de rodillo.

Debido a esta acción alternativa, se presenta un viaje de ida y otro de retorno en el cual se sigue el mismo movimiento en el orden inverso.

Por tanto el perfil de la leva quedará definido con la propia ley de desplazamiento que se defina para el seguidor.

Se deberá tener en cuenta los siguientes conceptos en el estudio de las levas alternativas:

- Punto de trazo: viene dado por el centro del rodillo que hace de seguidor.
- $R_r$ : radio del rodillo del seguidor.
- Curva de paso o primitiva: es la curva o trayectoria que describe el punto de trazo del seguidor al moverse siguiendo el perfil de la leva.

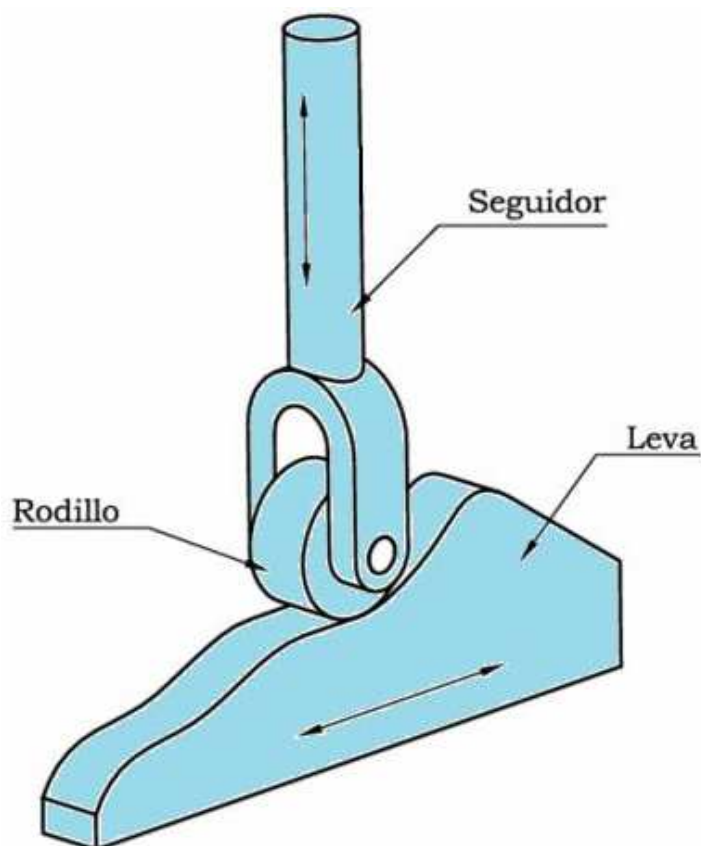


Figura 2.14: Leva alternativa o traslacional.

### 2.3 Secuencia de diseño de un mecanismo leva-palpador

La propia definición de mecanismo leva-palpador expuesta al inicio del capítulo 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  $q_p(q_l)$ .

Hay dos tipos de restricciones de movimiento: la primera, conocida como CEP (Critical Extreme Position), establece las condiciones de contorno para el seguidor al comienzo y al final de los tramos del diagrama de desplazamiento; la segunda, conocida como CPM (Critical Path Motion), requiere también el paso por determinadas posiciones intermedias. Este proyecto se centra en el primer tipo de restricciones.

- 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.

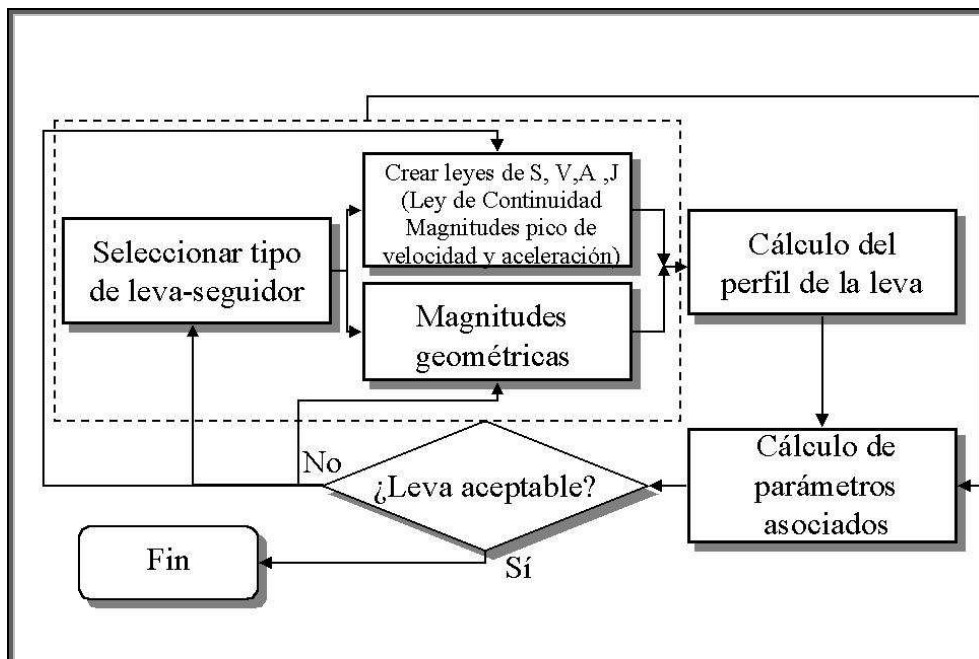


Figura 2.15: Diagrama de flujo para el cálculo cinemático de una leva

Al tratarse de un proceso cargado de cálculos y que suele requerir de repeticiones hasta llegar a una solución aceptable que se adapte a las especificaciones, hoy en día es casi indispensable el uso de herramientas informáticas que facilitan la tarea y ofrecen la posibilidad de realizar los cálculos analíticos con gran rapidez.

## Capítulo 3: Definición de la ley de la leva

### 3.1 Función de desplazamiento. Aspectos generales

El primer paso en el cálculo de una leva es especificar el movimiento de salida que debe regir al seguidor. A este movimiento se le denomina ley de desplazamiento o función de desplazamiento.

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  $\theta$ , 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  $\phi$  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  $\phi(\theta)$  para aquellos en los que rota.

El movimiento de salida se construye por la unión de diferentes tramos comúnmente empleados en el cálculo de levas. La longitud de cada tramo vendrá dada por el ángulo parcial de rotación dentro de una vuelta completa, a este ángulo parcial se le denominará  $\beta$ . Como es lógico, la suma de los ángulos parciales de rotación debe ser exactamente  $360^\circ$ . Una ley de desplazamiento se supone construida cuando se han determinado todos los tramos necesarios para componer un giro completo. La información que debe contener cada uno de dichos tramos es:

- El tipo de movimiento para el tramo: armónico simple, cicloidal, velocidad constante, etc.
- El ángulo parcial de rotación  $\beta$  sobre el que se construye el tramo.
- La magnitud del movimiento lineal (seguidores traslacionales) o angular (seguidores oscilantes) y su sentido. A este valor se le llamará L.

Al representar la ley de desplazamiento  $S(\theta)$  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.

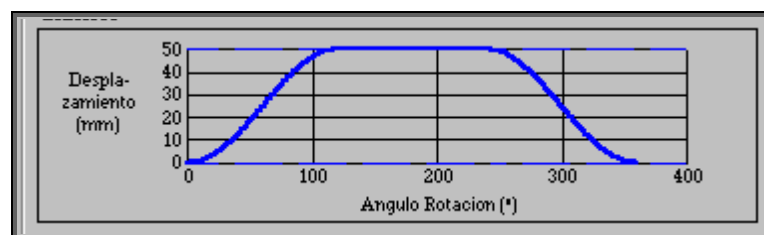


Fig. 3.1: Ley de desplazamiento formada por tres tramos de  $120^\circ$

En la figura 3.1 puede verse una función de desplazamiento para un seguidor de traslacional formada por tres tramos de  $120^\circ$ : el primero es un ascenso del seguidor de 50 mm, le sigue un detenimiento durante  $120^\circ$  y finalmente en el tercer tramo se retorna a la posición inicial.

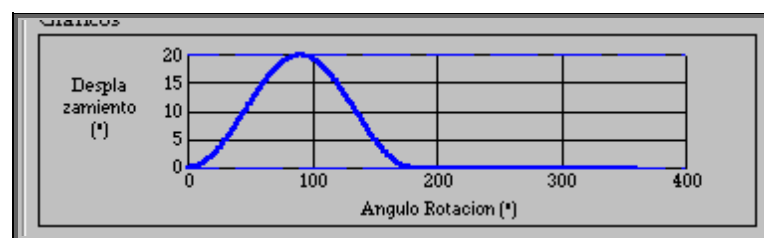


Fig. 3.2: Ley de desplazamiento de tres tramos ( $90^\circ+90^\circ+180^\circ$ )

En la figura 3.2 puede verse una función de desplazamiento para un seguidor de oscilante formada por tres tramos: el primero es un desplazamiento angular de  $20^\circ$  que

se lleva a cabo en un giro de leva de 90°, le sigue una oscilación en el sentido contrario y también durante 90° que lo hace volver a la posición inicial, y permanece allí durante el resto del giro de la leva (tercer tramo de 180°).

Para poder determinar el tipo de movimiento más adecuado se deberá seguir las siguientes pautas:

- Conocer o averiguar cuáles son las restricciones CPM para el intervalo.
- No pensar aisladamente en cada intervalo sino de forma conjunta con sus adyacentes.
- conocer bien las características que definen a cada tipo de movimiento para saber si es o no adecuado dentro de las condiciones del problema.

### 3.2 Relación cinemática leva-seguidor

La velocidad, aceleración y sobreaceleración<sup>1</sup> del seguidor se determinan directamente conociendo la ley de desplazamiento del mismo junto a la velocidad, la aceleración y la sobreaceleración angular de la leva:

$$\triangleright S = y(\theta)$$

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{dy}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{dy}{d\theta} \omega$$

$$A = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2y}{d\theta^2} \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{dy}{d\theta} \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2y}{d\theta^2} \omega^2 + \frac{dy}{d\theta} \alpha$$

$$\begin{aligned} J = \frac{dA}{dt} &= \frac{d^3y}{d\theta^3} \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^3 + 2 \frac{d^2y}{d\theta^2} \frac{d\theta}{dt} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d^2y}{d\theta^2} \frac{d\theta}{dt} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{dy}{d\theta} \frac{d^3\theta}{dt^3} = \\ &= \frac{d^3y}{d\theta^3} \omega^3 + 3 \frac{d^2y}{d\theta^2} \omega \alpha + \frac{dy}{d\theta} \varphi \end{aligned}$$

S, V, A, J: desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración del seguidor.

$\theta = \theta(t)$ : ángulo de giro.

<sup>1</sup> Sobreaceleración, sacudida o jalón (del inglés jerk), da idea de la rapidez de cambio de la aceleración.



$\omega$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ : velocidad, aceleración y sobreaceleración angular de la leva.

Se asume que  $\omega = \text{cte.}$  (que es lo habitual para la mayoría de las aplicaciones). En ese caso:

$$\triangleright S = y(\theta)$$

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{dy}{d\theta} \omega$$

$$A = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2y}{d\theta^2} \omega^2$$

$$J = \frac{dA}{dt} = \frac{d^3y}{d\theta^3} \omega^3$$

### 3.3 Selección de la función matemática para el perfil de la leva

#### 3.3.1 Ley Fundamental de Continuidad

Para que el cálculo de una leva sea aceptable, no se deben producir saltos en el seguidor a causa de un perfil abrupto causado por discontinuidades en la ley de desplazamientos. Es una condición indispensable: la continuidad en la función de desplazamiento del seguidor no puede violarse en ningún momento.

Sin embargo, no es suficiente con ello, y 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  $S(\theta)$  sea una función al menos de tipo C1. Discontinuidades en la velocidad originan aceleraciones en

teoría infinitas y fuerzas elevadas que podrían, excepto en máquinas muy lentas, que 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 C2. Si la aceleración presenta saltos bruscos –sobrealceleraciones 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.

Son aceptables discontinuidades en la tercera derivada (teniendo en cuenta que esto puede provocar vibraciones que se verán agravadas al aumentar la velocidad de giro de la leva por lo que, en el caso de velocidades angulares elevadas, no debe hacerse tal excepción).

No hay que dejar de pasar por alto que el movimiento de una leva es una situación cíclica, por lo que la continuidad debe estar asegurada también entre el punto inicial y su unión con el punto final (que son en sí el mismo punto). Por tanto, cuando la leva completa una vuelta (360°), el desplazamiento y las dos primeras derivadas (como mínimo) deben coincidir con los existentes en 0°.

En la figura 3.3 puede verse la ley de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobrealceleración para una leva (recuérdese la relación directa de las derivadas con la velocidad angular  $\omega$ ).

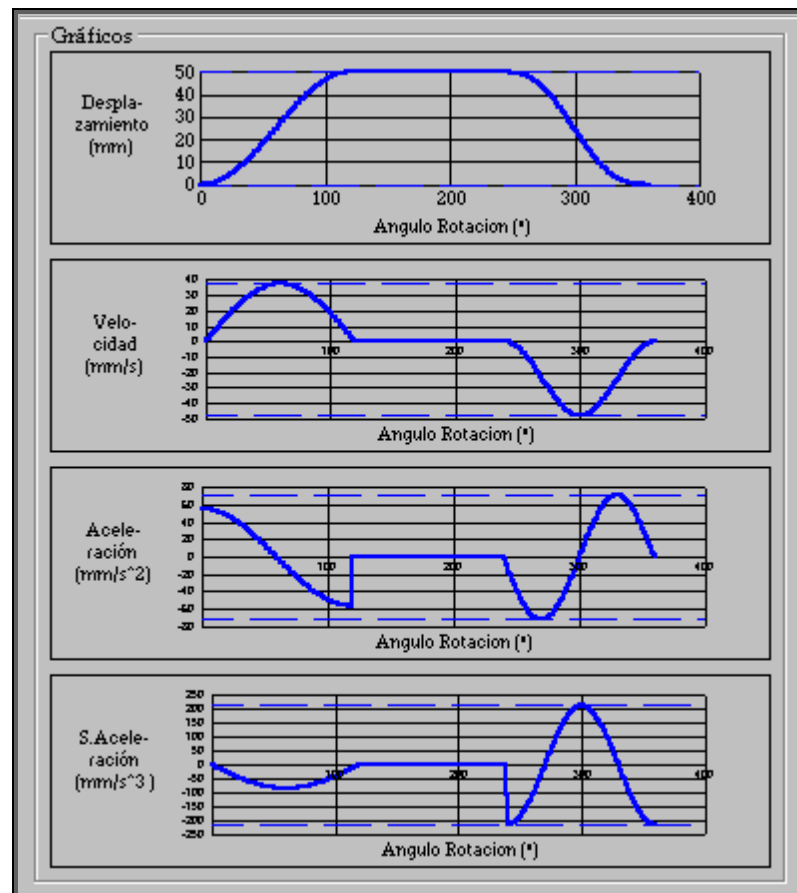


Fig. 3.3: Desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración.

En esta figura se observa que las funciones de desplazamiento y velocidad son continuas, pero no lo son la aceleración ni la sobreaceleración (la primera de ellas, al estar incumpléndose la ley de continuidad, hace que se trate a todas luces de una combinación de curvas inaceptable).

Haremos una excepción cuando se trate de levas de anchura o diámetro constante con seguidores traslacionales, debido a que su ley de desplazamiento tiene continuidad  $C^1$ , lo que conllevará discontinuidades en la aceleración. Este caso se verá con profundidad más adelante.

Obsérvese ahora la figura 3.4 en ella se aprecia la continuidad en la ley de desplazamiento, la velocidad y la aceleración, y a pesar de no ser continua en la sobreaceleración, esto es admisible si la leva no va a operar a velocidades angulares elevadas.

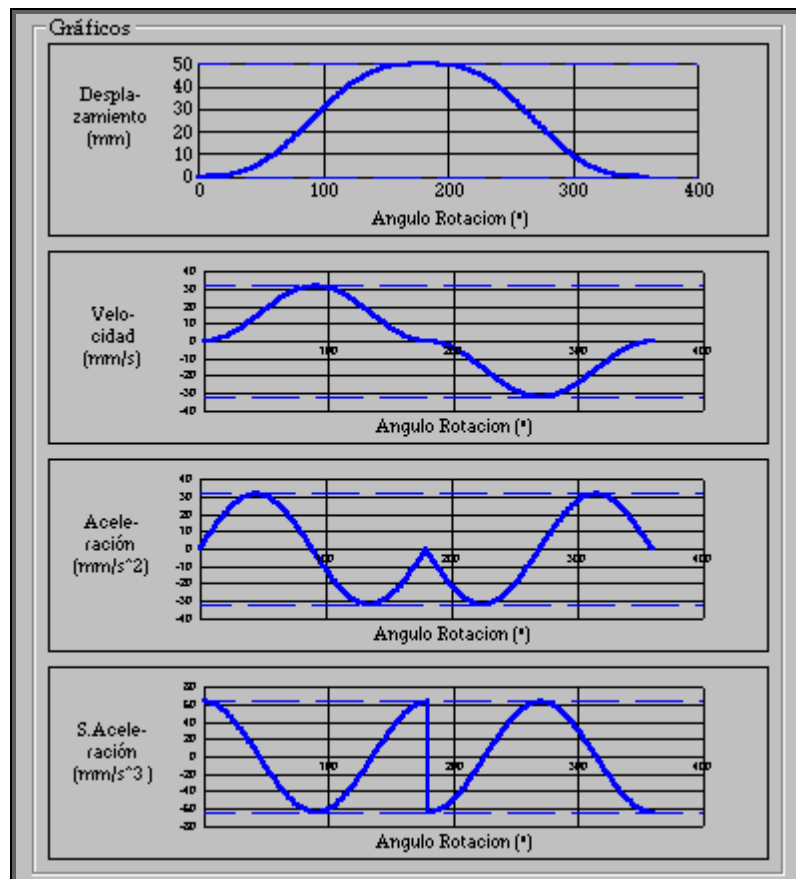


Fig. 3.4: Desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración

### 3.3.2 Valores pico de velocidad y aceleración

En ocasiones, la elección del tipo de movimiento para un tramo pasa por la incertidumbre de seleccionar entre diferentes posibilidades aparentemente válidas. En ese caso es necesario desechar aquellas que produzcan magnitudes pico de velocidad y

aceleración superiores a las demás. La razón es clara, mayores velocidades implican una más elevada energía cinética y consumos superiores de potencia, aceleraciones mayores producen cargas dinámicas que afectan a todo el sistema y que se deben tratar de minimizar para alargar el ciclo de vida de la leva y su seguidor.

### 3.4 Funciones matemáticas que definen la ley de desplazamiento

En este apartado se van a tratar de explicar las características que definen a cada una de las funciones que se emplean en el precálculo de levas para construir la ley de desplazamiento del seguidor, y junto a ella las leyes de velocidad, aceleración y sobreaceleración. El objetivo no es el detalle, sino presentar de forma sencilla y visual, con ayuda de los gráficos extraídos de CAM-DAS, las curvas más habituales.

En primer lugar es necesario aclarar la forma en que se opera con cada función. Como se ha dicho, cada ley de desplazamiento es creada por la unión de diferentes tramos de manera que se cumplan las condiciones de contorno requeridas. Cada tramo opera dentro de un intervalo angular englobado en la rotación total de la leva. Al ser la función de desplazamiento un conjunto de funciones, lo que se hace es tratar cada intervalo independientemente dentro de sus límites de rotación usando para ello una variable adimensional que será fracción de dos ángulos: el numerador  $\theta$  se corresponde con el ángulo parcial recorrido dentro de su intervalo; el denominador  $\beta$  (ya explicado) es la longitud total del tramo angular de rotación, así,  $\theta/\beta$  varía de 0 a 1, siendo 0 el punto inicial y 1 el punto final del tramo.

La curva de desplazamiento será muy parecida para casi todos los movimientos, sin embargo mostrarán notables diferencias en sus derivadas asociadas. Las condiciones de contorno y los valores pico de las mismas no tendrán porque ser iguales y ambos serán los criterios principales para decidirse por un tipo de movimiento o por otro, en primer lugar buscando el conjunto de tramos que cumpliendo las restricciones del problema aseguren la continuidad, como mínimo en velocidad y aceleración, después seleccionando entre las varias alternativas posibles para un posible tramo (si las hubiese), aquel que tenga menores valores pico de velocidad y aceleración.

Posteriormente entrarán a formar parte de otro cálculo la forma y movimiento del seguidor, así como las magnitudes geométricas, tanto de éste como de la leva, esto permitirá averiguar cuál tendrá que ser el perfil que debe tener la leva para que se produzca el movimiento de salida que se ha creado para el seguidor. Finalmente con ayuda de ciertos parámetros se determinará cómo de buena es la leva que se pretende. Caso de no ser suficientemente buena, habría que recalcular modificando cualquier dato de partida que pueda alterar la solución anterior.

Las curvas comúnmente empleadas en el cálculo cinemático de levas son las siguientes:

- Armónico Simple (sólo para ascenso y descenso consecutivos, ambos con  $\beta=180^\circ$  o con polinómicos genéricos de  $5^\circ$  o  $7^\circ$  grado).
- Cicloidal.
- Polinómico de  $5^\circ$  grado (caso particular: polinómico 3-4-5).
- Polinómico de  $7^\circ$  grado (caso particular: polinómico 4-5-6-7).
- Velocidad Constante.
- Movimientos de medio periodo (semiarmónicos y semicicloidal).
- Armónico Doble (sólo para ascenso y descenso consecutivos, ambos con igual  $\beta$  o con polinómicos genéricos de  $5^\circ$  o  $7^\circ$  grado).
- Movimientos compuestos (Aceleración de Onda Senoidal Modificada y Aceleración de Onda Trapecial Modificada).
- Detenimiento.

### 3.4.1 Armónico Simple

El movimiento armónico simple, cuyas gráficas y ecuaciones para tramos de ascenso y descenso se encuentran representados en las figuras<sup>2</sup> 3.5 y 3.6, es uno de los más sencillos que pueden plantearse en el precálculo de levas.

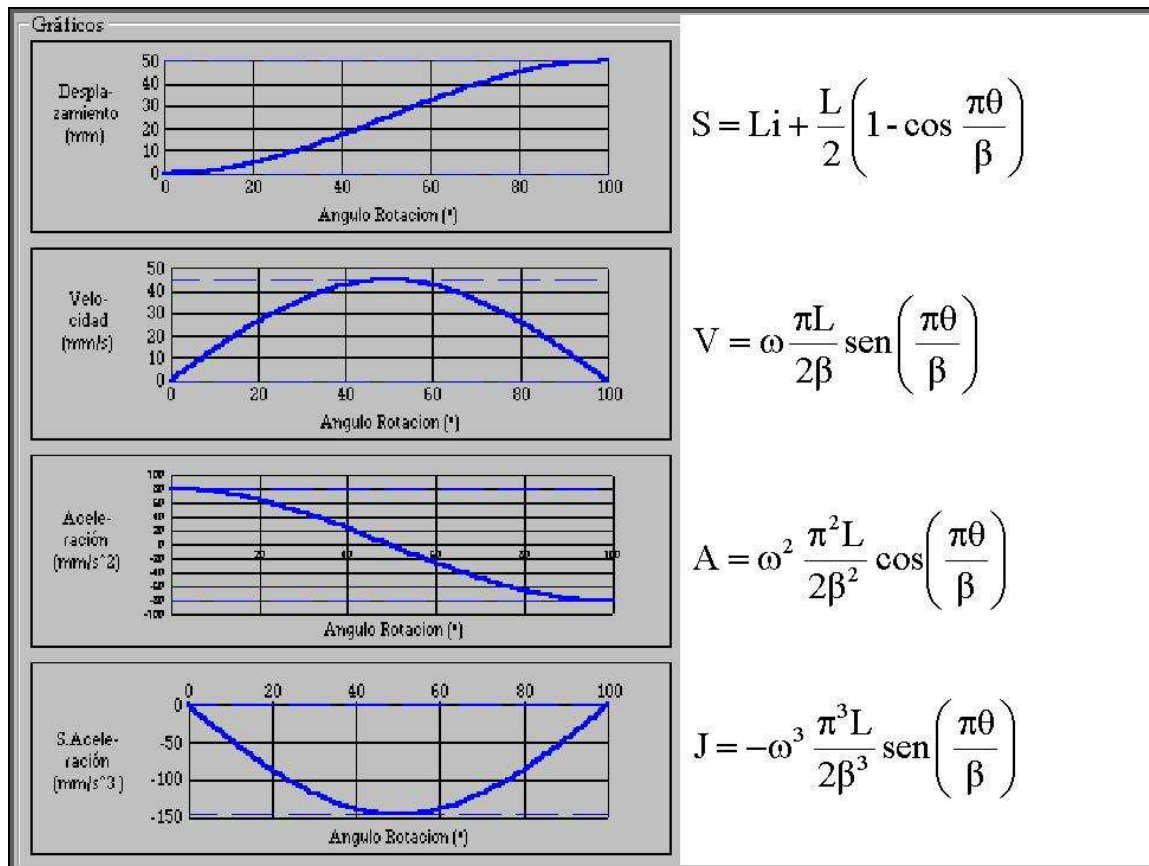


Fig. 3.5: Movimiento armónico simple de ascenso  $L=50\text{mm}$ ,  $Li=0$ ,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1\text{ rad/s}$

Su principal peculiaridad es que no se puede combinar con detenimientos, en éstos el seguidor permanece inmóvil durante el giro de la leva en una posición predeterminada por la última del tramo anterior (si lo hubiere, en caso de que no, sería la inicial, aunque estrictamente es como si fuese la última posición del tramo final; recuérdese el carácter cíclico), de manera que velocidad, aceleración y sobreaceleración son cero. Si se

<sup>2</sup> En todas las figuras,  $Li$  indica la posición inicial del seguidor, determinada por la última ordenada del tramo anterior.

observan las figuras se verá que la aceleración al final de los tramos armónicos simples es distinta de cero, por lo que la combinación junto a un detenimiento supondría el no cumplir con la ley de continuidad.

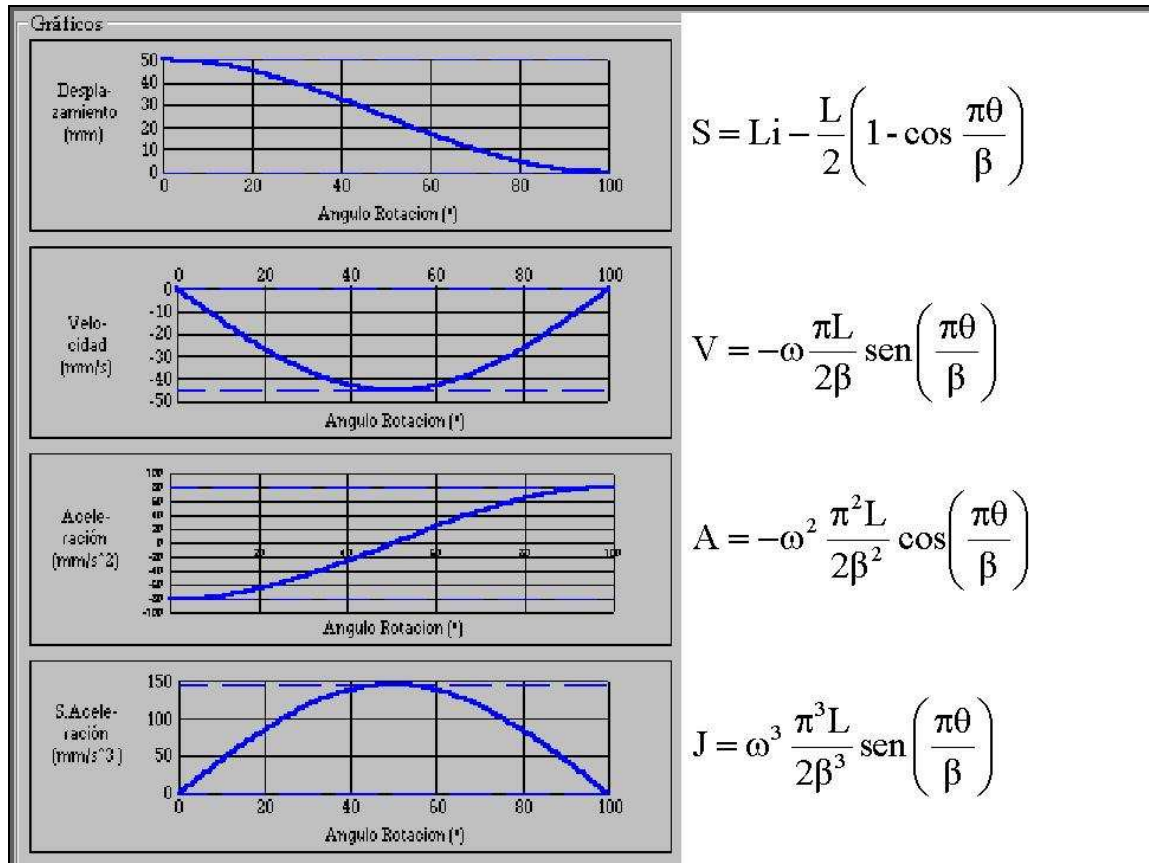


Fig. 3.6: Movimiento armónico simple de descenso  $L=50\text{mm}$ ,  $Li=50\text{mm}$ ,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1\text{ rad/s}$

Se debe aclarar que aunque se hable de ascenso o descenso como si se hiciese referencia a un seguidor traslacional, lo mismo es también aplicable a seguidores oscilantes, en este caso una subida se tomará como un giro en el sentido de las agujas del reloj.

Cuando se requiere una leva con un ascenso y descenso del seguidor de forma consecutiva, sin detenimiento intermedio, se puede emplear un movimiento armónico simple tanto en la subida como en la bajada. En ese caso, si ambos tramos tienen una longitud de  $180^\circ$ , la aceleración se vuelve continua. Esta combinación conforma lo que se conoce como leva excéntrica, que no es otra cosa que una leva con forma circular girando alrededor de un eje que no pasa por el centro del círculo, si bien, hay que decir



que esto ocurre sólo para seguidores de cara plana traslacionales, ya que los otros tipos de seguidores dan lugar a otras formas de leva que no son circulares.

### 3.4.2 Cicloidal

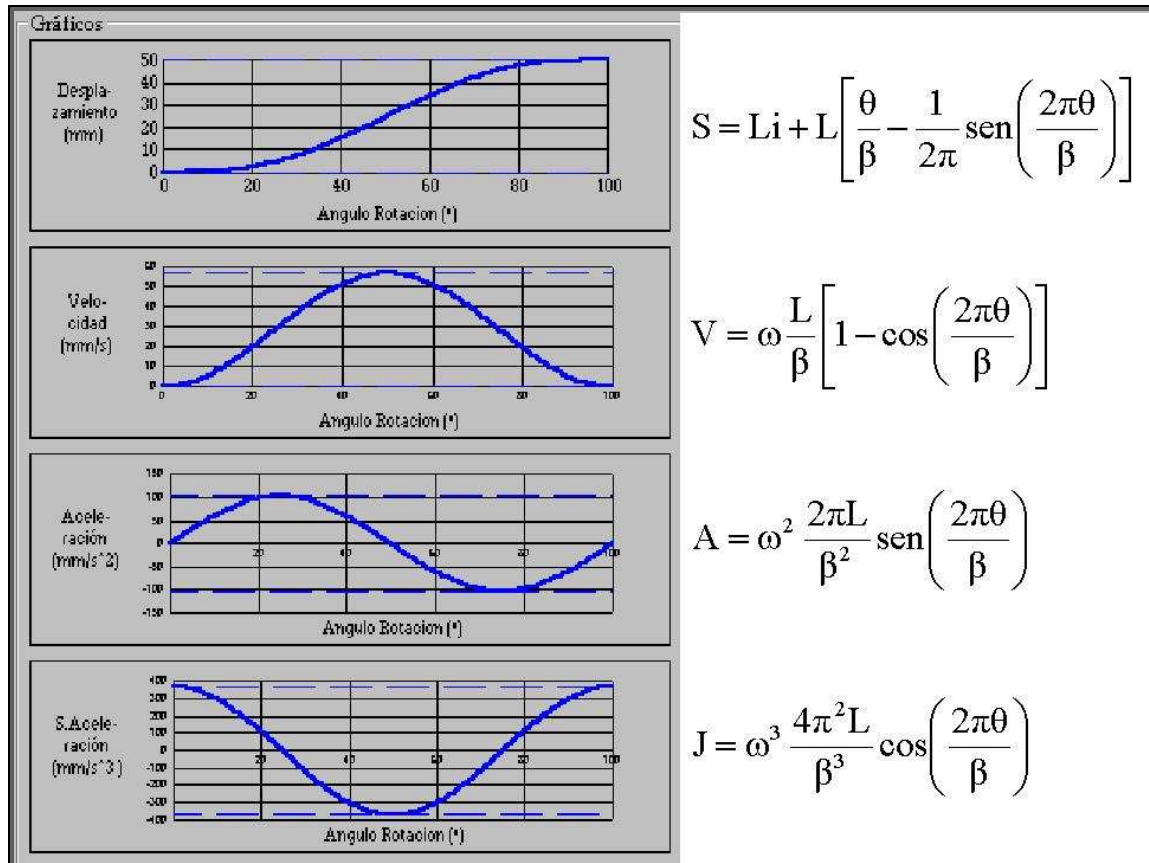


Fig. 3.7: Movimiento cicloidal de ascenso  $L = 50\text{mm}$ ,  $L_i = 0\text{mm}$ ,  $\beta = 100^\circ$ ,  $\omega = 1 \text{ rad/s}$

El movimiento cicloidal, a diferencia del armónico, no muestra incompatibilidad en su curva de aceleración cuando se combina con detenimientos. La razón es que su deducción parte de una aceleración senoidal de periodo completo, y por tanto con valores cero en sus extremos. Ésta se integra con las condiciones de contorno pertinentes ( $v=0$  en los extremos y desplazamiento de magnitud  $L$  para el tramo) y se obtienen las ecuaciones y las gráficas de desplazamiento que se muestran en las figuras 3.7 para el ascenso y 3.8 para el descenso.

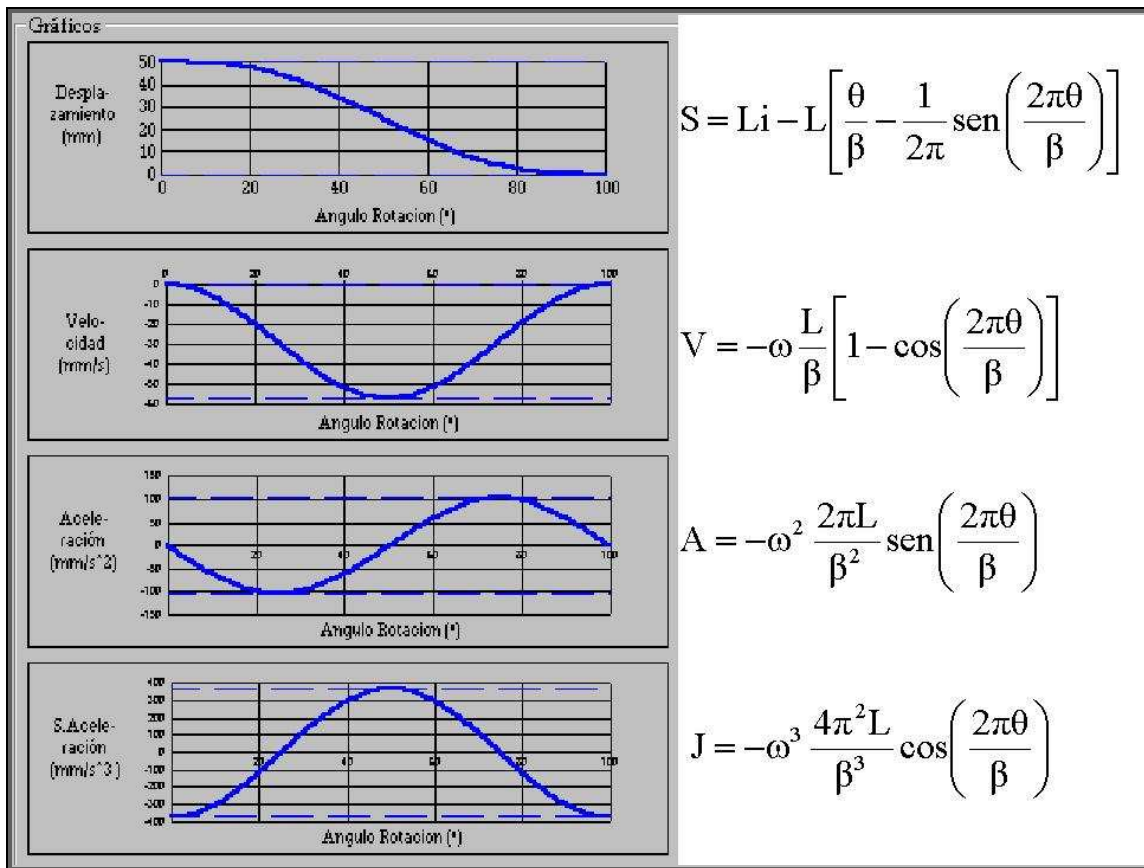


Fig. 3.8: Movimiento cicloidal de descenso  $L = 50\text{mm}$ ,  $Li = 50\text{mm}$ ,  $\beta = 100^\circ$ ,  $\omega = 1 \text{ rad/s}$

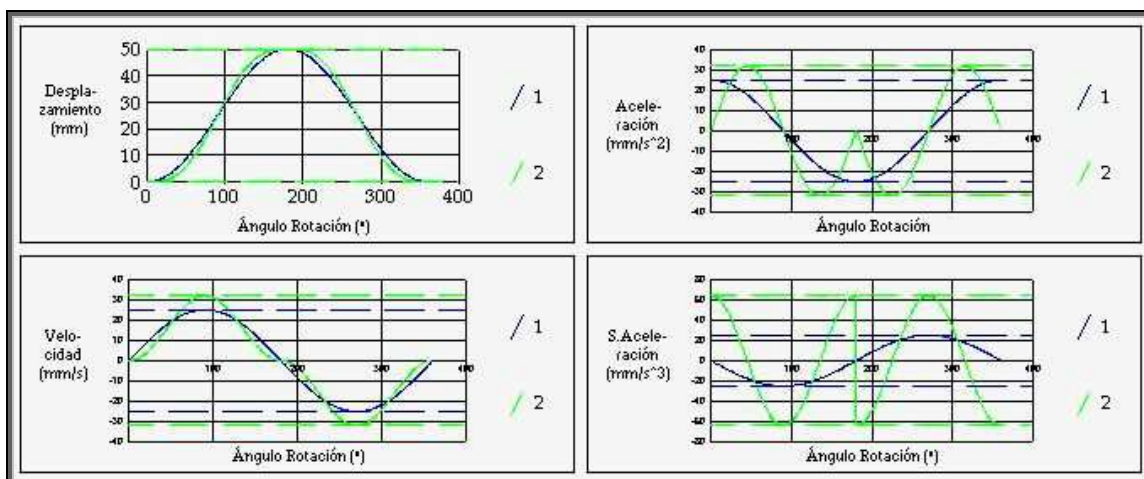


Fig. 3.9: Levas de ascenso y descenso sin detenimiento, armónica y cicloidal. La de movimientos armónicos muestra mayores valores pico de velocidad y aceleración (1-Armónica, 2-Cicloidal).

Sin embargo, el movimiento cicloidal no es una buena elección si lo que se desea es una combinación consigo mismo en forma de ascenso y descenso seguidos, ya que, además de incurrir en una discontinuidad en sobreaceleración, da lugar a velocidades y aceleraciones pico superiores a las que daría una leva con el uso de armónicos simples. Lo dicho puede verse claramente en la figura 3.9.

### 3.4.3 Polinómico 5º grado

#### 3.4.3.1 Caso general

La ley de continuidad puede cumplirse estrictamente si se obliga a que el tramo que se pretende añadir enlace perfectamente con sus adyacentes. Como mínimo se sabe que es necesario asegurar la continuidad en desplazamiento, velocidad y aceleración, esto supone dos condiciones de contorno para cada una de ellas, una de las cuales se aplicará al comienzo del tramo y la otra al final. Dichas condiciones serán las del tramo anterior y posterior respectivamente, de manera que se tienen seis condiciones de contorno que hay que satisfacer usando para ello un movimiento genérico versátil. En ello se emplea el uso de polinomios. En este caso bastará con un polinomio de 5º grado genérico, pues deja seis incógnitas que resolver, cuyo cálculo se llevará a cabo para que la ecuación satisfaga las condiciones de contorno requeridas. De nuevo hay que recordar el carácter cíclico, de forma que si el tramo polinómico es el primero que conforma el movimiento del seguidor, entonces el tramo anterior será el último, igualmente si el tramo polinómico es el último entonces el tramo posterior con el que debe enlazar será el primero.

La ecuación de desplazamiento que crea un polinomio de 5º grado viene dada por:

$$S = C_0 + C_1 \frac{\theta}{\beta} + C_2 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 + C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5$$

Donde como se puede entender, los seis coeficientes son las incógnitas que deben determinarse imponiendo las condiciones de contorno en desplazamiento, velocidad, y

aceleración, al comienzo y final del tramo polinómico. Sin embargo, aquí se plantean dos posibilidades, se pueden aplicar las condiciones de contorno tal y como se ha dicho o bien omitir el uso de la velocidad angular hasta el final y trabajar directamente con las derivadas de la función de desplazamiento, se puede pensar que el resultado va a ser el mismo, pero no es así:

▪ **Condiciones de contorno aplicadas en desplazamiento, velocidad y aceleración**

$$S' = \frac{dS}{d\theta} = \frac{1}{\beta} \left( C_1 + 2C_2 \frac{\theta}{\beta} + 3C_3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 4C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 5C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right)$$

$$S'' = \frac{d^2S}{d\theta^2} = \frac{1}{\beta^2} \left( 2C_2 + 6C_3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right) + 12C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 20C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 \right)$$

Si  $\omega = \text{cte}$ :

$$V = S' \omega$$

$$A = S'' \omega^2$$

Si se aplican las condiciones de contorno, se tendrá:

$$S_i = S(0) = C_0$$

$$S_f = S(1) = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5$$

$$V_i = V(0) = \frac{\omega}{\beta} C_1$$

$$V_f = V(1) = \frac{\omega}{\beta} (C_1 + 2C_2 + 3C_3 + 4C_4 + 5C_5)$$

$$A_i = A(0) = \frac{\omega^2}{\beta^2} 2C_2$$

$$A_f = A(1) = \frac{\omega^2}{\beta^2} (2C_2 + 6C_3 + 12C_4 + 20C_5)$$

Se ha obtenido un sistema lineal de seis ecuaciones con seis incógnitas. En este caso la solución polinómica de la función de desplazamiento se ve afectada por los valores que pueda tomar la velocidad angular. Variando la velocidad angular se modifican las condiciones de contorno de las curvas de velocidad y aceleración, lo que afecta a los coeficientes que forman la solución. Por tanto, se tendría una curva de desplazamiento para cada valor de velocidad angular. Si bien es cierto que tanto ésta como las curvas de velocidad y aceleración cumplirían las condiciones de contorno, téngase en cuenta que en la práctica una leva se calcula para que pueda operar en un determinado rango de velocidades, es por ello que si cada curva de desplazamiento lleva asociado un perfil de leva diferente y se calculase una leva bajo este método, entonces todo su análisis sería sólo válido para aquella velocidad angular con la que se dedujo. Conclusión: una leva no se calcula de este modo.

- **Condiciones de contorno aplicadas en desplazamiento y sus derivadas**

En este caso las condiciones de contorno se aplican haciendo uso directo de las derivadas y omitiendo la velocidad angular, es decir, se toman los valores de desplazamiento, y de su primera y segunda derivada de los tramos anterior y posterior:

$$S_i = S(0) = C_0$$

$$S_f = S(1) = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5$$

$$S'_i = S'(0) = \frac{1}{\beta} C_1$$

$$S'_f = S'(1) = \frac{1}{\beta} (C_1 + 2C_2 + 3C_3 + 4C_4 + 5C_5)$$

$$S''_i = S''(0) = \frac{1}{\beta^2} 2C_2$$

$$S''_f = S''(1) = \frac{1}{\beta^2} (2C_2 + 6C_3 + 12C_4 + 20C_5)$$

Una vez resuelto el sistema, se pueden plantear los valores de velocidad y aceleración sin más que multiplicar por  $\omega$  y  $\omega^2$  la primera y segunda derivada respectivamente del polinomio resultante.

Se va a plantear la solución implementada en CAM-DAS. De las ecuaciones anteriores se observa que  $C_0$ ,  $C_1$  y  $C_2$  se obtienen fácilmente:

$$C_0 = S(0)$$

$$C_1 = S'(0)\beta$$

$$C_2 = S''(0)\frac{\beta^2}{2}$$

$$S(1) - C_0 - C_1 - C_2 = C_3 + C_4 + C_5$$

$$S'(1) - \frac{1}{\beta}(C_1 + 2C_2) = \frac{1}{\beta}(3C_3 + 4C_4 + 5C_5)$$

$$S''(1) - \frac{1}{\beta^2}(2C_2) = \frac{1}{\beta^2}(6C_3 + 12C_4 + 20C_5)$$

Sistema de ecuaciones que en forma matricial queda como sigue:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \\ 6 & 12 & 20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(1) - C_0 - C_1 - C_2 \\ S'(1)\beta - (C_1 + 2C_2) \\ S''(1)\beta^2 - 2C_2 \end{bmatrix}$$

La matriz de 3x3 está formada por vectores linealmente independientes cualesquiera que sean las condiciones de contorno y los diversos parámetros del mecanismo leva-seguidor, así que se tiene siempre un sistema compatible determinado. Sin embargo, debe notarse que si bien se han planteado condiciones de contorno al comienzo y final del tramo polinómico, nada se ha dicho de lo que pueda ocurrir entre medias. Es por seguro que el polinomio cumplirá los requisitos en los extremos, pero una vez resuelto el sistema conviene verificar que la función de desplazamiento no tiene un comportamiento no deseado, por ejemplo podría existir una oscilación que en

principio no se pretende, o podría ocurrir que si se ha planteado un ascenso o descenso de magnitud  $L$ , en el interior del tramo se superase dicho valor, lo cual puede hacer desechar el resultado obtenido.

### 3.4.3.2 Caso particular: polinomio 3-4-5

Si en el caso anterior se aplican condiciones de contorno nulas en la primera y segunda derivada, en ambos extremos del intervalo, entonces los coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  y  $C_2$  se hacen cero, de ahí que al polinomio resultante se le denomine comúnmente en teoría de levas como 3-4-5. Por tanto, este polinomio es combinable con detenimientos o cualquier otro movimiento con velocidad y aceleración cero en su punto de enlace. Evidentemente es el resultado que se obtendría si sobre el caso general se tuviese como tramo anterior y posterior un detenimiento, en ese caso las condiciones aplicadas y la solución obtenida serían:

$$\triangleright S(0) = S'(0) = S''(0) = 0; S(1) = L; S'(1) = S''(1) = 0$$

$$\Rightarrow S = L_i + L \left[ 10 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 15 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right]$$

Donde como siempre,  $L$  es la magnitud del ascenso o descenso (en cuyo caso sería negativa) y  $L_i$  es la ordenada del último punto del tramo anterior. En la figura 3.10 pueden verse sus gráficas y el resto de las ecuaciones para un tramo de ascenso. Para un descenso sería similar: la gráfica de desplazamiento sería imagen especular de ésta y las derivadas cambiarían de signo.

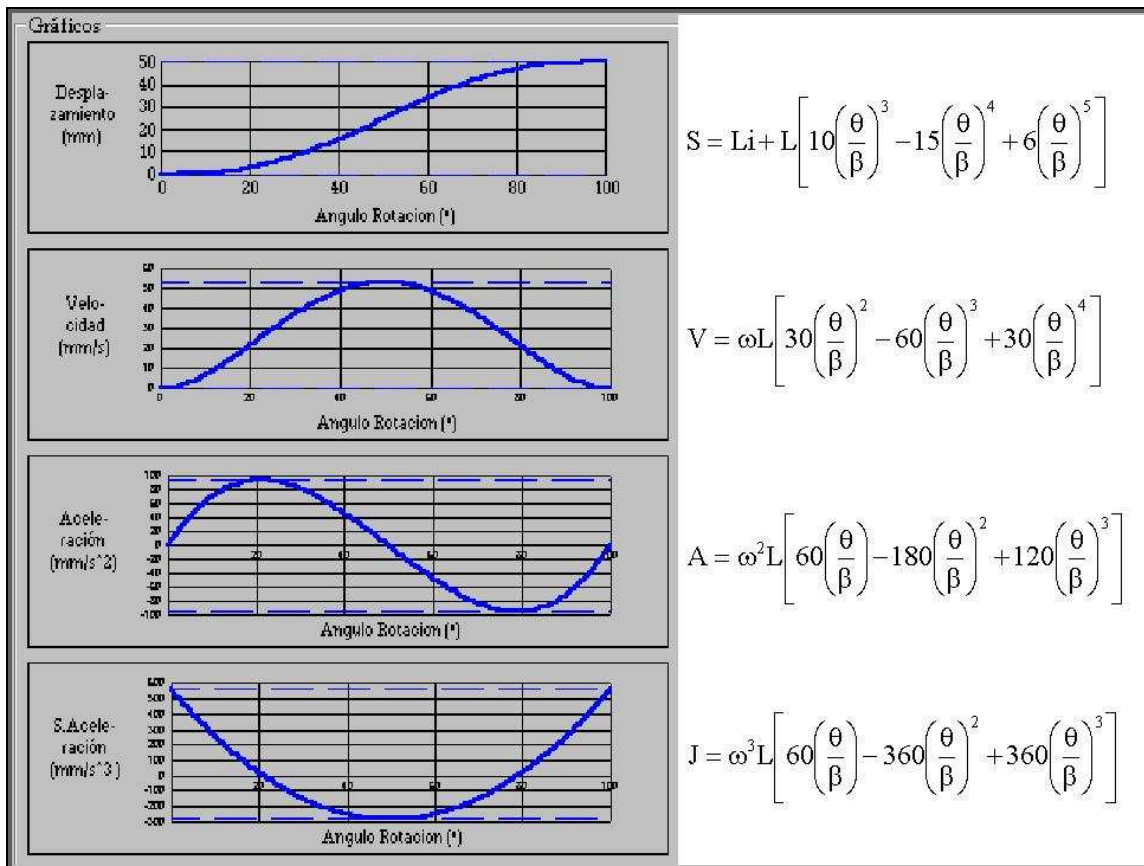


Fig. 3.10: Movimiento polinómico 3-4-5 de ascenso  $L=50\text{mm}$ ,  $Li=0\text{mm}$ ,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1\text{ rad/s}$

### 3.4.4 Polinómico 7º grado

#### 3.4.4.1 Caso general

En el caso del polinomio de 5º grado no se ha tenido en cuenta ningún tipo de restricción a aplicar en sobreaceleración. Si se desea que la continuidad esté también asegurada en la tercera derivada, entonces es necesario aumentar el grado del polinomio para que pueda contener dos condiciones de contorno adicionales. Se tiene entonces una ecuación de desplazamiento polinómica de 7º grado. Todo lo dicho en el caso anterior es extensible al actual, así las ecuaciones que se plantean quedan de la siguiente forma:

$$S = C_0 + C_1 \frac{\theta}{\beta} + C_2 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + C_3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 + C_6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^6 + C_7 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^7$$



$$S' = \frac{dS}{d\theta} = \frac{1}{\beta} \left( C_1 + 2C_2 \frac{\theta}{\beta} + 3C_3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 4C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 5C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 6C_6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 7C_7 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right)$$

$$S'' = \frac{d^2S}{d\theta^2} = \frac{1}{\beta^2} \left( 2C_2 + 6C_3 \left( \frac{\theta}{\beta} \right) + 12C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 20C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 30C_6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 42C_7 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right)$$

$$S''' = \frac{d^3S}{d\theta^3} = \frac{1}{\beta^3} \left( 6C_3 + 24C_4 \left( \frac{\theta}{\beta} \right) + 60C_5 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 120C_6 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 210C_7 \left( \frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right)$$

Aplicando las condiciones de contorno:

$$S(0) = C_0$$

$$S(1) = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7$$

$$S'(0) = \frac{C_1}{\beta}$$

$$S'(1) = \frac{1}{\beta} (C_1 + 2C_2 + 3C_3 + 4C_4 + 5C_5 + 6C_6 + 7C_7)$$

$$S''(0) = \frac{2C_2}{\beta^2}$$

$$S''(1) = \frac{1}{\beta^2} (2C_2 + 6C_3 + 12C_4 + 20C_5 + 30C_6 + 42C_7)$$

$$S'''(0) = \frac{6C_3}{\beta^3}$$

$$S'''(1) = \frac{1}{\beta^3} (6C_3 + 24C_4 + 60C_5 + 120C_6 + 210C_7)$$

Lo anterior puede plantearse como un sistema de ocho ecuaciones con ocho incógnitas. No obstante, puede observarse que  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se despejan directamente, así que se puede dejar como un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas:

$$S(1) - C_0 - C_1 - C_2 - C_3 = C_4 + C_5 + C_6 + C_7$$

$$S'(1) - \frac{1}{\beta}(C_1 + 2C_2 + 3C_3) = \frac{1}{\beta}(4C_4 + 5C_5 + 6C_6 + 7C_7)$$

$$S''(1) - \frac{1}{\beta^2}(2C_2 + 6C_3) = \frac{1}{\beta^2}(12C_4 + 20C_5 + 30C_6 + 42C_7)$$

$$S'''(1) - \frac{1}{\beta^3}(6C_3) = \frac{1}{\beta^3}(24C_4 + 60C_5 + 120C_6 + 210C_7)$$

Representándolo matricialmente:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 6 & 7 \\ 12 & 20 & 30 & 42 \\ 24 & 60 & 120 & 210 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(1) - C_0 - C_1 - C_2 - C_3 \\ S'(1)\beta - (C_1 + 2C_2 + 3C_3) \\ S''(1)\beta^2 - (2C_2 + 6C_3) \\ S'''(1)\beta^3 - 6C_3 \end{bmatrix}$$

Igual que antes, es un sistema de ecuaciones compatible determinado, pero deberá verificarse la solución a posteriori para comprobar que entre los extremos no ocurre nada que no se ajuste a las condiciones del problema.

### 3.4.4.2 Caso particular: polinomio 4-5-6-7

Cuando las condiciones de contorno en la primera, segunda y tercera derivadas se hacen nulas, los únicos coeficientes no nulos son  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  y  $C_7$ . En ese caso la solución que se obtiene puede verse en la figura 3.11.

De nuevo este polinomio puede combinarse junto a detenimientos o con cualquier otro movimiento que tenga condiciones nulas de velocidad, aceleración y sobreaceleración en su punto de unión con el tramo polinómico.

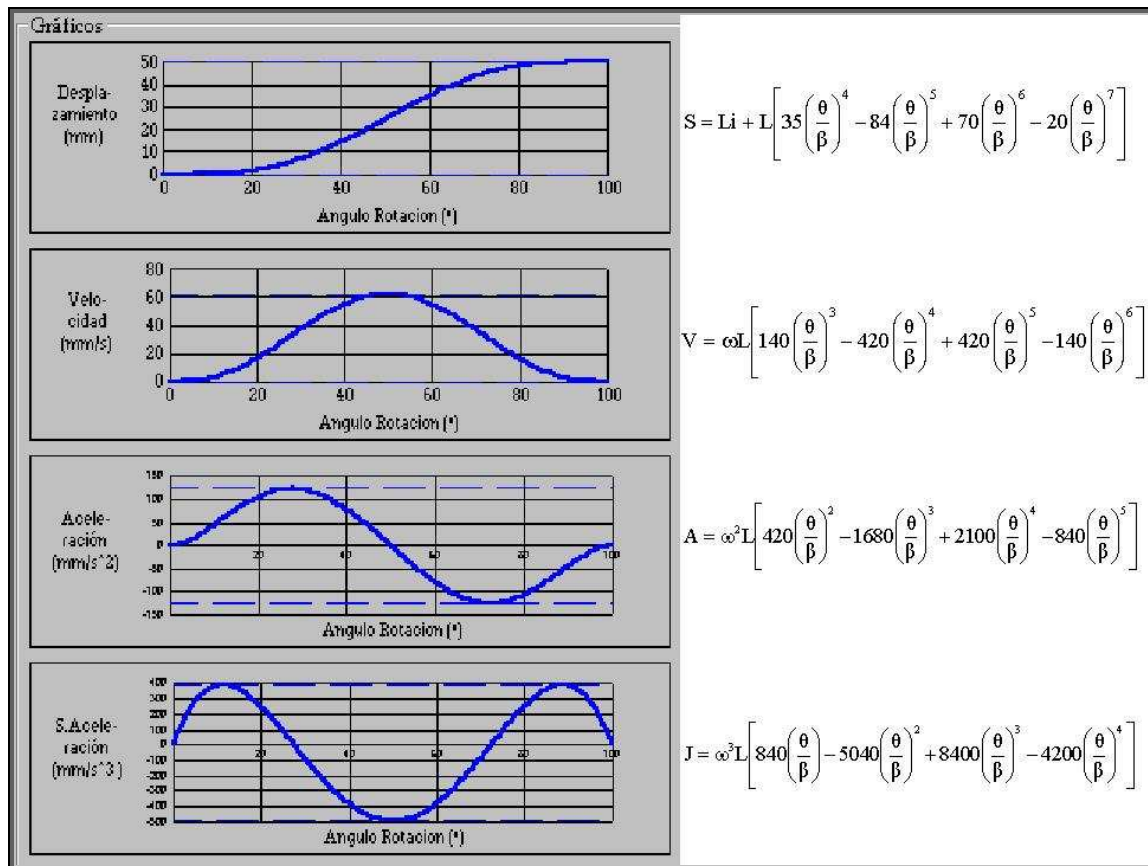


Fig. 3.11: Movimiento polinómico 4-5-6-7 de ascenso  $L = 50\text{mm}$ ,  $L_i = 0\text{mm}$ ,  $\beta = 100^\circ$ ,  $\omega = 1\text{ rad/s}$

### 3.4.5 Velocidad Constante

Un tramo a velocidad constante es un desplazamiento lineal, es decir, un tramo polinómico de primer grado con dos incógnitas por determinar. Por lo tanto, hacen falta dos condiciones de contorno que se aplicarán al desplazamiento. La posición inicial viene dada por la ordenada del último tramo, que será cero en el caso de que sea el primero. La posición final se determina por la magnitud del desplazamiento y su sentido, es decir,  $L$ , de modo que:

$$\text{➤ } S = C_0 + C_1 \frac{\theta}{\beta}$$

$$S(0) = C_0 = L_i$$

$$S(1) = C_0 + C_1 = L_i + L$$

$$S'(0) = S'(1) = \frac{L_i + L - L_i}{\beta} = \frac{L}{\beta} \quad [\beta] = \text{rads}$$

$$S''(0) = S''(1) = S'''(0) = S'''(1) = 0$$

$$S = L_i + L \frac{\theta}{\beta}$$

Evidentemente, un tramo de velocidad constante ( $V \neq 0$ ) no es combinable con un detenimiento, se estaría incumpliendo la ley de continuidad. Este tipo de tramo suele emplearse junto con movimientos de medio periodo.

### 3.4.6 Movimientos de medio periodo

Tanto el movimiento armónico simple como el cicloidal tenían condiciones nulas de velocidad en sus extremos, por lo que no podrían utilizarse junto a tramos de velocidad constante, para estos casos pueden emplearse las semiarmónicas y semicicloidales. Como su nombre indica se trata de curvas de medio periodo con velocidad no nula en uno de sus extremos. Se tienen dos semiarmónicas y dos semicicloidales, ya que la condición de velocidad distinta de cero puede estar al comienzo o al final del tramo. La diferencia más notable entre ambos es que el movimiento semicicloidal, igual que su “homónimo” de periodo completo, tiene aceleración nula al inicio y al final, por el contrario, el movimiento semiarmónico tiene aceleración distinta de cero en el extremo contrario al de velocidad nula.

### 3.4.6.1 Semiarmónicos

- **Semiarmónico Velocidad final=0**

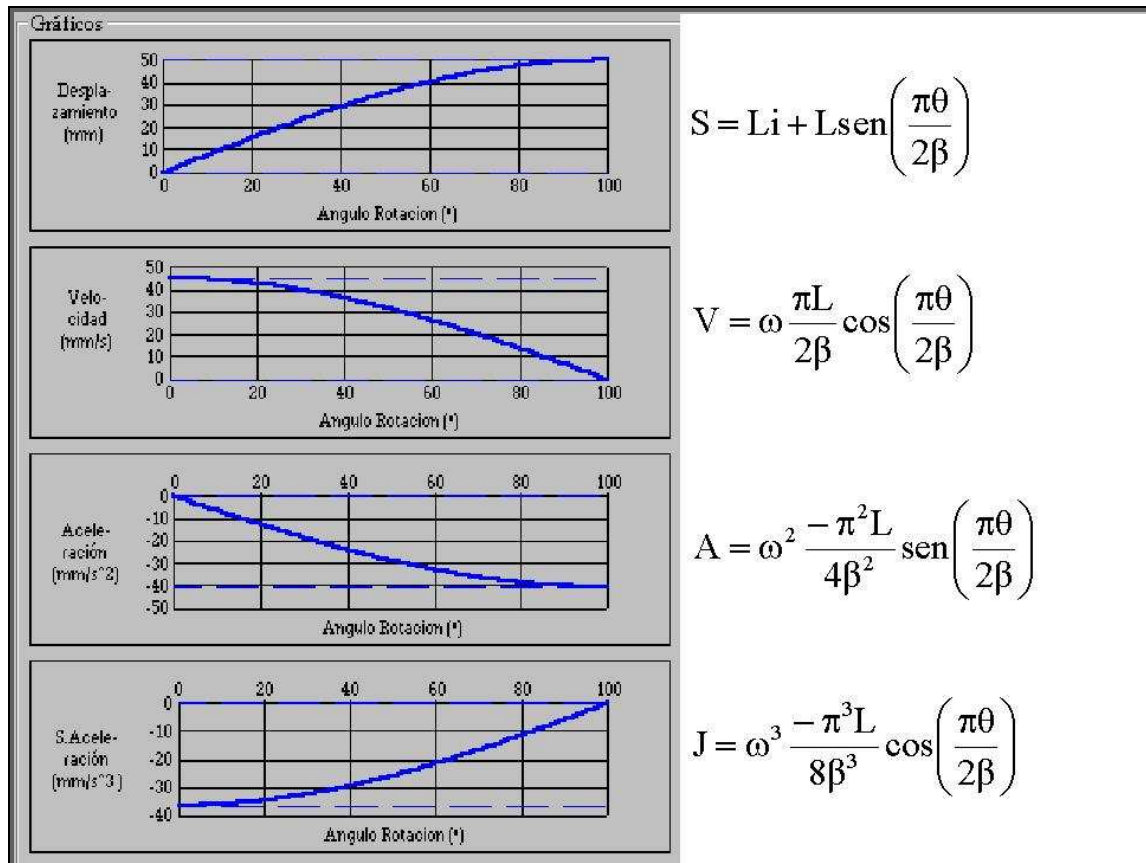


Fig. 3.12: Movimiento semiarmónico de ascenso  $V_f=0$  mm/s,  $L_i=0$  mm,  $L=50$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

En la figura 3.12 puede verse un movimiento semiarmónico  $V_f=0$  de ascenso. Para ajustar la curva con el movimiento anterior<sup>3</sup> hay que calcular adecuadamente los valores que intervienen en la  $V_i$ :

$$\triangleright V_i = V\left(\frac{\theta}{\beta} = 0\right) = \omega \frac{\pi L}{2\beta} = \omega S'_{k-1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 1\right) \Rightarrow \frac{\pi L}{2\beta} = S'_{k-1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 1\right)$$

Variando  $\beta$  y  $L$  en la forma que convenga se puede lograr la continuidad en velocidad con el tramo anterior. Normalmente  $L$  es conocida y basta con hallar el ángulo de

rotación parcial. No obstante, la curva previa deberá tener aceleración final nula para cumplir con la ley de continuidad, además notar que tendrá que ser ascendente y por tanto con velocidad positiva para que exista solución. Como se ha dicho, lo habitual es que sea un movimiento de velocidad constante.

Lo explicado para el movimiento de ascenso es extensible para el descenso que se representa junto a sus ecuaciones en la figura 3.13.

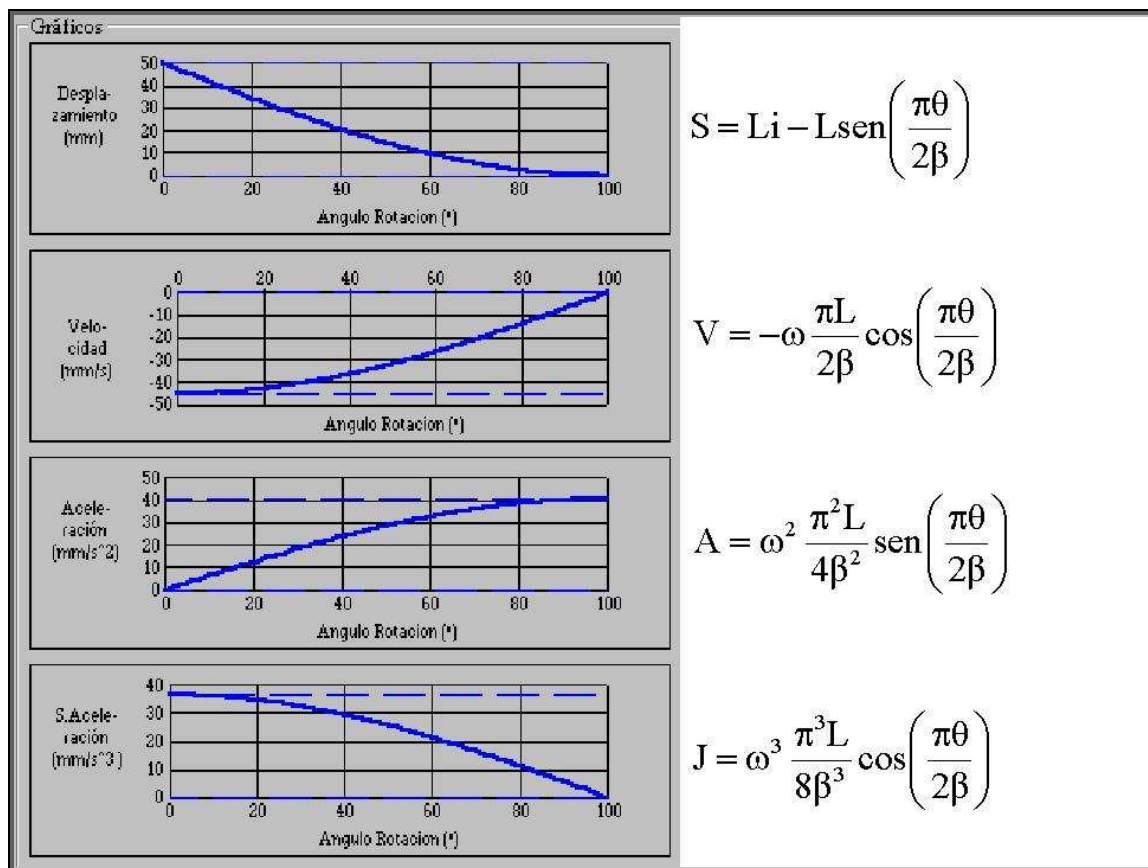


Fig. 3.13: Movimiento semiarmónico de descenso  $V_f=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $L_i=50$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

<sup>3</sup> Denotado por la ecuación de desplazamiento  $S_{k-1}$ .

• **Semiarmónico Velocidad inicial=0**

En la figura 3.14 pueden verse las curvas del movimiento ascendente y sus ecuaciones, nuevamente hará falta compatibilizar, en este caso con el movimiento posterior<sup>4</sup>:

$$\triangleright V_f = v\left(\frac{\theta}{\beta} = 1\right) = \omega \frac{\pi L}{2\beta} = \omega S'_{k+1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 0\right) \Rightarrow \frac{\pi L}{2\beta} = S'_{k+1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 0\right)$$

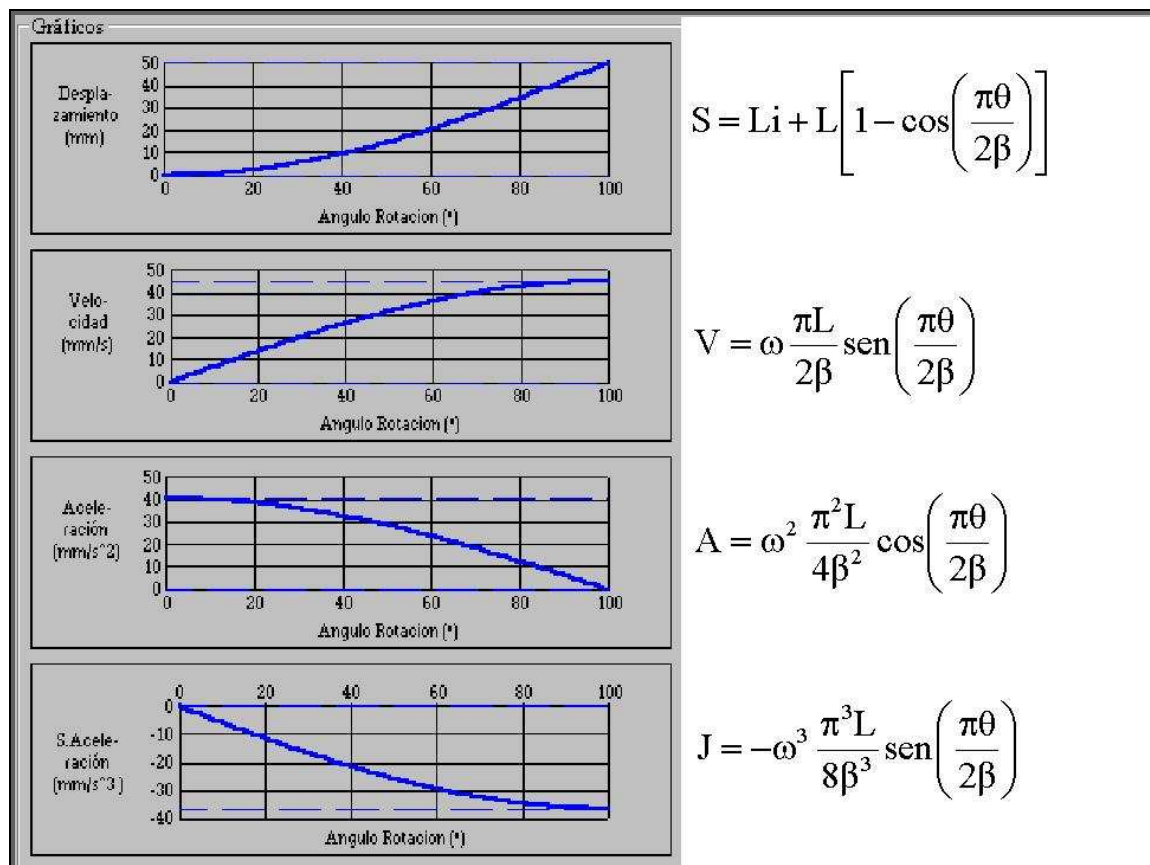


Fig. 3.14: Movimiento semiarmónico de ascenso  $V_i=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $Li=0$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

Como se puede ver, el tramo posterior también debe ser de ascenso para tener velocidad positiva y que exista solución. Como ocurre con todas estas curvas de medio periodo, se suele combinar con tramos de velocidad constante. En el caso del movimiento semiarmónico  $V_i=0$  de descenso (figura 3.15), el tramo siguiente también debe ser

<sup>4</sup> Denotado por la ecuación de desplazamiento  $S_{k+1}$ .

descendente para que su velocidad de comienzo pueda igualarse con la última del tramo semiarmónico.

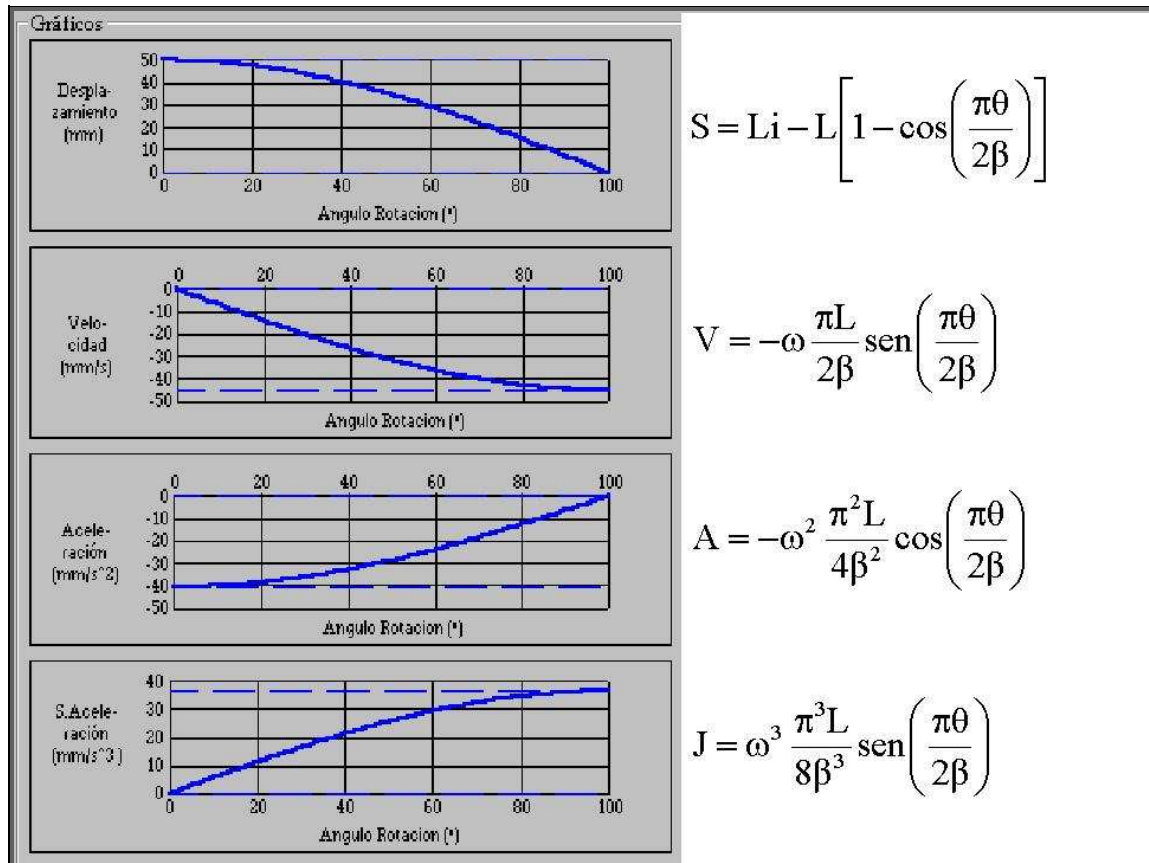


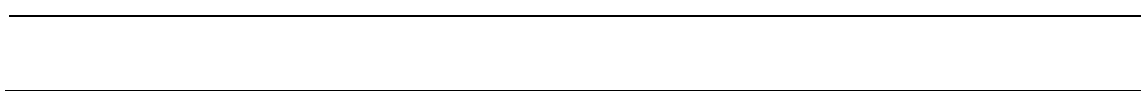
Figura 3.15: Movimiento semiarmónico de descenso  $V_i=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $Li=50$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

### 3.4.6.2 Semicicloidales

A diferencia de las semiarmónicas, ahora la aceleración es nula en ambos extremos.

- **Semicicloidal Velocidad final=0**

En el caso de un movimiento semicicloidal ascendente (figura 3.16), el tramo anterior deberá cumplir que:





$$\triangleright V_i = V\left(\frac{\theta}{\beta} = 0\right) = \omega \frac{2L}{\beta} = \omega S'_{k-1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 1\right) \Rightarrow \frac{2L}{\beta} = S'_{k-1}\left(\frac{\theta}{\beta} = 1\right)$$

Para mantener el signo de la pendiente, el movimiento previo que se una al cicloidal también ha de ser de subida.

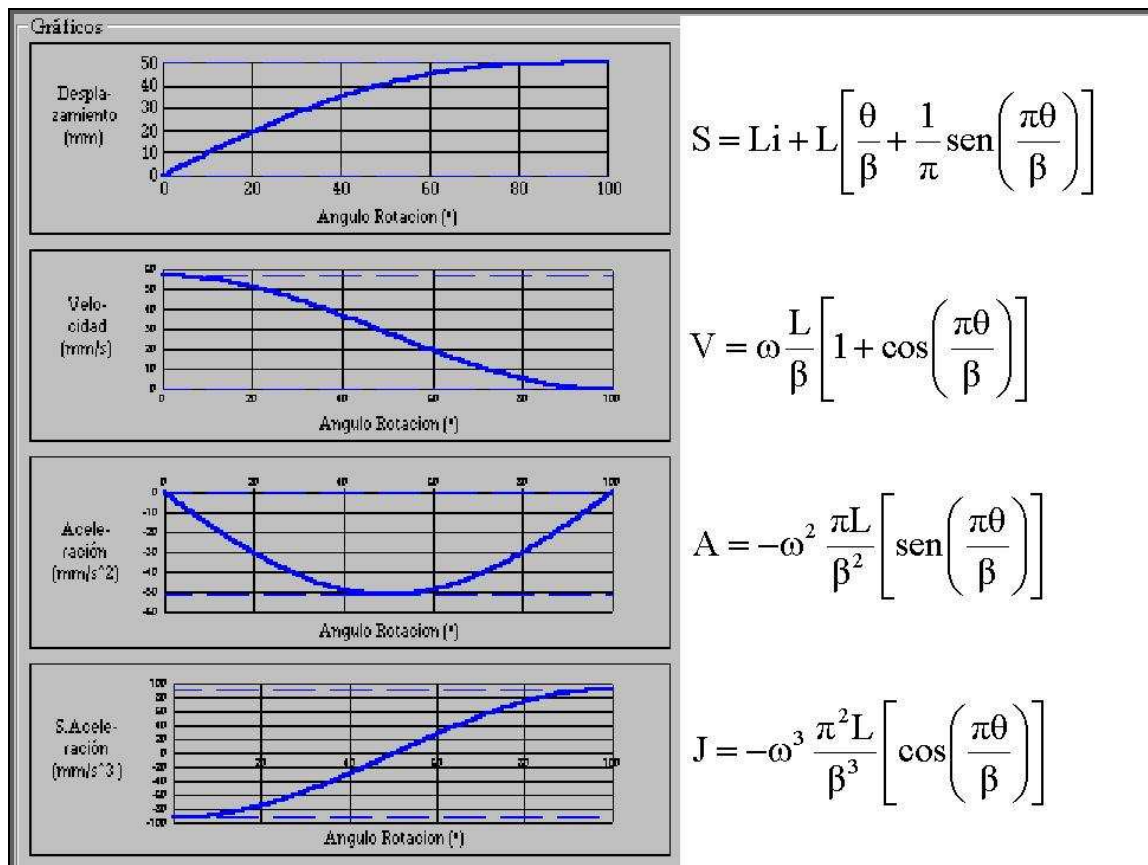


Fig. 3.16: Movimiento semicicloidal de ascenso  $V_f=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $Li=0$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

Para el caso del descenso (figura 3.17) la situación es similar y el tramo anterior también tiene que ser de bajada. Notar que esto debe ocurrir siempre cualquiera que sea el movimiento considerado para conservar el signo de la pendiente y que se pueda cumplir la ley de continuidad, es decir, si la derivada de la función de desplazamiento es distinta de cero en alguna de sus fronteras, entonces el tramo que pretenda ser adyacente

deberá conservar el sentido de la función de desplazamiento, de otro modo la continuidad en velocidad no podría darse.

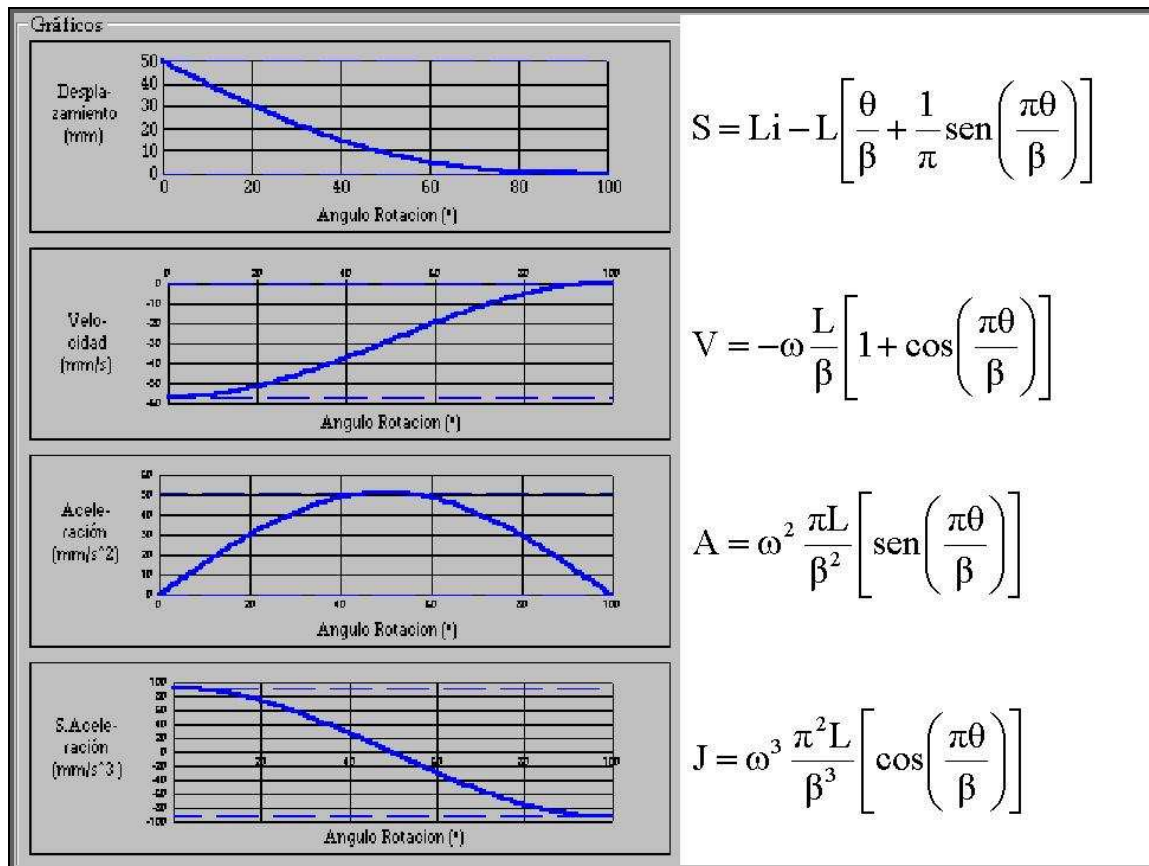


Fig. 3.17: Movimiento semicicloidal de descenso  $V_f=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $Li=50$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

- **Semicicloidal Velocidad inicial=0**

Para que el tramo posterior iguale en la condición de frontera de velocidad no nula deberá cumplirse que:

$$\triangleright V_f = v \left( \frac{\theta}{\beta} = 1 \right) = \omega \frac{\pi L}{2\beta} = \omega S'_{k+1} \left( \frac{\theta}{\beta} = 0 \right) \Rightarrow \frac{\pi L}{2\beta} = S'_{k+1} \left( \frac{\theta}{\beta} = 0 \right)$$

Los tramos de ascenso y descenso se encuentran representados en las figuras 3.18 y 3.19 respectivamente.

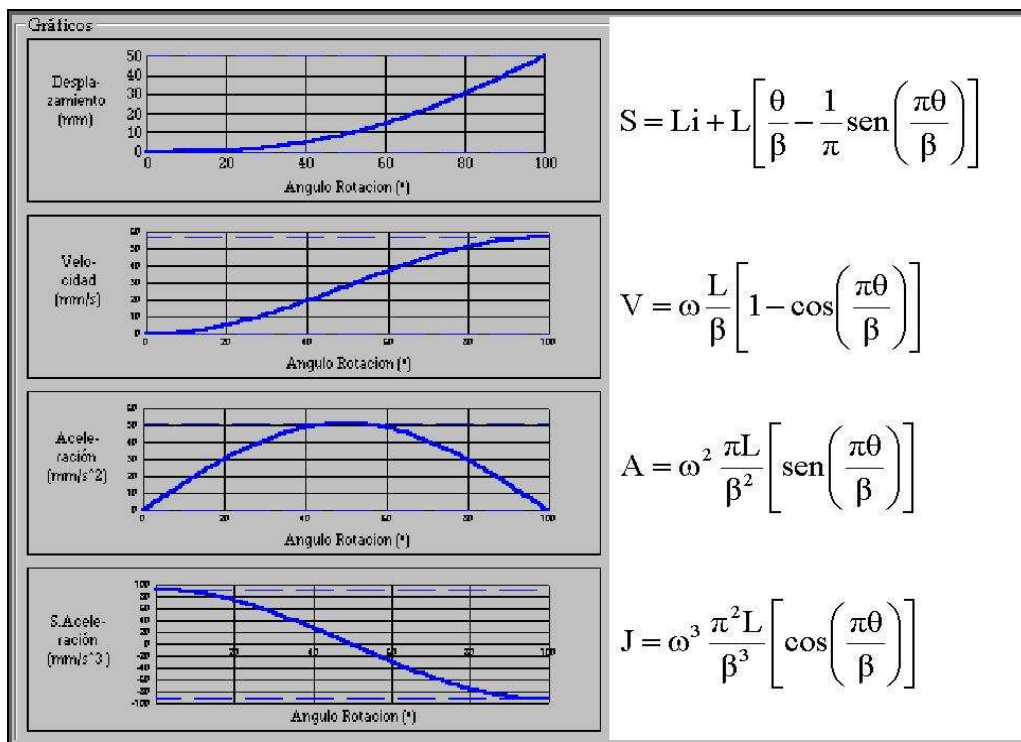


Fig. 3.18: Movimiento semicicloidal de ascenso  $V_i=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $L_i=0$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

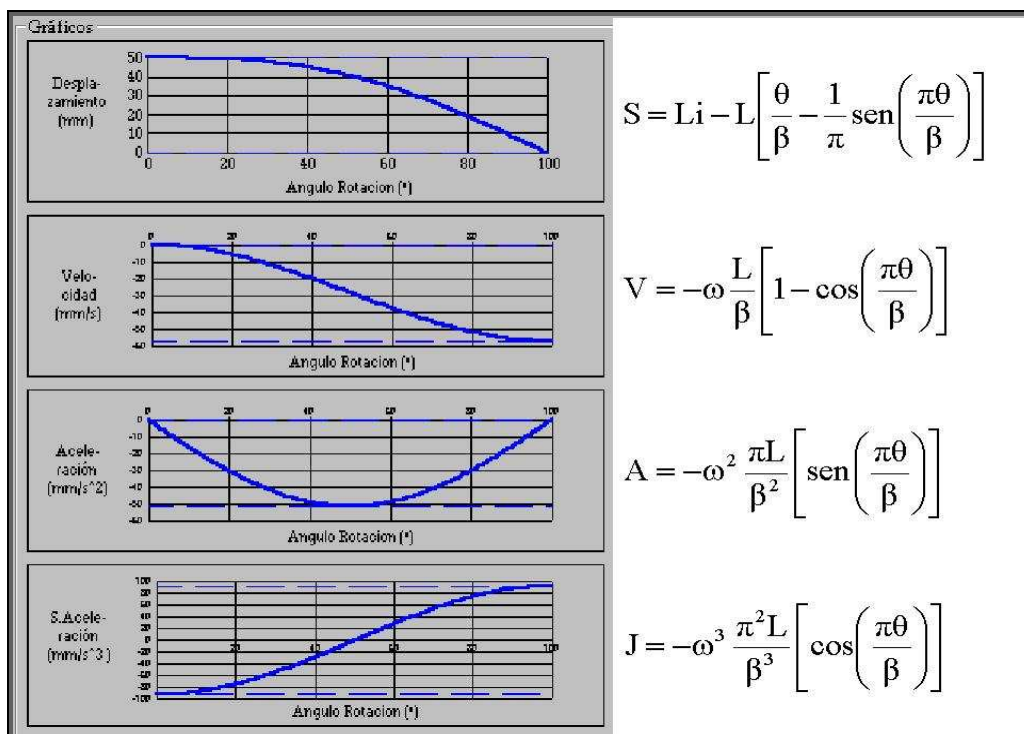


Fig. 3.19: Movimiento semicicloidal de descenso  $V_i=0$  mm/s,  $L=50$  mm,  $L_i=50$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

### 3.4.7 Armónico Doble

Este es un movimiento combinado de ascenso y descenso creado para evitar que la aceleración retorne a cero cuando finaliza la subida y va a comenzar la bajada. El descenso comienza con el mismo valor de aceleración en el que terminó la subida.

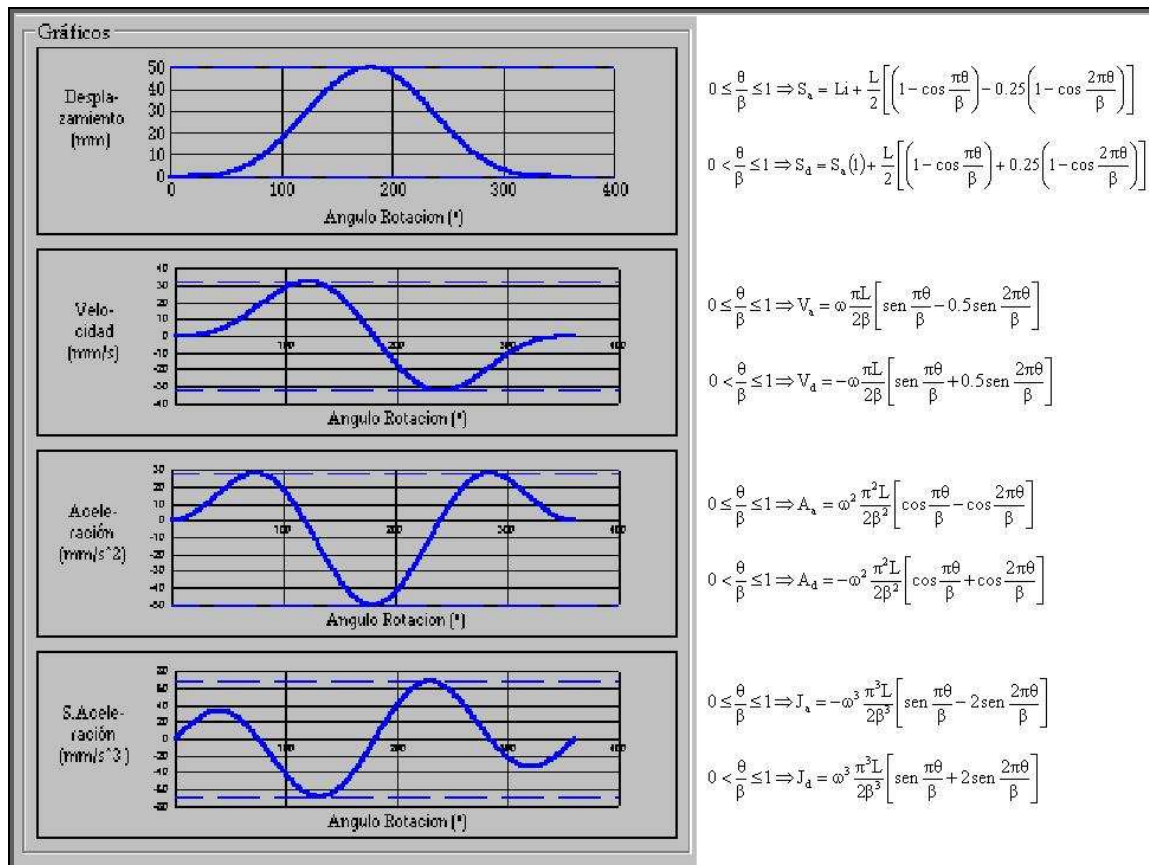


Fig. 3.20: Movimiento armónico doble de ascenso y descenso  $L=50$  mm,  $L_i=0$  mm,  $\beta=180^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

Ambos tramos, el de ascenso y el de descenso, deben tener la misma  $\beta$  para que se cumpla la ley de continuidad.

### 3.4.8 Movimientos compuestos

Hasta ahora se han planteado movimientos que son en sí una sola función para cada ángulo de rotación parcial. Sin embargo, existen también movimientos compuestos que tratan de reunir las mejores características de otros simples en función de la porción de tramo para la que se requieran.

#### 3.4.8.1 Aceleración de Onda Senoidal Modificada

El desplazamiento cicloidal es una función con una aceleración de onda senoidal; tratando de disminuir los valores de aceleración pico a que da lugar, se crea la curva de aceleración senoidal modificada, la cual, es combinación de otras dos, cada una de ellas de frecuencia diferente.

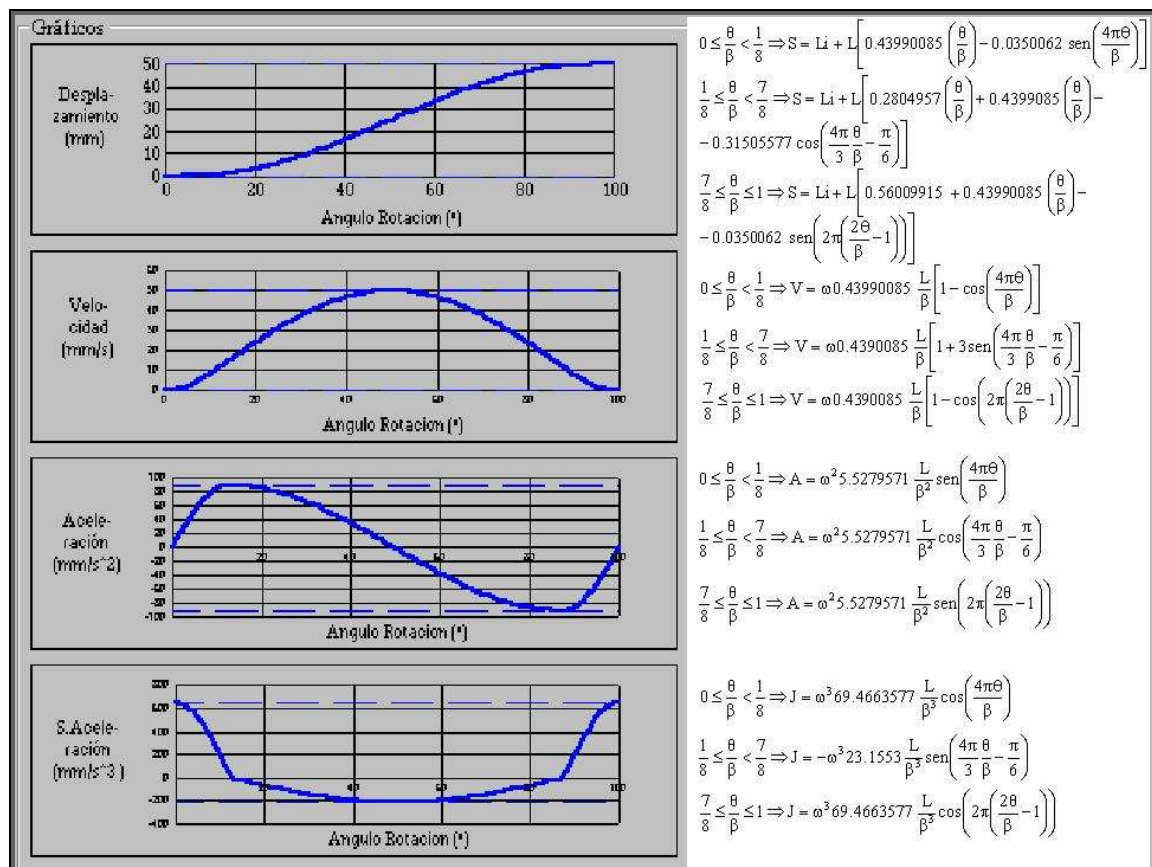


Fig. 3.21: Movimiento de aceleración de onda senoidal modificada de ascenso  $L=50$  mm,  $Li=0$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s



### 3.4.8.2 Aceleración de Onda Trapecial Modificada

Se trata de una curva de aceleración de onda cuadrada que ha sido adaptada para evitar la discontinuidad en su punto medio así como las que aparecerían en sus extremos si se combinase junto a detenimientos. Como en el movimiento compuesto anterior, ciertas porciones de tramo de la onda cuadrada de aceleración se sustituyen para evitar dichos inconvenientes. Éste es el camino por el que se crea una función de aceleración de onda trapecial, que si bien no posee discontinuidades en aceleración, si las tiene en sobreaceleración (no incumple la ley de continuidad). Después, tal función se mejora para crear una aceleración de onda trapecial modificada; la diferencia más notable de ésta con la trapecial normal sería un alisamiento de sus esquinas mediante el empleo de porciones de curva senoidales.

Onda cuadrada  $\Rightarrow$  Onda trapecial  $\Rightarrow$  Onda trapecial modificada

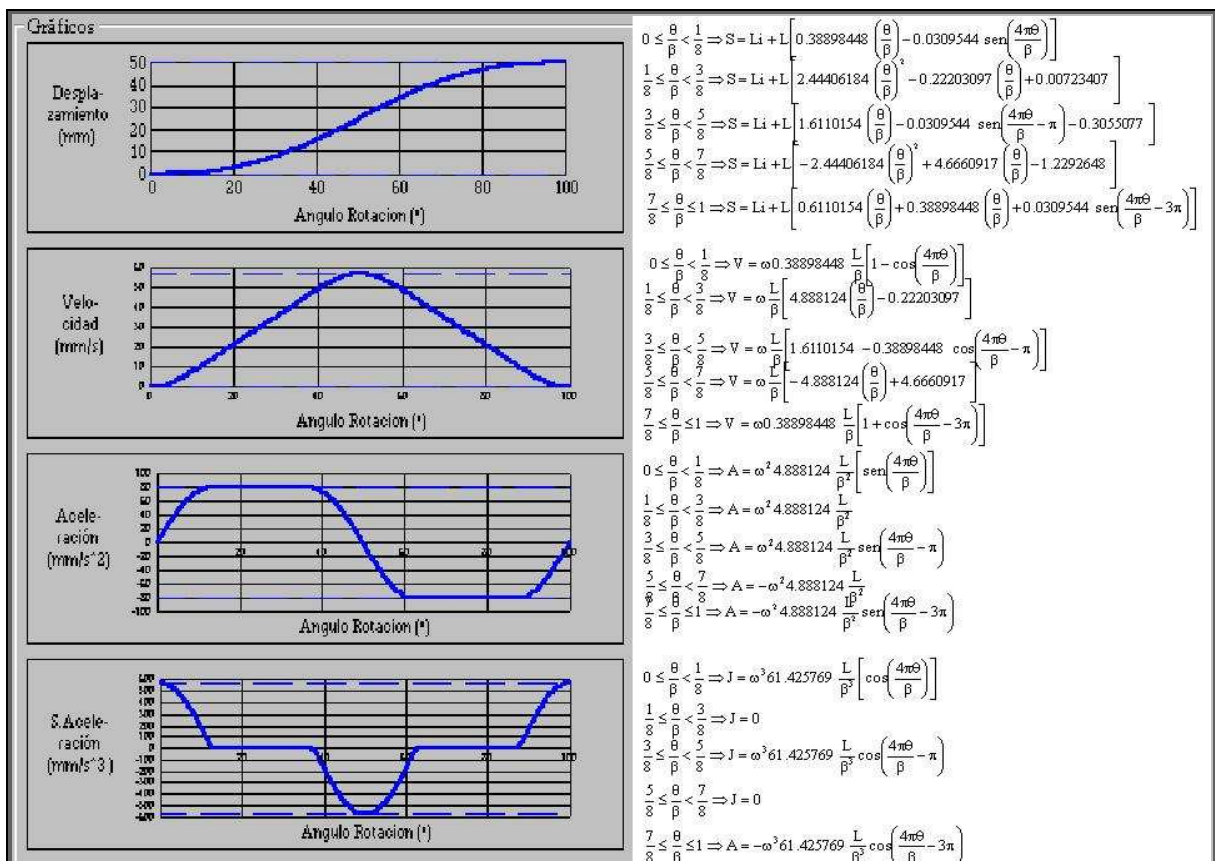


Figura 3.22: Movimiento de aceleración de onda trapecial modificada de ascenso  $L=50$  mm,  $Li=0$  mm,  $\beta=100^\circ$ ,  $\omega=1$  rad/s

## Capítulo 4: Obtención del perfil de una leva

Los métodos de obtención del perfil de levas se dividen en gráficos y analíticos. Muchos de los autores consultados hacen referencia a ambos métodos cuando explican el proceso de generación del perfil, dentro de ellos podemos citar a Rohtbart (1956); Chen (1982), otros exponen sólo los métodos gráficos, como por ejemplo, Kozhevnikov (1981); Calero y Carta (1999) y algunos sólo exponen los métodos analíticos (Shigley y Uicker, 1988; Koloc y Vlácavík, 199; Norton, 1995; Cardona y Clos, 2001).

Para determinar gráficamente un perfil de leva, se realiza una inversión cinemática del mecanismo leva-palpador, en la cual la leva se considera fija y la guía o articulación del seguidor móvil. La inversión cinemática no afecta el movimiento relativo entre la leva y el palpador. El perfil de la leva es la envolvente del haz de curvas correspondientes a las distintas posiciones del palpador en una vuelta de la leva.

Los métodos gráficos que se muestran a continuación facilitarán la comprensión de los mecanismos desmodrómicos, que es uno de los objetivos en los que se centra este proyecto, la inclusión en CAM-DAS de estos mecanismos.

### 4.1 Obtención gráfica del perfil en mecanismos desmodrómicos

En la bibliografía consultada sólo Rothbart (1956) expone los métodos gráficos de obtención de los perfiles de levas pertenecientes a mecanismos leva-seguidor desmodrómicos. Este autor explica la obtención de un perfil de anchura constante (con doble palpador plano de translación). También expone la obtención de los perfiles de levas que forman un mecanismo de levas conjugadas que accionan un doble palpador circular de translación.

A continuación se explican los procedimientos propuestos por Rohtbart (1956) para los casos de leva de anchura constante con doble palpador plano de translación y de levas conjugadas con doble palpador circular de translación.

#### 4.1.1 Leva de anchura constante con doble palpador plano traslacional.

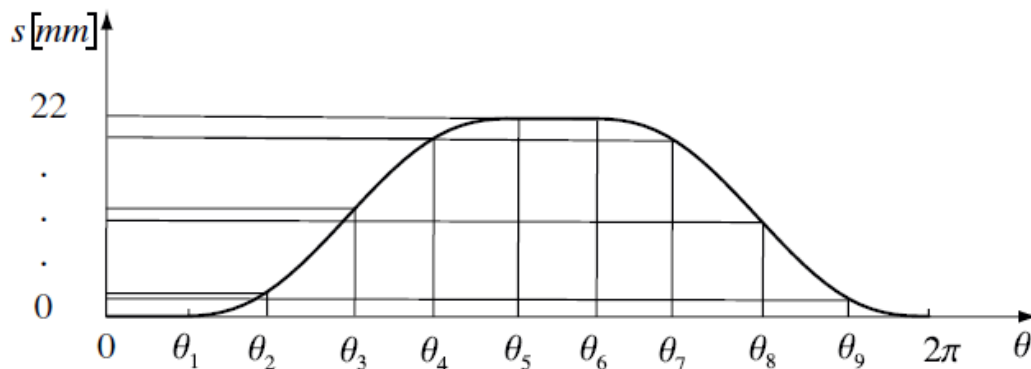


Fig. 4.1: Diagrama de desplazamiento del seguidor

En la figura 4.1 tenemos el diagrama de desplazamiento en el que basaremos la explicación del método gráfico de obtención del perfil de una leva de anchura constante.

El procedimiento que se debe seguir para obtener el perfil es:

- A. Dividir los  $360^\circ$  de las abscisas del gráfico de desplazamiento del palpador en un número definido de partes iguales. En ejemplo de la Figura 4.1 se utilizan diez partes.
- B. Selección de un punto O en el plano y haciendo centro en éste, dibujar la circunferencia base de la leva, de radio  $R_b$ . Dividir esta circunferencia en igual número de partes que el diagrama de desplazamiento y trazar líneas radiales por cada división señalada.
- C. Dibujar el doble palpador en su posición inicial, siendo el palpador superior tangente a la circunferencia base. La distancia constante que separa a los palpadores superior e inferior es  $d_c = 2R_b + S_{\max}(\theta)$ .
- D. Transferir los desplazamientos correspondiente al evento de subida del doble palpador (para el ejemplo que se toma son los desplazamiento de  $s(\theta)_1 \dots s(\theta)_5$ ) desde el diagrama de desplazamiento a las líneas radiales correspondientes midiendo desde la circunferencia base y dibujar líneas perpendiculares (que representan la cara de palpador) a las líneas radiales en los puntos correspondientes.



- E. Desde las líneas que representan la cara del palpador superior trazar líneas paralelas a ellas separadas una distancia  $d_c$ , las cuales interceptan a las líneas radiales correspondientes.
- F. Trazar una curva suave tangente a cada una de las caras del palpador dibujadas. Esta curva se aproxima al perfil de la leva de anchura constante.

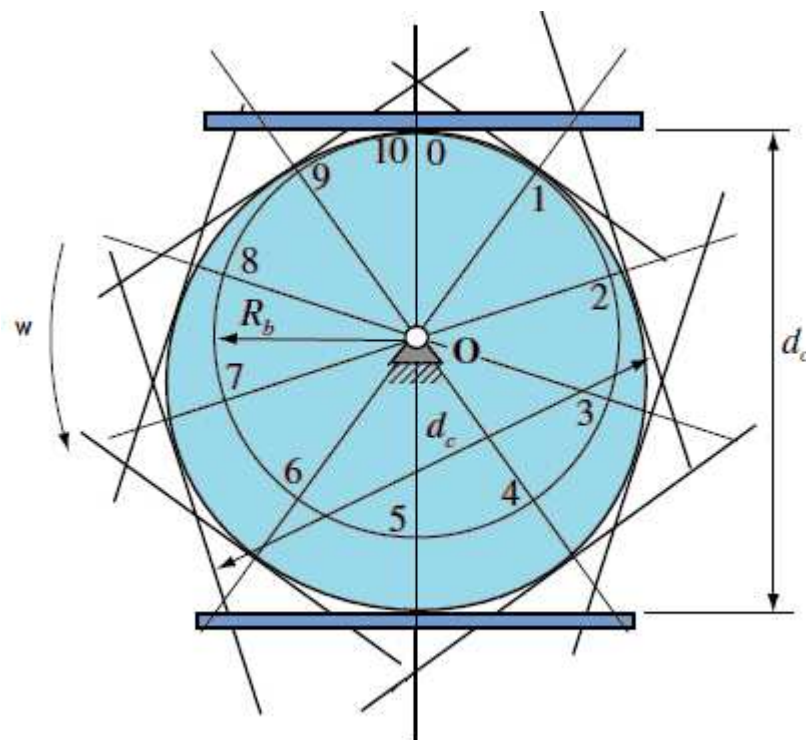


Fig. 4.2: Obtención del perfil de leva de anchura constante con doble palpador traslacional

#### 4.1.2 Levas conjugadas con doble palpador de rodillo traslacional.

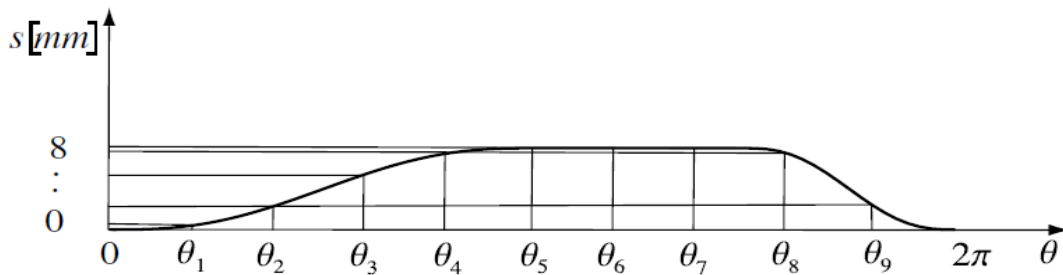


Fig. 4.3: Ley de desplazamiento para doble palpador de rodillo traslacional

La ley de desplazamiento mostrada en la figura 3.3, es la ley a partir de la cual se inicia el método gráfico para la obtención del perfil requerido, cuyos pasos q seguir son los siguientes:

- A. Dividir los  $360^\circ$  de las abscisas del gráfico de desplazamiento del palpador en un número definido de partes iguales. En el ejemplo de la figura 3.3 se utilizan diez partes.
- B. Selección de un punto O en el plano y haciendo centro en éste, dibujar la circunferencia base de la leva, de radio  $R_b$  (este es un parámetro a definir por el diseñador) y dibujar la circunferencia primaria de radio  $R_p = R_b + R_r$ . Dividir la circunferencia base en el mismo número de partes iguales que el diagrama de desplazamiento y trazar líneas radiales por cada división señalada.
- C. Transferir los desplazamientos  $s(\theta_0)$ ,  $s(\theta_1)$ , etc., del diagrama de desplazamiento del palpador a las líneas radiales correspondientes midiendo desde la circunferencia primaria.
- D. Dibujar una circunferencia, de radio  $R_r$ , correspondiente al rodillo sobre cada una de las líneas radiales, según correspondan.
- E. Trazar una curva suave tangente a cada una de las circunferencias dibujadas. Esta curva es una aproximación al perfil de la leva.

Con estos cinco primeros pasa se obtiene una aproximación del primero de los perfiles de las levas conjugadas, es decir el perfil que impulsa al palpador superior.

- F. Medir la distancia  $d_c = 2R_p + S_{m\acute{a}x}$  desde los puntos de trazo del primer perfil, por ejemplo el  $''$ , sobre las líneas radiales correspondientes, señalando los puntos de trazo del segundo perfil, por ejemplo, en la Figura 3.4 se señala el punto  $'''$ .
- G. Haciendo centro en los puntos de trazo hallados en el paso anterior dibujar circunferencias de radio  $R_r$ , correspondiente al rodillo sobre cada una de las líneas radiales.
- H. Trazar una curva suave, tangente a cada una de las circunferencias dibujadas, obteniendo de este modo una aproximación del segundo perfil de las levas conjugadas, o sea, el que impulsa al palpador inferior.

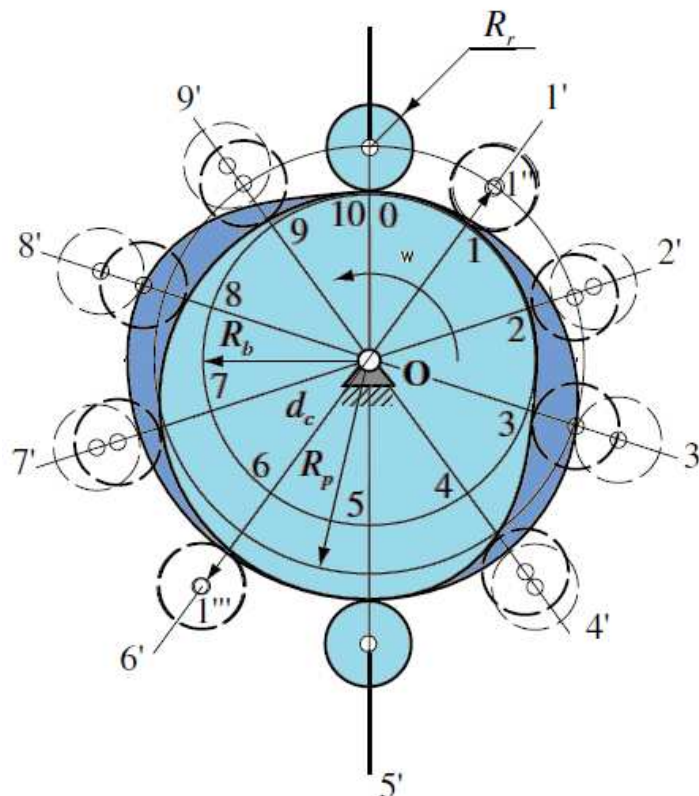


Fig. 4.4: Obtención del perfil de levas conjugadas con doble palpador de rodillo traslacional.

## 4.2 Métodos analíticos para la obtención de perfiles de levas.

En la actualidad los métodos gráficos de diseño de levas han sido sustituidos por los métodos de diseño analítico. Este proceso ha sido facilitado por el uso de los ordenadores, obteniéndose ventajas respecto al diseño gráfico.

La primer ventaja es que una vez se han programado las expresiones para la generación de los perfiles de levas se pueden obtener los perfiles y otras informaciones del diseño en un tiempo mucho menor que con el método gráfico. Además el proceso iterativo de diseño para obtener el perfil con las características geométricas deseadas se hace más rápido, simulando el comportamiento de los mecanismos antes de fabricarlos.

Una segunda ventaja es la precisión numérica del ordenador, la cual es muy superior a la precisión lograda con el método de diseño gráfico, lo que contribuye a disminuir el error del diseño final de la leva.

Una tercera ventaja es que el ordenador utilizado para diseñar la leva también puede suministrar la información necesaria para la fabricación de la misma con máquinas de control numérico.

Se pretende generar el perfil de una leva a partir de una ley de desplazamiento determinada que se quiere realice el seguidor, ésta ley estará definida según diferentes criterios dependiendo del tipo de seguidor de que se trate:

- Seguidor de rodillo traslacional: la ley de desplazamiento tiende a referirse a la distancia medida en la dirección del brazo del seguidor entre el centro del rodillo (punto de trazo) y el centro de giro de la leva, o alternativamente, entre el punto de trazo y el círculo primario.
  
- Seguidor de rodillo oscilante: en este caso lo habitual no es un desplazamiento lineal, sino que la salida que se define, es el movimiento angular del brazo del seguidor con vértice en su eje de giro.

- Seguidor de cara plana traslacional: la ley de desplazamiento se define como la distancia medida en la dirección del brazo entre el centro de giro de la leva y la cara del seguidor, o entre el círculo base y la cara del seguidor.
- Seguidor de cara plana oscilante: al igual que en el caso del rodillo oscilante, la salida es ahora un movimiento angular, la cara del seguidor reposa sobre la leva que le imprime dicho movimiento.

Pero en el cálculo del perfil de una leva, además de la ley de desplazamiento necesaria en la que implícitamente ya se han tenido en cuenta las características de velocidad y aceleración (a través de las derivadas superiores), y que genera geoméricamente el perfil, va a ser necesario determinar si dicho contorno es adecuado para un funcionamiento correcto. Creado el perfil de la leva, se hace necesario la consideración adicional de ciertos parámetros cuya naturaleza dependerá del tipo de seguidor que se vaya a emplear. Por otro lado, debe hacerse notar, que no siempre es conformable una leva aunque cumpla las condiciones de continuidad en sus curvas, puesto que una vez establecidas éstas y tal como se ha dicho, entra en juego el seguidor encargado (como ahora se verá) de generar el contorno de acuerdo a ellas. El perfil a que da lugar puede que en la práctica no sea conformable para que el seguidor realice el movimiento que se quería.

#### **4.2.1 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo traslacional**

En este caso el seguidor es un rodillo con un movimiento de rotación alrededor de su eje y un movimiento de traslación vertical en la dirección de su brazo. En un funcionamiento correcto el rodillo gira sin deslizar sobre el perfil de la leva que tiene un movimiento rotacional, el giro de la leva induce en el seguidor el movimiento vertical.

La generación del perfil de la leva se debe hacer teniendo en cuenta el movimiento de salida que pretendemos para el centro del rodillo. Como se mencionó en el punto anterior, dicho movimiento de salida se define como la distancia medida en la dirección

del brazo del seguidor entre el centro de éste y el centro de rotación de la leva. El movimiento de entrada es conocido y corresponde con un giro a una velocidad angular constante que hace girar la leva. Pero para generar el perfil será necesario considerar al seguidor como si se moviese alrededor, de forma semejante a un fresado que va siguiendo una trayectoria continua para crear el perfil a partir de un tocho sin forma. El contorno de la leva es por tanto, la envolvente generada a partir de las sucesivas posiciones del seguidor. Por lo que se entiende hasta ahora, se puede deducir que las coordenadas de dichas posiciones deben plantearse a partir del movimiento de salida que se pretende para el seguidor. El movimiento de salida definido anteriormente se denotará por  $L(\phi)$ , donde  $\phi$  es el ángulo girado por la leva medido desde una referencia fija cualquiera. En el caso que se trata es el seguidor el que debe moverse para generar el perfil, así que  $\phi$  será el ángulo girado por éste alrededor de la leva en sentido contrario al de rotación de ésta (Figura 4.5).

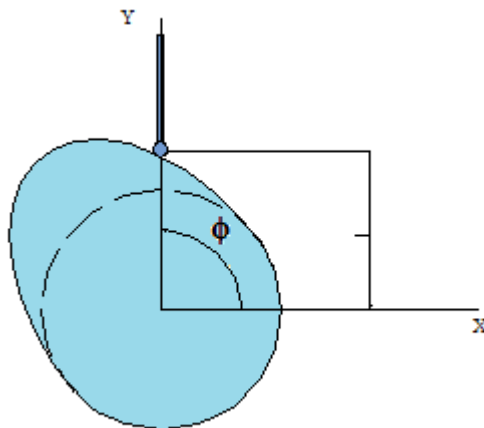


Figura 4.5: Leva Plana de Rodillo Traslacional

Sin embargo, como ya se mencionó, un seguidor no es un elemento puntual, su punto de contacto varía en cada instante. Sea  $\theta$  el ángulo formado por la recta (F) que une los centros de leva y seguidor y la que une el centro de la leva con el punto de contacto leva-seguidor (R) (Figura 4.6).

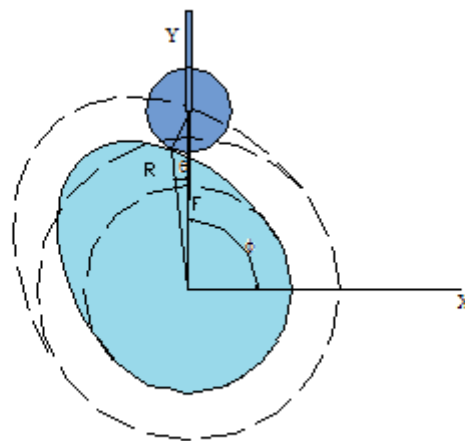


Fig. 4.6: Leva Plana de Rodillo Traslacional

Además, se puede tener un sistema leva-seguidor que funcione con una excentricidad ( $m$ ), definida como la abcisa entre el centro de éste y el de la leva. En ese caso se hace necesaria la consideración de un tercer ángulo al que se denominará  $\psi$  (Figura 4.7):

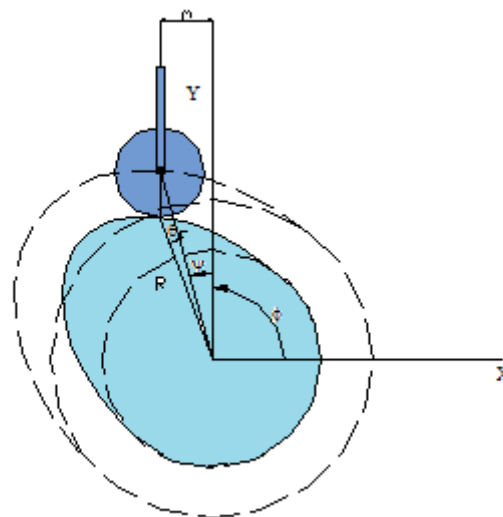


Fig. 4.7: Leva Plana de Rodillo Traslacional

Es importante notar que en esta situación el ángulo  $\phi$  se sigue correspondiendo con la definición dada, aún teniendo en cuenta los otros dos ángulos. En el caso de estar conformando el perfil, se puede apreciar que ya no representa de forma directa la

posición del punto de contacto entre la leva y el seguidor, pero seguirá existiendo una relación unívoca entre  $\phi$  y la ley de desplazamiento  $L(\phi)$ .

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el cálculo del contorno de una leva con seguidor traslacional de rodillo puede plantearse como sigue (Figura 4.8):

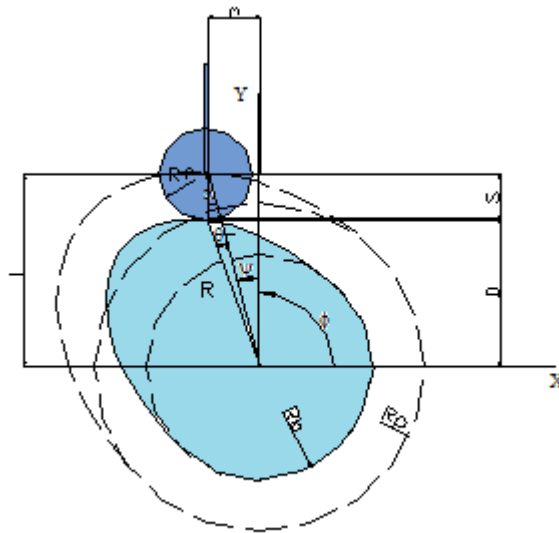


Fig. 4.8: Leva Plana de Rodillo Traslacional

- $R_f$ : es el radio del seguidor de rodillo.
- Curva de Paso: está formada por la trayectoria del centro del seguidor alrededor de la leva. La distancia perpendicular a la superficie de la leva entre ésta y el centro del seguidor es constante e igual al radio de éste. En procesos de fabricación en los que la herramienta a emplear tiene el mismo radio que el seguidor, es habitual plantear el corte de la leva dando como coordenadas las de la curva de paso.
- $R_b$ : es el radio base de la leva. El círculo base queda determinado por el más pequeño que puede trazarse tangente al perfil de ésta.
- $R_p$ : es el radio primario de la leva. El círculo primario es el más pequeño que puede trazarse tangente a la curva de paso.



- S: es la distancia medida sobre la línea extendida del brazo del seguidor entre el centro de éste y el círculo primario.

De la Figura 4.1d se deducen las siguientes relaciones:

$$\text{➤ } R_p = R_b + R_f$$

$$\text{➤ } R_p^2 = D^2 + m^2$$

$$\text{➤ } L(\phi) = S + D \Rightarrow L(\phi) = S(\phi) + (R_p^2 - m^2)^{1/2}$$

Notar que  $L(\phi)$  está formada por una componente fija y una variable,  $S(\phi)$ . Cuando el seguidor está en reposo sobre la superficie de la leva, es decir, cuando no se le transmite elevación, el centro del seguidor queda sobre el círculo primario, por lo que la ley de desplazamiento es constante e igual a  $(R_p^2 - m^2)^{1/2}$ .  $S(\phi)$  es el tipo de movimiento que se requiere para el centro del rodillo, esto es, armónico, cicloidal, semiarmónico etc., o una función cualquiera que cumpla los requisitos de continuidad en sí misma y en sus derivadas sucesivas; se corresponde con la distancia del centro del rodillo al círculo primario.

$$\text{➤ } F = [L(\phi)^2 + m^2]^{1/2}$$

$$\text{➤ } \psi = \text{Arctg} \left[ \frac{m}{L(\phi)} \right]$$

Ahora es necesario imprimir el movimiento al seguidor para ir generando el perfil de la leva bajo la envolvente que éste produciría. Para ello, se va a considerar un sistema de referencia adicional con centro en el sistema fijo y que gira a la vez que el seguidor sobre la leva: el eje  $X_1$  se trazará sobre la recta  $F$  y el eje  $Y_1$  a  $90^\circ$  en sentido antihorario respecto de  $X_1$ . Sobre el sistema móvil las coordenadas del punto de contacto entre la leva y el seguidor serán  $R_{x_1}$  y  $R_{y_1}$  (Figura 4.9), en ese caso:

$$\triangleright \theta = \text{Arctg}\left(\frac{Ry_1}{Rx_1}\right)$$

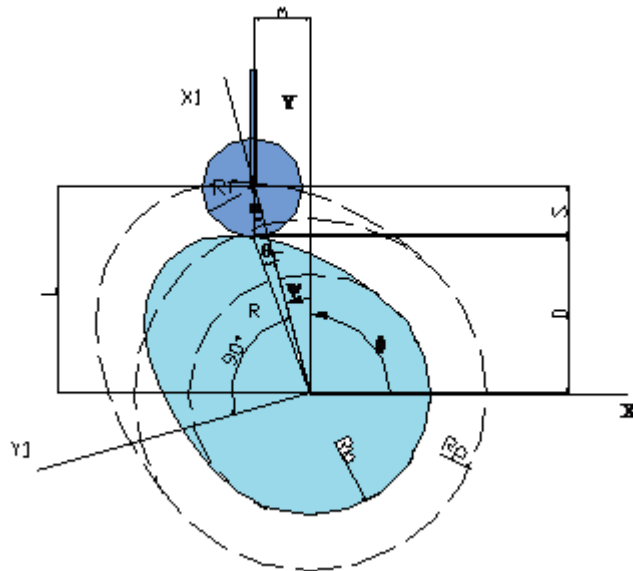


Fig. 4.9: Leva Plana de Rodillo Traslacional

El ángulo<sup>1</sup>  $\alpha$  se define como:

$$\triangleright \alpha = \text{Arctg}\left[\frac{L\left(\frac{dL}{d\phi}\right)}{m^2 + L^2 - m\left(\frac{dL}{d\phi}\right)}\right]$$

Por tanto,  $Rx_1 = F - Rf(\cos\alpha)$ ,  $Ry_1 = Rf(\sin\alpha)$ , lo que en polares respecto del sistema fijo quedará como:

$$\triangleright \Omega = \theta + \phi + \psi$$

$$\triangleright \rho = (Rx_1^2 + Ry_1^2)^{1/2}$$

En definitiva, se precisa partir de los siguientes datos iniciales:

- $R_p$  ó  $R_b$ : se suele optar por el radio primario ya que en procesos de fabricación es éste el empleado puesto que se trabaja directamente con las coordenadas de la curva de paso.
- $R_f$ : radio del seguidor
- $S(\phi)$ : distancia del punto de trazo al círculo primario.
- $m$ : excentricidad

Variando  $\phi$  de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  se va obteniendo  $L(\phi) \Rightarrow \alpha, \psi \Rightarrow R_{x_1}, R_{y_1} \Rightarrow \theta \Rightarrow \rho, \Omega$  quedando así determinadas todas las coordenadas del contorno de la leva.

#### 4.2.2 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo oscilante.

El planteamiento del caso es similar al anterior. Ahora la salida que se pretende para el seguidor es un movimiento de rotación sobre un pivote en el que finaliza su brazo. El seguidor apoya como antes sobre la leva a través de un rodillo. Al girar la leva sobre su eje, los ascensos y descensos transmitidos al rodillo se transforman en un movimiento giratorio en el pivote de éste (Figura 4.10).

Se trata de generar el perfil que necesitará la leva sabiendo que se requiere un movimiento de salida específico que como siempre deberá cumplir la ley de continuidad. Ahora no se tiene un desplazamiento en sí, sino un movimiento angular que se pretende siga el brazo del seguidor.

Como en el caso anterior, y como en todos los demás, el contorno de la leva queda generado por la envolvente que crea el seguidor en sus sucesivas posiciones alrededor del eje de giro de la leva, posiciones que como se puede entender son tales que van cumpliendo el requerimiento deseado para la salida.

---

- <sup>1</sup> Ver Diseño de mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G. Erdman/George N. Sandor. Prentice Hall

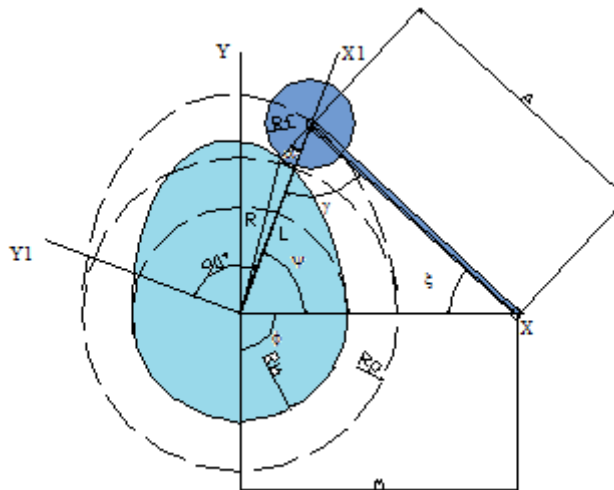


Figura 4.10: Leva Plana de Rodillo Oscilatorio

- m: distancia entre el centro de la leva y el eje de giro del brazo del seguidor.
- A: longitud del brazo del seguidor, desde su eje de giro hasta el eje del rodillo.
- Rb: radio base de la leva.
- Rf: radio del rodillo del seguidor.
- R: distancia entre el centro de la leva y el punto de contacto leva-seguidor.
- L: distancia entre los centros respectivos de la leva y el rodillo del seguidor.
- $\xi = \xi_0 + \delta(\phi)$ : ley de movimiento angular que se quiere realice el seguidor:
- $\phi$ : ángulo girado por la leva medido desde una referencia fija cualquiera.
- $\xi$ : es el requerimiento que se debe plantear para la salida. Se trata de un movimiento angular que varía en función del ángulo de rotación de la leva  $\phi$ .

- $\xi_0$ : es el desplazamiento angular inicial del seguidor cuando éste descansa sobre el perfil de la leva antes de producirse ninguna elevación, es decir, sobre el círculo base. Viene determinado por los parámetros geométricos que se consideren para el conjunto leva-seguidor, en concreto:

$$\triangleright \xi_0 = \text{Arcos} \left[ \frac{A^2 + m^2 - (R_b + R_f)^2}{2mA} \right]$$

- $\delta(\phi)$ : movimiento angular que cumple las condiciones de continuidad, es decir, es continuo para todo  $\phi$  tanto en sí mismo como para sus dos primeras derivadas (como mínimo). Es equivalente a  $S(\phi)$ , pero se altera la nomenclatura para distinguir el movimiento angular del traslacional.

Del planteamiento de la figura 4.10 pueden deducirse las siguientes relaciones geométricas:

$$\triangleright L^2 = A^2 + m^2 - 2Am \cos(\xi)$$

$$\triangleright \gamma = \text{Arcos} \left( \frac{L^2 + A^2 - m^2}{2LA} \right)$$

$$\triangleright m^2 = L^2 + A^2 - 2LA \cos(\gamma)$$

$$\triangleright \psi = \text{Arcos} \left( \frac{L^2 - A^2 + m^2}{2Lm} \right)$$

El ángulo  $\alpha$ , formado por las rectas que unen el centro del rodillo con el punto de contacto y el centro del rodillo con el de la leva, viene dado por la siguiente expresión<sup>2</sup>:

---

- <sup>2</sup> Ver Diseño de mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G. Erdman/George N. Sandor. Prentice Hall 1998.

$$\triangleright \alpha = \text{Arctg} \left[ \frac{(A \text{sen} \gamma) \left( \frac{d\xi}{d\phi} \right)}{L - (A \text{cos} \gamma) \left( \frac{d\xi}{d\phi} \right)} \right]$$

Para determinar las coordenadas de cada punto del perfil de la leva es necesario considerar un sistema de referencia móvil, con centro en el sistema fijo, y que gira a la vez que el seguidor sobre la leva: el eje X1 se trazará sobre la recta L y el eje Y1 a 90° en sentido antihorario respecto de X1. Sobre el sistema móvil las coordenadas del punto de contacto entre la leva y el seguidor serán  $R_{x_1}$  y  $R_{y_1}$  (Figura 4.10), en ese caso:

- $R_{x_1} = L - R \text{cos}(\alpha)$
- $R_{y_1} = R \text{sen}(\alpha)$

Con todo lo anterior se puede concluir que las coordenadas polares de todos los puntos que conforman el perfil de la leva vendrán dadas por:

- $\Omega = \theta + \phi + \psi \quad \theta = \text{Arctg} \left( \frac{R_{y_1}}{R_{x_1}} \right)$
- $\rho = (R_{x_1}^2 + R_{y_1}^2)^{1/2}$

Variando  $\phi$  de 0° a 360° se va obteniendo  $\xi(\phi) \Rightarrow L, \frac{d\xi}{d\phi} \Rightarrow \gamma, \psi \Rightarrow \alpha \Rightarrow R_{x_1}, R_{y_1} \Rightarrow \theta \Rightarrow$

$\rho, \Omega$  quedando así determinadas todas las coordenadas del perfil.

#### 4.2.3 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana traslacional.

La diferencia más notable con respecto a los casos de rodillo es que ahora el seguidor ya no rueda sin deslizar, por el contrario, está en permanente deslizamiento con respecto a la superficie de la leva. Como siempre, el movimiento del seguidor se produce en la

dirección de su brazo, impulsado por la rotación de la leva. Como se deduce de explicaciones anteriores, a pesar de pretender un movimiento para el brazo del seguidor que sea igual que en el caso de un rodillo traslacional, el perfil de la leva será diferente puesto que el seguidor también lo es.

Nuevamente, es la envolvente del seguidor la que crea el perfil de la leva (Figura 4.11).

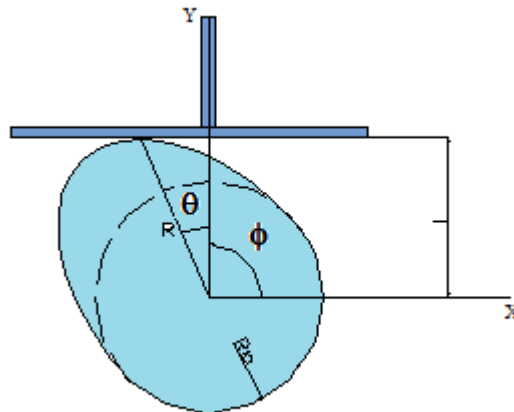


Fig. 4.11: Leva Plana de de Cara Plana Traslacional

- $R_b$ : radio base de la leva.
- $S$ : es la distancia medida sobre la línea extendida del brazo del seguidor entre el centro de éste, en su cara de contacto con la leva, y hasta el círculo base.
- $L(\phi) = R_b + S(\phi)$ : distancia medida sobre la línea extendida del brazo del seguidor entre el centro de éste, en su cara de contacto con la leva, y hasta el centro de la misma.

El ángulo<sup>3</sup>  $\theta$ , con vértice en el centro de la leva, está formado por las rectas que van desde el centro al punto de contacto (recta  $R$ ) y desde el centro a la cara del seguidor según la perpendicular a éste:

<sup>-3</sup> Ver Diseño de mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G. Erdman/George N. Sandor. Prentice Hall 1998.

$$\triangleright \theta = \text{Arctg} \left[ \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{d\phi} \right) \right]$$

- $\triangleright$  R: distancia entre el centro de la leva y el punto de contacto leva-seguidor, gráficamente se deduce que  $R = \frac{L}{\cos\theta}$

Considerando un sistema de referencia móvil que se mueve con el seguidor alrededor de la leva, tal que el eje X1 esté sobre la recta R y el eje Y1 a 90° en sentido antihorario respecto de X1, las coordenadas de cada punto del perfil de la leva serían (R, 0). De modo que en polares se tendría (R,  $\theta + \phi$ ).

Variando  $\phi$  de 0° a 360° se va obteniendo  $S(\phi) \Rightarrow L \Rightarrow \theta \Rightarrow R$ , con lo que se consigue establecer todos los puntos que conforman el perfil de la leva.

En el desarrollo anterior destaca que en ningún momento se ha tenido en cuenta la longitud de la cara del seguidor. El planteamiento es independiente de dicha longitud, no se precisa, sin embargo se debe asegurar una longitud mínima (esta consideración se verá en el capítulo siguiente).

Otro factor a tener en cuenta es la excentricidad del vástago del seguidor respecto al diámetro vertical del círculo base: la excentricidad no afecta al perfil de la leva, obsérvese que aunque se desplace el vástago horizontalmente sobre la cara del seguidor (no que se desplace todo el seguidor), el movimiento de salida que se pretendía no varía. Sin embargo, si bien la excentricidad no varía el contorno, si tiene efectos dinámicos sobre los momentos que se van producir en el eje. Por tanto, una diferencia notable entre un seguidor de rodillo traslacional y uno de cara plana traslacional cuando se aplica excentricidad, es que en el primero el perfil de la leva se ve alterado para mantener el movimiento de salida mientras que en el segundo eso no ocurre.



#### 4.2.4 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana oscilante.

Ahora el brazo del seguidor sirve todo él como soporte sobre el que apoyarse en cada momento sobre la superficie de la leva. En el extremo de dicho brazo se tiene un eje de oscilación sobre el que se mueve (Figura 4.12).

Como en el caso del rodillo oscilante, la salida que se desea es un movimiento de rotación sobre el pivote en el que finaliza el brazo. Conociendo este movimiento de salida debe generarse el perfil de la leva que lo produzca de acuerdo al tipo de seguidor que se está utilizando y a los parámetros que lo definen. En este caso es suficiente con conocer la distancia entre el pivote de giro y el centro de la leva. Como en el caso de cara plana traslacional, para el desarrollo teórico del perfil no se precisa de la longitud del seguidor, ésta hay que determinarla a posteriori una vez calculado el perfil.

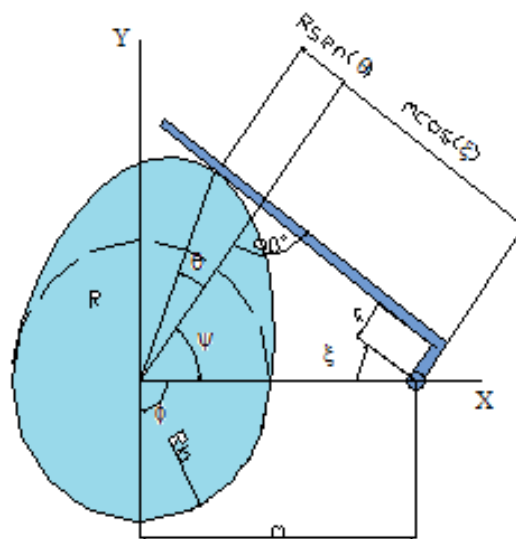


Fig. 4.12: Leva Plana de Cara Plana Oscilatoria

- $m$ : distancia entre el centro de la leva y el eje de giro del brazo del seguidor.
- $R_b$ : radio base de la leva.

- R: distancia entre el centro de la leva y el punto de contacto leva-seguidor.
- f: distancia perpendicular a la cara del seguidor desde ésta hasta la paralela a la misma que pasa por el pivote del brazo. Se conoce como excentricidad (no confundir con “m” en el caso del rodillo traslacional).
- $\xi = \xi_0 + \delta(\phi)$ : ley de movimiento angular que se quiere realice el seguidor:
  - $\phi$ : ángulo girado por la leva medido desde una referencia fija cualquiera.
  - $\xi$ : es el requerimiento que se debe plantear para la salida. Se trata de un movimiento angular que varía en función del ángulo de rotación de la leva  $\phi$ . Es equivalente a  $S(\phi)$  para los seguidores traslacionales.
  - $\xi_0$ : es el desplazamiento angular inicial del seguidor cuando éste descansa sobre el perfil de la leva antes de producirse ninguna elevación, es decir, sobre el círculo base. Viene determinado por los parámetros geométricos que se consideren para el conjunto leva-seguidor, en concreto:
 
$$\xi_0 = \text{Arctg}\left(\frac{Rb - f}{m}\right)$$

El ángulo<sup>4</sup>  $\theta$  con vértice en el centro de la leva formado por las rectas R y  $f + m \text{sen}(\xi)$  viene dado por:

$$\theta = \text{Arctg}\left[\frac{\left(\frac{d\xi}{d\phi}\right)}{1 - \left(\frac{d\xi}{d\phi}\right)} \frac{m \cos \xi}{f + m \text{sen} \xi}\right]$$

---

- <sup>4</sup> Ver Diseño de mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G. Erdman/George N. Sandor. Prentice Hall 1998.

Como en los casos anteriores, se emplea un sistema de referencia móvil con origen en el centro de la leva: el eje X1 sobre la recta R y el Y1 perpendicular a éste en sentido antihorario.

Del dibujo puede deducirse que las coordenadas polares de cada punto del perfil vienen dadas por:

$$\triangleright (R, \psi + \theta + \phi)$$

$$\triangleright R = \frac{f + m \operatorname{sen} \xi}{\cos \theta}$$

$$\triangleright \psi = \frac{\pi}{2} - \xi$$

Puede comprobarse que en cartesianas, para el sistema móvil, los puntos del perfil de la leva son  $(R, 0)$ .

Variando  $\phi$  de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  se va obteniendo  $\xi(\phi) \Rightarrow \frac{d\xi}{d\phi}$ ,  $\psi \Rightarrow \theta \Rightarrow R, \psi + \theta + \phi$ , quedando así determinadas todas las coordenadas del perfil de la leva.

Como se mencionó antes, en ningún momento se ha tenido en cuenta la longitud de la cara del seguidor para el desarrollo, sin embargo debe asegurarse una longitud mínima si se desea que el perfil calculado produzca realmente el movimiento de salida del que partió su cálculo, consideración que como en el caso del seguidor traslacional, se hará en el capítulo siguiente.

#### 4.2.5 Levas conjugadas con doble seguidor plano de traslación.

Los métodos analíticos para la obtención de los perfiles de levas conjugadas, de anchura y diámetro constante, tanto con seguidores traslacionales como con seguidores oscilantes están basados en el enfoque analítico-vectorial que aportan Cardona y Clos (2001).

La obtención de los perfiles de levas conjugadas, como se mostraba en los métodos gráficos, es un proceso secuencial, donde primero se genera el perfil en contacto con el seguidor superior y a continuación el seguidor inferior.

Para el caso de doble seguidor plano de traslación el perfil de leva es la envolvente de un haz de rectas.

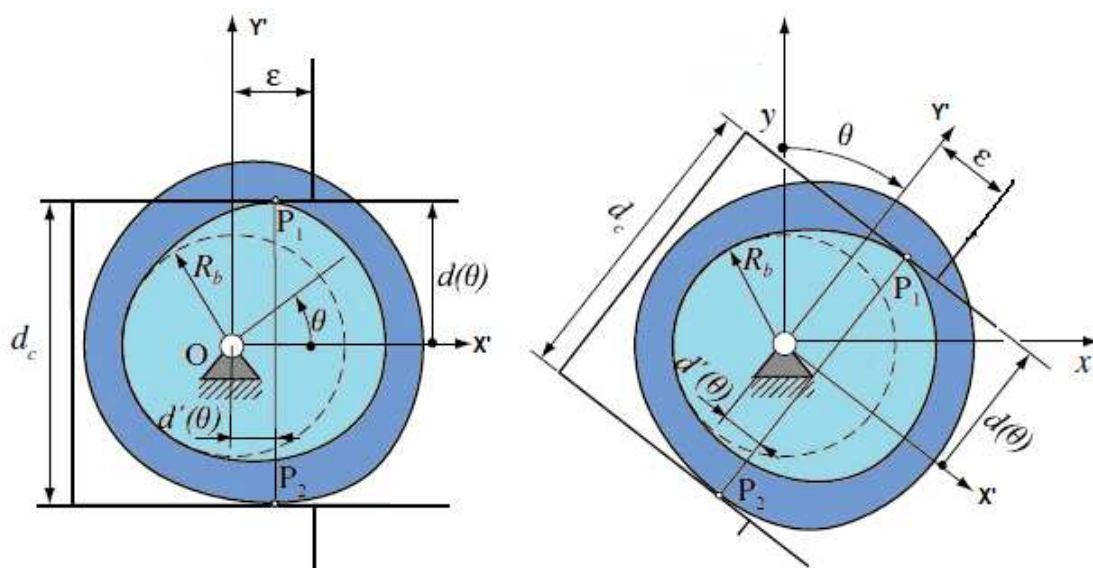


Fig. 4.13: Inversión cinemática levas conjugadas de cara plana traslacional.

La figura 4.13 nos aporta la base para nuestro análisis, nos presenta la inversión cinemática y los parámetros geométricos a partir de los cuales obtendremos los perfiles buscados.

Los puntos P1 y P2, son los puntos de contacto leva-seguidor con el primer y segundo perfil respectivamente.

Se utiliza, la base vectorial  $x, y$  fija a la leva y la base  $X', Y'$  fija a la guía del doble palpador.

A. Para el primer perfil (leva que está en contacto con el palpador superior), las expresiones de cálculo son:

- En la base móvil  $X'Y'$  el vector  $OP_1$  tiene por componentes: (1)

$$\left\{ \overrightarrow{OP_1}(\theta) \right\}_{X'Y'} = \left\{ \begin{array}{l} d'_1(\theta) \\ d_1(\theta) \end{array} \right\}_{X'Y'} \quad d_1(\theta) = d_o + s(\theta)$$

- En la base fija  $x, y$  el vector  $OP_1$  tiene por componentes: (2)

$$\left\{ \overrightarrow{OP_1}(\theta) \right\}_{x,y} = [S_\theta] \left\{ \overrightarrow{OP_1}(\theta) \right\}_{X'Y'} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

B. Para el segundo perfil (leva que está en contacto con el palpador inferior), se tiene:

- En la base móvil  $X'Y'$  el vector  $OP_2$  tiene por componentes: (3)

$$\left\{ \overrightarrow{OP_2}(\theta) \right\}_{X'Y'} = \left\{ \begin{array}{l} d'_2(\theta) \\ d_2(\theta) \end{array} \right\}_{X'Y'} \quad d_2(\theta) = (d_o - d_c) + s(\theta)$$

Para obtener el vector  $OP_2$  en la base fija  $x, y$ , se aplica la ecuación 2, con el subíndice

2. Así, se tiene la expresión paramétrica del perfil de la segunda leva.

#### 4.2.6 Levas conjugadas con doble seguidor de rodillo traslacional.

La Figura 4.14, muestra la inversión cinemática en este tipo de mecanismo, que sirve como base para la obtención de las expresiones de cálculo.

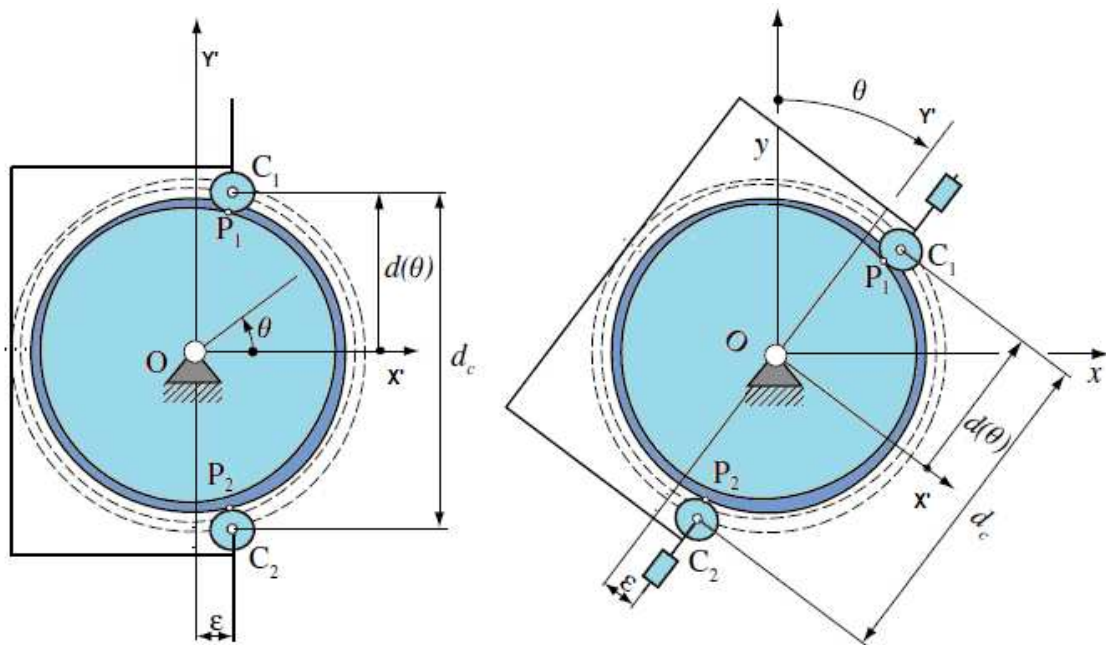


Fig. 4.14: Inversión cinemática levas conjugadas de rodillo traslacional.

A. Para el primer perfil (leva que está en contacto con el palpador superior), las expresiones de cálculo son:

- En la base móvil  $X'Y'$  el vector  $OC_1$  tiene por componentes: (1)

$$\{\overline{OC_1}(\theta)\}_{X'Y'} = \begin{Bmatrix} \epsilon \\ d_1(\theta) \end{Bmatrix}_{X'Y'}$$

- En la base fija  $x, y$  el vector  $OC_1$  (curva de paso del primer perfil) tiene por componentes: (2)

$$\{\overline{OC_1}(\theta)\}_{X,Y} = [S_\theta] \{\overline{OC_1}(\theta)\}_{X'Y'}$$

El perfil de la leva  $OP_1(\theta)$  equivale al lugar geométrico de los puntos situados a una distancia  $R_r$  (radio del rodillo) de la curva de paso en la dirección de su normal  $n(\theta)$  (interior) y dirigida hacia el área que encierra la curva, la ecuación paramétrica del primer perfil es: (3)

$$\overrightarrow{OP_1}(\theta) = \overrightarrow{OC_1}(\theta) + R_r \cdot n_1(\theta)$$

La normal unitaria a la curva de paso se calcula según: (4)

$$n_1(\theta) = [R_{-90^\circ}] \cdot \frac{t_1(\theta)}{|t_1(\theta)|}, \quad \text{donde} \quad t_1(\theta) = \frac{d}{d\theta} \overrightarrow{OC_1}(\theta)$$

B. Para el segundo perfil  $OP_2(\theta)$ , leva que está en contacto con el palpador inferior, las expresiones de cálculo son las mismas que las del primer perfil (Ecuaciones 1, 2, 3, 4) tomando en las expresiones vectoriales, la ley de desplazamiento del segundo palpador.

#### 4.2.7 Levas conjugadas con doble seguidor plano oscilatorio.

Al igual que en el caso de palpadores traslacionales, los perfiles conjugados que aquí pueden ser obtenidos se generan de manera secuencial. Primero se obtiene el perfil que está en contacto con el palpador superior y luego el que está en contacto con el palpador inferior.

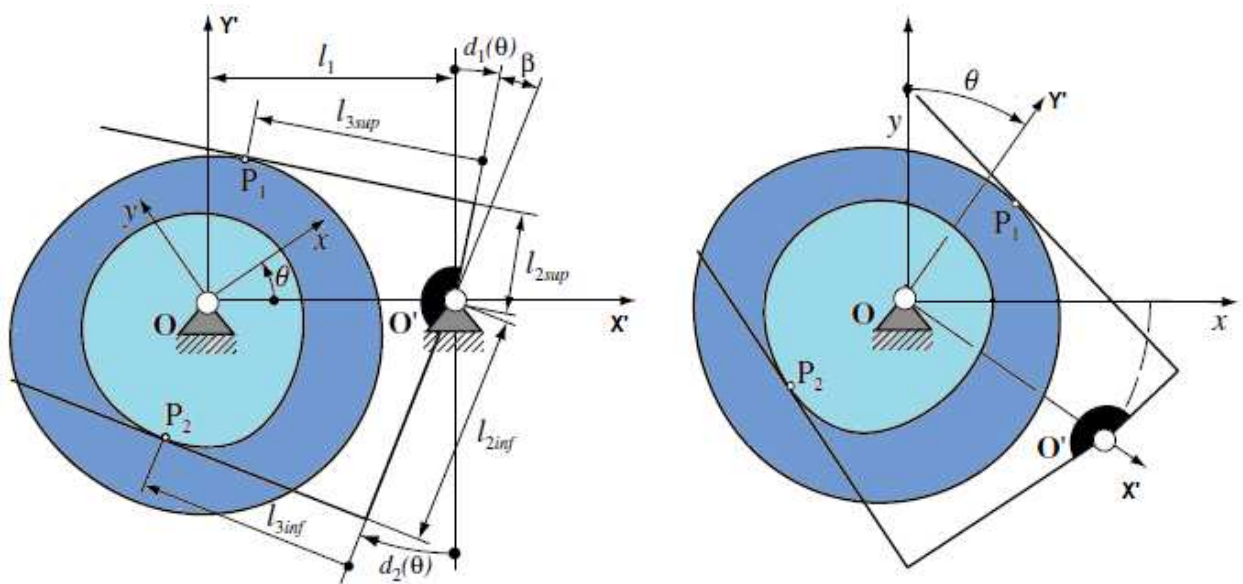


Fig. 4.15: Definición de parámetros geométricos e inversión cinemática.

Los puntos P1 y P2, son los puntos de contacto leva-palpador con el primer y segundo perfil respectivamente. El triedro  $x, y$ , fijo a la leva se toma como referencia de estudio y la base  $X', Y'$ , fija a las articulaciones O de la levas y O' del doble seguidor, es móvil. En las dimensiones de las levas influirán los parámetros:  $R_{b1}$ ,  $l_1$ ,  $l_{2sup}$  y  $l_{2inf}$ .

Para la ampliación de CAM-DAS, nos permitirá obtener levas conjugadas de cara plana oscilante con la configuración mostrada en la figura 4.16 donde se toman los brazos  $l_{2sup} = l_{2inf} = 0$  mm.



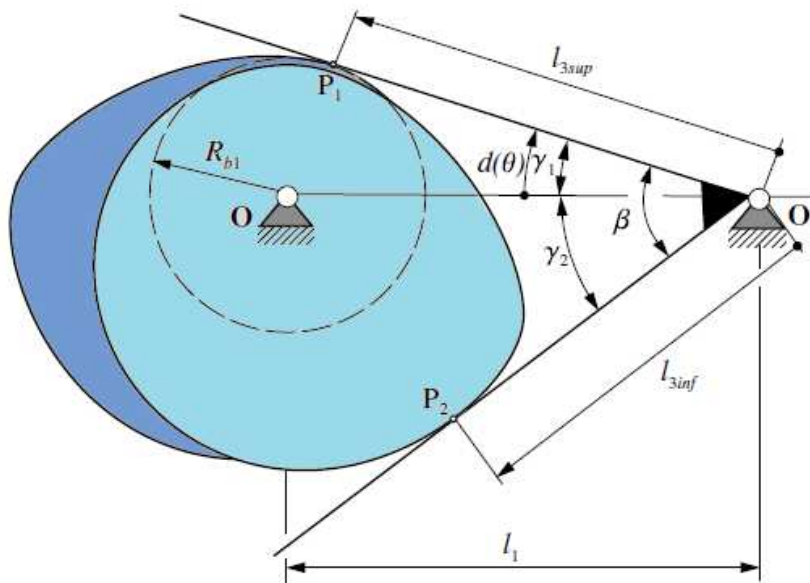


Fig.4.16: Levas conjugadas con seguidores planos oscilatorios con  $l_{2sup} = l_{2inf} = 0$  mm

Los pasos para la obtención de los perfiles son los siguientes:

A. Para el primer perfil (leva que está en contacto con el palpador superior), las expresiones de cálculo son:

- En la base móvil  $X', Y'$ , el vector  $OP_1$  tiene por componentes: (1)

$$\overrightarrow{OP_1}(\theta)_{X'Y'} = \left\{ \begin{array}{l} l_1 + l_{2sup} \sin[d_1(\theta)] - l_{3sup} \cos[d_1(\theta)] \\ l_{2sup} \cos[d_1(\theta)] + l_{3sup} \sin[d_1(\theta)] \end{array} \right\}_{X'Y'}$$

Donde:

$$d_1(\theta) = \gamma_1 + \varphi(\theta) \cdot d_1'(\theta) = \frac{d}{d\theta} d_1(\theta) \text{ y } l_{3sup} = l_1 (d_1'(\theta) + 1)^{-1} \cos[d_1(\theta)]$$

$\gamma_1$  = ángulo a partir del cual comienza a desplazarse el palpador superior.

- En la base fija  $x,y$  el vector  $OP_2$  tiene por componentes : (2)

$$\{\overrightarrow{OP_1}(\theta)\}_{X,Y} = [S_\theta] \{\overrightarrow{OP_1}(\theta)\}_{X'Y'} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

B. De manera similar para el perfil de leva que está en contacto con el palpador inferior:

- En la base móvil  $X', Y'$ , el vector  $OP_2$  tiene por componentes: (3)

$$\{\overrightarrow{OP_2}(\theta)\}_{X'Y'} = \begin{Bmatrix} l_1 - l_{2inf} \sin[d_2(\theta)] - l_{3inf} \cos[d_2(\theta)] \\ -l_{2inf} \cos[d_2(\theta)] + l_{3inf} \sin[d_2(\theta)] \end{Bmatrix}_{X'Y'}$$

Donde:

$$d_2(\theta) = (\gamma_1 - \beta) + \varphi(\theta) \cdot d_2'(\theta) = \frac{d}{d\theta} d_2(\theta) \text{ y } l_{3inf} = l_1 (d_2'(\theta) + 1)^{-1} \cos[d_2(\theta)]$$

El vector  $OP_2$  en la base fija  $x,y$  se obtiene de manera similar al  $OP_1$  en dicha base. Así, se tiene la expresión paramétrica del perfil de la segunda leva.

Recordemos que con CAM-DAS obtendremos levas conjugadas sin excentricidad, es decir

$$l_{2sup} = l_{2inf} = 0 \text{ mm.}$$

#### 4.2.8 Levas conjugadas con doble seguidor de rodillo oscilatorio.

Para la obtención de estos perfiles en CAM-DAS, también impondremos ciertas restricciones el análisis posterior, como en el caso anterior las excentricidades volverán a tener un valor nulo, es decir las longitudes de los siguientes brazos es

$$l_{2sup} = l_{2inf} = l_{4sup} = l_{4inf} = 0 \text{ mm.}$$

Con esta restricción obtendremos levas con la configuración de la figura 4.17.

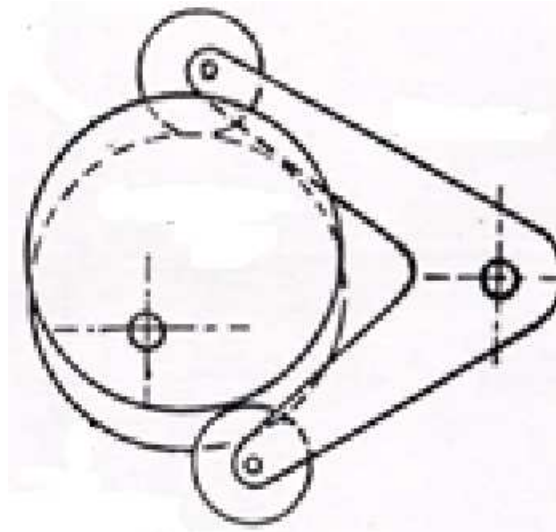


Fig. 4.17: Levas conjugadas con seguidores de rodillo oscilante con  $l_{2sup} = l_{2inf} = l_{4sup} = l_{4inf} = 0 \text{ mm}$

Secuencia de obtención de levas conjugadas con seguidores de rodillo oscilante:

A. Para el primer perfil (leva que está en contacto con el palpador superior leva), las expresiones de cálculo son:

- En la base móvil  $X', Y'$ , el vector  $OP_1$  tiene por componentes: (1)

$$\left\{ \overrightarrow{OP_1}(\theta) \right\}_{X'Y'} = \left\{ \begin{array}{l} l_1 + l_{2sup} \sin[d_1(\theta)] - l_{3sup} \cos[d_1(\theta)] \\ l_{2sup} \cos[d_1(\theta)] + l_{3sup} \sin[d_1(\theta)] \end{array} \right\}_{X'Y'}$$

Donde:

$$d_1(\theta) = \gamma_1 + \varphi(\theta) \cdot d_1'(\theta) = \frac{d}{d\theta} d_1(\theta) \text{ y } l_{3\text{sup}} = l_1(d_1'(\theta) + 1)^{-1} \cos[d_1(\theta)]$$

$\gamma_1$  = ángulo a partir del cual comienza a desplazarse el palpador superior.

- En la base fija  $x, y$  el vector  $OP_1$  tiene por componentes: (2)

$$\{\overrightarrow{OP_1}(\theta)\}_{X,Y} = [S_\theta] \{\overrightarrow{OP_1}(\theta)\}_{X'Y'} \quad [S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

B. De manera similar para el perfil de leva que está en contacto con el palpador inferior:

$$\{\overrightarrow{OP_2}(\theta)\}_{X'Y'} = \begin{Bmatrix} l_1 - l_{2\text{inf}} \sin[d_2(\theta)] - l_{3\text{inf}} \cos[d_2(\theta)] \\ -l_{2\text{inf}} \cos[d_2(\theta)] + l_{3\text{inf}} \sin[d_2(\theta)] \end{Bmatrix}_{X'Y'}$$

Donde:

$$d_2(\theta) = (\gamma_1 - \beta) + \varphi(\theta) \cdot d_2'(\theta) = \frac{d}{d\theta} d_2(\theta) \text{ y } l_{3\text{inf}} = l_1(d_2'(\theta) + 1)^{-1} \cos[d_2(\theta)]$$

El vector  $OP_2$  en la base fija  $x, y$  se obtiene de manera similar al  $OP_1$  en dicha base. Así, se tiene la expresión paramétrica del perfil de la segunda leva.

#### 4.2.9 Levas planas de rotación de anchura constante.

En la ampliación del programa CAM-DAS que abordamos en el presente proyecto nos centramos en las denominadas por Rothbart (1956), levas armónicas, que son un tipo de levas de arcos circulares, con seguidor plano traslacional.

Esta denominación se debe al movimiento que describe el seguidor que acciona, tanto seguidor plano como de rodillo.

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 2.4 y Figura 2.12).

Las levas de anchura y de diámetro constante pueden considerarse un caso particular de las conjugadas. Así cuando dos levas conjugadas tienen idéntica geometría y orientación, coinciden una sobre otra obteniéndose una única leva, que será de anchura o de diámetro constante en función del tipo de palpador que accionen.

Para obtener una leva con perfil de anchura constante debemos conocer de antemano la ley de desplazamiento del seguidor. Para los casos de seguidores traslacionales, los cuales se analizan en este proyecto, la ley se denominará ley de anchura constante para seguidores con movimiento traslacional. Rothbart (1956) nos presenta gráficamente las características y la obtención de esta ley, que podemos ver en la figura 4.18.

La ley de desplazamiento del seguidor  $S(\theta)$  así obtenida tiene la característica de que el movimiento del palpador desde  $0$  a  $\pi$ , es el inverso del que realiza desde  $\pi$  a  $2\pi$ , de manera que se cumple :  $S(\theta) + S(\theta + \pi) = \text{constante}$ .

Esta ley de desplazamiento para levas de arcos circulares está formada por partes de curvas del movimiento armónico simple de ahí la denominación de levas armónicas, además de tramos de detenimientos.

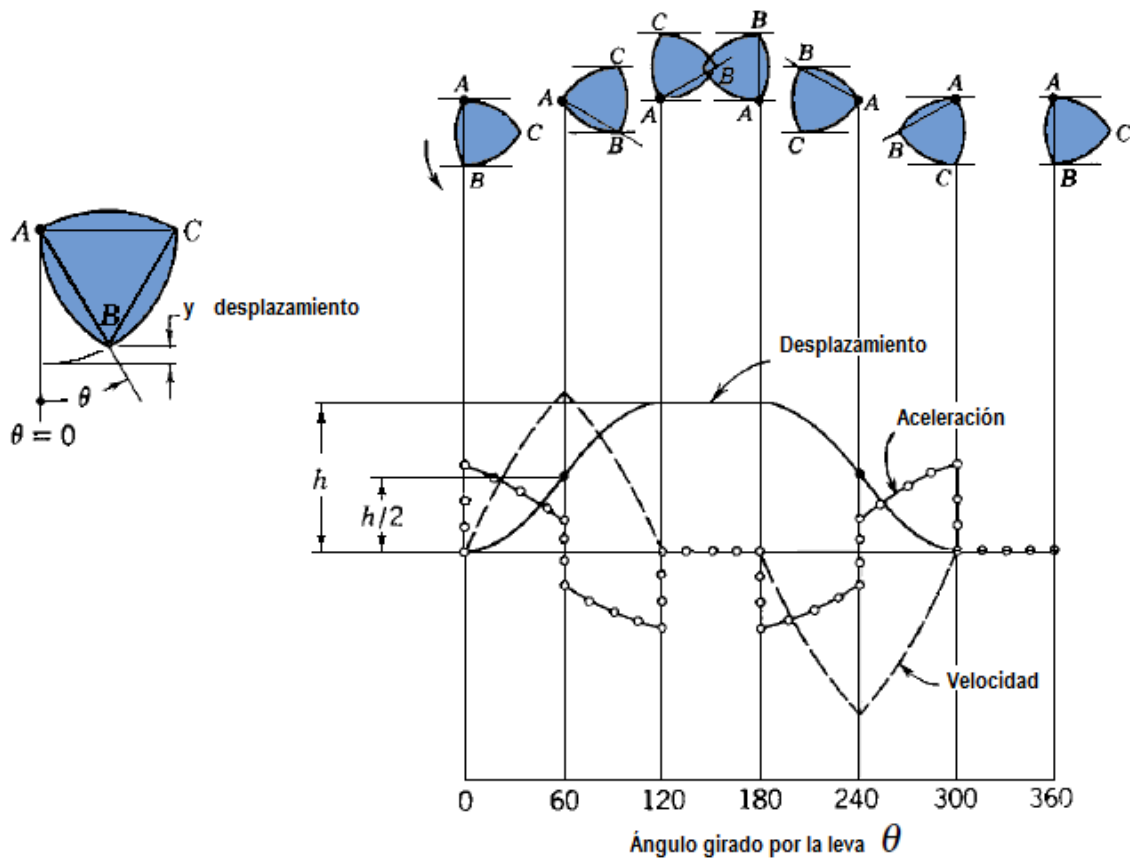


Fig. 4.18: Determinación de la ley de anchura constante para seguidores traslacionales

La figura 4.18 también nos muestra las gráficas de velocidad y aceleración, que se obtienen a partir de la derivación sucesiva de la ley de desplazamiento.

Se deduce de las gráficas que nuestra ley tiene continuidad  $C^1$ , siendo el caso de las levas de anchura y diámetro constante los únicos casos en los que se aceptarán discontinuidades en la aceleración.

Además de conocer esta ley de desplazamiento para obtener el perfil de leva deberemos imponer la siguiente restricción:

- La distancia entre los palpadores superior e inferior debe ser:
 
$$d_c = 2R_b + S_{\max}(\theta)$$
 , de esta manera se obliga al doble palpador a ajustarse al perfil de anchura constante.

Una vez aplicadas las dos restricciones mencionadas la leva de anchura constante se obtendrá según las expresiones de cálculo expuestas en el apartado 4.2.5, es decir como un caso particular de leva conjugada.

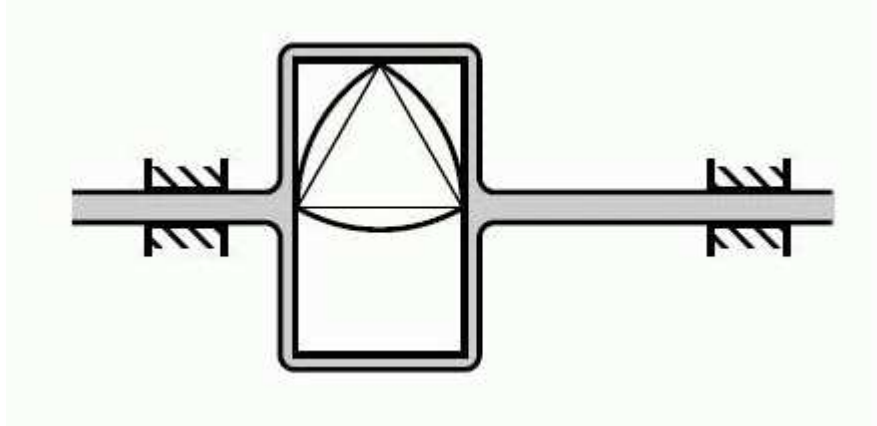


Fig. 4.19: Leva de arcos circulares con seguidores traslacionales.

#### 4.2.10 Levas planas de rotación de diámetro constante.

Este tipo de mecanismo desmodrómico tiene la característica de tener un doble palpador de rodillo, la distancia  $d_c$ , que permanecerá constante, se mide diametralmente entre los puntos de contacto leva-seguidor.

Cuando se requiere obtener un perfil de diámetro constante (que accione un doble seguidor de rodillo) utilizando el método expuesto para levas conjugadas (apartado 4.2.6), debemos tener en cuenta las siguientes restricciones:

- La ley de desplazamiento del seguidor será la ley de anchura constante analizada en el apartado anterior (4.2.9), donde se cumple:

$$S(\theta) + S(\theta + \pi) = \text{constante.}$$

- La distancia entre los palpadores superior e inferior deberá ser:  
 $d_c = 2R_b + S_{\max}(\theta)$ , de esta manera se obliga al doble palpador a ajustarse al perfil de anchura constante.
- La excentricidad ( $\epsilon$ ) del seguidor deberá tener un valor nulo,  $\epsilon = 0$  mm.

Aplicando las expresiones de cálculo del perfil para levas conjugadas con doble seguidor de rodillo traslacional y las restricciones antes mencionadas, se obtienen perfiles de diámetro constante como caso particular de levas conjugadas.

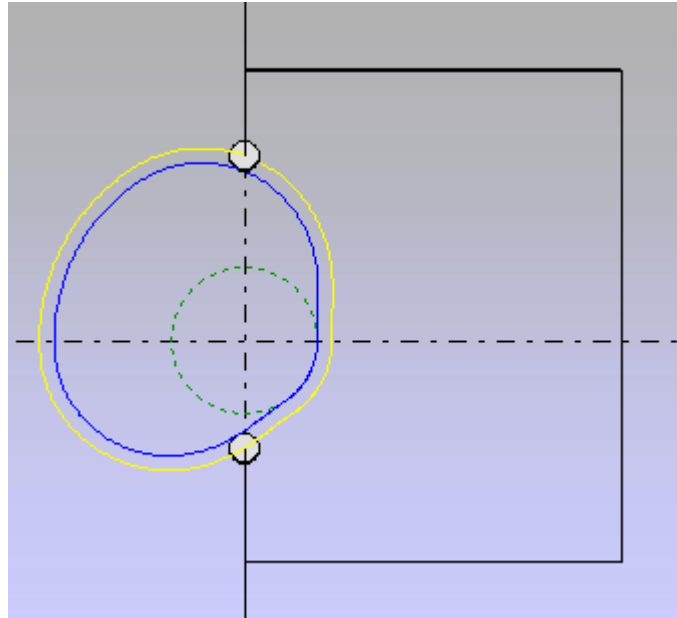


Fig. 4.20: Leva de diámetro constante, calculada con CAM-DAS.

#### 4.2.11 Levas alternativas o traslacionales.

Para este tipo de levas se consideran seguidores de rodillo con un movimiento de rotación alrededor de su eje y un movimiento de traslación vertical en la dirección de su brazo. En un funcionamiento correcto el rodillo gira sin deslizar sobre el perfil de la leva que tiene un movimiento traslacional, esta acción alternativa induce en el seguidor el movimiento vertical.

La generación del perfil de la leva se debe hacer teniendo en cuenta el movimiento de salida que pretendemos para el centro del rodillo. Dicho movimiento de salida se define como la distancia medida en la dirección del brazo del seguidor entre el centro de éste y un eje horizontal que en el presente proyecto se tomará en la base del propio perfil. El movimiento de entrada es conocido y corresponde con un desplazamiento



traslacional a lo largo del eje seleccionado con una velocidad lineal constante.

Pero para generar el perfil será necesario considerar al seguidor como si se moviese sobre la leva de forma semejante a un fresado que va siguiendo una trayectoria continua para crear el perfil a partir de un tocho sin forma. El contorno de la leva es por tanto, la envolvente generada a partir de las sucesivas posiciones del seguidor. Por lo que se entiende hasta ahora, se puede deducir que las coordenadas de dichas posiciones deben plantearse a partir del movimiento de salida que se pretende para el seguidor. El movimiento de salida se denotará por  $L(B)$ , donde  $B$  es la longitud parcial que la leva se desplaza medida desde una referencia fija cualquiera. En el caso que se trata es el seguidor el que debe moverse para generar el perfil, así que  $B$  será esta longitud recorrida por éste a lo largo de la leva en sentido contrario al de avance de ésta.

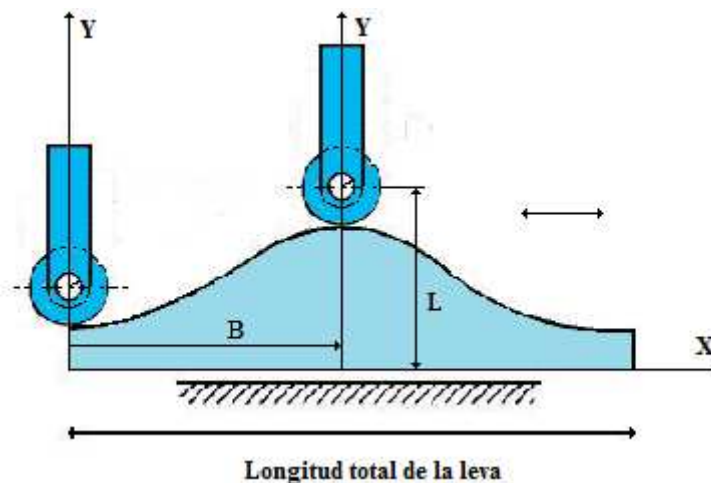


Fig. 4.21: Planteamiento para el cálculo del perfil de una leva alternativa.

Teniendo en cuenta el planteamiento anterior y los parámetros que a continuación se mencionan se llevará a cabo el cálculo del perfil:

- $R_f$ : es el radio del seguidor de rodillo.
- Curva de Paso: está formada por la trayectoria del centro del seguidor sobre la leva. En procesos de fabricación en los que la herramienta a emplear tiene el mismo radio que el seguidor, es habitual plantear el corte de la leva dando como coordenadas las de la curva de paso.

- Longitud total de la leva: es la magnitud que nos indica el tamaño de la leva a construir, la suma total de las longitudes parciales de avance (B) tendrá que ser igual a este valor.

Observando la figura 4.21, se llega a la conclusión de que:

$$\text{➤ } L(B) = S(B) + R_f$$

siendo  $S(B)$  la ley de desplazamiento definida para el seguidor.

## Capítulo 5: Análisis de verificación del perfil obtenido

La comprobación del perfil constituye el último paso del proceso de diseño de una leva, para ello CAM-DAS analiza los valores obtenidos del radio de curvatura, ángulo de presión y la longitud de los seguidores de cara plana.

Con este análisis podremos saber si la leva diseñada tiene tramos problemáticos, problemas de esfuerzos excesivos, en definitiva si es viable o por el contrario nos encontramos con ciertas dificultades físicas que no permitan obtener una leva con las características dadas.

### 5.1 Radio de curvatura

El radio de curvatura representa numéricamente la mayor o menor concavidad/convexidad que muestra la representación gráfica de una función. Así por ejemplo una recta tiene un radio de curvatura infinito y una circunferencia un radio de curvatura constante (igual a su radio). No se debe confundir esta magnitud con su inversa conocida como curvatura (la curvatura de una recta es 0). Así pues, resulta ser una propiedad intrínseca de toda función.

El radio de curvatura que deberá tenerse en cuenta siempre, dando igual el tipo de seguidor que se escoja.

Hay múltiples enfoques para la determinación del radio de curvatura dependiendo del autor que se consulte, por poner ejemplos significativos Chen (1982) utiliza varios métodos (método del polo de velocidades, método de las variables complejas, y métodos de aproximado de Krasnikov), obteniendo diferentes expresiones para el cálculo del radio de curvatura; Norton (1995), sustituye en la expresión paramétrica (a través de dos ecuaciones de cierre vectorial), obtenida por cálculo diferencial, para el cálculo del radio de curvatura de una curva plana, las derivadas correspondientes de las

expresiones para el cálculo del perfil obteniendo las ecuaciones del radio de curvatura según el tipo de palpador.

Otros autores fijan unos gráficos donde podremos encontrar los radios mínimos de curvatura del perfil en función de la ley de desplazamiento elegida (cicloidal, armónica simple o modificada) y del radio primario de la leva.

En CAM-DAS se utilizaran los siguientes métodos:

- La primera es a través de la expresión matemática que da el radio de curvatura para cualquier función, este método tiene la desventaja de que previamente debe conocerse el contorno de la leva, esto no es en sí un problema para el caso que concierne puesto que uno de los resultados que se obtienen con CAM-DAS son las coordenadas de dicho contorno.
- La segunda es a partir de desarrollos matemáticos que emplean la teoría de levas para establecer analíticamente el radio de curvatura en función del ángulo de rotación, el diagrama de desplazamiento, y sus derivadas.

El primer método ha sido implementado en CAM-DAS para el caso de un seguidor oscilante de cara plana y para el rodillo traslacional excéntrico. El segundo ha sido empleado en el resto. Este doble camino ha permitido plantear un método de validación (allí donde existía más de una alternativa) en la creación del programa al poder establecer durante el proceso de programación los dos métodos en paralelo comparando satisfactoriamente los resultados.

### 5.1.1 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana de movimiento oscilante o seguidor de rodillo traslacional (excéntrico)

- De forma genérica el radio de curvatura ( $\rho$ ) de una función  $R=R(\Omega)$  en polares viene dado por<sup>1</sup>:

$$\rho = \frac{\left[ R^2 + \left( \frac{dR}{d\Omega} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{R^2 + 2 \left( \frac{dR}{d\Omega} \right)^2 - R \frac{d^2R}{d\Omega^2}}$$

No debe confundirse el ángulo  $\Omega$ , con el de rotación  $\phi$ , hay que considerar a la leva de forma estática, detenida en una posición, es su contorno el que interesa. En el capítulo anterior se planteó como generar un perfil en función del tipo de seguidor, como resultado se obtuvo una colección de puntos en coordenadas polares formados por el radio y el ángulo, y que determinan el perfil de la leva. Son esos puntos ( $R$ ) y esos ángulos ( $\Omega$ ) los que se pueden emplear para determinar el radio de curvatura en cada punto del perfil de la leva. En CAM-DAS se obtiene de forma discreta las coordenadas del perfil con 1° de precisión angular. Habiéndose planteado una salida de 361 puntos, donde el primero y el último son iguales y deben coincidir (0° y 360°), se puede realizar el cálculo del radio de curvatura discretizando las derivadas que contiene la expresión analítica:

$$\left( \frac{dR}{d\Omega} \right)_i = \frac{R(\Omega)_{i+1} - R(\Omega)_{i-1}}{\Omega_{i+1} - \Omega_{i-1}}$$

$$\left( \frac{d^2R}{d\Omega^2} \right)_i = \frac{\left( \frac{dR}{d\Omega} \right)_{i+1} - \left( \frac{dR}{d\Omega} \right)_{i-1}}{\Omega_{i+1} - \Omega_{i-1}}$$

Se recuerda que para cada ángulo de rotación ( $\phi$ ) existe un par de valores (ángulo  $\Omega$  y radio  $R$ ) relativos a las coordenadas de un punto del perfil, lo que permite obtener el radio de curvatura para cada uno de dichos puntos.

A continuación se tratan los otros tres casos. En todos ellos la nomenclatura empleada es la misma que en el capítulo anterior, por comodidad se repetirá su significado, para mayor claridad puede acudir a las figuras de dicho capítulo que ilustraban todas las magnitudes.

### 5.1.2 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana de movimiento traslacional<sup>2</sup>

➤  $\rho = Rb + S + a$

$Rb$ : radio base de la leva

$S = S(\phi)$ : ley de desplazamiento

$\phi$ : ángulo de rotación

$$a = \frac{d^2 S}{d\phi^2}$$

### 5.1.3 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de movimiento traslacional (no excéntrico)<sup>3</sup>

➤ 
$$\rho_{\text{paso}} = \frac{\left[ (Rp + S)^2 + v^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{(Rp + S)^2 + 2v^2 - a(Rp + S)}$$

$Rp = Rf + Rb$ ;  $Rp$ : radio primario;  $Rf$ : radio del seguidor.

$S = S(\phi)$ : ley de desplazamiento

---

<sup>1</sup> Mecanismos y dinámica de maquinaria. Mabie-Reinholtz.Limusa, Grupo Noriega Editores 1998.

<sup>2</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton. Mc. Graw Hill 1995

<sup>3</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton, Mc Graw Hill 1995.

$\phi$ : ángulo de rotación

$$v = \frac{dS}{d\phi}$$

$$a = \frac{d^2S}{d\phi^2}$$

#### 5.1.4 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de movimiento oscilante<sup>4</sup>

$$\rho_{\text{paso}} = \frac{(C^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}}{(C^2 + D^2)(1 + \xi') - mC\xi' + m(\text{sen}\xi)A\xi''}$$

$$C = m + A\cos[\xi(1 + \xi')]$$

$$D = A\text{sen}[\xi(1 + \xi')]$$

m: distancia entre el centro de la leva y el eje de giro del brazo del seguidor.

A: longitud del brazo del seguidor, desde su eje de giro hasta el eje del rodillo.

$\xi = \xi_0 + \delta(\phi)$ : ley de movimiento angular que se quiere siga el seguidor:

$\phi$ : ángulo girado por la leva medido desde una referencia fija cualquiera.

$\xi$ : es el requerimiento que se debe plantear para la salida. Se trata de un movimiento angular que varía en función del ángulo de rotación de la leva  $\phi$ .

$\xi_0$ : es el desplazamiento angular inicial del seguidor cuando este descansa sobre el perfil de la leva antes de producirse ninguna elevación, es decir, sobre el círculo base. Viene determinado por los parámetros geométricos que se consideren para el conjunto leva-seguidor, en concreto :

<sup>4</sup> Mecanismos y dinámica de maquinaria. Mabie-Reinholtz.Limusa, Grupo Noriega Editores 1998

$$\xi_0 = \text{Arcos} \left[ \frac{A^2 + m^2 - (Rb + Rf)^2}{2mA} \right]$$

$\delta(\phi)$ : movimiento angular que cumple las condiciones de continuidad, es decir, es continuo para todo  $\phi$  tanto en sí mismo como para sus dos primeras derivadas (como mínimo).

### 5.1.5 Análisis de la función radio de curvatura.

Cuando se genera un contorno puede ocurrir que tal leva no sea conformable en la práctica para que dé como resultado el movimiento pretendido para el seguidor, debido a que el trazado de su silueta se cruza sobre sí mismo (rebaje o socavación) o bien que siendo conformable, se creen puntas, es decir, zonas agudas conocidas como cúspides que harían que el seguidor no se moviese bien.

Para detectar estas posibles características del perfil de leva generado se utiliza el radio de curvatura. En el primero de los casos se puede utilizar la forma de cálculo que se dio para el seguidor oscilante de cara plana y el de rodillo traslacional excéntrico. Para el segundo caso es necesario conocer la expresión específica para cada tipo de seguidor (de acuerdo a su forma y movimiento), expresiones que se han visto para cada uno de los otros tres tipos. Lo que ahora hace falta decir es qué valores del radio de curvatura son indicativos de la presencia de cúspides o rebajes en el perfil de la leva, y una vez establecidos, adaptar las características del mecanismo para evitar que se dé tal situación.

Para las levas alternativas este parámetro no se tendrá en cuenta debido a que la propia ley de desplazamiento define el perfil de leva, y por tanto, no sería lógico crear un perfil con picos o socavaciones.



### 5.1.5.1 Levas planas de rotación con seguidores de rodillo.

En el caso de una leva con seguidor de rodillo, el radio de curvatura del perfil de la leva ( $\rho$ ) y el de la curva de paso ( $\rho_{\text{paso}}$ ), difieren en el radio del rodillo ( $R_f$ ), por ello podemos plantear la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_{\text{paso}} - R_f$$

Teniendo en cuenta la anterior ecuación los problemas que se pueden presentar en el contacto leva-seguidor son los siguientes:

- Cuando  $\rho < 0$ , hay tramos cóncavos en el perfil de la leva. Se ha de verificar que  $|\rho| > R_f$ . En caso contrario, el rodillo no puede acceder al punto teórico de contacto leva-seguidor (Figura 5.1)
- Si  $\rho_{\text{paso}} > 0$ , hay tramos convexos de la curva de paso. Se debe de verificar que  $\rho_{\text{paso}} > R_f$ . En el caso de  $\rho_{\text{paso}} = R_f$ , se generaría un vértice ( $\rho = 0$ ) en el perfil de la leva. Si  $\rho_{\text{paso}} < R_f$ , ocurriría el fenómeno del rebaje (Figura 5.2)

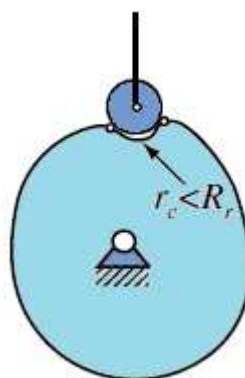


Fig. 5.1: Características geométricas que impiden el contacto leva-seguidor.

Para evitar las situaciones perjudiciales, debemos conseguir que  $R_f < \rho_{\text{paso}}$ , para ello debemos tener en cuenta:

- Aumentar la excentricidad (valor absoluto) disminuye el radio de curvatura y por tanto, empeora la situación.
- Mientras el radio primario se mantenga constante, el radio de curvatura no se modifica (resto de los parámetros también constantes), es decir, se puede aumentar  $R_f$  y disminuir  $R_b$  en la misma proporción, en ese caso el radio de curvatura de la curva de paso permanece invariable. Por tanto, se puede evitar un rebaje si se disminuye  $R_f$  y/o se aumenta  $R_b$ . La acción contraria, es decir, aumentar  $R_f$  y/o disminuir  $R_b$  agravará el problema.

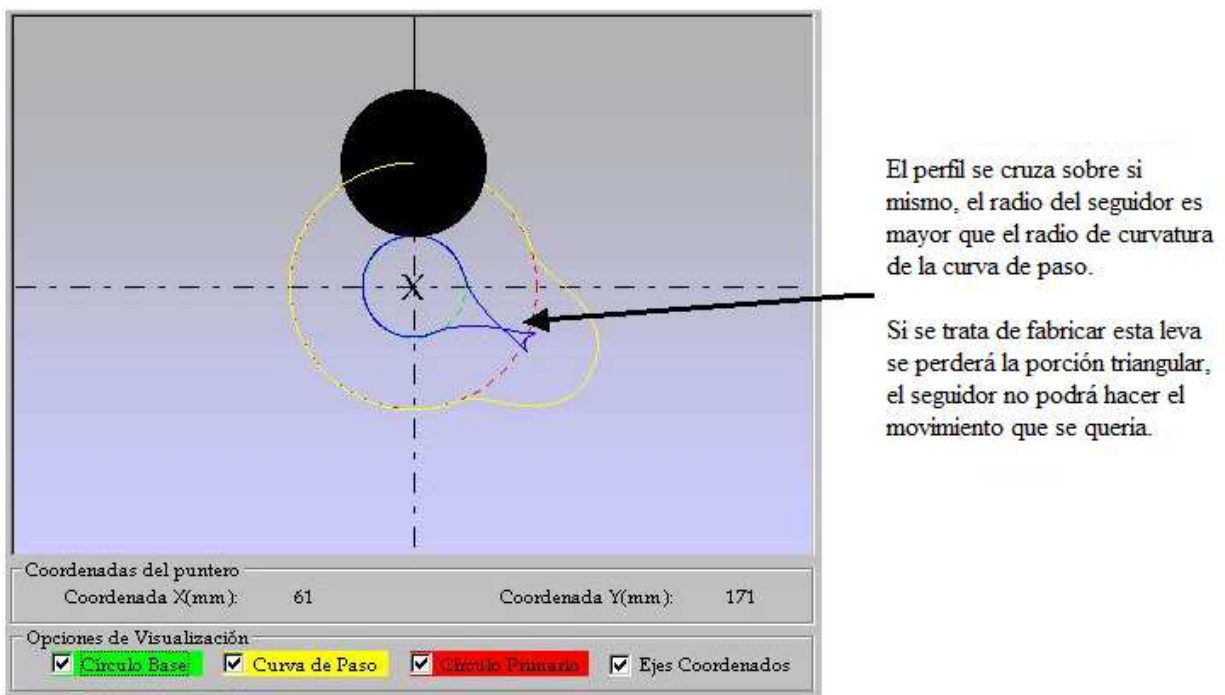
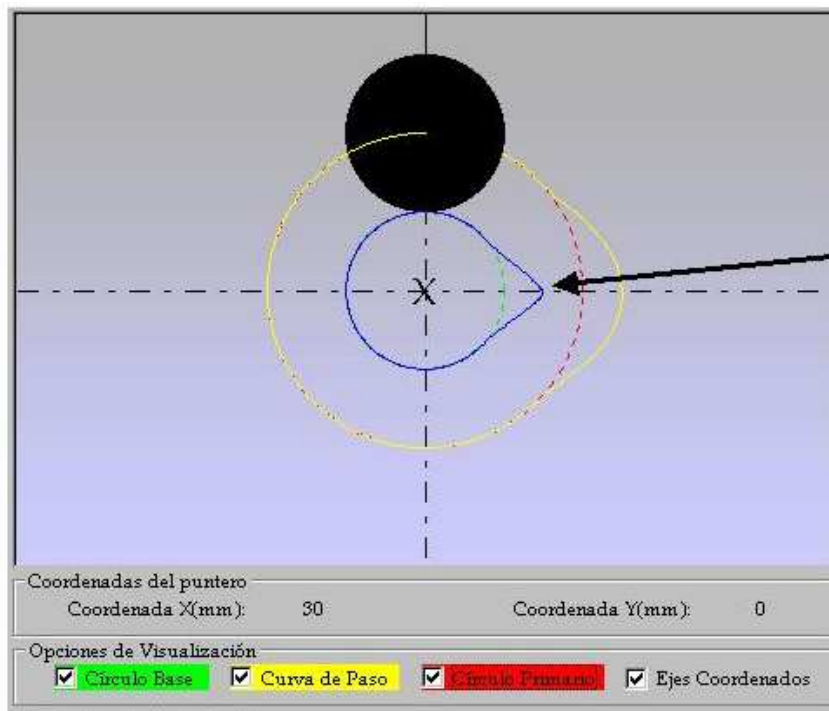


Fig. 5.2: Rebaje en el contorno.



Se ha creado una cúspide .  
El radio de curvatura de la  
curva de paso iguala al  
radio del seguidor en ese  
punto.  
el radio de curvatura del  
contorno es 0.

Fig. 5.3: Cúspide en el contorno

### 5.1.5.2 Levas planas de rotación con seguidores de cara plana.

En estos casos no existe curva de paso, y el parámetro es el radio de curvatura del perfil de la leva. No obstante, la situación es similar a la anterior:

- Si siempre  $\rho > 0$ , la leva es convexa y el seguidor podrá acceder al punto teórico de contacto sin problemas.
- Cuando  $\rho = 0$ , aparece un vértice o una punta en el perfil de la leva , lo cual conlleva la presencia de presiones muy elevadas en el punto de contacto leva-seguidor, aspecto no deseado (Figura 5.4).
- Un tramo  $\rho < 0$  entre dos puntos de retroceso ( $\rho = 0$ ) corresponde a un rebaje en el perfil que, además de originar un pico, impide seguir la ley de desplazamiento especificada porque el perfil se cruza sobre sí mismo (Figura 5.5).

Para modificar una situación problemática y evitar el rebaje se pueden tener en cuenta los siguientes puntos:

- En seguidores traslacionales: al aumentar  $R_b$ , el radio de curvatura se incrementa en la misma cantidad. La representación gráfica del radio de curvatura en función del ángulo de rotación se desplaza hacia arriba en la misma proporción.
- En seguidores oscilantes: al aumentar  $R_b$  también se incrementa el radio de curvatura, pero no necesariamente en la misma proporción.

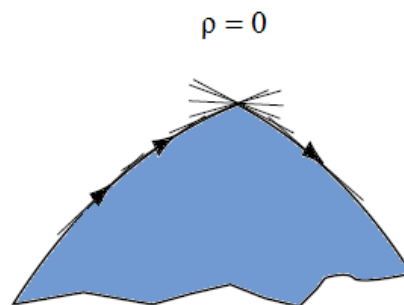


Fig. 5.4: Vértice en el contorno.

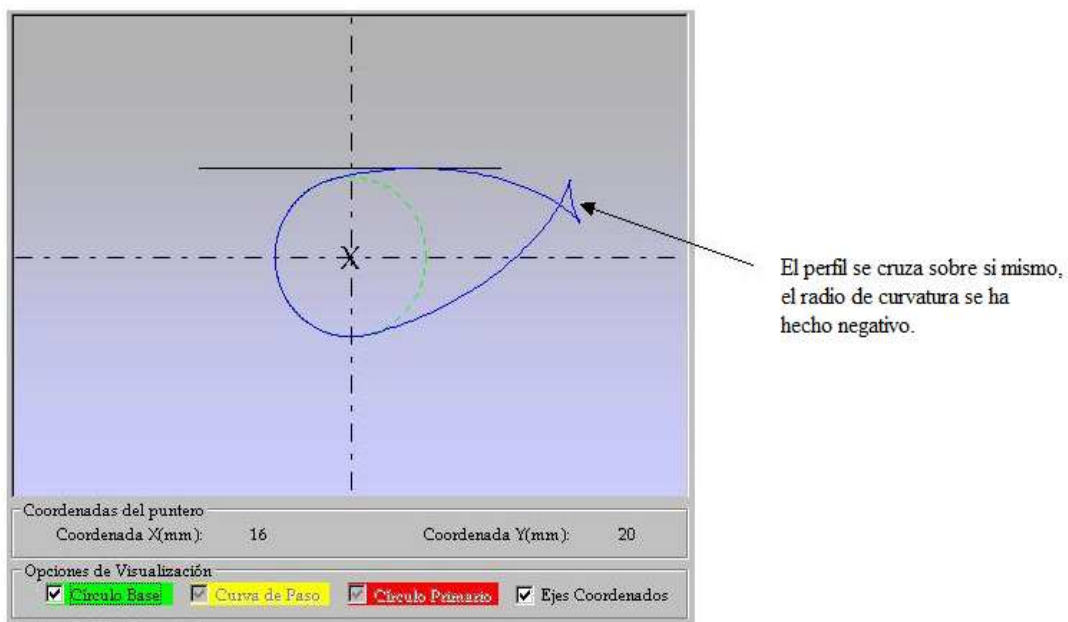


Fig. 5.5: Rebaje en el contorno.

## 5.2 Ángulo de presión

El ángulo de presión es el que forma la dirección de aplicación de la fuerza entre la leva y el seguidor, es decir, la normal común a ambas superficies (eje de transmisión), con la dirección del movimiento de éste. De la descripción se deduce que para un seguidor de cara plana, tanto traslacional como oscilante, si la dirección de aplicación de la fuerza es normal a la superficie de contacto, entonces es perpendicular a su cara y coincide con la dirección de su movimiento, por lo que el ángulo de presión para este tipo de seguidores es nulo, o dicho de un modo más simple, la dirección de aplicación de la fuerza y la dirección de su movimiento son iguales. Por eso para éstos no se considera el ángulo de presión como un parámetro a tener en cuenta en el cálculo. Bien es cierto que podrían existir seguidores con cara plana tal que ésta no fuese perpendicular a su movimiento, pero no es ninguno de los casos que se está tratando. En los seguidores de rodillo el punto que se toma para determinar la dirección de su movimiento es su centro. En ellos el ángulo de presión ofrece una idea de la facilidad con la que la leva transmite el movimiento al seguidor: si es muy elevado el seguidor puede atascarse o moverse con dificultad, además, en los oscilantes aumenta el rozamiento en el pivote sobre el que gira el brazo, todo esto obliga a tratar de minimizarlo cuando se calcula una leva con un seguidor de rodillo.

Existen desarrollos que plantean analíticamente el cálculo del ángulo de presión en función de magnitudes geométricas y de las curvas de desplazamiento y sus derivadas. No obstante, este mismo cálculo puede llevarse a cabo si se emplea para ello el algoritmo planteado en el capítulo anterior para el desarrollo del perfil. Se obtendrá así el ángulo de presión en función de los valores que va tomando el ángulo de rotación  $\phi$ .

### 5.2.1 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo traslacional

En la figura 5.6 puede verse el ángulo de presión ( $\delta$ ) para este tipo de seguidores, de la figura se deduce que:

- $\delta = \alpha - \psi$  ; el algoritmo desarrollado en el capítulo anterior, e implementado en CAM-DAS, sirve simultáneamente para el cálculo de las coordenadas del perfil y del ángulo de presión en cada punto del contorno de la leva en contacto con el seguidor.

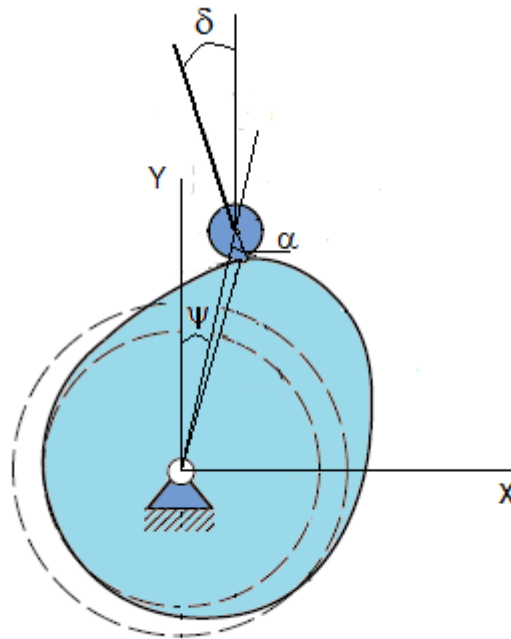


Figura 5.6: Ángulo de presión rodillo traslacional

### 5.2.2 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo oscilante

En la figura 5.7 puede verse el planteamiento del ángulo de presión ( $\delta$ ). De nuevo el mismo algoritmo que genera el perfil va a permitir su cálculo

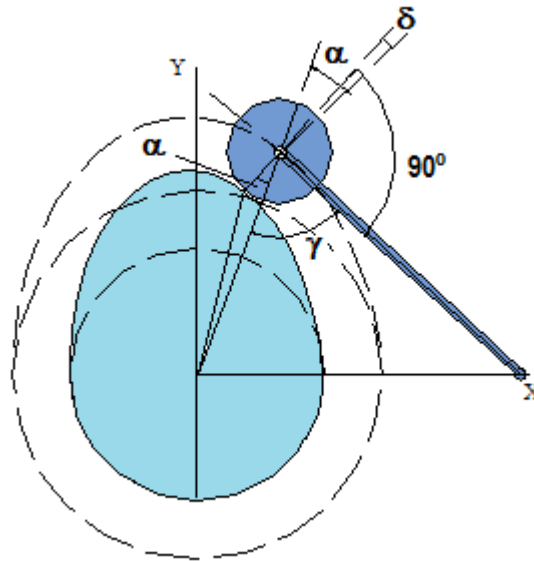


Figura 5.7: Ángulo de presión rodillo oscilante

$$\delta = \gamma + \alpha - \frac{\pi}{2}$$

### 5.2.3 Análisis del ángulo de presión

#### 5.2.3.1 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo traslacional

El ángulo de presión puede tomar signo positivo o negativo en función de los valores relativos de sus dos componentes. Sin embargo, lo que importa es que su valor absoluto no exceda<sup>5</sup> de los 30°, cuando esto ocurre se deben realizar modificaciones para disminuirlo:

- Aumentar el radio base disminuye el ángulo de presión, pero tiene el inconveniente de que la leva ocupará más espacio (con las consecuencias económicas añadidas), lo que puede no ser factible.
- A veces es posible cumplir las restricciones de contorno mediante más de un tipo de curva, su elección también se puede ver influenciada por el ángulo de presión, ya

<sup>5</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton, Mc Graw Hill 1995.

que pueden dar lugar a diferentes valores máximos. Esto suele pasar cuando las condiciones de contorno relevantes son las de desplazamiento; si hay que ajustarse a condiciones de velocidad y/o aceleración y/o sobreaceleración, entonces no es probable que haya varias alternativas.

- Al aumentar la excentricidad (sentido positivo hacia la derecha del dibujo) se modifica la forma de la curva del ángulo de presión y la desplaza hacia arriba, quedando siempre por encima de la anterior. Ocurre lo inverso al aumentar la excentricidad hacia el otro lado, en este caso se modifica y se desplaza hacia abajo. En la medida de lo posible se trata de buscar, de forma iterativa, un valor intermedio que minimice el ángulo.
- Aumentar el radio del seguidor hace disminuir el ángulo de presión máximo (en valor absoluto), los inconvenientes son los mismos que aumentar el radio base de la leva.

### **5.2.3.2 Leva plana de rotación con seguidor de rodillo de oscilante**

En este caso se puede permitir<sup>6</sup> un ángulo de presión de hasta 35°. Un proceso de optimización o mejora puede ser más complicado que en el caso anterior porque hay que tener en cuenta varios parámetros más, sin embargo se puede afirmar que:

- Al aumentar el radio del seguidor ocurre algo semejante a lo que pasaba con la excentricidad en el caso del rodillo traslacional: la curva del ángulo de presión resultante queda por debajo. Si el seguidor se hace más pequeño, la curva resultante queda por encima, de modo que hay que buscar un valor intermedio del radio del seguidor para que el máximo en valor absoluto de las curvas sea el mínimo de todas ellas (mínimo de los máximos en valor absoluto).
- Si se aumenta el radio base el efecto es el mismo que en el caso anterior cuando se hacía al seguidor más grande.

---

<sup>6</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton, Mc Graw Hill 1995.



- Aumentar la distancia entre el pivote del brazo del seguidor y el centro de giro de la leva produce una curva de ángulo de presión resultante por debajo de la anterior.
- Aumentar la longitud del brazo del seguidor dibuja una curva de ángulo de presión por debajo de la original.

Se aprecia que puede resultar verdaderamente complicado llegar a una solución suficientemente buena. Se ven involucradas demasiadas magnitudes, y por si fuese poco, el ángulo de presión no es el único criterio a tener en cuenta en el cálculo, también hay que considerar el radio de curvatura del perfil de la leva.

### 5.2.3.3 Leva alternativa o traslacional

El ángulo de presión puede tomar signo positivo o negativo en función de los valores relativos de sus dos componentes y determinará la relación de contacto F leva-palpador y la componente de ésta en la dirección del movimiento del palpador (fuerza útil). En la práctica se recomienda que el ángulo de presión esté entre 0 y unos 30°, valores mayores harían aumentar la fricción e incluso podría producirse el acuñaamiento del palpador, cuando esto ocurre se deben realizar modificaciones para disminuirlo:

- A veces es posible cumplir las restricciones de contorno mediante más de un tipo de curva, su elección también se puede ver influenciada por el ángulo de presión, ya que pueden dar lugar a diferentes valores máximos. Esto suele pasar cuando las condiciones de contorno relevantes son las de desplazamiento; si hay que ajustarse a condiciones de velocidad y/o aceleración y/o sobreaceleración, entonces no es probable que haya varias alternativas.
- Aumentar el radio del seguidor hace disminuir el ángulo de presión máximo (en valor absoluto)

### 5.3 Longitud de seguidores de cara plana

Tanto en el seguidor oscilante como en el traslacional, la longitud del seguidor es un parámetro que no influye en los resultados del cálculo, la generación del perfil no precisa en ningún momento de esta magnitud. Sin embargo, es un resultado que hay que determinar porque se trata de una condición necesaria para asegurar el contacto permanente entre la leva y el seguidor. El punto de contacto se desplaza a lo largo de la cara plana de acuerdo a la forma de la leva, son las posiciones de dicho punto y en concreto las de máximo alejamiento (véase cada caso particular para las referencias) las que van a determinar la longitud mínima de la cara del seguidor. Como en el caso del radio de curvatura, existe un método analítico a priori, esta vez sólo para los seguidores traslacionales, y un método a posteriori que se valdrá del algoritmo desarrollado en el capítulo anterior. El objetivo es determinar el valor mínimo de la longitud que debe exigirse al seguidor. Visualmente puede comprobarse sobre la aplicación como el punto de contacto se desplaza hasta una posición extrema que va a determinar dicha longitud, en la práctica es necesario agregar un margen de seguridad sobre este valor mínimo.

#### 5.3.1 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana traslacional

El método implementado en CAM-DAS se ayuda del mencionado algoritmo para determinar la longitud mínima en los seguidores de cara plana traslacionales. Volviendo a la figura 4.3a, se observa que la distancia izquierda del punto de contacto al eje de ordenadas es  $R\sin\theta$ ; para cada ángulo de rotación se puede hallar dicho valor. Completada una vuelta, es decir, para  $360^\circ$ , se tendrá un conjunto de valores, de los cuales el máximo será la longitud mínima que debe tener el seguidor a izquierdas del eje de ordenadas. La longitud a derechas no tiene porque ser igual que a izquierdas, dependerá de si el perfil que se crea es simétrico o no, así que, debe calcularse independientemente (valores de  $\theta$  negativos). Por tanto, para cada ángulo de rotación se calcula la distancia izquierda y derecha del punto de contacto leva-seguidor al eje de ordenadas, completada una vuelta se tendrá un conjunto de valores positivos para las

distancias a izquierdas y negativos a derechas. Tomando el máximo y el mínimo de cada grupo respectivamente se dispondrá de la longitud que a cada lado debe tener el seguidor.

El método a priori<sup>7</sup> establece que la longitud del seguidor coincide con la distancia pico a pico máxima del diagrama de velocidad (longitud/tiempo) dividida por la velocidad angular, o lo que es lo mismo, la distancia pico a pico del diagrama de la primera derivada del desplazamiento con respecto al ángulo de rotación. La longitud derecha es el máximo y la izquierda el mínimo. Esto puede observarse perfectamente sobre la aplicación.

### 5.3.2 Leva plana de rotación con seguidor de cara plana oscilante

El cálculo es semejante al utilizado para el seguidor traslacional. Ahora la distancia que se debe considerar es la que hay desde el punto de contacto leva-seguidor hasta el vértice en el que se forma el ángulo recto (“Excentricidad”  $\neq 0$ ) o hasta el pivote de giro del brazo (“Excentricidad” = 0), medida sobre la cara del seguidor. La longitud para cada ángulo de rotación  $\phi$  es  $m\cos\xi + R\sin\theta$  (ver figura 4.4a). Por tanto, la cara del seguidor debe ser al menos como el  $\text{Max}[m\cos\xi + R\sin\theta]$ .

---

<sup>7</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton. Mc. Graw Hill 1995

## Capítulo 6: Entorno software y diagramas de funcionamiento.

### 6.1 Entorno software: Visual Basic 6.0

La aplicación informática CAM-DAS, ha sido implementada con Visual Basic 6.0. Visual Basic es un lenguaje de programación que fue creado con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y, en cierta medida, también la programación misma. Desde el 2001 Microsoft ha propuesto abandonar el desarrollo basado en la API Win32 y pasar a trabajar sobre un framework o marco común de librerías independiente de la versión del sistema operativo, .NET Framework, a través de Visual Basic .NET (y otros lenguajes como C Sharp (C#) de fácil transición de código entre ellos).

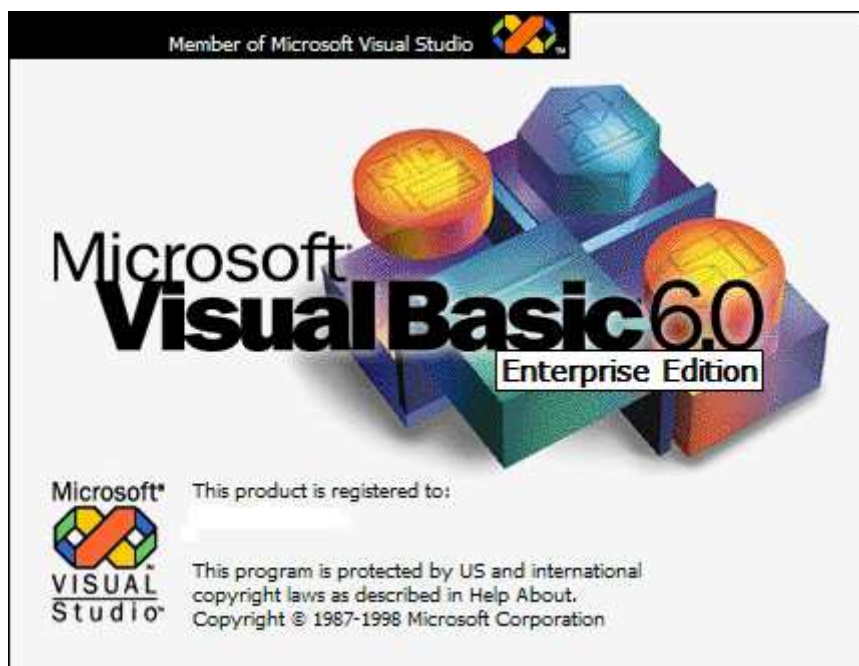


Fig.6.1: Pantalla de inicio de Visual Basic 6.0.

Visual Basic constituye un IDE (entorno de desarrollo integrado, o, en inglés, Integrated Development Environment) que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, consiste en un editor de código (programa donde se escribe el código fuente),

un depurador (programa que corrige errores en el código fuente para que pueda ser bien compilado), un compilador (programa que traduce el código fuente a lenguaje de máquina), y un constructor de interfaz gráfica o GUI (es una forma de programar en la que no es necesario escribir el código para la parte gráfica del programa, sino que se puede hacer de forma visual).

El compilador de Visual Basic 6.0 genera ejecutables que requieren una DLL para que funcionen, en algunos casos llamada MSVBVMxy.DLL (acrónimo de "MicroSoft Visual Basic Virtual Machine x.y", siendo x.y la versión) y en otros VBRUNXXX.DLL ("Visual Basic Runtime X.XX"), que provee todas las funciones implementadas en el lenguaje. Además existe un gran número de bibliotecas (DLL) que facilitan el acceso a muchas funciones del sistema operativo y la integración con otras aplicaciones.

Su entorno de desarrollo es muy similar al de otros lenguajes e IDE's. Se compone principalmente por los siguientes elementos:

- Barra de título: muestra el nombre del proyecto y del formulario q se está diseñando actualmente.
- Barra de menús: agrupa los menús despegables que contienen todas las operaciones que pueden llevarse a cabo con Visual Basic 6.0.
- Barra de herramientas estándar: contienen los botones que se utilizan con mayor frecuencia cuando se trabaja con un proyecto. Simplifica la elección de opciones de los menús Archivo, Edición, Ver y Ejecutar; además, en el área derecha presenta la ubicación (coordenadas) y el tamaño del objeto seleccionado
- Ventana de formulario: es el área donde se diseña la interfaz gráfica, es decir, es donde se inserta electo gráficos, como botones, imágenes, casilla de verificación, cuadros de listas, etc.
- Cuadro de herramientas: presenta todos los controles necesarios para diseñar una aplicación, como cuadros de texto, etiquetas, cuadros de listas, botones de comandos, etc.

- Ventana de proyecto: muestra los elementos involucrados en el proyecto, como formularios, módulos, controles oxc, etc. Cada elemento puede seleccionarse en forma independiente para su edición.
- Ventana de posición del formulario: muestra la ubicación que tendrá el formulario en la pantalla, cuando ejecute la aplicación. Esta ubicación puede cambiarse si se hace clic con el botón izquierdo del mouse.
- La Ventana propiedades muestra todas las propiedades del control actualmente seleccionado, en este caso muestra las propiedades del Form1, después se puede ver que abajo dice "Form1 Form", en negrita se ve el nombre del objeto, y lo que le sigue es el tipo de objeto, en este caso es un Formulario (Form).

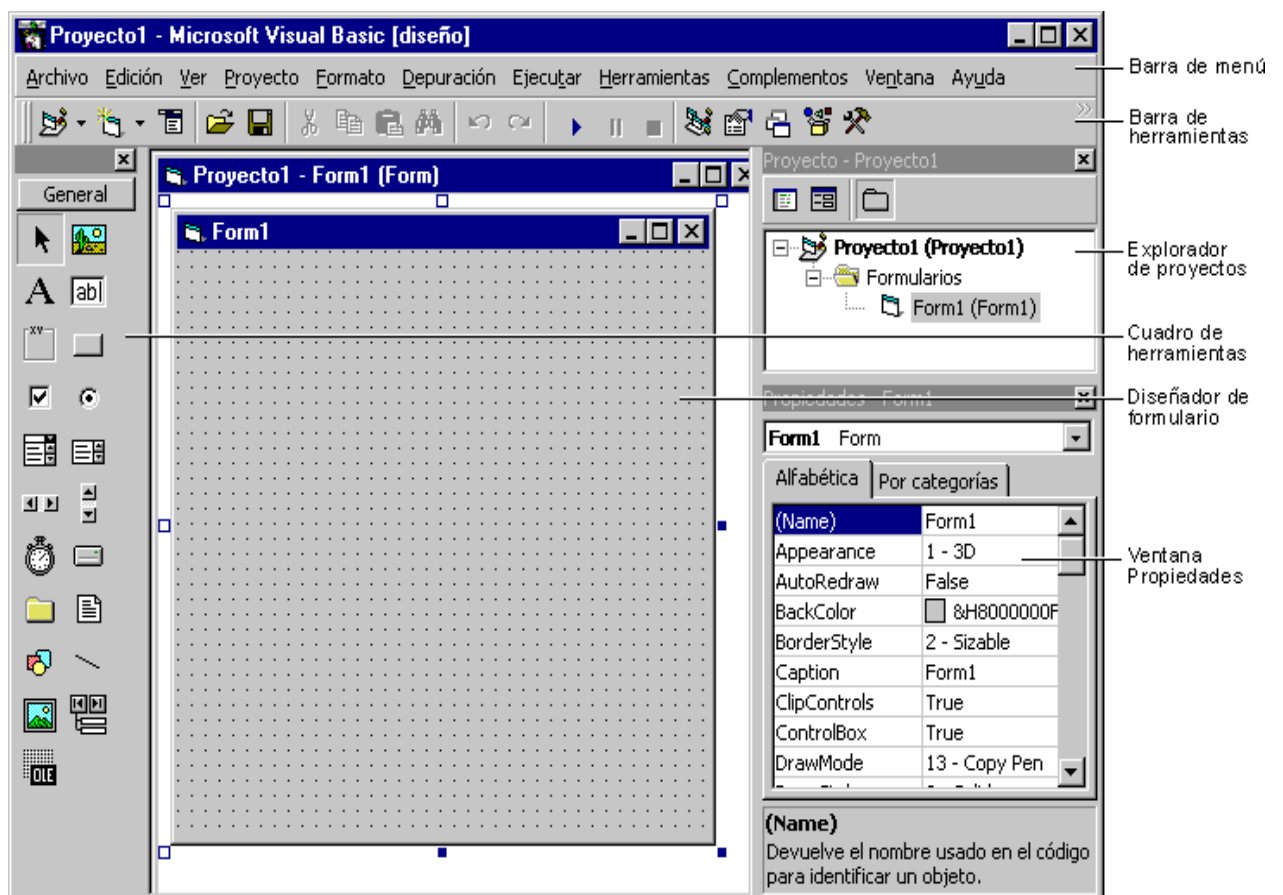


Fig.6.2: Entorno de Visual Basic 6.0.

Se puede decir que Visual Basic es un lenguaje orientado a eventos. En las aplicaciones tradicionales o "por procedimientos", la aplicación es la que controla qué partes de código y en qué secuencia se ejecutan. La ejecución comienza con la primera línea de código y continúa con una ruta predefinida a través de la aplicación, llamando a los procedimientos según se necesiten.

En una aplicación controlada por eventos, el código no sigue una ruta predeterminada; ejecuta distintas secciones de código como respuesta a los eventos. Los eventos pueden desencadenarse por acciones del usuario, por mensajes del sistema o de otras aplicaciones, o incluso por la propia aplicación. La secuencia de estos eventos determina la secuencia en la que se ejecuta el código, por lo que la ruta a través del código de la aplicación es diferente cada vez que se ejecuta el programa.

Tras crear la interfaz de usuario de su aplicación utilizando formularios y controles, se debe escribir el código que define el comportamiento de la aplicación. Al igual que con cualquier lenguaje de programación moderno, Visual Basic admite un gran número de constructores comunes de programación y elementos de lenguaje.

El esquema de programación es muy sencillo, para crear una aplicación, primero crearemos un formulario vacío sobre el que iremos poniendo los controles que deseemos, en tiempo de diseño podremos especificar las propiedades iniciales de esos controles. Posteriormente escribiremos el "código respuesta" a los eventos que queramos controlar de nuestros objetos. En ese "código respuesta", que es lo que llamaremos tiempo de ejecución, podremos modificar algunas propiedades de los objetos, lanzar métodos, ejecutar rutinas, llamar a otros procedimientos etc.

La elección de este lenguaje para implementar CAM-DAS, se debe a las siguientes ventajas que ofrece con respecto a otros entornos software:

- Es un lenguaje RAD (desarrollo rápido de aplicaciones, acrónimo en inglés de rapid application development)
- Posee una curva de aprendizaje muy rápida.
- Integra el diseño e implementación de formularios de Windows.

- Permite usar con suma facilidad la plataforma de los sistemas Windows, dado que tiene acceso prácticamente total a la API de Windows, incluidas librerías actuales.
- Es un lenguaje muy extendido, por lo que resulta fácil encontrar información, documentación y fuentes para los proyectos.

A pesar de las ventajas que anteriormente se enuncian se debe tener en cuenta que Visual Basic 6.0 presenta ciertos inconvenientes que limitan la implementación del programa, entre los que cabe destacar:









- Se presentan problemas a la hora de crear figuras sólidas con movimiento continuo.
- Visual Basic no da absoluta libertad sobre el diseño y código interno del programa.
- El tamaño de los archivos ejecutables creados es excesivamente grande, y es complejo llegar a abarcar todas sus funcionalidades.
- Crea dificultades a la hora de generar un programa orientado a internet.
- El depurador no es demasiado flexible ni cómodo en ciertas situaciones.



## 6.2 Diagramas de funcionamiento.

Los diagramas tratan de explicar el funcionamiento de la aplicación con una representación visual del camino que se sigue en el cálculo de una leva, siguiendo el orden de ejecución según las acciones realizadas.

A continuación se explica el significado de cada símbolo utilizado en los diagramas de flujo:

	Presentación del programa.
	Opciones que dará al usuario CAM-DAS.
	Información o datos que el usuario deberá introducir.
	Verificaciones que llevará a cabo CAM-DAS.
	Botones de cálculo sobre los que actuará el usuario.
	Cálculos realizados y muestra de datos.
	Verificación con respuesta predeterminada.
	Camino opcional a seguir si el usuario lo desea.

Los diagramas que a continuación se presentan ilustran el funcionamiento tanto interno del programa como las fases donde debe intervenir el usuario para completar el diseño y cálculo cinemático de la leva seleccionada. Para llevar a cabo el análisis CAM-DAS está compuesto por 15 formularios y 21 módulos. Incluyendo líneas de separación y comentarios la aplicación se compone de unas 10.000 líneas de código.

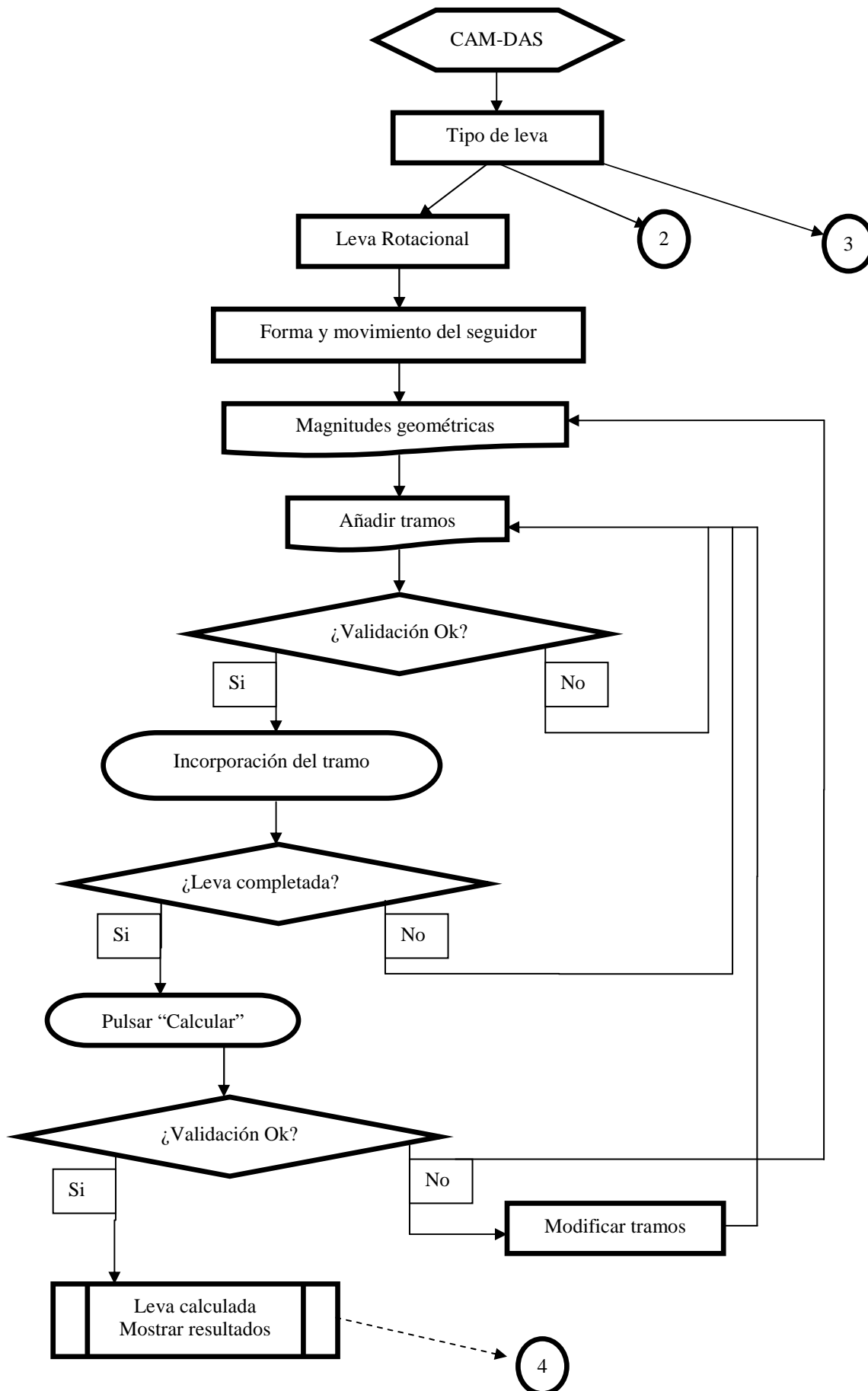
A grandes rasgos el funcionamiento del programa consiste en:

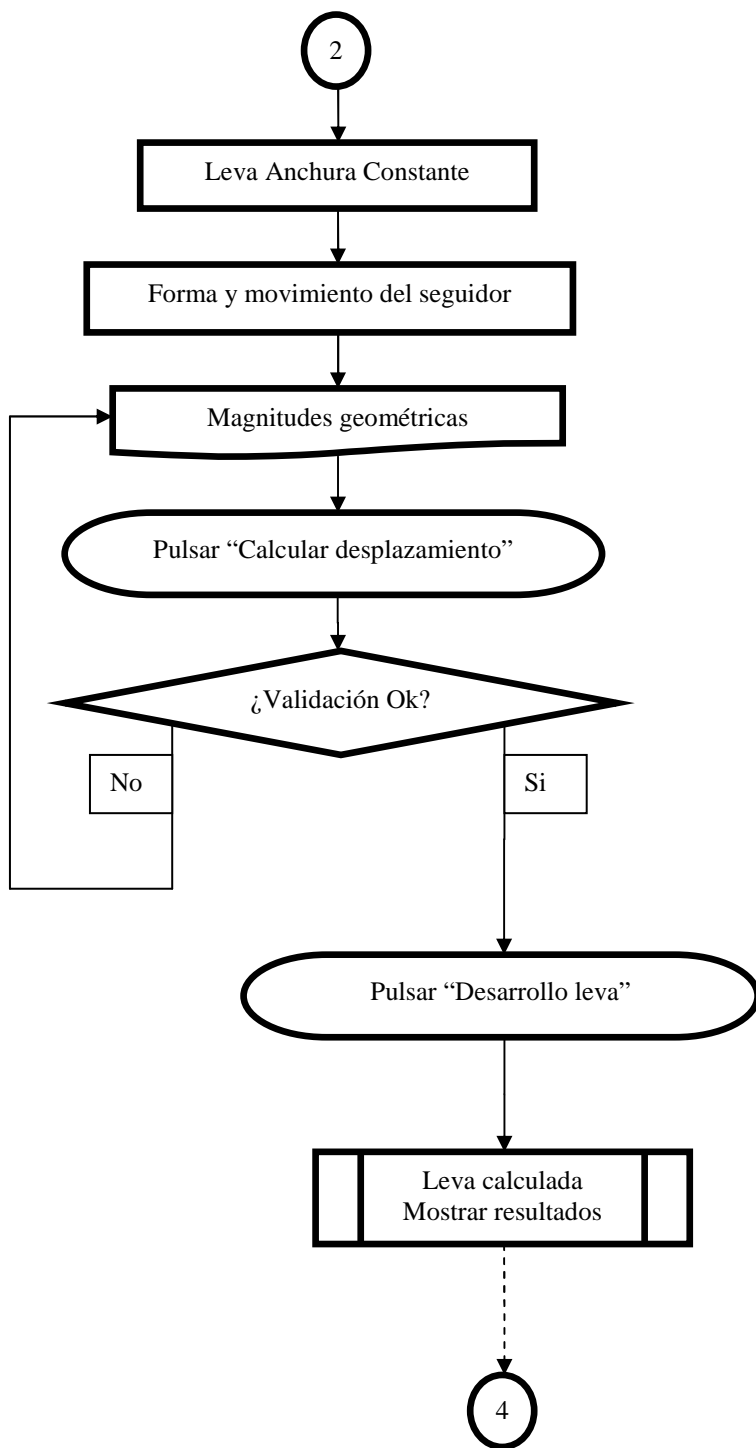
- Acorde al tipo de leva, forma y movimiento del seguidor seleccionado se adapta la interface para que el usuario introduzca los datos adecuados y se le pueda presentar toda la información en consonancia: unidades, gráficos etc.
- Cada vez que se añade un tramo lo primero que se realiza es un chequeo de los datos introducidos para comprobar que es válido y puede ser incluido. Si se trata de un polinómico genérico el programa permanece en espera hasta que se tengan sus condiciones de contorno, es entonces cuando se realizan los cálculos encaminados a hallar sus coeficientes; inmediatamente después el nuevo tramo polinómico es incluido.
- Los tramos se van evaluando acorde a la función seleccionada, almacenando sus valores de forma discreta en vectores públicos de 361 elementos, éstos son: desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración, donde el índice de cada vector se emplea como ángulo de rotación. De éste modo, la variedad de funciones particulares que se tiene de acuerdo a cada tipo de movimiento posible se transforma en sólo cuatro vectores que pueden tratarse como funciones individuales. La razón para discretizar las funciones en incrementos angulares de 1° fue porque esta precisión suele ser una de las más comunes para fabricación<sup>1</sup> CNC. Por otro lado, valores menores dificultarían la eficiencia del código, haciendo la ejecución del programa más lenta y su desarrollo y depuración más complicado.
- La introducción de datos se valida a nivel de campo impidiendo teclear caracteres no válidos. Existe un segundo filtro que trata de atajar errores conocidos (como en el caso de un rodillo traslacional, si se introduce un valor de excentricidad superior al radio primario). Un tercer filtro elimina combinaciones que no se pueden predecir hasta que no se procede al cálculo de la leva y que hacen que algún intervalo del perfil sea dibujado por debajo del círculo base. Errores de desbordamiento también se han tenido en cuenta. Si todo falla se tiene un control de error genérico que impedirá la interrupción de la ejecución y mostrará un mensaje con el error que se ha producido.

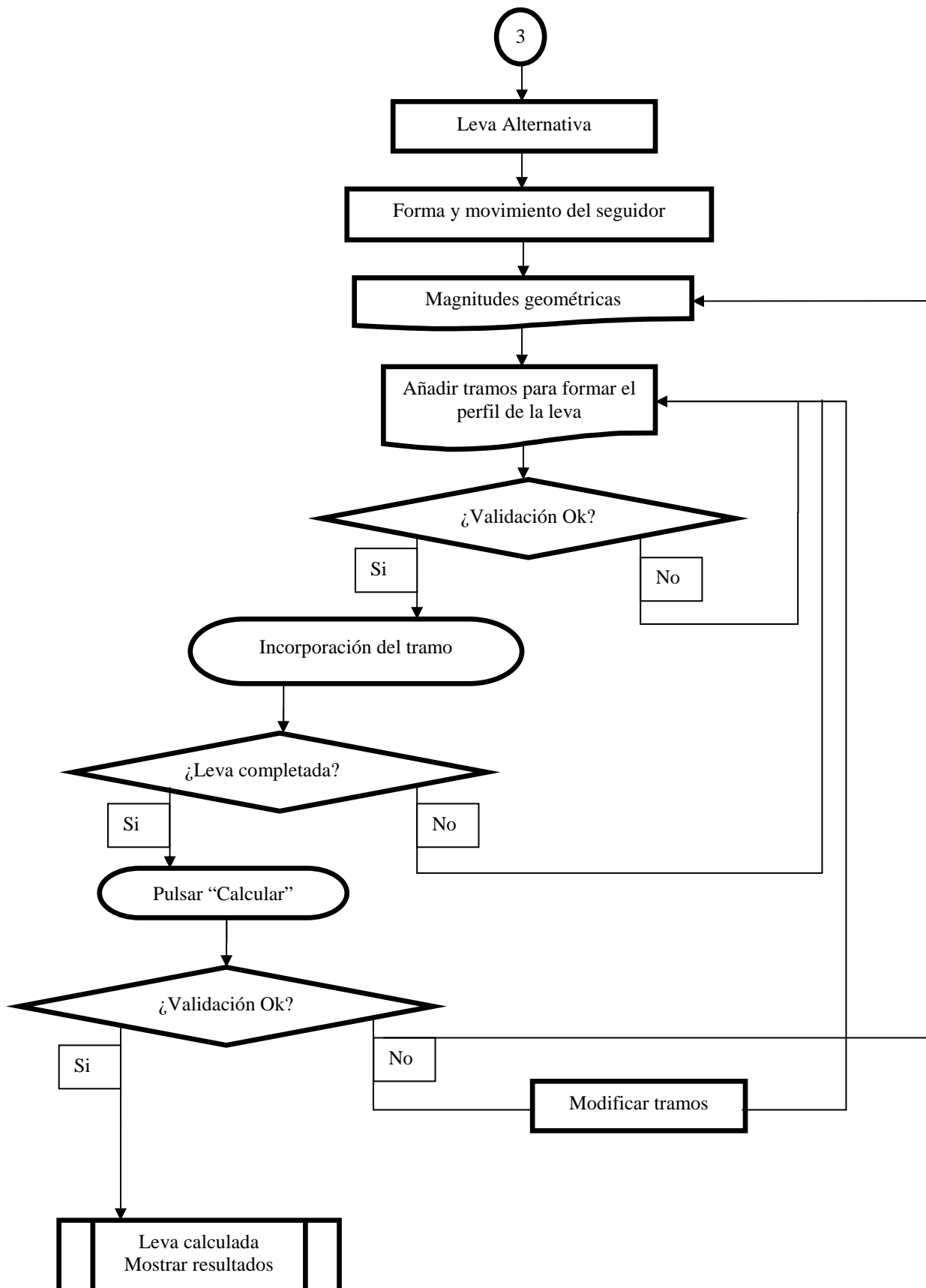
---

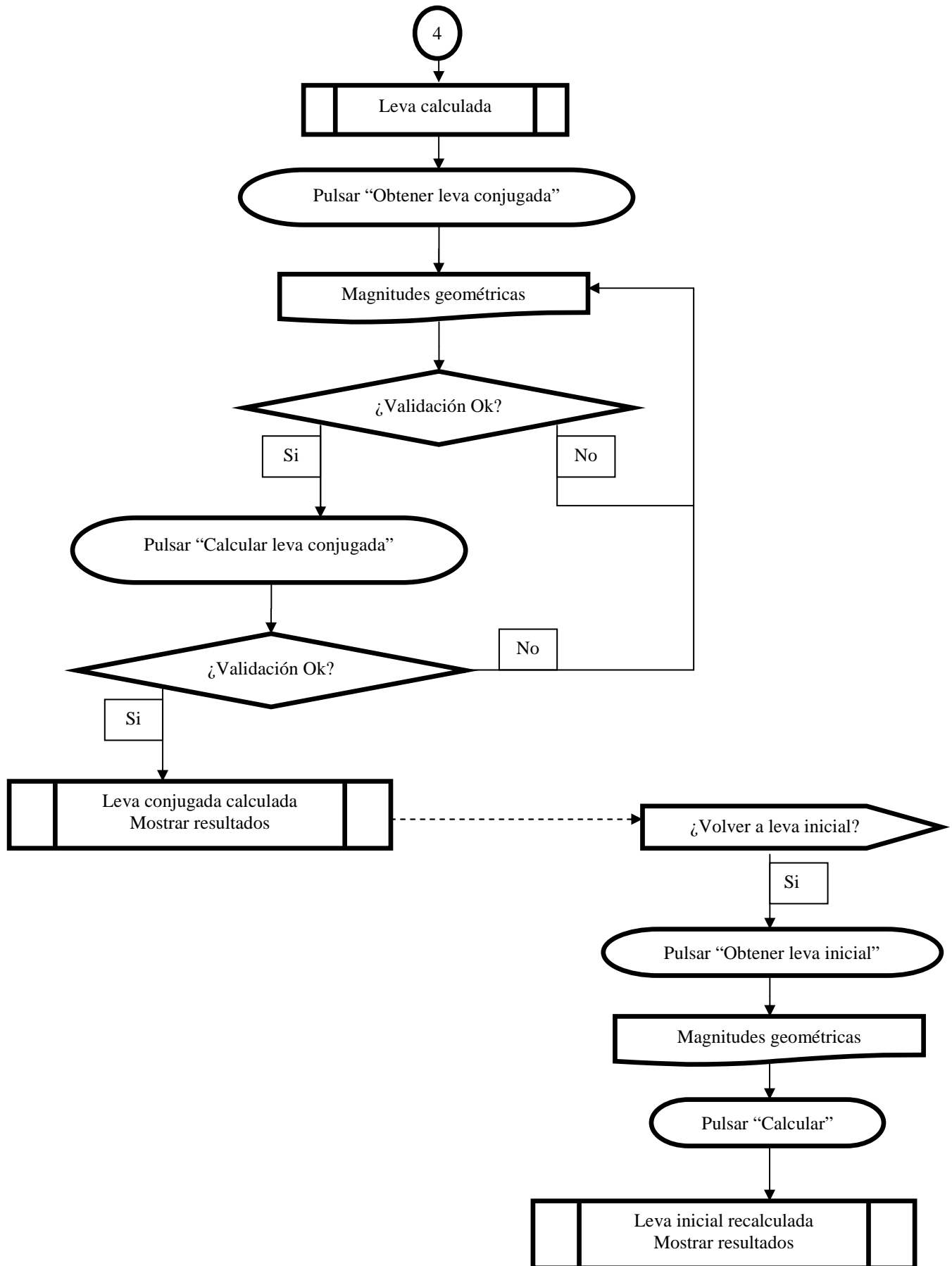
<sup>1</sup> Diseño de maquinaria. Robert L. Norton, Mc Graw Hill 1995.

- Cuando se realiza el cálculo, y si todo es correcto, resultados como el ángulo de presión, el radio de curvatura o las longitudes de los seguidores de cara plana, también se almacenan en vectores públicos, pues van a ser empleados en diferentes módulos. Tan solo los resultados referentes a la última leva se encuentran residentes; aunque la “Pizarra” esté abierta, ésta es sólo un elemento informativo que muestra un pequeño resumen de tales resultados.
- El funcionamiento del programa se ha hecho independiente de la configuración regional del sistema en el que se ejecute. En algunos ordenadores el separador decimal numérico empleado es la coma y en otros es el punto. Algunos de los controles que se muestran en la interface de usuario del programa emplean para sí separadores decimales y de miles de moneda, otros emplean los separadores de número. Si no se hubiese tenido en cuenta esta disparidad, la ejecución del programa en un ordenador con una configuración diferente a la que tuvo en su desarrollo hubiese impedido un funcionamiento correcto. La forma de resolverlo fue adaptar la aplicación para detectar la configuración del ordenador en el que se ejecuta y emplear el separador decimal numérico del mismo. De este modo, tanto si se pulsa la coma como si lo que se pulsa es el punto, el caracter que se presente en pantalla será el decimal de número configurado en ese ordenador (En Windows: Panel de control⇒ Configuración regional ⇒Número⇒ Símbolo decimal). Internamente Visual Basic 6.0 emplea el punto, sin embargo la asignación directa de valores numéricos desde algunos de los controles (por ejemplo una caja de texto) a variables, convierte dichos valores a su representación interna de acuerdo a la configuración de moneda; esto requirió crear una serie de funciones que sustituyen la coma por el punto o viceversa siempre que resulta necesario.
- El primer diagrama nos muestra los pasos a seguir para el diseño de una leva rotacional genérica. El segundo diagrama presenta el camino que seguirá CAM-DAS, con la ayuda del usuario, para obtener una leva de anchura constante .El tercer diagrama que se expone aborda la creación de una leva alternativa o traslacional. El último diagrama ofrece paso a paso la obtención de la leva conjugada de cualquier leva rotacional creada previamente con CAM-DAS.









## Capítulo 7: Manual de usuario del programa CAM-DAS

### 7.1 Introducción

#### ¿Qué es CAM-DAS?

CAM-DAS es una aplicación para el cálculo cinemático y la simulación de levas planas de rotación y levas alternativas, abordando los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, específicamente las levas conjugadas, y los mecanismos con levas de anchura y diámetro constante, y las levas alternativas o traslacionales.

Además de incluir el cálculo de estos mecanismos, se ha intentado lograr que la interfaz del usuario que nos presenta CAM-DAS brinde al usuario mayor comodidad, una notable comprensión del cálculo de levas y mayor eficiencia a la hora de manejar el programa.

El manual del usuario pretende ser la guía que ayude al usuario a familiarizarse con el entorno de CAM-DAS y optimice su utilización.

#### ¿Qué permite hacer CAM-DAS?

CAM-DAS permite el cálculo cinemático de levas planas de rotación y levas alternativas a partir de las características geométricas del mecanismo y de las especificaciones de movimiento deseadas para el seguidor, obteniéndose las coordenadas de su perfil con una precisión de 1°.

Ofrece resultados cuantitativos como el radio de curvatura, el ángulo de presión, o las longitudes mínimas de los seguidores de cara plana que es requisito necesario para asegurar el contacto entre la leva y su seguidor. Además, se obtienen conclusiones cualitativas de los cálculos bajo criterios teóricos contrastados. Permite la impresión de todos los resultados y su exportación de forma numérica conjunta en formato de Hoja



de Cálculo Excel. Es posible guardar en cualquier momento la leva en curso y su recuperación posterior. Puede almacenar los resultados obtenidos de un mismo tipo de leva en una pantalla independiente para que el usuario pueda llevar a cabo procesos de comparación y optimización.

CAM-DAS tiene el atractivo de ver el mecanismo leva-seguidor calculado en movimiento, pudiendo variar la velocidad de la simulación, detenerla en cualquier instante y establecer o no la visualización de elementos adicionales de apoyo. La posibilidad de ver en movimiento los dos elementos mecánicos ofrece información adicional que puede pasarse por alto en un cálculo tradicional, ya que es posible observar si se producirían interacciones entre la leva y el seguidor en otro punto que no es el de contacto teórico, y que puede estar causado por un error en la geometría y/o por las características del movimiento de salida deseado.

CAM-DAS ha sido pensado para que se trate de un programa sencillo de usar sin que se requieran apenas conocimientos de teoría de levas. Está construido sobre un entorno gráfico, amistoso y altamente informativo, lo que sin duda hace de él una herramienta muy apropiada de cara a la docencia de esta materia.

La aplicación está dividida en dos partes claramente diferenciadas:

- La primera de ellas corresponde con la entrada de datos y se trata de la pantalla inicial, “Datos Iniciales”.
- La segunda se corresponde con los resultados que se encontrarán disponibles sólo después de realizar el cálculo y que engloba el resto de pantallas, esto es, “Diagramas Cinemáticos”, “Perfil Leva”, “Parámetros”, “Conclusiones” y “Simulación de Movimiento”.

## 7.2. Requisitos del equipo informático.

La aplicación CAM-DAS a diferencia del programa de referencia, no necesita ser instalada en el equipo donde se pretenda hacer uso de ella. Esto es una mejora considerable ya que el usuario podrá disponer del programa para realizar sus cálculos en cualquier ordenador que desee de un modo fácil y cómodo.

Simplemente es necesario el archivo ejecutable (.exe), copiando y pegando en el equipo que se desee ya se dispondrá del programa en toda su dimensión.

Debido a que CAM-DAS tiene disponible una biblioteca de ejemplos a disposición del usuario, donde éste encontrará doce ejemplos de levas muy interesantes, la carpeta que contiene estos ejemplos deberá ser incorporada al equipo informático para poder hacer uso de ella.

Por tanto se deben tener en cuenta las principales características que se recomiendan para el ordenador donde se haga uso del programa, estas serán las siguientes:

- La aplicación debería funcionar correctamente sobre Windows 95 y posteriores (se ha probado con éxito en Windows 95/98/2000/Vista). Se recomienda un procesador de 100 Mhz o superior.
- La simulación del movimiento mejora con el uso de una tarjeta gráfica compatible SVGA de 8Mb o superior.
- Es imprescindible una resolución mínima de 800x600 pixeles.

.

### 7.3 Uso y descripción de CAM-DAS

El interfaz de CAM-DAS presenta libertad de movimiento para de este modo el usuario pueda situar las pantallas donde mejor uso haga de ellas. Su tamaño proporciona una visualización óptima que asegura una mejor interacción usuario-herramienta.

#### 7.3.1 Datos Iniciales

Esta será la pantalla inicial de CAM-DAS, en ella se puede observar dos partes bien diferenciadas:

Parte izquierda: es la zona de introducción de datos por parte del usuario (figura 7.1), a continuación se detalla con más precisión cada una de sus partes.

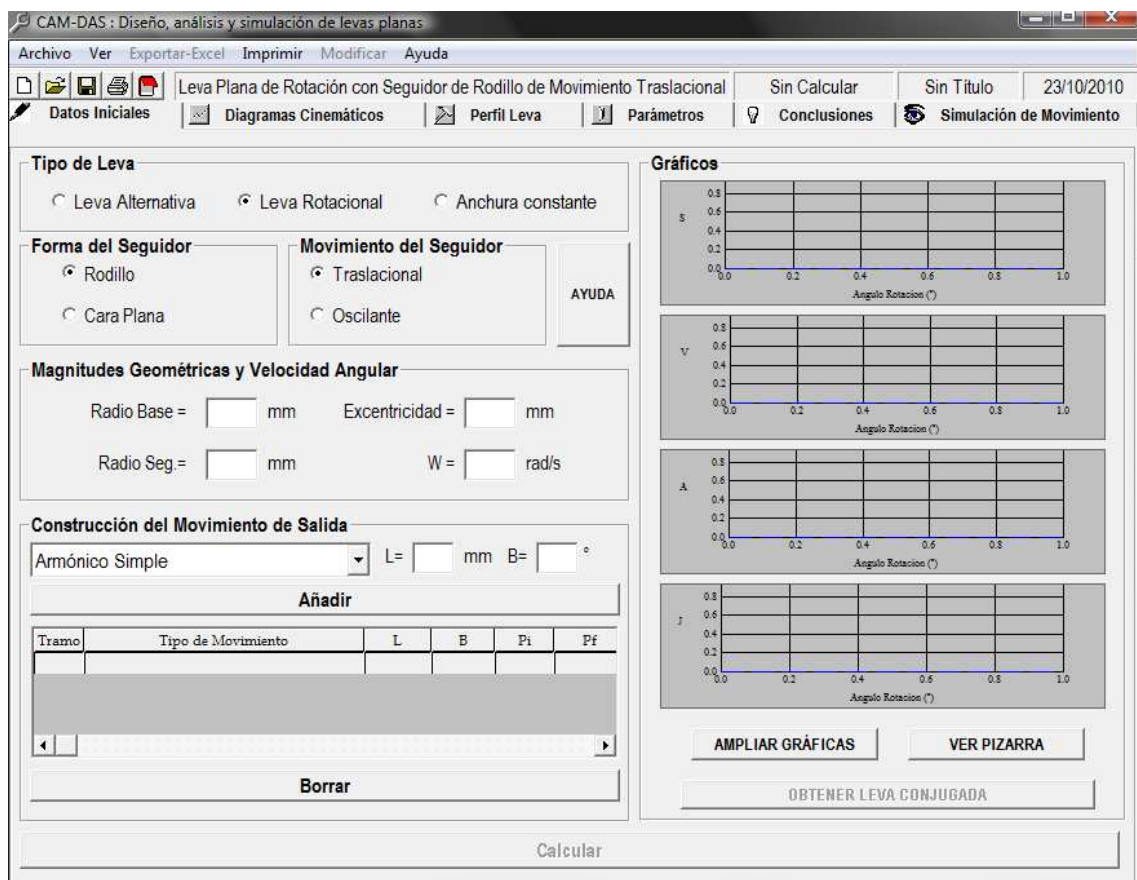


Fig. 7.1: Pantalla "Datos Iniciales"

- **Tipo de leva:** (Figura 7.2) Esta será la primera elección que se tendrá que hacer, se deberá elegir el tipo de leva que se quiere calcular, levas rotacionales genéricas levas de anchura constante (mecanismos desmodrómicos) o levas alternativas.

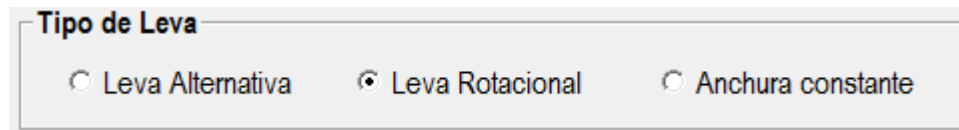


Fig. 7.2: Selección del tipo de leva

- **Forma y movimiento del seguidor:** (Figura 7.3) Mediante estos botones de opción que se encuentran en la parte superior izquierda de la pantalla se selecciona la forma para el seguidor y el tipo de movimiento que va a realizar. Si en el tipo de leva se hubiera seleccionado “Leva Rotacional”, se podrá posteriormente combinar todas las opciones de forma y movimiento. Si la elección es “Anchura Constante”, el movimiento del seguidor será por obligación “Traslacional”, y si la opción elegida fuera “Leva Alternativa” el seguidor será de rodillo con movimiento traslacional.

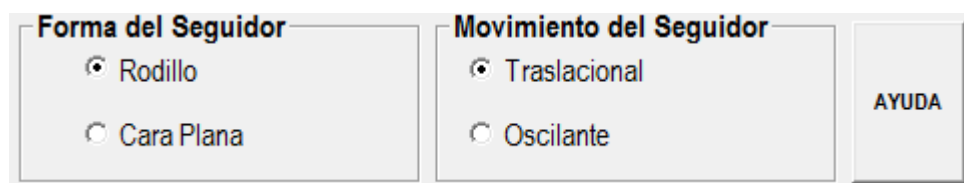


Fig. 7.3: Selección de forma y movimiento del seguidor y botón de ayuda.

- **Ayuda:** (Figura 7.3) Este botón de ayuda es una de las novedades incluida CAM-DAS, al pulsarlo aparecerá una pantalla de ayuda con el tipo de leva, forma y movimiento del seguidor seleccionados, donde se podrán observar con claridad las magnitudes geométricas que el usuario deberá introducir para llevar a cabo el cálculo (figura 7.4)

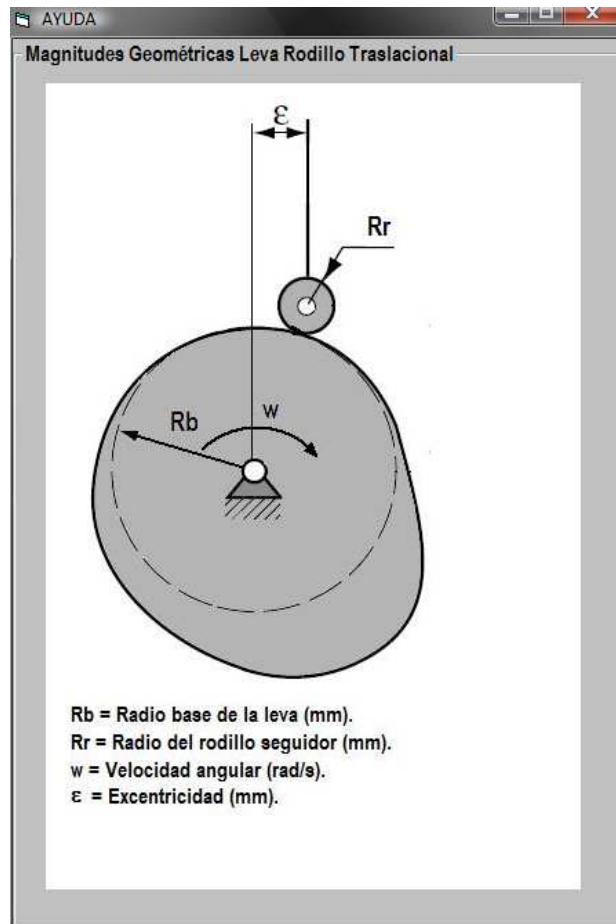


Fig. 7.4: Ayuda Magnitudes Geométricas para leva de rodillo con movimiento traslacional.

▪ **Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular:**

Estos campos deben ser cuidadosamente completados con valores consistentes para que el programa pueda realizar el cálculo.

En función del tipo de seguidor y el movimiento se requerirán diferentes tipos de magnitudes geométricas, no obstante hay dos comunes a todos ellos, excepto para levas alternativas:

- **“Radio Base”:** el radio base es el que se corresponde con el círculo tangente más pequeño que puede trazarse al perfil de la leva (círculo base), este campo no puede ser cero.

- “ $\omega$ ”: la velocidad angular que se introduzca será siempre positiva, no se permiten valores negativos, esto no es ningún inconveniente puesto que una velocidad negativa es un giro en sentido contrario, el perfil de la leva resultante no se modifica por ello. En la simulación sí será posible invertir el sentido del movimiento. El sentido positivo es el de las agujas del reloj. Este campo puede dejarse vacío, en cuyo caso el programa empleará por defecto el valor de 1 rad/s, pero no puede valer 0 rad/s, ya que haría nulas la velocidad, aceleración y sobreaceleración del seguidor.

#### A. Leva rotacional con seguidor de rodillo traslacional

- “**Excentricidad**”, este es un parámetro que seleccionándolo adecuadamente permite reducir las dimensiones de la leva sin afectar a la eficiencia del mecanismo, manteniendo el ángulo de presión dentro de valores aceptables. Por definición es la distancia mínima del centro del seguidor al diámetro vertical del círculo base. Se entiende por tanto, que el valor de la excentricidad no puede superar ni igualar en magnitud al radio primario (“Radio Base”+”Radio Seguidor”). Este valor puede ser positivo, negativo o cero: en el primer caso el centro del seguidor se situaría a la derecha (mirando hacia la pantalla) del eje vertical, si fuese negativo estaría situado a la izquierda. Un valor positivo de excentricidad hará disminuir el ángulo de presión en el tramo de subida, pero lo aumentará en el tramo de bajada. La excentricidad negativa hace lo contrario.

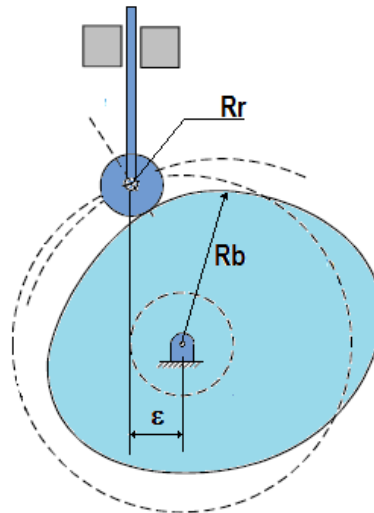


Fig. 7.5: Magnitudes geométricas en una leva rotacional con seguidor de rodillo traslacional.

## B. Leva rotacional con seguidor de rodillo oscilante.

- **“PivCen”**, es la distancia entre el centro de giro de la leva y el pivote o centro de giro del brazo del seguidor. No se permite un valor negativo, y se sitúa a la derecha del centro de la leva. De nuevo, como en el caso de la velocidad angular, esto no es ningún inconveniente, el situarlo en el lado izquierdo no modificaría ningún resultado, es como mirar la leva desde el lado opuesto.

Existen combinaciones que a golpe de vista parecerían incorrectas, por ejemplo podría ponerse un “PivCen” inferior a “Radio Base”, esto es admitido porque el pivote de giro del brazo del seguidor podría situarse en un plano diferente en el que está la leva, entonces el seguidor debería ser en sí un cilindro para que pudiese entrar en contacto con el contorno que lo hace moverse, si bien son casos extraños, también es cierto que el restringirlos supondría acortar las posibilidades del programa.

- **“Brazo”**, el seguidor está formado por el rodillo que apoya sobre la leva y por el brazo que lo sostiene, el cual oscila sobre un pivote, “Brazo” es la distancia desde dicho pivote al centro del rodillo. Su valor debe ser mayor que el radio del seguidor, lo contrario no sería tolerado por el programa.

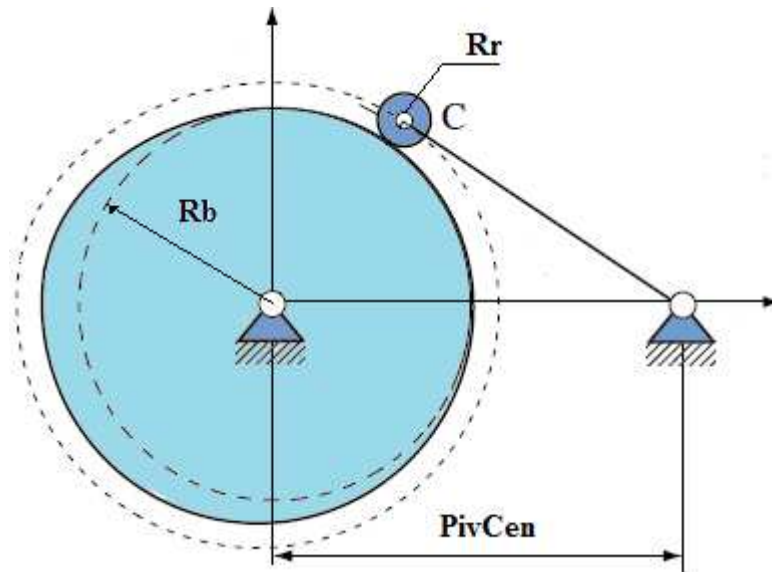


Fig. 7.6: Magnitudes geométricas de una leva rotacional con seguidor de rodillo oscilante.

### C. Leva rotacional con seguidor de cara plana traslacional.

Únicamente son necesarios el radio base y la velocidad angular, no se precisan datos del seguidor, los resultados que se mostrarán incluyen la longitud mínima necesaria de la cara del mismo.

### D. Leva rotacional con seguidor de cara plana oscilante.

- “**PivCen**”, la definición es idéntica al caso de rodillo oscilante.
- “**Excentricidad**”, el seguidor en este caso tiene un ángulo recto, una de sus caras está en contacto con la leva y en la otra uno de los extremos es el que gira sobre el pivote, la distancia entre ese centro de giro y el vértice del ángulo es la excentricidad. Este valor puede ser positivo, negativo, o cero.



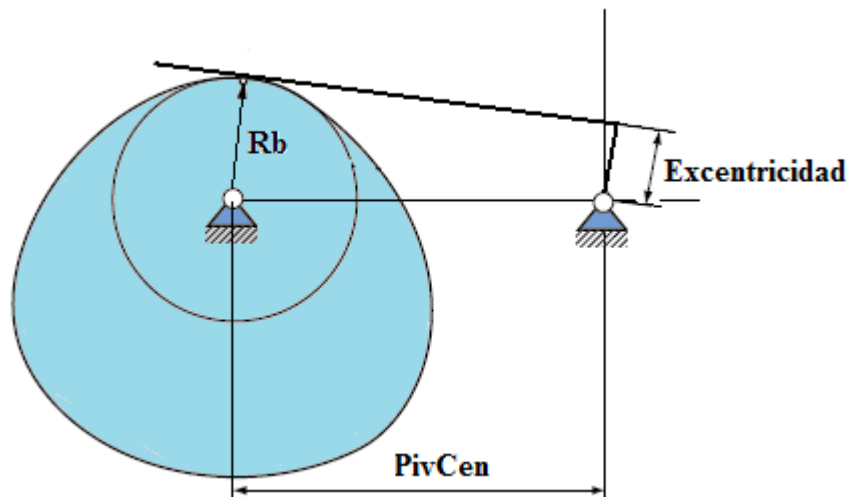


Figura 7.7: Magnitudes geométricas de una leva rotacional de cara plana oscilante.

### E. Leva de anchura constante de cara plana traslacional.

Este tipo de leva es una de las novedades que presenta CAM-DAS, el cuadro de las magnitudes geométricas y velocidad angular que nos aparecerá al seleccionar este tipo de leva (figura 7.8), nos pedirá además de las magnitudes comunes a todos los casos como son el radio base y la velocidad angular, los siguientes datos:

- **“Anchura Constante”**, es la distancia que permanecerá constante entre dos puntos opuestos de contacto leva-seguidor, se mide entre dos tangentes (trazadas de manera paralela) al perfil de leva.

En el mismo cuadro de magnitudes encontraremos un botón de cálculo denominado **“Calcular Desplaz.”**, con él podremos calcular el desplazamiento que realizará la leva de anchura constante que se quiere calcular en su movimiento.

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular**

Radio Base=  mm       $w=$   rad/s

Anchura Constante=  mm        mm

Fig. 7.8: Cuadro de magnitudes geométricas y velocidad angular para el caso, Leva de anchura constante con seguidor de cara plana traslacional.

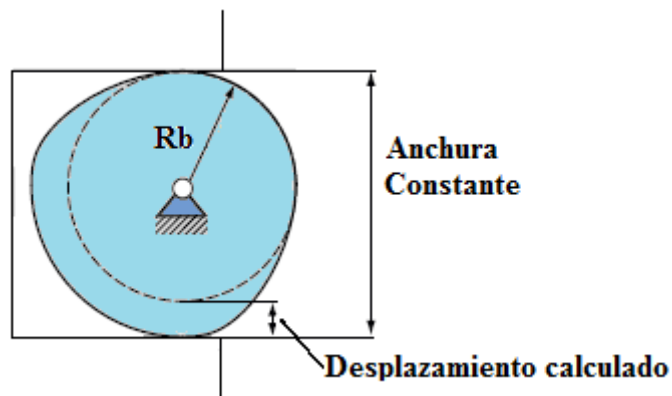


Fig. 7.9: Magnitudes geométricas de una leva de anchura constante con seguidor de cara plana traslacional.

**F. Leva de anchura constante con seguidor de rodillo traslacional.**

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular**

Radio Base =  mm      Radio Seg.=  mm       $w=$   rad/s

Anchura Constante =  mm        mm

Fig.7.10: Cuadro de magnitudes geométricas y velocidad angular para el caso, Leva de anchura constante con seguidor de rodillo traslacional.

- “**Anchura constante**”, para este caso la distancia que permanecerá constante, se mide diametralmente entre los puntos de contacto leva-seguidor, en este caso al perfil de leva se le puede denominar de **diámetro constante**.

Tanto para este caso como para el anterior de anchura constante, el valor de esta magnitud deberá ser mayor que el diámetro base de la leva, para poder llevar a cabo el cálculo del perfil.

El botón de cálculo, “**Calcular Desplaz.**”, que aparece en la figura 6.10, tiene la misma función que en el caso anteriormente explicado, leva de anchura constante con palpador plano traslacional.

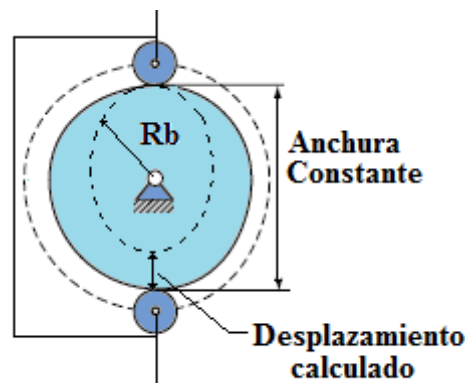


Fig. 7.11: Magnitudes geométricas de una leva de diámetro constante con seguidor de rodillo traslacional.

### G. Leva alternativa o traslacional.

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Lineal**

Radio Seguidor =  mm

Longitud total de la leva =  mm

V =  mm/s

Fig. 7.11: Cuadro de magnitudes geométricas y velocidad lineal para el caso leva alternativa.

Para el caso de leva alternativa debido al movimiento de traslación que posee la leva, la velocidad será una magnitud lineal.

- **“Longitud total de la leva”**, como su nombre indica el usuario deberá introducir la dimensión longitudinal que desee para el perfil de la leva. Posteriormente esta longitud se dividirá en diversos tramos (B) donde el usuario definirá el movimiento que desee para el seguidor.

▪ **Construcción del movimiento de salida**

**A. Casos de Levas Rotacionales.**

Para los casos con levas rotacionales el cuadro que tendremos será el mostrado en la figura 7.12. El control de la izquierda es desplegable y permite seleccionar entre las diferentes curvas comúnmente empleadas para el movimiento del seguidor. Las curvas que pueden seleccionarse son:

Aceleración de onda senoidal modificada	Polinómico 5º grado
Aceleración de onda trapecial modificada	Polinómico 7º grado
Armónico doble	Semiarmónico Vf=0
Armónico simple	Semiarmónico Vi=0
Cicloidal	Semicicloidal Vf=0
Detenimiento	Semicicloidal Vi=0
Polinómico 3-4-5	Velocidad constante
Polinómico 4-5-6-7	

Cuando se selecciona un tramo **polinómico genérico** (5º grado o 7º grado), éste ni puede ser añadido inmediatamente a los gráficos, ni puede ser completado el cuadro inferior (bajo el botón “Añadir) que muestra sus condiciones de contorno, ya que precisamente éstas no se tienen hasta que no se disponga de sus tramos adyacentes;

en cuanto que el programa las posea, los gráficos se actualizarán con dicho intervalo y sus condiciones de contorno podrán mostrarse de forma numérica en la zona inferior habilitada para ello. Un tramo polinómico genérico compatibiliza con las condiciones de contorno establecidas del tramo anterior y posterior, esto significa hacer continuo el diagrama de desplazamiento, velocidad y aceleración, si el polinomio es de 5° grado, y también sobreaceleración si se selecciona el de 7° grado. Puesto que no se dice nada de lo que puede pasar en el interior del tramo polinómico, podría ocurrir que este se moviese por encima o por debajo de lo deseado (esto no quita que cumpla las restricciones en sus extremos), sólo en el caso de que ello produjese un desplazamiento por debajo del círculo base, el programa avisaría de lo ocurrido e impediría su agregación como tramo del movimiento, en cualquier otro caso se deja al usuario la opción de ponerlo o no. No es posible que aparezcan dos tramos polinómicos genéricos de forma seguida, de lo contrario no se tendrían condiciones de contorno para resolver todas las ecuaciones, esa es la razón por la que se incluyen de forma separada los polinomios 3-4-5 y 4-5-6-7, en éstos no existe ninguna incógnita que determinar, por lo que sí pueden ser combinados con los genéricos. El hecho de que no se puedan poner dos tramos polinómicos genéricos consecutivos, y debido al carácter cíclico de los diagramas, incluye la posibilidad de que uno de ellos sea el primero y el otro el último.

Tramo	Tipo de Movimiento	L	B	Pi	Pf

Fig. 7.12: Cuadro de construcción del movimiento para casos de levas rotacionales.

En el campo “L” se introduce la magnitud total y el sentido del desplazamiento para el tramo seleccionado y que tiene como referencia la última ordenada del tramo

anterior, si es que lo hubiere, en caso de que se tratase del primero la referencia estaría situada sobre el círculo base para las levas con seguidor de cara plana, y sobre el círculo primario para las que usan seguidor de rodillo. Notar que esta formulación es válida porque como mínimo, y por definición, al menos existirá un punto en el que el seguidor está en contacto con el círculo base, en ese punto se empieza a construir el diagrama de desplazamiento; si existe más de uno, el usuario puede decidir en cual comienza, ya que se trata en sí de un diagrama cíclico. Esta magnitud de desplazamiento puede ser positiva o negativa: si es positiva y se está empleando un seguidor traslacional entonces se está añadiendo un ascenso, si es negativa se tratará de un descenso; para los seguidores oscilantes un valor positivo indica que se debe realizar en el sentido de las agujas del reloj, si es negativo se invertirá el sentido. Por definición un primer tramo no puede ser negativo porque sino el punto de contacto entre el seguidor y la leva tendría que atravesar el círculo base, lo mismo ocurre si se trata de añadir un tramo con un valor negativo superior a la ordenada acumulada que se lleve hasta ese momento. “L” puede ser cero, en ese caso lo que se introduce es un detenimiento y se pasa por el alto el tipo de curva que se haya seleccionado en el control desplegable. Este campo cambiará las unidades en las que deben ser introducidos los datos dependiendo del tipo de movimiento requerido para el seguidor, esto es, grados para los seguidores oscilantes y mm para los traslacionales.

El campo “B” es el ángulo de rotación parcial, es decir, el giro de la leva en el que se debe realizar el tipo de desplazamiento seleccionado y cuya magnitud se ha introducido en el campo “L”. La suma de todos los parciales introducidos debe ser 360°, que corresponden a un giro completo.

Una vez han sido introducidos los datos anteriores, el tramo puede ser incluido pulsando sobre el botón “**Añadir**”. Para cada tramo habrá que completar sus datos correspondientes; cuando la suma de los ángulos parciales de rotación sea 360°, la leva estará completada y el botón situado en la zona inferior de la pantalla (“**Calcular**”) se habilitará y se podrá pulsar. Si los datos introducidos resultan coherentes para poder crear el perfil de una leva, entonces en la barra de estado se

podrá ver “Cálculo Realizado”, el resto de pantallas serán visibles y contendrán los resultados obtenidos. En cualquier momento se puede eliminar el último tramo que se haya introducido si se pulsa sobre el botón “**Borrar**”.

Bajo el botón “Añadir” se encuentra un **cuadro informativo** sobre el que se pueden observar los tramos que se van introduciendo junto a sus características más significativas, que aparte de las definitorias anteriores, son los valores iniciales y finales de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración, los cuales se corresponden con los gráficos y se encuentran dispuestos en sus mismas unidades. Para ir haciéndolos visibles basta mover la barra de desplazamiento que posee el cuadro en su zona inferior.

## B. Casos de Levas de Anchura Constante

Para estos casos de anchura constante el cuadro de construcción del movimiento tendrá una presentación diferente a los casos anteriores (figura 7.13).

En la configuración inicial el cuadro presentará tres botones, “**Desarrollo de la leva**”, “**Añadir**” y “**Borrar**”, los cuales, en principio, estarán deshabilitados.

Tramo	Tipo de Movimiento	L	B	Pi	Pf

Fig. 7.13: Configuración inicial del cuadro de construcción del movimiento de salida para levas de anchura constante.

La ley de desplazamiento de anchura constante es una ley formada por dos tramos de movimiento armónico simple y dos detenimientos, donde el primer tramo será un ascenso, siendo el movimiento del seguidor desde 0 a  $\pi$ , el inverso del que se realiza de  $\pi$  a  $2\pi$ .

El desplazamiento que realizará el seguidor, para los casos en los que nos encontramos, dependerá de los valores que se dé al radio base y a la anchura constante en el cuadro explicado anteriormente. El valor de este desplazamiento se obtendrá tras pulsar el botón **“Calcular Desplaz.”**, una vez CAM-DAS compruebe que el dato calculado es correcto, el botón **“Desarrollo de la leva”** quedará activado y podrá obtenerse el movimiento completo de nuestro palpador en función del desplazamiento calculado, pulsando el botón.

Hay que dejar claro que una vez el botón **“Desarrollo de la leva”** este habilitado y no sea pulsado, el desplazamiento puede modificarse dando otro valor a la anchura constante y pulsando **“Calcular Desplaz.”**. Toda vez pulsado, en el **cuadro informativo** observaremos las características de la ley de anchura constante que define nuestra leva.

El botón **“Añadir”** y el botón **“Borrar”** permanecerán inhabilitados, siempre que nos encontremos en levas de anchura constante, por motivos obvios, la ley de anchura constante es una ley fija no modificable y dependiente del desplazamiento.

Una vez cargada la ley de desplazamiento de anchura constante por completo, la leva quedará completa y el botón situado en la zona inferior de la pantalla (**“Calcular”**) se habilitará y se podrá pulsar para calcular todo el perfil.



### C. Casos de Levas Alternativas

La configuración de la pantalla para este tipo de levas se presenta igual que en el caso de levas rotacionales pero se deben matizar ciertos aspectos que deben tenerse en cuenta en el diseño de este tipo de mecanismos.

Es muy importante que se tenga presente que el perfil de la leva quedará definido directamente, para estos casos, al definir la ley de desplazamiento que se desee para el seguidor.

El campo “**L**” hará referencia a la magnitud total y sentido del desplazamiento para el tramo seleccionado y que tendrá como referencia la última ordenada del tramo anterior, si es que lo hubiere, en caso de que se tratase del primero la referencia estaría situada en la base de la leva, centro de coordenadas de la referencia tomada.

El campo “**B**” es la longitud parcial de avance, es decir, la longitud en el que se debe realizar el tipo de desplazamiento seleccionado y cuya magnitud se ha introducido en el campo “**L**”. La suma de todos los tramos parciales introducidos debe ser igual a la magnitud previamente introducida en “Longitud total de la leva”.

En la parte derecha de la pantalla “Datos Iniciales” encontraremos: (Figura 7.14)

- “**Gráficos**”, ocupan la mayor parte de la parte derecha, en ellos podremos observar la forma de las gráficas de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración, que se cargarán según vayamos construyendo el movimiento de nuestra leva.

Estas gráficas nos servirán como información sobre la continuidad de las sucesivas de derivadas del desplazamiento, y si el movimiento seleccionado es adecuado.

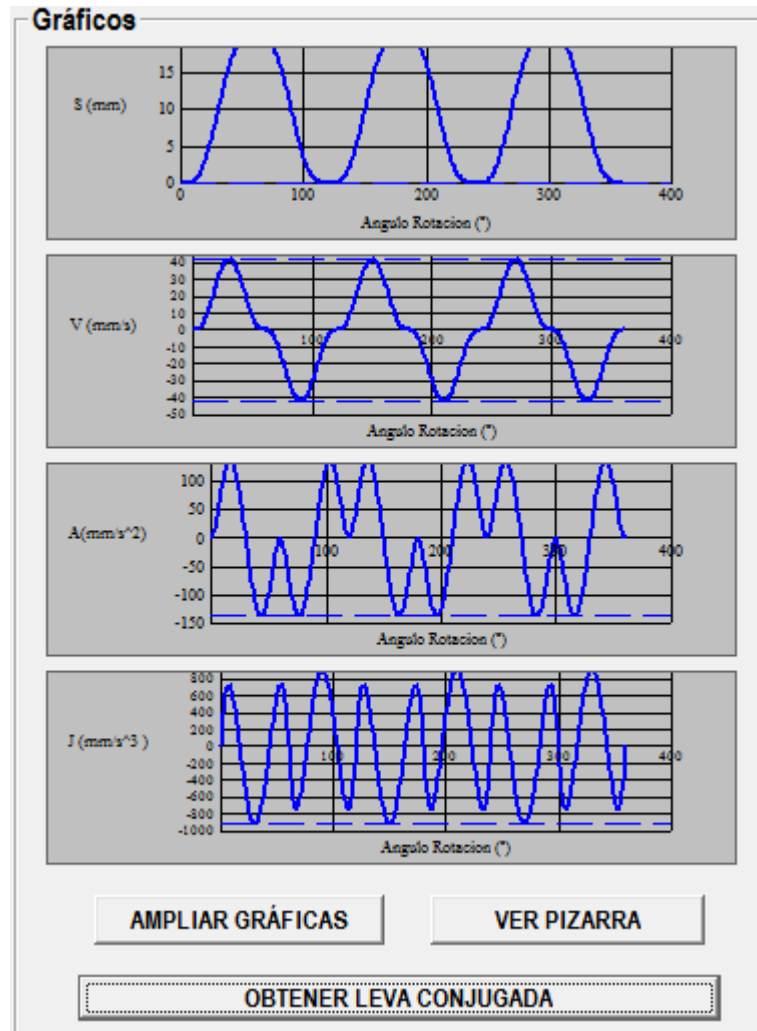


Fig. 7.14: Parte derecha de la pantalla "Datos Iniciales"

- **“Ampliar gráficas”**, (Figura 7.14) este botón que encontraremos debajo de las gráficas es una de las novedades introducidas en CAM-DAS. En caso de que el usuario desee visualizar de una manera más detallada las gráficas mencionadas, al pulsarlo aparecerá una nueva pantalla con las gráficas, cuyo tamaño nos permitirá observarlas con más detenimiento.

- **“Ver Pizarra”**, (Figura 7.14) como ayuda para el manejo del usuario, se ha creado este botón que nos permitirá acceder de un modo directo a la pizarra.

La pizarra (Figura 7.15) se trata de una pantalla adicional en la que una vez abierta se van agregando las levas que se calculan. La información que contiene depende del tipo de leva-seguidor que se esté tratando. En la parte superior se encuentran datos relativos a los cálculos que se van incluyendo y que se van situando por filas, sus contenidos identifican el nombre del archivo junto a sus magnitudes geométricas, velocidad angular y los resultados característicos que proporcionan información de cara a poder realizar comparaciones y mejoras en los mismos. En la parte inferior se encuentran los gráficos referentes a cada uno de ellos acompañados de una leyenda de colores para poder identificarlos. El número máximo de curvas que pueden contener los gráficos está limitado a 15 levas, a partir de ese momento los resultados seguirán incluyéndose en la rejilla superior pero no se realizarán sus dibujos. En cualquier caso se recomienda no añadir excesivo número de levas ya que la información gráfica puede hacerse confusa.

La pizarra dispone de un menú y una barra de herramientas:

**a) Menú**

“Salir de CAM-DAS”: sale de la aplicación.

“Ayuda”: mismo funcionamiento que en el menú de cálculo y simulación.

**b) Barra de herramientas**

De izquierda a derecha: “Volver a cálculo y simulación”, “Borrar pizarra” e “Imprimir pizarra”. La opción de borrar elimina todo el contenido del grupo que se muestra en pantalla en ese momento.

- **“Obtener Leva Conjugada”**, (Figura 7.14) este es el último botón que encontraremos, como ya se ha dicho CAM-DAS abordaba el cálculo de las levas conjugadas.

En principio y hasta que no se pulse el botón “Calcular” este botón permanecerá

deshabilitado. Una vez tengamos nuestro perfil calculado podremos iniciar el cálculo de su conjugada que dependerá del caso en el nos encontremos, esto se explicará en detalle más adelante.

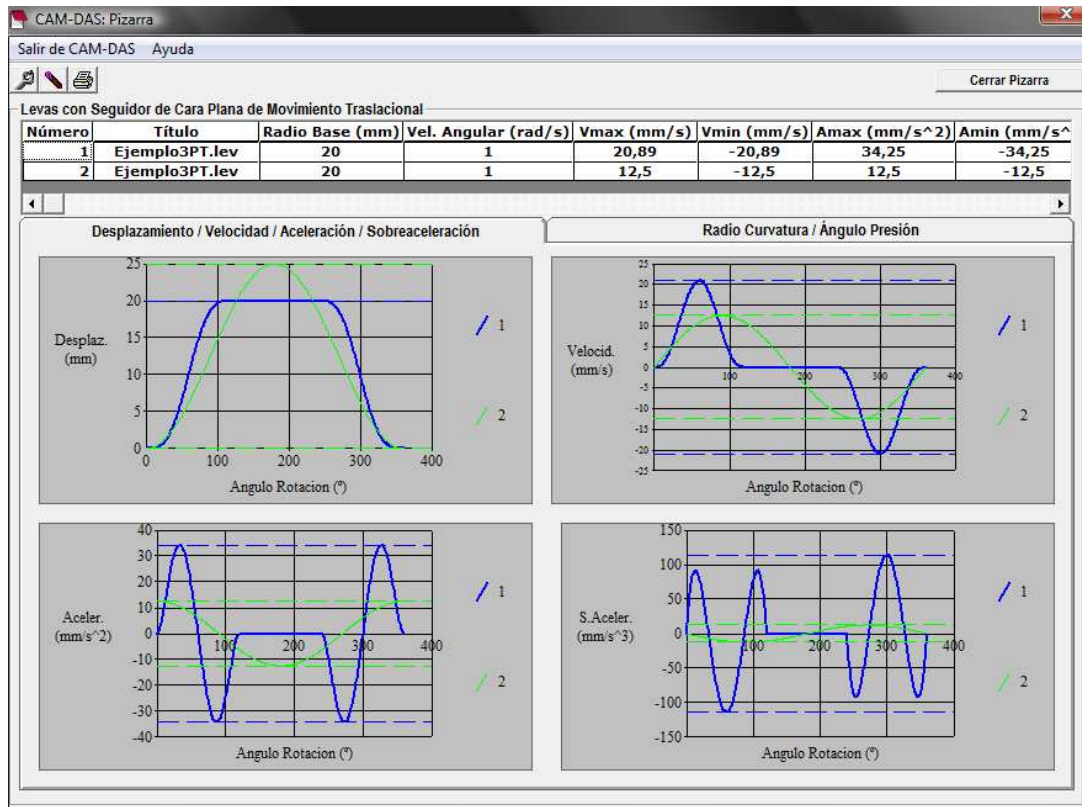


Fig. 7.15: Pantalla "Pizarra"

A partir de este punto se describirán y se explicará la utilización de las pantallas que quedan habilitadas tras haber realizado el cálculo de nuestra leva, es decir todas las pantallas que a continuación se explicarán nos mostrarán los resultados obtenidos.

### 7.3.2 Diagramas Cinemáticos

En esta pantalla podremos observar los diagramas de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración. A diferencia de los que se encuentran en "Datos Iniciales", estas gráficas si están dimensionadas según los parámetros cinemáticos del movimiento real del seguidor..

En la versión anterior de CAM-DAS, las cuatro gráficas se mostraban en la misma pantalla, siendo su tamaño considerablemente pequeño, por ello se ha intentado en esta nueva versión que los diagramas puedan ser vistos en detalle, aumentando su tamaño y visualizando cada uno por separado (figura 7.16).

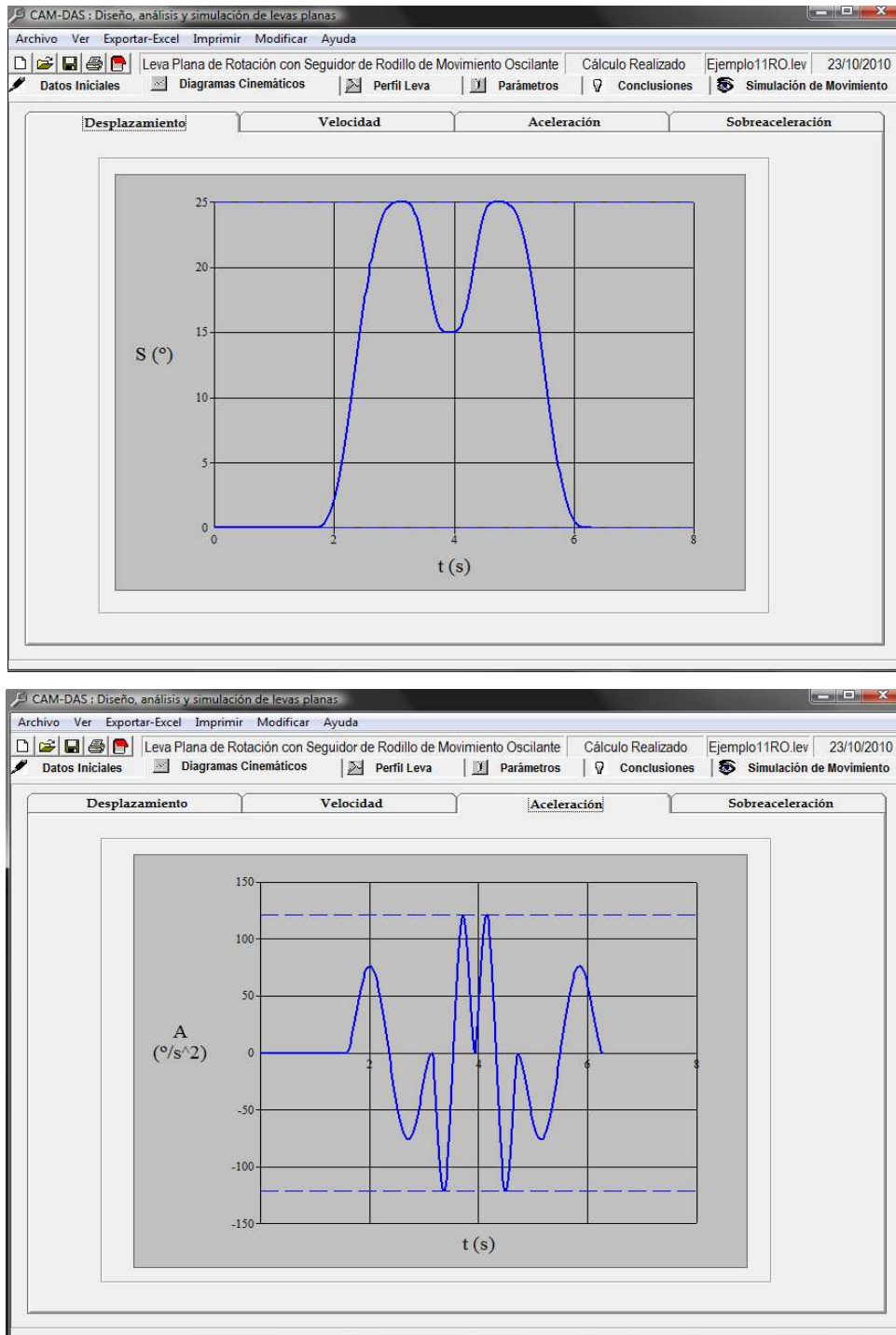


Fig. 7.16: Detalle de los diagramas desplazamiento y aceleración.

### 7.3.3 Perfil Leva

En esta pantalla (figura 7.17) puede observarse sobre un diagrama polar, el perfil de la leva (en azul) que se ha obtenido. Se muestra también el círculo base (en verde) y el primario (en rojo), si es que se está empleando un seguidor de rodillo.

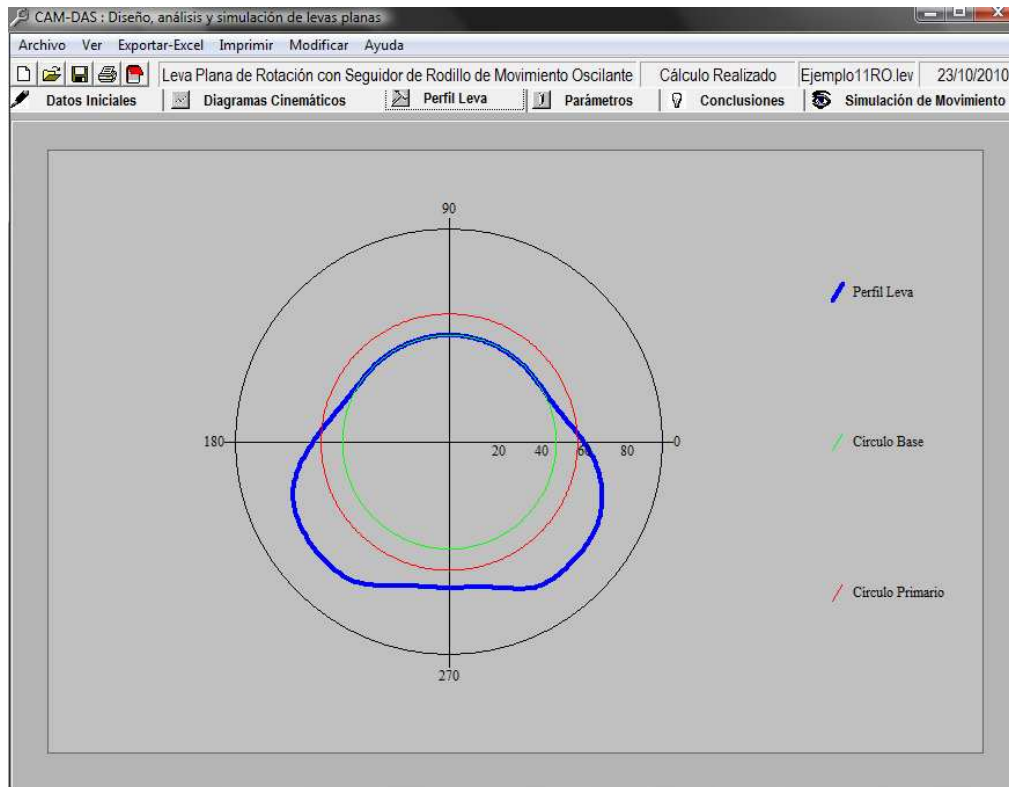


Fig. 7.17: Pantalla "Perfil Leva".

Es importante avisar que el ángulo de este diagrama no es el ángulo de rotación. La introducción de discontinuidades en la velocidad, inaceptable para un correcto cálculo, se hará patente cuando se observe el perfil de la leva: si la discontinuidad está en puntos intermedios, tal vez sea posible observar brusquedades en el perfil, pero si ésta ha sido introducida entre el punto inicial y final entonces la leva estará rota, consecuencia directa de que la generación del perfil depende directamente de la primera derivada del desplazamiento; una discontinuidad en tal punto hace que el ángulo inicial donde se comienza a dibujar la leva no coincida con el ángulo final y por tanto el contorno quede partido. No es un error del programa sino, una consecuencia de que no se está cumpliendo con la ley de continuidad.

### 7.3.4 Parámetros

Esta pantalla (figura 7.18) ha sido optimizada, para mejorar la comprensión del usuario, anteriormente se mostraban sobre la pantalla las gráficas de dos parámetros, según el caso, sin ninguna explicación.

Ahora en ella aparecerán dos botones que dependiendo del caso en el que nos encontremos serán:

- Para cualquier tipo de leva con seguidor de cara plana, aparecerán en la pantalla los botones: **“Radio de Curvatura”** y **“Longitud Cara Plana”**.
- Para cualquier tipo de leva con seguidor de rodillo, los botones serán: **“Radio de Curvatura”** y **“Ángulo de Presión”**.

Pulsando el botón deseado aparecerá la gráfica correspondiente el parámetro solicitado, así como una breve explicación a cerca del parámetro.

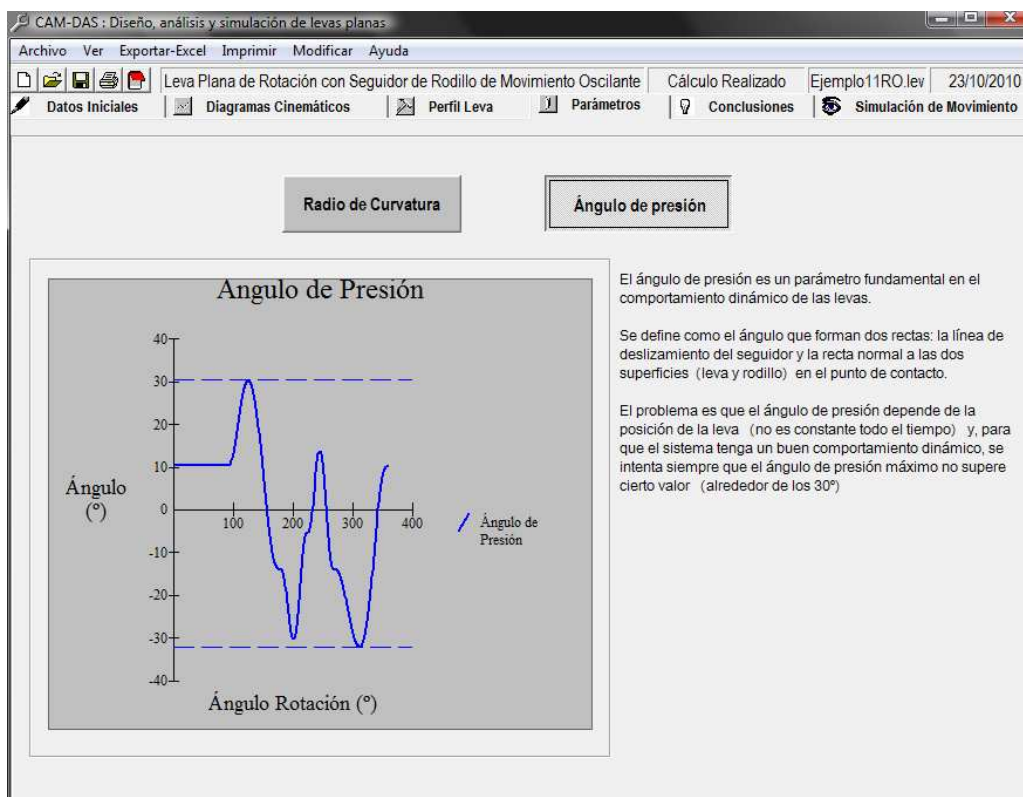


Fig. 7.18: Pantalla “Parámetros”



- **Radio de Curvatura:**

El radio de curvatura es importante para cualquier tipo de seguidor que se haya escogido, y será indicador de que se hayan producido cúspides o rebajes (también suelen llamarse socavaciones) en el perfil. Un contorno así no será válido y será necesario modificar algún parámetro para cambiar el radio de curvatura y evitar que eso ocurra.

En los seguidores de cara plana un radio de curvatura negativo indicaría que se ha producido un rebaje, en la igualdad con cero se estará ante una cúspide o punta.

En los seguidores de rodillo, los rebajes pueden producirse solamente en zonas en las que el radio de curvatura de la curva de paso es positivo, es decir, en zonas convexas (mirando desde fuera), cuando éste es inferior al radio del seguidor se producirá un rebaje, como antes, en la igualdad será una cúspide.

- **Ángulo de Presión:**

El ángulo de presión es el que forman las rectas cuyas direcciones son la de movimiento del seguidor (el punto de trazo para los rodillos) y la de aplicación de la fuerza entre seguidor y leva, es decir, la perpendicular común. Da idea de la facilidad con que se transmite el movimiento de la leva al seguidor: un ángulo de presión elevado puede hacer que el seguidor se atasque o no se mueva bien. Un ángulo de presión superior a  $30^\circ$  para los seguidores traslacionales y a  $35^\circ$  para los oscilantes provocaría un mecanismo deficiente. Hay que mirar el máximo y el valor absoluto del mínimo y comprobar que no exceden de las anteriores cifras, cuanto menores sean, mejor.

- **Longitud en los seguidores de cara plana:**

Si se trata de un seguidor de cara plana traslacional, lo que se representa son las abcisas, para cada ángulo de rotación, del punto de contacto leva-seguidor. Se han hecho todas positivas para resaltar el hecho de que lo que se busca es la longitud mínima que debe



tener tanto a izquierda como a derecha del eje vertical, estas longitudes no tienen porque ser iguales, lo serán si el perfil es simétrico. La longitud mínima a cada lado se corresponde con el valor máximo de cada curva.

Si el seguidor de cara plana es oscilante, la distancia es la que hay desde el punto de contacto leva-seguidor hasta el vértice en el que se forma el ángulo recto (“Excentricidad” $\neq 0$ ) o hasta el centro de giro del brazo (“Excentricidad” $=0$ ), de nuevo el máximo será la longitud mínima que debe tener la cara de contacto del seguidor con la leva.

### 7.3.5 Conclusiones

En la zona inferior de la pantalla se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos: valores máximos y mínimos de desplazamiento, velocidad, aceleración, sobreaceleración, radio de curvatura, ángulo de presión (seguidores de rodillo), y distancia del punto de contacto leva-seguidor, tal y como se ha explicado en el punto anterior para los seguidores de cara plana. A la derecha de todos estos valores se encuentra un comentario explicativo. En la parte superior de la pantalla se puede observar la conclusión cualitativa del cálculo, existen tres tipos posibles:

- **Leva aceptable:** las curvas de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración son continuas, excepto para los casos de leva de anchura constante donde aceptaremos la discontinuidad en la aceleración, el ángulo de presión para los seguidores de rodillo traslacionales es inferior a  $30^\circ$  y para los oscilantes es inferior a  $35^\circ$ , no existen cúspides y/o rebajes.
- **Leva no apta para elevadas velocidades:** igual que en el caso anterior, sólo que ahora la curva de sobreaceleración muestra alguna discontinuidad
- **Leva inaceptable:** esta conclusión puede deberse a un ángulo de presión elevado y/o un radio de curvatura que produce cúspides/rebajes y/o una discontinuidad en velocidad y/o aceleración (las discontinuidades en desplazamiento no son posibles debido al diseño del programa).

Leva aceptable			
Concepto	Máximo	Mínimo	Comentarios
Desplazamiento (°)	25,	0,	Continua
Velocidad (°/s)	34,82	-34,82	Continua
Aceleración (°/s <sup>2</sup> )	121,51	-121,51	Continua
Sobreaceleración (°/s <sup>3</sup> )	1080,44	-1080,44	Continua
Radio de Curvatura Convexo	--	32,	El perfil está libre de cúspides y/o rebajes
Ángulo de Presión	30,35	-32,08	Aceptable

Fig. 7.19: Pantalla “Conclusiones”

Como puede observarse la conclusión va acompañada de la razón en la que se fundamenta y de un icono en forma de semáforo que tomará el color verde, rojo o amarillo, en los casos aceptable, inaceptable o no apta para elevadas velocidades respectivamente.

### 7.3.6 Simulación de Movimiento.

Esta opción permite ver la leva que se ha calculado en movimiento. A la izquierda se tiene la imagen del mecanismo, bajo ella se encuentran las siguientes opciones:

- **Coordenadas del puntero:** podemos situar el cursor del ratón en cualquier punto de la imagen para averiguar las coordenadas cartesianas de dicho punto, siempre vendrán dadas en milímetros. No importa cuál sea el tamaño del mecanismo que se ha calculado porque éste siempre se adaptará al disponible en la pantalla de simulación, se mantienen todas las proporciones, pero no sería correcto comparar tamaños de levas distintas recordando el formato que aquí ofrecen.
- **Opciones de visualización:** marcando estas opciones se puede decidir si se desea ver o no el círculo base (verde), la curva de paso (amarillo), el círculo primario (rojo) y los ejes coordenados (negro con línea discontinua en raya y punto). La curva de paso y el círculo primario sólo estarán disponibles para los casos en los que se utilice seguidor de rodillo (en los otros no tiene sentido). Estas opciones mostrarán su elección cuando inicie el movimiento del mecanismo o bien si éste ya está en marcha en el mismo momento que sean seleccionadas
- **Velocidad de la simulación:** desplazando el elemento móvil de la barra se puede adecuar la velocidad a la que se mueve el mecanismo, esta velocidad no está en relación con la angular que se introdujo en los datos iniciales. Se trata de una opción que permite modificar el incremento angular entre cada imagen ( $\pm 5^\circ$  en las posiciones más extremas), creando una sensación de movimiento más veloz a mayor diferencia. Acorde a esta velocidad se comportará el resto de información no estática que se encuentra en la pantalla a la derecha de la animación. Situar la barra en la zona derecha hace girar la leva en el sentido de las agujas del reloj, la posición central detiene el mecanismo, y desplazar la barra hacia la zona izquierda invierte el sentido del movimiento.

A la derecha de la imagen del mecanismo se pueden ver:

- **Datos de la simulación:** etiquetas de texto dinámicas y sincronizadas con la animación que mostrarán el ángulo de rotación, el tiempo, el ángulo de presión (seguidores de rodillo), distancia izquierda y derecha (seguidor traslacional de cara

plana), distancia en seguidor (seguidor oscilante de cara plana) y el ángulo inicial (seguidores oscilantes). El ángulo de rotación varía de 0 a 360° iniciándose cada vez que se completa una vuelta, lo mismo ocurre con el tiempo que guarda relación directa con la velocidad angular y el ángulo de rotación. El ángulo de presión que se muestra en cada instante es el que se tiene acorde a la posición instantánea de la leva y el seguidor, esto es tremendamente informativo porque permite hacerse una idea al comparar la imagen (y ver la posición relativa que guardan leva y seguidor) con el valor numérico que muestra la etiqueta. Lo mismo ocurre con las distancias en los seguidores de cara plana traslacional y oscilante, y también tiene utilidad dinámica, ya que si se conoce la fuerza ejercida por la leva sobre el seguidor podría calcularse en cada instante el momento que se produce sobre cualquier punto del mismo. El ángulo inicial es la única magnitud estática de este grupo, representa el ángulo que los seguidores oscilantes tienen en la posición de partida, cuando reposan sobre el círculo base, se recuerda que la curva de desplazamiento que se ha creado se inicia desde un punto en el que el seguidor está sobre el círculo base.

- **Desplazamiento, velocidad, aceleración y sobreaceleración:** este grupo de controles muestra en cada instante el correspondiente valor numérico sobre una etiqueta de texto, bajo ésta se encuentra el gráfico, y según transcurre el movimiento un punto se desplaza sobre él acorde al valor que le corresponda en ese momento. Existe la posibilidad de detener independientemente del resto de controles cualquiera de ellos sin más que pulsar sobre el botón que hay bajo cada uno, esto descarga el ordenador de tareas que el usuario puede no precisar. Estos gráficos son muy concluyentes cuando se han introducido discontinuidades, ya que de un golpe de vista se pueden observar los saltos que se producen.
- **Botón Mover/Detener:** anima o detiene la simulación en cualquier instante. Puede emplearse la tecla “P” con el mismo resultado.

Además de todo lo anterior, en la simulación es posible captar fallos difíciles de anticipar si no se dispone de una herramienta similar a ésta, ya que es necesario ver

todas las posiciones relativas que pueden adoptar los dos elementos que forman el mecanismo. En los seguidores oscilantes pueden existir interacciones entre la leva y el seguidor en puntos de contacto que no son los pertinentes: en concreto en los seguidores de cara plana estas pueden producirse entre la porción de seguidor que une la cara de contacto con el pivote sobre el que gira; en los seguidores de rodillo esto puede ocurrir en cualquier punto del brazo oscilante. Al observar estos fallos puede recalcularse la leva para evitarlos de una forma rápida, cómoda y sin tener que fabricarla previamente.

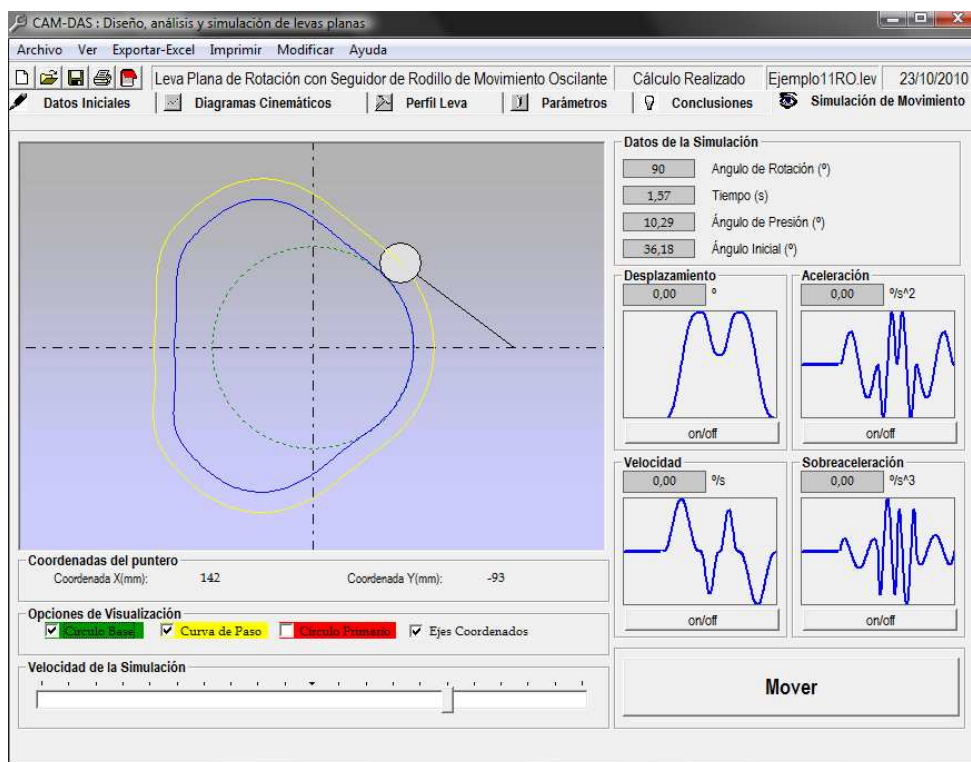


Fig. 7.20: Pantalla “Simulación de Movimiento”

### 7.3.7 Menú, Barra de Herramientas y Barra de Estado

Como una aplicación tradicional del entorno Windows, CAM-DAS dispone de elementos característicos propios de este sistema operativo.

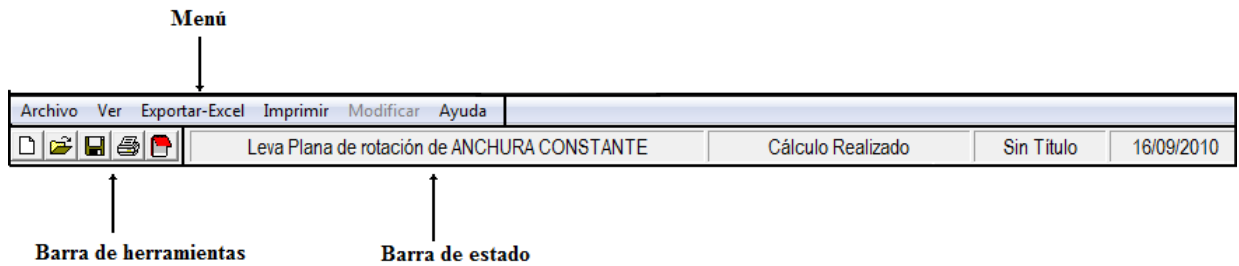


Figura 7.21: Menú, barra de herramientas y barra de estado

## A) Menú

- **Archivo:** permite manejar las opciones “Nueva leva”, “Abrir leva...”, “Guardar leva”, “Guardar leva como...” y “Salir”. Estas opciones están disponibles en cualquier momento. Una leva puede guardarse o abrirse aunque no haya sido completada. El formato de la aplicación es de un solo documento (SDI: Simple Document Interface) lo que significa que no puede manejarse más de una leva simultáneamente. La extensión de los archivos del programa es \*.lev.

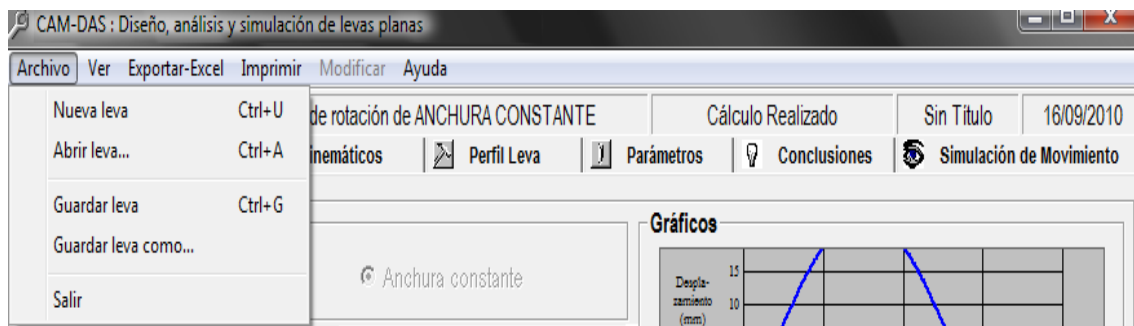


Fig. 7.22: Menú “Archivo” desplegado

- **Ver**

Este menú presenta una variación con respecto a la versión anterior de CAM-DAS, se ha eliminado el submenú “pizarra” debido a que se ha creado un acceso directo a

la misma, muy intuitivo y fácil de manejar, con el botón “Ver Pizarra”, que anteriormente ha sido explicado.

- “Barra de herramientas y estado”: visualiza u oculta estos elementos.
- “Actualizar”: si se modifica el valor de la velocidad angular y después se hace click sobre esta opción, se actualizarán los gráficos y el elemento donde aparecen las condiciones de contorno de los tramos añadidos (ver figura 7.4.3a), no obstante, cuando el campo “ $\omega$ ” pierda el enfoque esta acción se realizará por si sola.

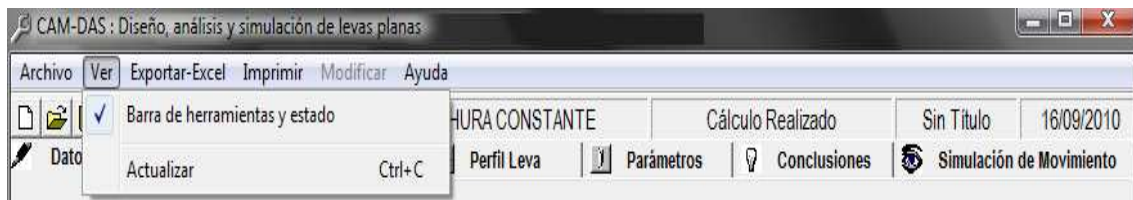


Fig. 7.23: Menú “Ver” desplegado

- **Exportar-Excel:** esta opción está deshabilitada hasta que se han introducido todos los datos necesarios para calcular una leva y se ha procedido a su cálculo. En ese momento la opción quedará disponible. Si el usuario dispone de Microsoft Excel pueden ser exportados todos los resultados de la leva en curso de forma numérica y conjunta a dicha aplicación. Cuando se selecciona, la aplicación Microsoft Excel se abrirá (en caso de no tenerla, se mostraría un mensaje de error) y se hará visible con un libro y el número de hojas que el usuario tenga por defecto configuradas para cada nuevo libro (en Excel: Herramientas⇒ Opciones⇒ General), sólo la primera de ellas contiene los resultados. El archivo.xls no es guardado por CAM-DAS por lo que deberá guardarlo el usuario si así lo desea.

Los resultados que se exportan dependen del tipo de leva y se sitúan agrupados en columnas, que van encabezadas por su concepto y por las unidades en las que se representan, se acompañan del tipo de leva, del título del archivo que la contiene (en el caso de que se haya salvado), de la conclusión que obtuvo CAM-DAS y de las

magnitudes geométricas y velocidad angular que la definen. La distribución exacta es la siguiente:

<b>Para todas las levas</b>	
Celdas	Concepto
A1	Tipo de leva, forma y movimiento del seguidor
A2	Título
A3	Conclusión
A4:A8	Magnitudes geométricas y velocidad angular
A10:A371	Ángulo de rotación (cada 1°)
B10:B371	Desplazamiento
C10:C371	Velocidad
D10:D371	Aceleración
E10:E371	Sobreaceleración
F10:F371	Radio de curvatura
I10:J371	Coordenadas polares del contorno de la leva
L10:M371	Coordenadas cartesianas del contorno de la leva

<b>Levas de rodillo (traslacionales y oscilantes)</b>	
Celdas	Concepto
G10:G371	Ángulo de presión
O10:P371	Coordenadas polares de la curva de paso
R10:S371	Coordenadas cartesianas de la curva de paso



Levas de cara plana traslacional	
Celdas	Concepto
G10:G371	Distancia por la izquierda del punto de contacto leva-seguidor al diámetro vertical del círculo base
H10:H371	Distancia por la derecha del punto de contacto leva-seguidor al diámetro vertical del círculo base

Levas de cara plana oscilante	
Celdas	Concepto
G10:G371	Distancia desde el punto de contacto leva-seguidor hasta el vértice en el que se forma el ángulo recto (“Excentricidad” $\neq 0$ ) o hasta el pivote de giro del brazo (“Excentricidad” $=0$ ), medida sobre la cara del seguidor

- **Imprimir:** cualquiera de las cinco primeras pantallas (“Datos Iniciales”, “Diagramas Cinemáticos”, “Perfil Leva”, “Parámetros”, “Conclusiones”) es imprimible desde esta opción de menú, sin embargo sólo “Datos Iniciales” está disponible antes de realizar el cálculo.

Los diagramas cinemáticos pueden imprimirse por separado o todos juntos en un hoja, los submenús nos permitirán la impresión única o conjunta.

Debido a las limitaciones que presenta Visual Basic, se recomienda que para visualizar unos diagramas con mejores condiciones que los aportados por CAM-DAS, se exporten los datos obtenidos a Excel y se obtengan las gráficas que se desee.

Lo mismo sucede con los parámetros, el submenú dará la opción de elegir cuál de ellos se quiere imprimir (radio de curvatura, ángulo de presión o longitud cara plana) según el caso en el que el usuario se encuentre..

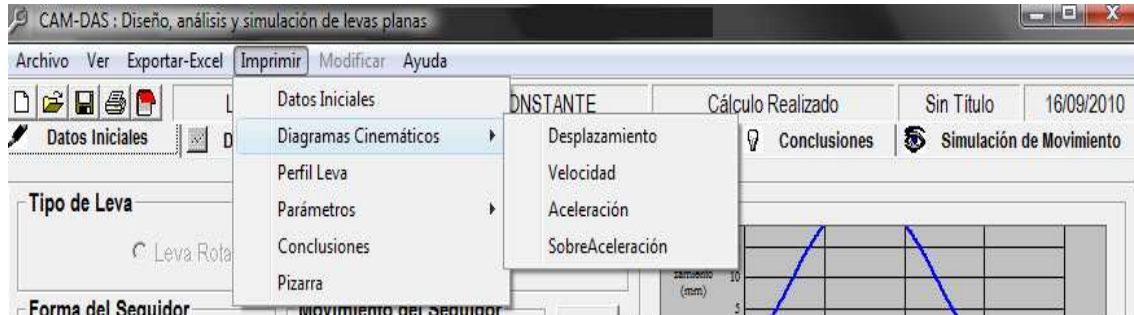


Fig. 7.24: Menú “Imprimir” y submenú “Diagramas Cinemáticos” desplegados

- **Modificar:** cuando se procede al cálculo de una leva pulsando sobre el botón “Calcular” de “Datos Iniciales”, se bloquean todos los campos de entrada de datos para evitar que pudiesen modificarse y se dispusiera de resultados incoherentes con los datos de partida. Para poder recalculer o modificarlos, se dispone de esta opción, cuando se pulse, sólo la pantalla “Datos Iniciales” será visible y entonces se podrá modificar cualquiera de los valores que contiene.

Para los caso de Levas de Anchura Constante la opción “Modificar” no estará disponible, para llevar a cabo cualquier modificación deberemos ir al menú “Archivo” y seleccionar “Nueva Leva”, para reiniciar el cálculo.

- **Ayuda:** para el usuario que se inicie en el uso de CAM-DAS o en caso de dudas acerca del programa, se ha creado el menú ayuda (figura 7.25). El menú consta de dos opciones “Contenido” y “Acerca de CAM-DAS”.

Al pulsar “Acerca de CAM-DAS” se visualizará información relativa al programa y se dispondrá de un enlace con la página web de la Universidad Carlos III de Madrid. “Contenido” facilitará al usuario un menú (figura 7.26) con el cual podrá resolver cualquier duda acerca de las pantallas o información que muestra CAM-DAS. Este menú estará activo desde que se inicia CAM-DAS, y su estructura se basa en la guía del usuario que en el presente proyecto se expone.

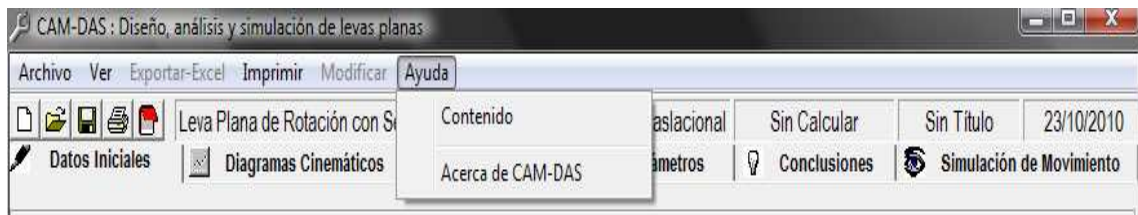


Fig. 7.25: Menú "Ayuda" desplegado.

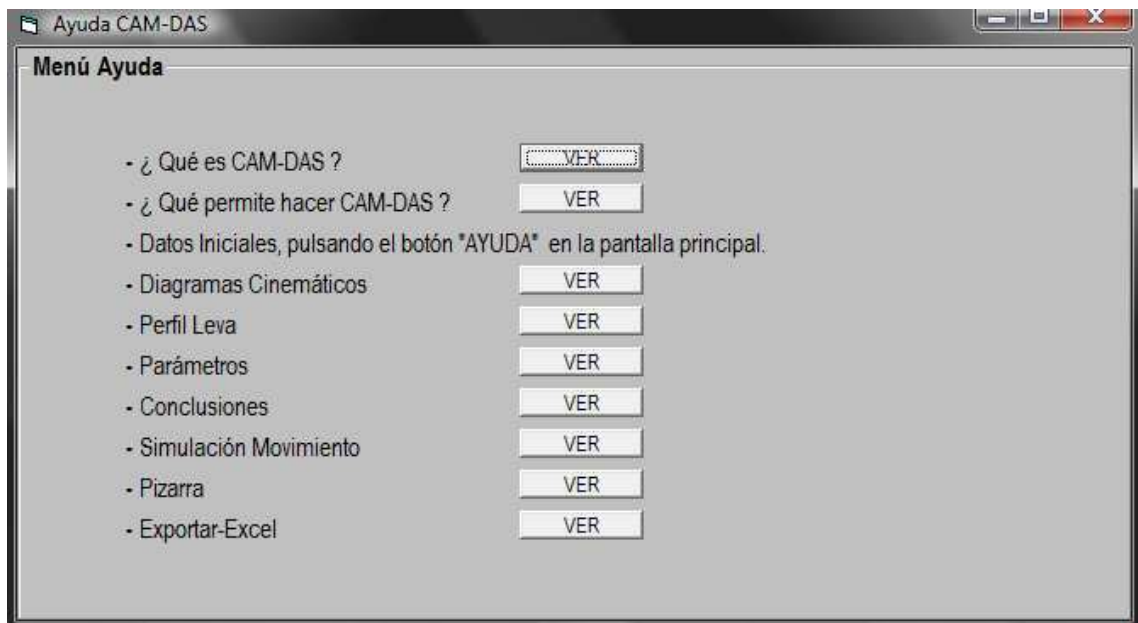


Fig. 7.26: Menú que se muestra al pulsar "Contenido".

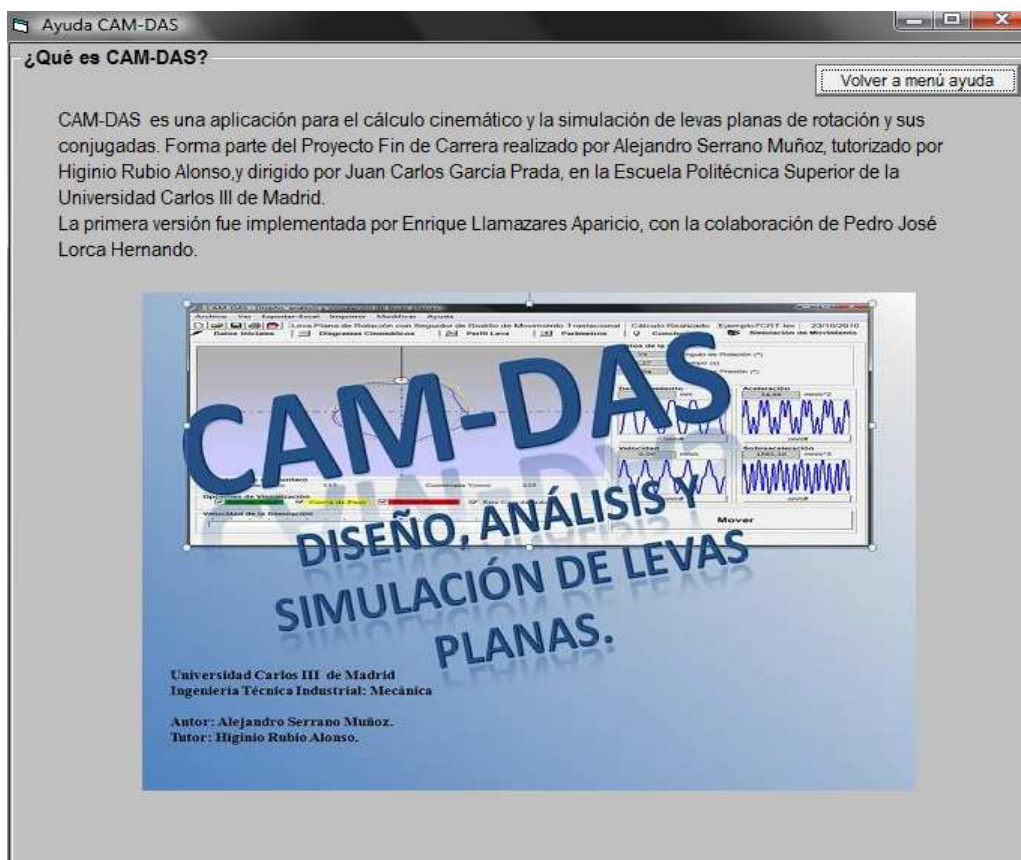
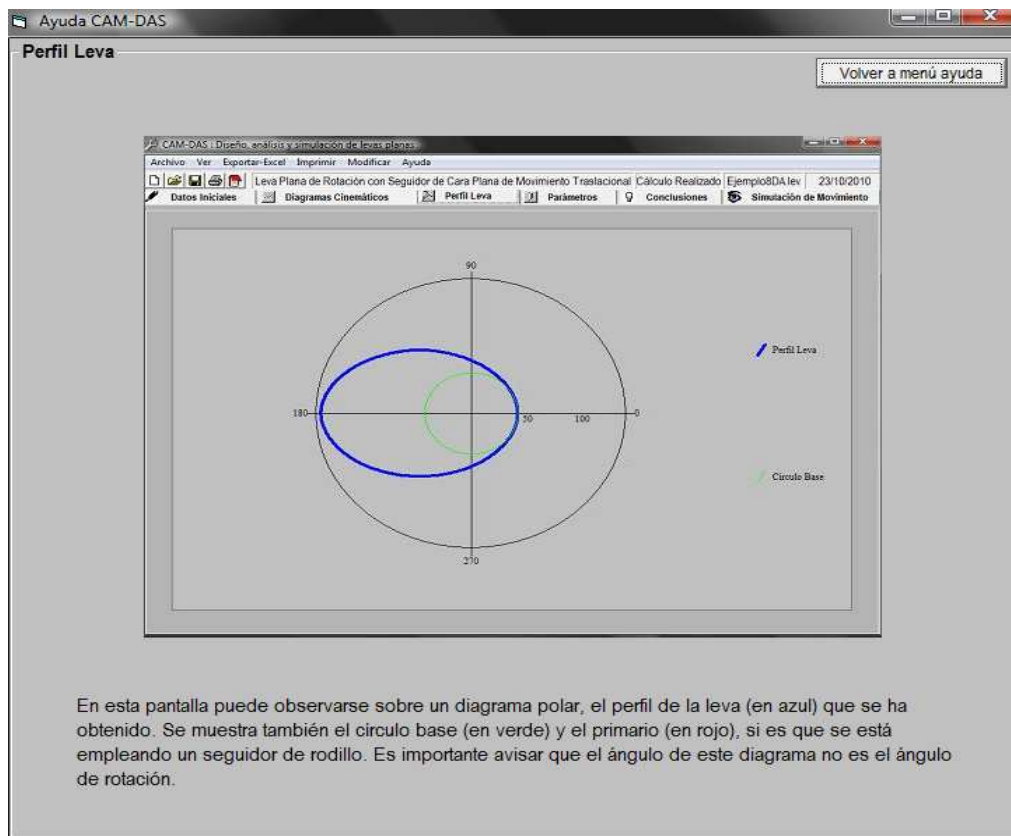


Fig. 7.27: Ejemplos de ayuda que se muestra al pulsa "VER" en el menú de la figura 6.26.

## B) Barra de herramientas



Figura 7.28: Botones de la barra de herramientas

La barra de herramientas es el conjunto de botones bajo el menú. Contiene alguna de las opciones propias de aquel para proporcionar un acceso más rápido. De izquierda a derecha están: “Nueva leva”, “Abrir leva”, “Guardar leva”, “Imprimir pantalla” y “Pizarra”. La opción “Guardar leva” se comportará como un “Guardar como...” solicitando el título que se desea dar al archivo si es la primera vez que se salva. “Imprimir pantalla” imprimirá la pantalla que se esté utilizando en ese momento. “Ver pizarra” mostrará dicho elemento con el grupo de levas definido por la forma y movimiento del seguidor que se tenga seleccionado en ese instante.

## C) Barra de estado



Figura 7.29: Barra de estado

La barra de estado, a la derecha de la barra de herramientas, presenta información referente a la leva en curso. De izquierda a derecha muestra: el tipo de leva, forma y movimiento del seguidor; si el cálculo ha sido realizado o no; el título del archivo que contiene la leva en el caso de que ya haya sido salvado (de lo contrario marcará “Sin Título”); y finalmente la fecha actual del sistema.

### 7.3.8 Cálculo de levas conjugadas

En este apartado se explicará con exactitud como con la nueva versión de CAM-DAS el usuario podrá calcular el perfil la leva conjugada de cualquier leva obtenida como anteriormente se ha explicado, exceptuando las levas alternativas.

El proceso de obtención de la conjugada podrá iniciarse cuando el cálculo de la leva inicial este completo y, por supuesto ésta sea aceptable.

Como se decía en el apartado 7.3.1 y veíamos en la figura 7.14, el botón **“Obtener Leva Conjugada”**, estará deshabilitado hasta pulsar **“Calcular”**.

Cuando el botón ya se encuentre operativo y dependiendo del tipo de leva inicial del que partamos, al pulsar **“Obtener Leva Conjugada”**, aparecerá sobrepuesto al formulario principal un formulario como los que a continuación se describen y que no podrá cerrarse hasta finalizar el cálculo (cuestión que se avisa al usuario mediante un mensaje):

#### 7.3.8.1 Leva conjugada con seguidor de cara plana traslacional.

En la pantalla que observamos en la figura 7.30, vemos que se ilustra el montaje del tipo de leva que vamos a calcular.

Los datos que deberemos aportar para el cálculo son:

- Radio base de la leva inicial: este dato lo incorpora automáticamente CAM-DAS.
- Distancia entre los palpadores: dato facilitado por el usuario, esta distancia permanecerá constante en todo momento durante el movimiento del conjunto. Su valor deberá alcanzar un mínimo, CAM-DAS nos avisará en caso contrario indicándonos que debe ser modificado.

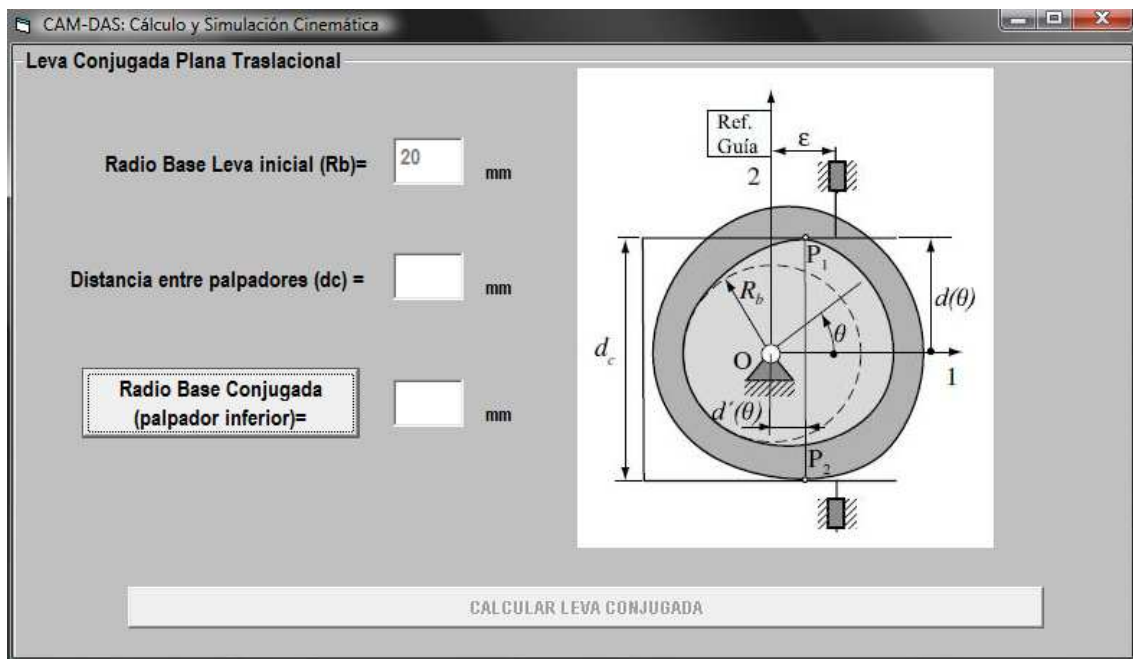


Fig. 7.30: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva con seguidor de cara plana con movimiento traslacional.

Una vez incorporados los datos señalados ya podremos obtener el radio base de la leva conjugada. Si todo es correcto el botón **“Calcular Leva Conjugada”** dejará de estar deshabilitado y podrá ser pulsado por el usuario para completar el cálculo.

Completado el cálculo el usuario dispondrá de toda la información (diagramas cinemáticos, perfil de la leva, parámetros, conclusiones y simulación) en el formulario principal. Pudiendo ver comparadas las gráficas de la leva inicial y su conjugada en la pizarra.



### 7.3.8.2 Leva conjugada con seguidor de cara plana oscilatorio.

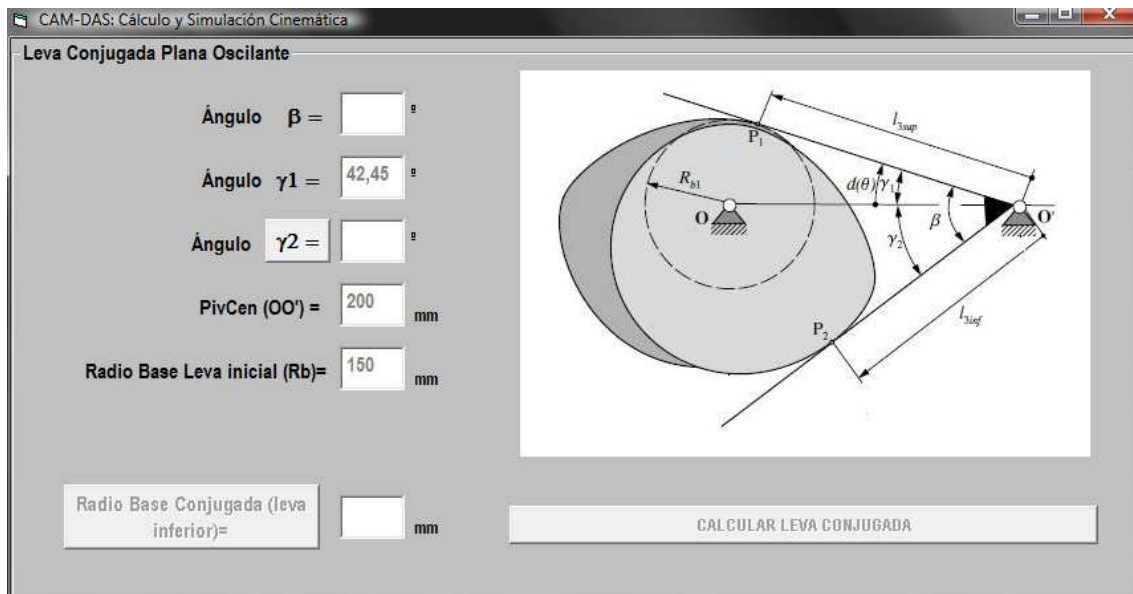


Fig. 7.31: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva con seguidor de cara plana con movimiento oscilatorio.

En este caso los palpadores de cara plana deberán moverse solidariamente sin perder el contacto en ningún momento, por tanto el ángulo  $\beta$  permanecerá constante durante todo el recorrido.

Los datos que incorporara directamente CAM-DAS , que provienen de la leva inicial son:

- Ángulo  $\gamma_1$ : es el ángulo que forman el seguidor superior y la recta  $OO'$ .
- PivCen: distancia entre el centro de la leva y el pivote del seguidor.
- Radio Base de la leva inicial.

Para iniciar el cálculo el usuario deberá fijar el ángulo  $\beta$ , este ángulo en ningún caso podrá ser negativo y siempre mayor que cero.



Ya fijado el ángulo  $\beta$ , como vemos en la figura 7.31, el usuario obtendrá el ángulo  $\gamma_2$  pulsando el correspondiente botón.

El botón **“Radio Base Conjugada (leva inferior)”**, se activará si hemos completado correctamente todos los pasos anteriores, dando como resultado el radio que buscábamos y activando el botón **“Calcular Leva Conjugada”**, con el que finalizaremos el cálculo y obtendremos la leva conjugada que como en el caso anterior podremos analizar en el formulario principal.

### 7.3.8.3 Leva conjugada con seguidor de rodillo traslacional.

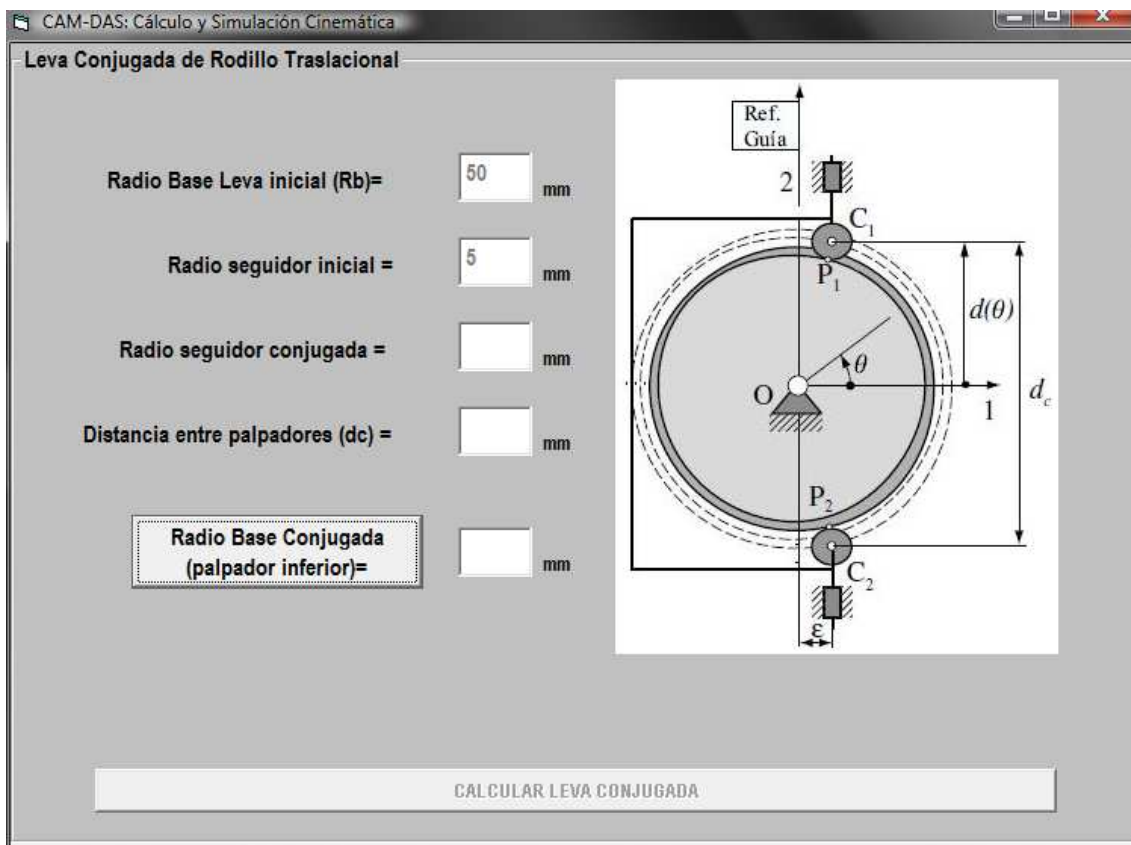


Fig. 7.32: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva con seguidor de rodillo con movimiento traslacional.

Observamos en la figura 7.32 que CAM-DAS directamente nos fija los valores del radio base de la leva y el radio del seguidor ambos datos corresponden a la leva inicial.

El usuario podrá fijar a su gusto los siguientes datos:

- Radio seguidor conjugada: este radio no tiene porque ser igual al del seguidor de la leva inicial aunque habitualmente se tome el mismo valor.
- Distancia ente palpadores: al igual que en el caso de palpadores planos traslacionales esta distancia permanecerá constante durante todo el movimiento de los palpadores. En caso de no alcanzar el mínimo geométrico necesario CAM-DAS informará al usuario.

Con toso estos datos se calculara el radio base de la leva conjugada y posteriormente se finalizará el cálculo pulsando **“Calcular Leva Conjugada”**.

El formulario principal nos mostrará todo los datos que deseemos conocer. Y en la pizarra el usuario dispondrá de una comparativa de diagramas.

#### 7.3.8.4 Leva conjugada con seguidor de rodillo oscilatorio.

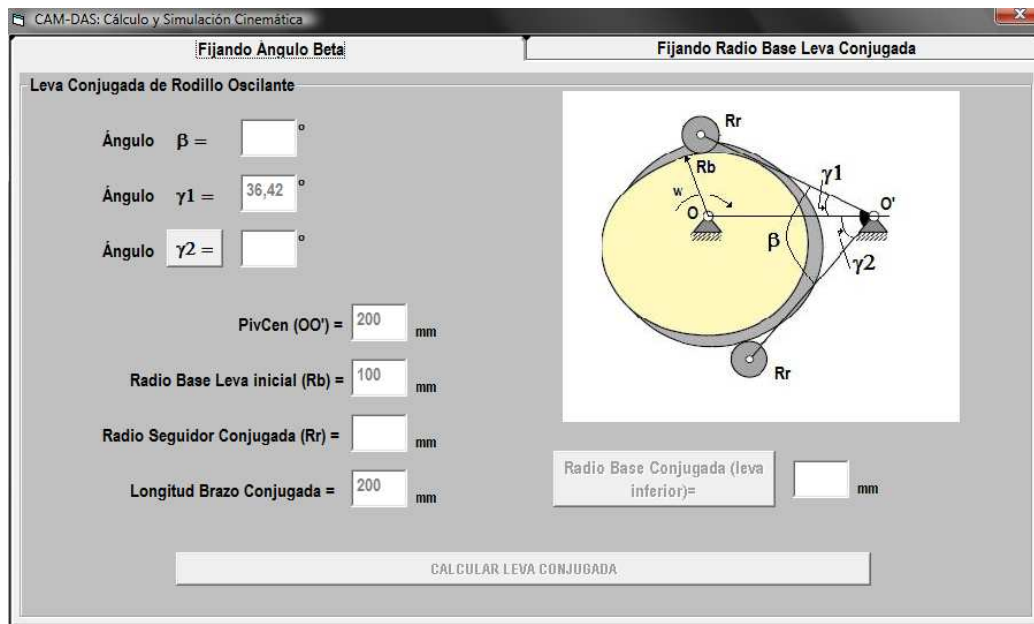


Fig. 7.33: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva con seguidor de rodillo con movimiento oscilatorio, fijando el ángulo beta.

Este caso tiene dos variantes, una será fijando el ángulo  $\beta$  (figura 7.33), y la otra será fijando el radio base de la leva conjugada (figura 7.34).

En la primera variante el usuario aportará el valor del ángulo  $\beta$  y calculará mediante el botón “ $\gamma_2$ ” dicho ángulo.

Con este ángulo y dando un valor al radio del seguidor de la conjugada, que como en el caso anterior puede tener un valor distinto al de la inicial, obtendremos el radio base de nuestra leva conjugada.

El usuario terminará el cálculo y pasará a observar la leva obtenida y sus características pulsando “**Calcular Leva Conjugada**”.

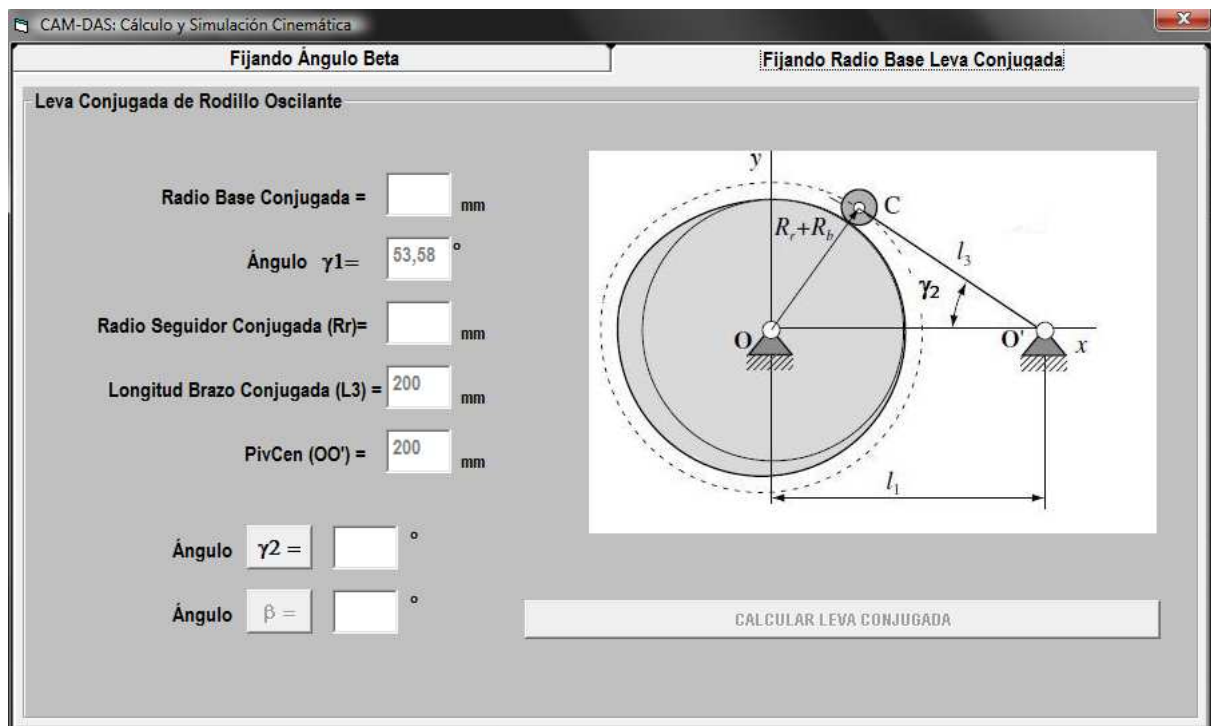


Fig. 7.34: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva con seguidor de rodillo con movimiento oscilatorio, fijando el radio base de la leva conjugada.

Para el caso en el que el usuario pretenda calcular la leva conjugada fijando su radio base (figura 7.34), éste deberá dar valores además de al citado radio base, al radio del seguidor de la conjugada para obtener consecutivamente, pulsando sus respectivos botones, los ángulos  $\gamma_2$  y  $\beta$ , para terminar con el botón “**Calcular Leva Conjugada**”, como en casos anteriores.

### 7.3.8.5 Leva de anchura constante con palpador plano traslacional.

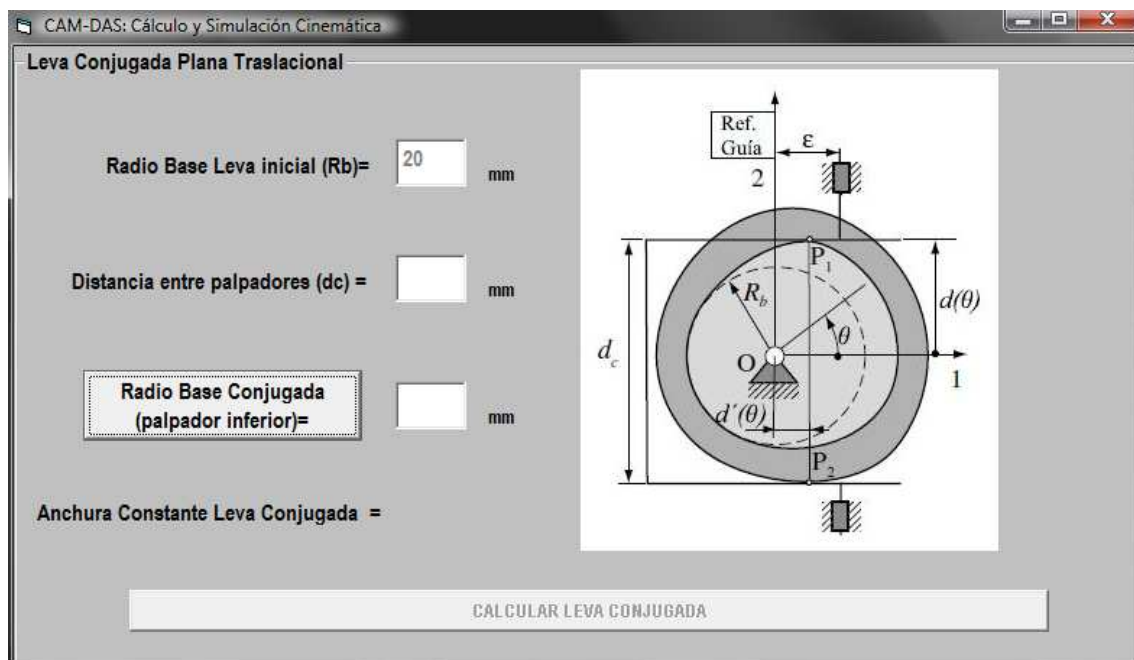


Fig. 7.35: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva de anchura constante con seguidor plano con movimiento traslacional..

Este caso difiere ligeramente con el caso de leva con seguidor de cara plana con movimiento traslacional, una vez aportados por el usuario la distancia entre los palpadores y fijado el radio base inicial por CAM-DAS, al pulsar el botón “**Radio Base Conjugada (palpador inferior)**”, además del radio, CAM-DAS calculará e incorporará a la pantalla la “Anchura Constante Leva Conjugada”, dato imprescindible para calcular el perfil de la conjugada. El cálculo finalizará al igual que en casos anteriores.

### 7.3.8.6 Leva de anchura constante con palpador de rodillo traslacional.

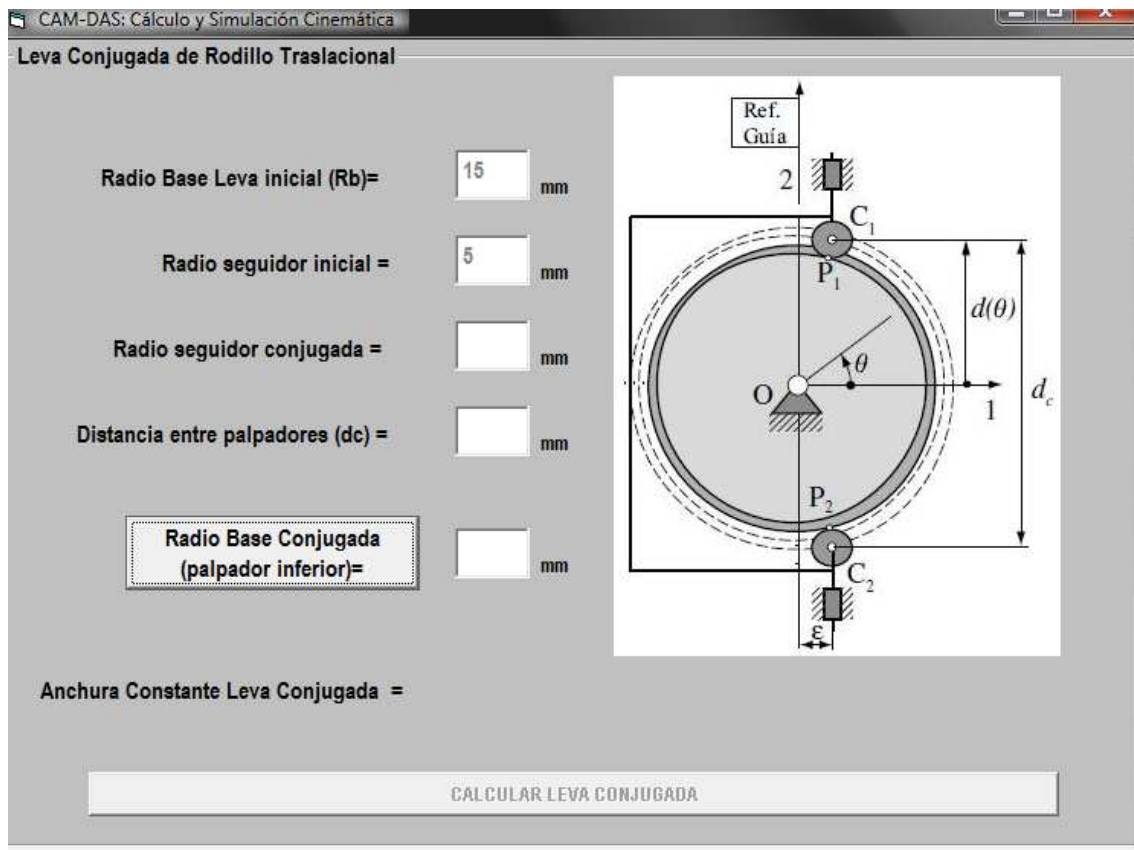


Fig. 7.36: Pantalla de cálculo de la leva conjugada para el caso de leva de anchura constante con seguidor de rodillo con movimiento traslacional.

Como en el anterior caso de anchura constante, al incorporar todos los datos mencionados en el apartado para leva conjugada con seguidor de rodillo con movimiento traslacional, la única diferencia es que a la hora de obtener el radio base de la leva conjugada con el respectivo botón, CAM-DAS vuelve a incorporar la anchura constante que deberá tener nuestra leva conjugada.

La finalización del cálculo sigue el mismo camino que en todos los casos explicados.

### 7.3.9 Retorno a la leva inicial

Cuando el usuario tome la decisión de calcular la leva conjugada, y lleve a cabo el cálculo, puede que quiere volver a la leva inicial, o si la leva conjugada no puede ser calculada por problemas geométricos. Por si se presentan estas situaciones se ha dispuesto el botón **“Obtener Leva Inicial”**.

Este botón solo será visible cuando el cálculo de la conjugada este completo. Pulsándolo los diagramas pasarán a ser los iniciales, pero deberemos introducir en la zona de “Magnitudes geométricas y Velocidad angular” los valores que CAM-DAS nos indicará de la leva inicial, dependiendo del tipo de leva en el que nos encontremos. Introducidos estos datos se pulsará “Calcular” y podremos ver nuestra leva inicial con todas sus características.

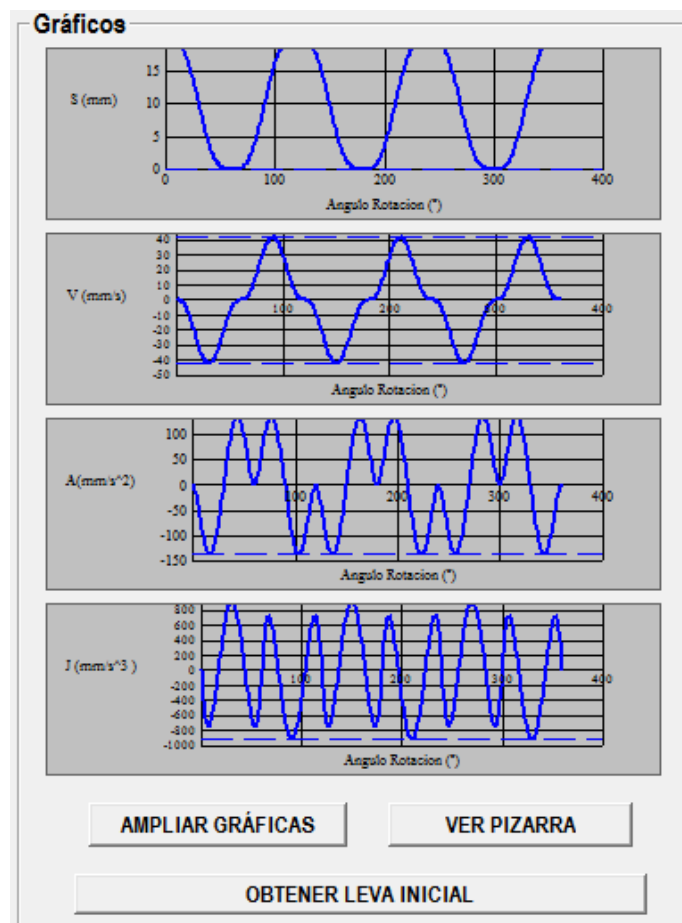


Fig. 7.37: Detalle de la parte derecha de la pantalla inicial, donde podemos ver el botón “Obtener Leva Inicial”.

## 7.4 Biblioteca de ejemplos incluidos en CAM-DAS

### 7.4.1 Ejemplo1RT.lev

Este primer caso es una leva con seguidor de rodillo de movimiento traslacional. El movimiento que se desea realice el seguidor es un ascenso armónico y consecutivamente un descenso armónico sin detenimiento, cada uno con  $\beta=180^\circ$ . La curva de desplazamiento y sus derivadas asociadas son continuas tal y como se puede ver a la derecha de los datos de partida. Todo hace pensar que se está construyendo una leva excéntrica, sin embargo no es así: si se procede al cálculo y se observa el radio de curvatura se verá como éste no es constante, como correspondería en tal caso, recuérdese que una leva excéntrica tiene un contorno circular y gira sobre un punto que no es su centro. Si posee forma circular, el radio de curvatura del perfil debe ser constante en todo el giro de la leva.

**Tipo de Leva**

Leva Rotacional     Anchura constante

**Forma del Seguidor**

Rodillo     Cara Plana

**Movimiento del Seguidor**

Traslacional     Oscilante

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular**

Radio Base = 50 mm    Excentricidad = 0 mm

Radio Seg. = 5 mm    w = 1 rad/s

**Construcción del Movimiento de Salida**

Armónico Simple    L = mm    B = °

Tramo	Tipo de Movimiento	L	B	Pi	Pf
1	Armónico Simple	50	180	0,	50,
2	Armónico Simple	-50	180	50,	0,

**Gráficos**

S

V

A

J

AMPLIAR GRÁFICAS    VER PIZARRA

OBTENER LEVA CONJUGADA

Calcular

Fig. 7.38: "Datos Iniciales" para el Ejemplo1RT.lev



Si se observa la forma del contorno con atención se verá que ciertamente no es un círculo perfecto. Curiosamente si se aumenta el radio del seguidor y se hace mucho más grande que el radio base de la leva, entonces la situación empieza a parecerse más a un seguidor de cara plana (tiene radio de curvatura  $\infty$ ) y sólo en ese caso la leva empieza a aproximarse realmente a una excéntrica. Hágase por ejemplo diez veces más grande que el radio base, se verá como el radio de curvatura se hace prácticamente constante. Por otro lado, si aumentar el radio del seguidor hace que el caso se aproxime a un traslacional de cara plana, entonces debería también cumplirse que el ángulo de presión se redujese drásticamente, pues bien, así es, ábrase la pizarra y calcúlese la leva para los datos originales y luego aumentando el radio de seguidor en un factor de 10, podrán observarse todas las apreciaciones anteriores.

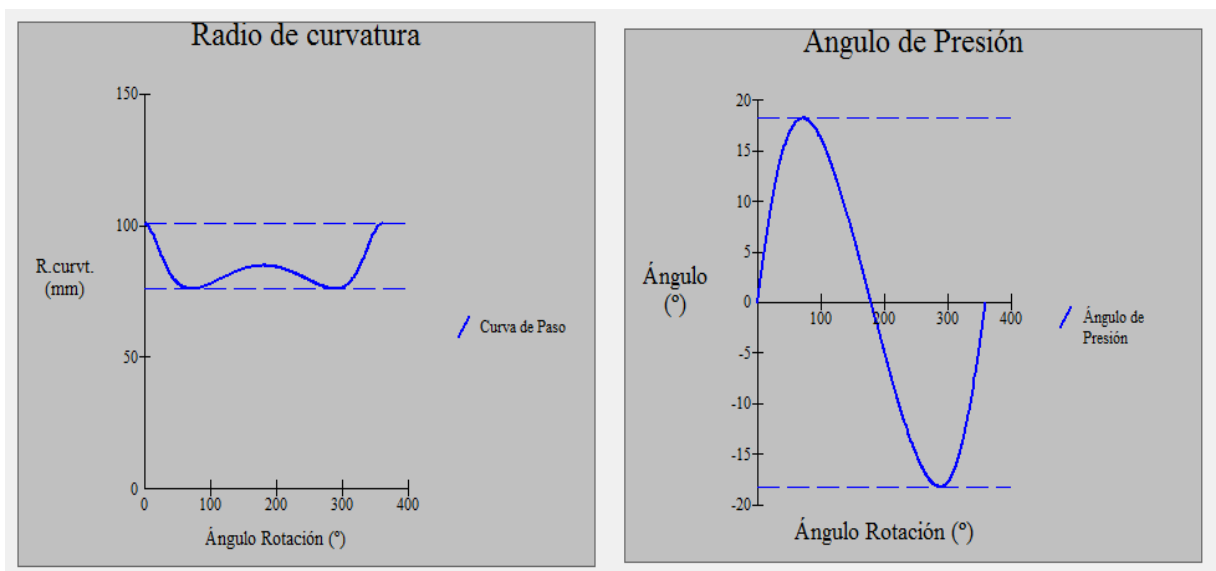


Fig. 7.39: Diagramas “Radio de Curvatura” y “Ángulo de Presión” para el Ejemplo1RT.lev



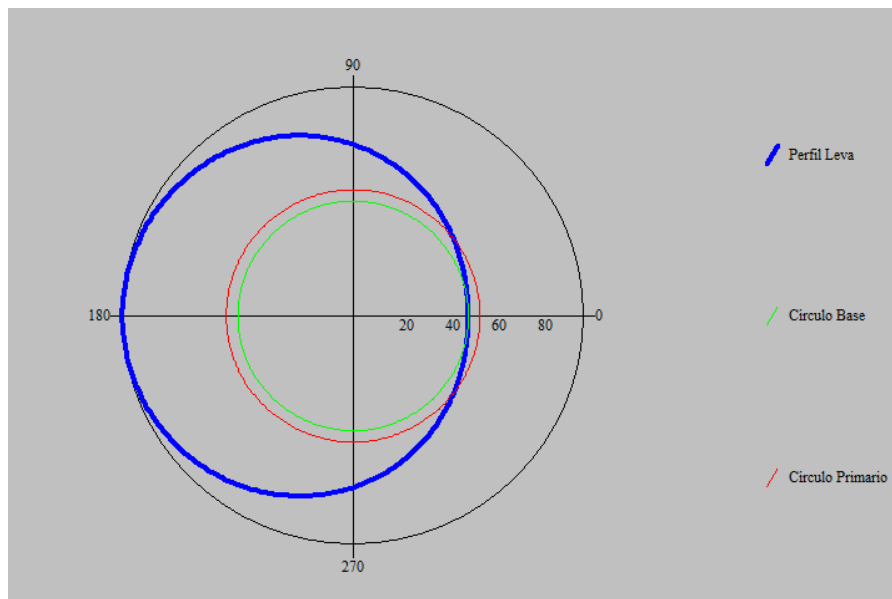


Fig. 7.40: "Perfil Leva" para el Ejemplo1RT.lev

#### 7.4.2 Ejemplo2RO.lev

Este es un caso sencillo de seguidor oscilante de rodillo que desde su reposo sobre el círculo base (punto de trazo sobre el primario) gira  $10^\circ$  en el sentido de las agujas del reloj mediante un movimiento polinómico 4-5-6-7 y durante una rotación parcial de leva de  $120^\circ$ , después se detiene en esa posición durante otros  $120^\circ$  y desciende de nuevo según otro polinómico 4-5-6-7 hasta la posición inicial, en donde el rodillo toca el círculo base y que se corresponde con un ángulo del brazo respecto de la horizontal de  $36.42^\circ$ . Es una leva aceptable, no existen discontinuidades, ni cúspides/rebajes y el ángulo de presión se mantiene por debajo de  $35^\circ$  ( $-33.2^\circ$ ).

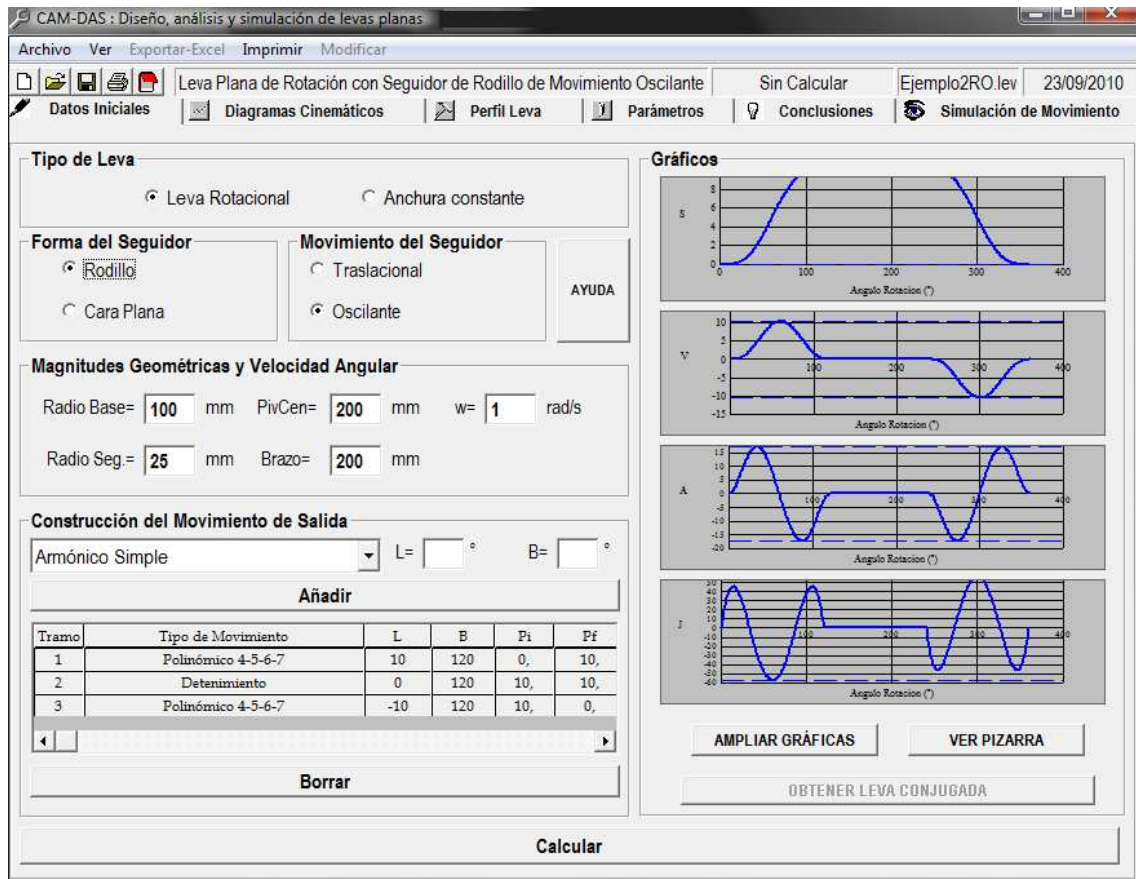


Figura 7.41: "Datos Iniciales" para Ejemplo2RO.lev

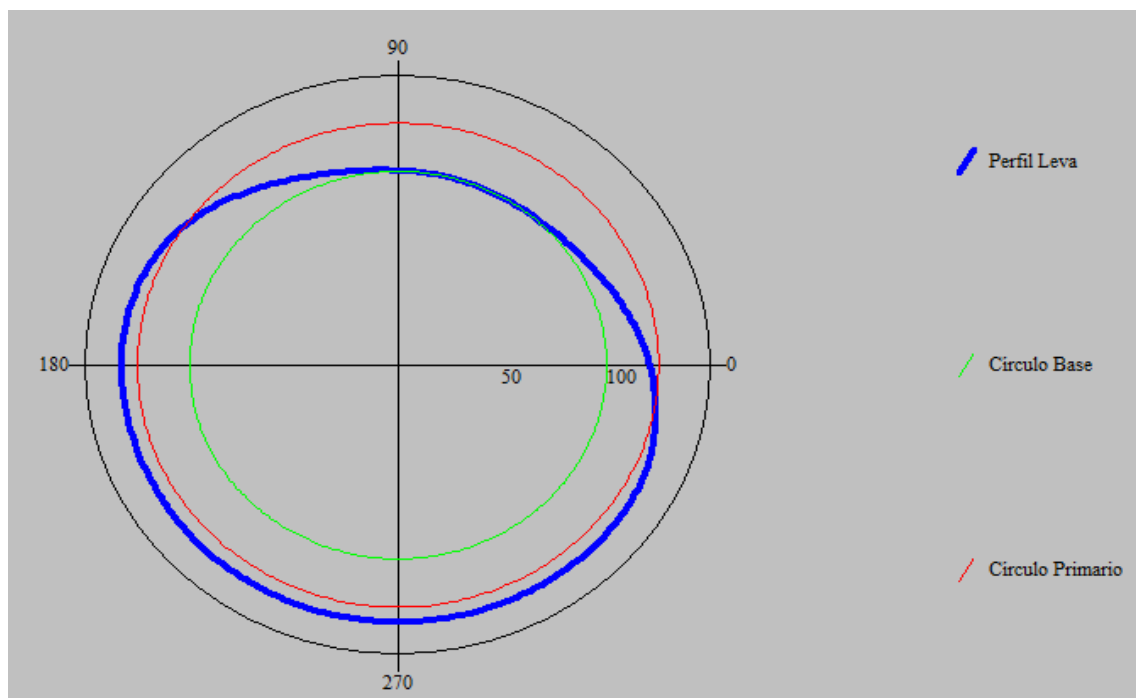


Fig. 7.42: "Perfil Leva" para el Ejemplo2RO.lev

### 7.4.3 Ejemplo3PT.lev

Supóngase que partiendo de esta leva se plantea la necesidad de reducir su tamaño al mínimo posible por necesidades de coste y de espacio. Si el movimiento del seguidor no puede alterarse, puesto que son esos los tramos específicos que debe realizar, entonces es evidente que el único parámetro que puede alterar el tamaño es el radio base de la leva, reduciendo éste disminuirá su tamaño. El mínimo vendrá dado por la situación en la que en el perfil de la leva aparezca una cúspide (situación previa al rebaje). La manera de realizarlo es tan simple como ir disminuyendo dicho radio y calculando hasta que se produzca la situación adversa; en ese momento el radio de curvatura del contorno se hará cero. Si se prefiere se puede observar en “Conclusiones” cuando la leva se hace inaceptable, se toma el valor mínimo de radio base que produzca un cálculo aceptable, en este caso 16.5 mm (este valor es el límite mínimo, así que es conveniente añadir un margen de seguridad).

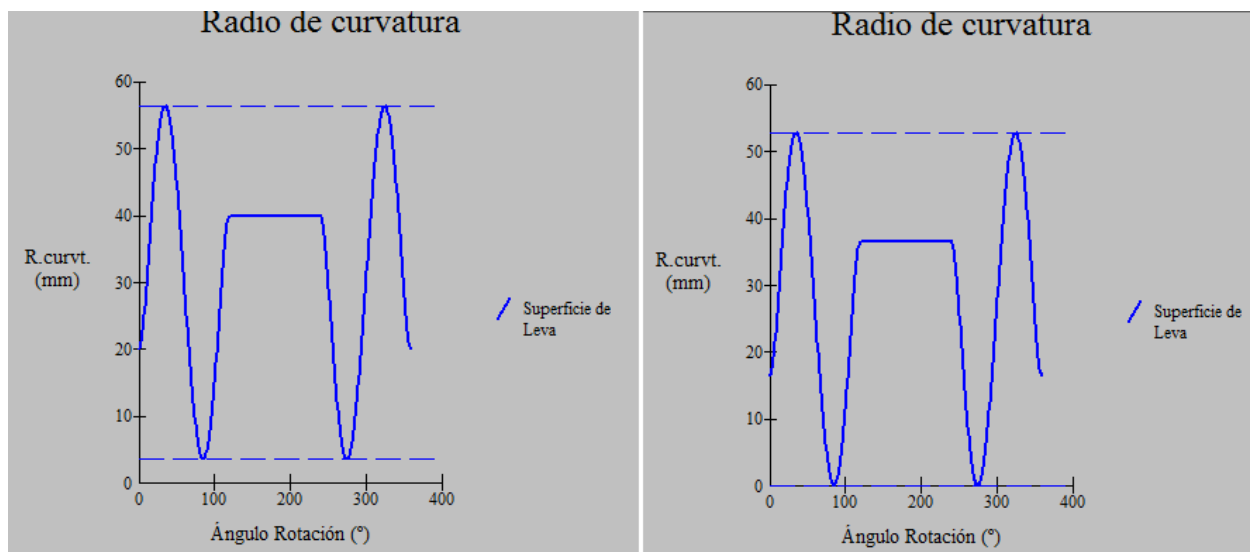


Fig. 7.43: Comparativa del radio de curvatura antes de disminuir el radio base (derecha) y después de disminuir el radio base, para el Ejemplo3PT.lev

### 7.4.4 Ejemplo4PO.lev

Este ejemplo ilustra el uso de los movimientos de medio periodo junto a tramos de velocidad constante. Consiste en un ascenso que comienza con un tramo semicicloidal  $V_i=0$  que se une a un tramo de velocidad constante, notar que éste, al tratarse de un seguidor oscilante, se refiere a la velocidad angular de giro del mismo y no a la lineal (no confundir tampoco con la de giro de la leva). Para permitir un detenimiento tras la elevación, se reduce la velocidad a cero con el empleo de un semicicloidal  $V_f=0$ . Tras el detenimiento, el seguidor oscilante retorna a su posición inicial de reposo, sobre el círculo base, mediante un tramo polinómico 4-5-6-7. Entre los resultados se obtiene la longitud mínima del seguidor, que debe ser de 156.04 mm. La leva es aceptable (excepto para velocidades angulares elevadas).

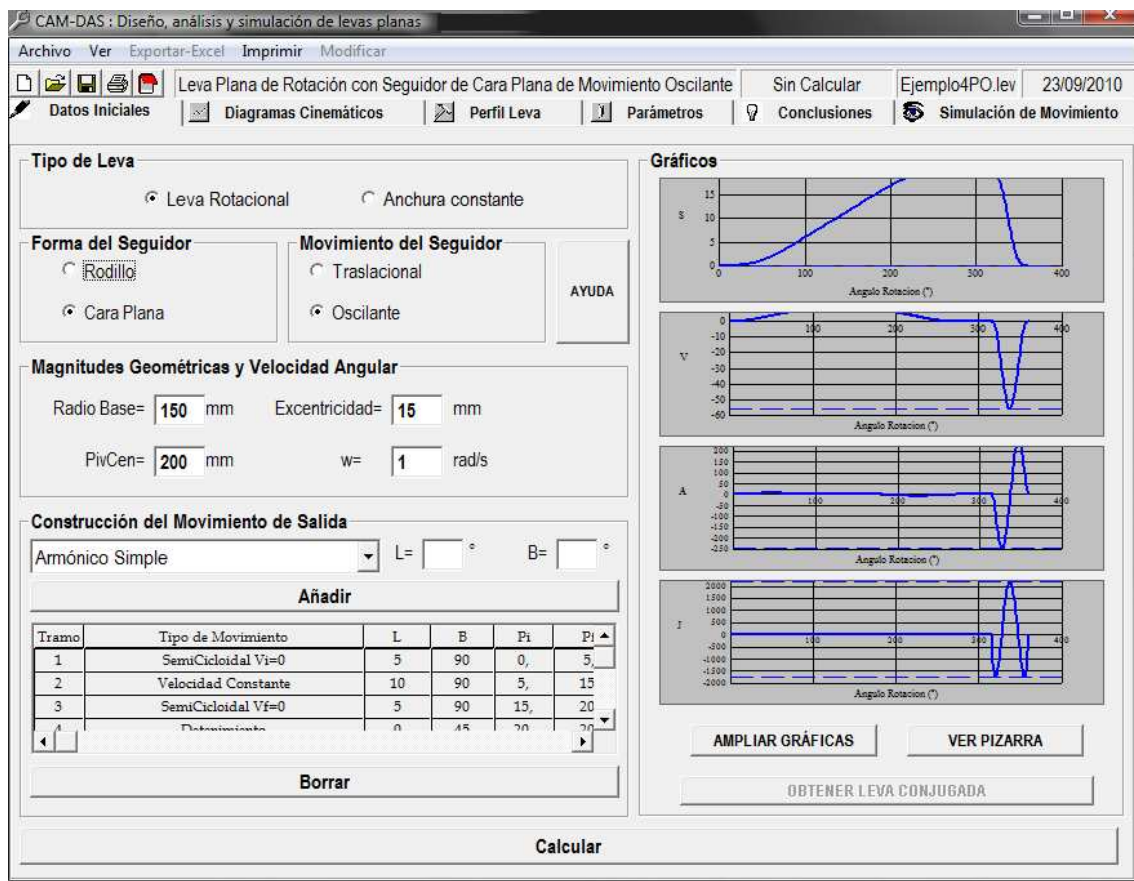


Fig. 7.44: “Datos Iniciales” para el Ejemplo4PO.lev

CAM-DAS : Diseño, análisis y simulación de levas planas

Archivo Ver Exportar-Excel Imprimir Modificar Ayuda

Leva Plana de Rotación con Seguidor de Cara Plana de Movimiento Oscilante Cálculo Realizado Sin Título 22/09/2010

Datos Iniciales Diagramas Cinemáticos Perfil Leva Parámetros Conclusiones Simulación de Movimiento

**Discontinuidad en Sobreaceleración. Leva no apta para elevadas velocidades**

Concepto	Máximo	Mínimo	Comentarios
Desplazamiento (°)	20,	0,	Continua
Velocidad (°/s)	6,37	-55,62	Continua
Aceleración (°/s <sup>2</sup> )	243,02	-243,02	Continua
Sobreaceleración (°/s <sup>3</sup> )	2160,88	-1733,58	Discontinua
Radio de Curvatura (mm)	413,92	6,6	El perfil está libre de cúspides y/o rebajes producidos por concavidades
Distancia sobre el seguidor desde su eje de giro al punto de contacto (mm)	156,04	59,09	El máximo se corresponde con la longitud mínima de la cara del seguidor necesaria para asegurar el contacto

Fig. 7.45: "Conclusiones" para Ejemplo4PO.lev

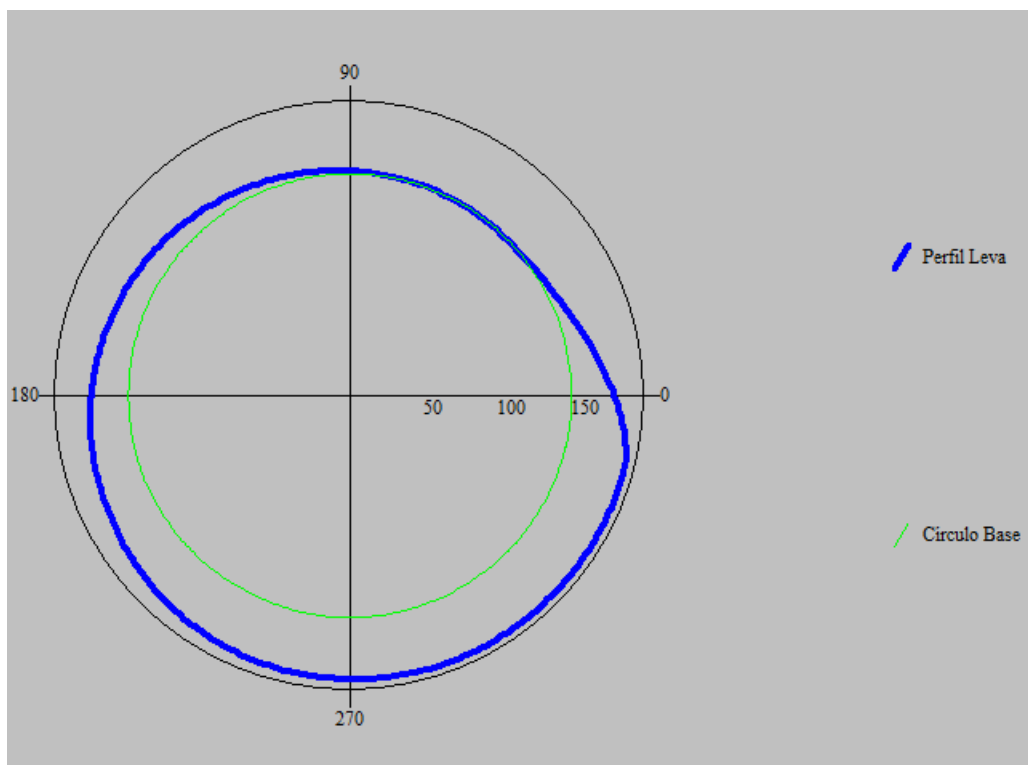


Fig. 7.46: "Perfil Leva" para Ejemplo4PO.lev

### 7.4.5 Ejemplo5ACRT.lev

Este ejemplo se trata de un mecanismo desmodrómico, una leva de rotación de anchura constante de seguidores de rodillo con movimiento traslacional, debido al tipo de seguidores, la denominaremos leva de diámetro constante.

Como se ha explicado a lo largo del proyecto la ley de desplazamiento, ley de anchura constante, es una ley predefinida formada por un primer tramo de ascenso o alejamiento de tipo armónico simple durante  $120^\circ$  de rotación de la leva, a continuación presenta un detenimiento de  $60^\circ$ , el descenso o acercamiento que sigue al detenimiento también es de tipo armónico simple y de  $120^\circ$ , por último y para completar el giro de  $360^\circ$  de la leva, la ley finaliza con otro detenimiento de  $60^\circ$ .

Se debe recordar que para esta ley de anchura constante, la aceleración presentará una discontinuidad que como excepción será aceptada para este tipo de leva, ya que serán utilizadas a bajas velocidades.

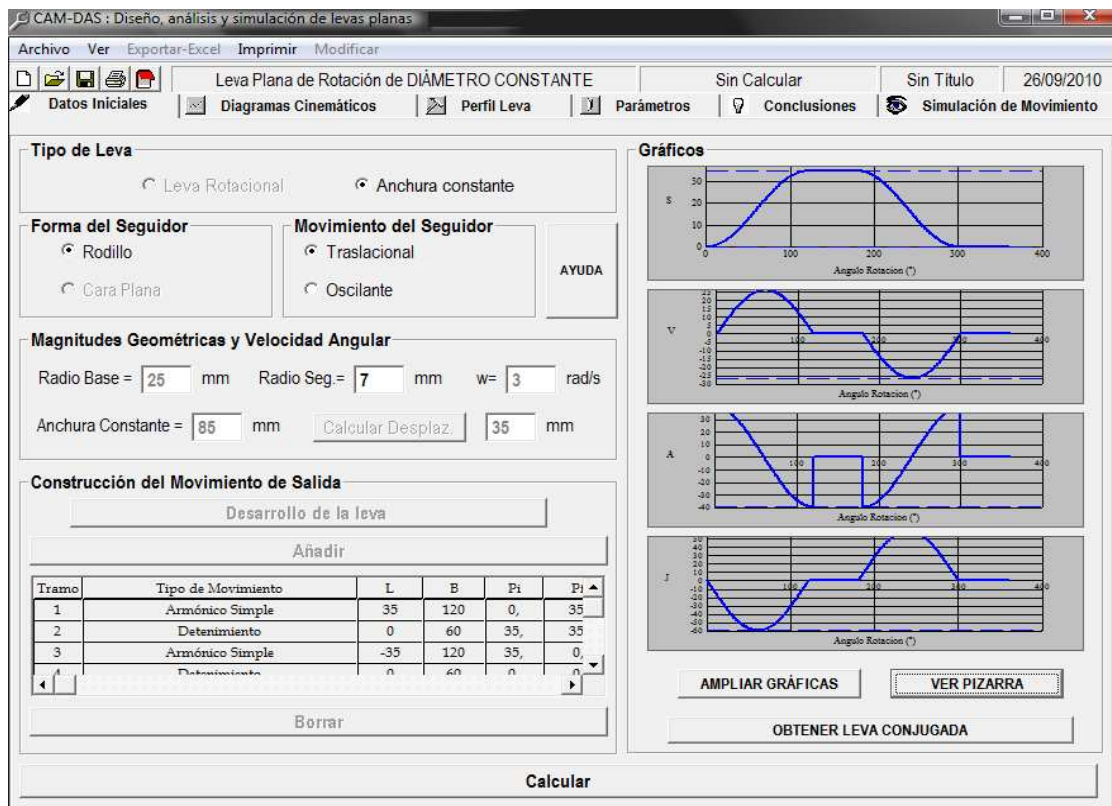


Fig. 7.47: "Datos Iniciales" para el Ejemplo5ACRT.lev

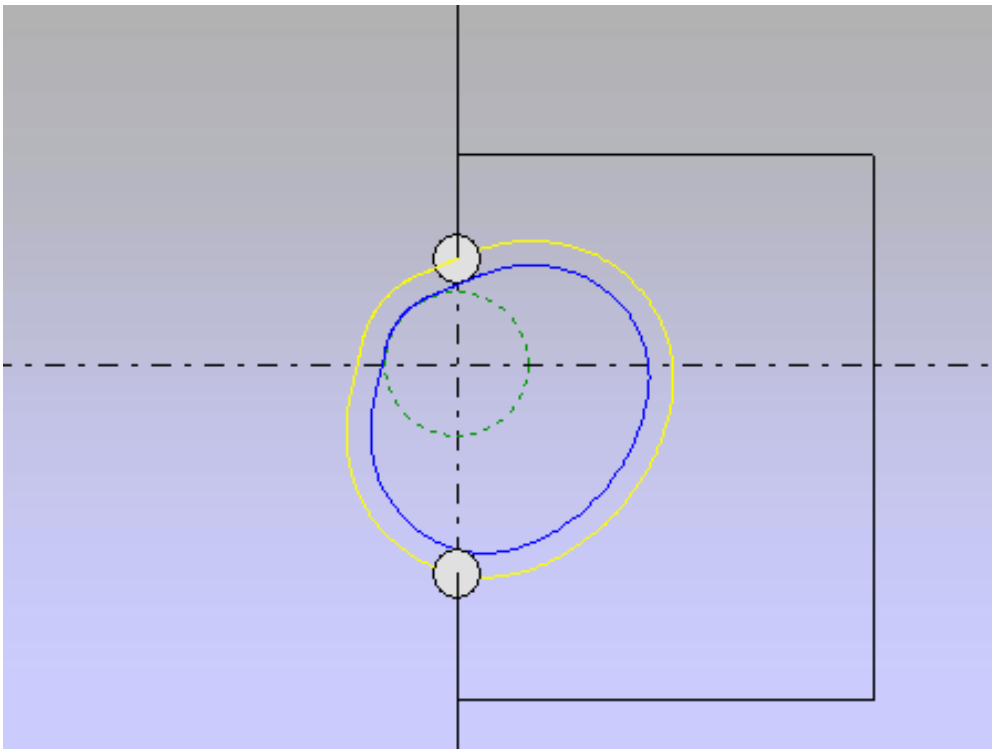


Fig. 7.48: Simulación para el Ejemplo5ACRT.lev

#### 7.4.6 Ejemplo6ACPT.lev

En este ejemplo podemos observar una leva de anchura constante con seguidores planos con movimiento traslacional. La ley es idéntica a la explicada en el ejemplo anterior, ley de anchura constante, al estar formada por tramos de movimiento armónico simple son conocidas también como levas armónicas.

La distancia entre dos rectas tangentes al perfil trazadas de manera que sean paralelas se mantendrá constante durante todo el movimiento de la leva.



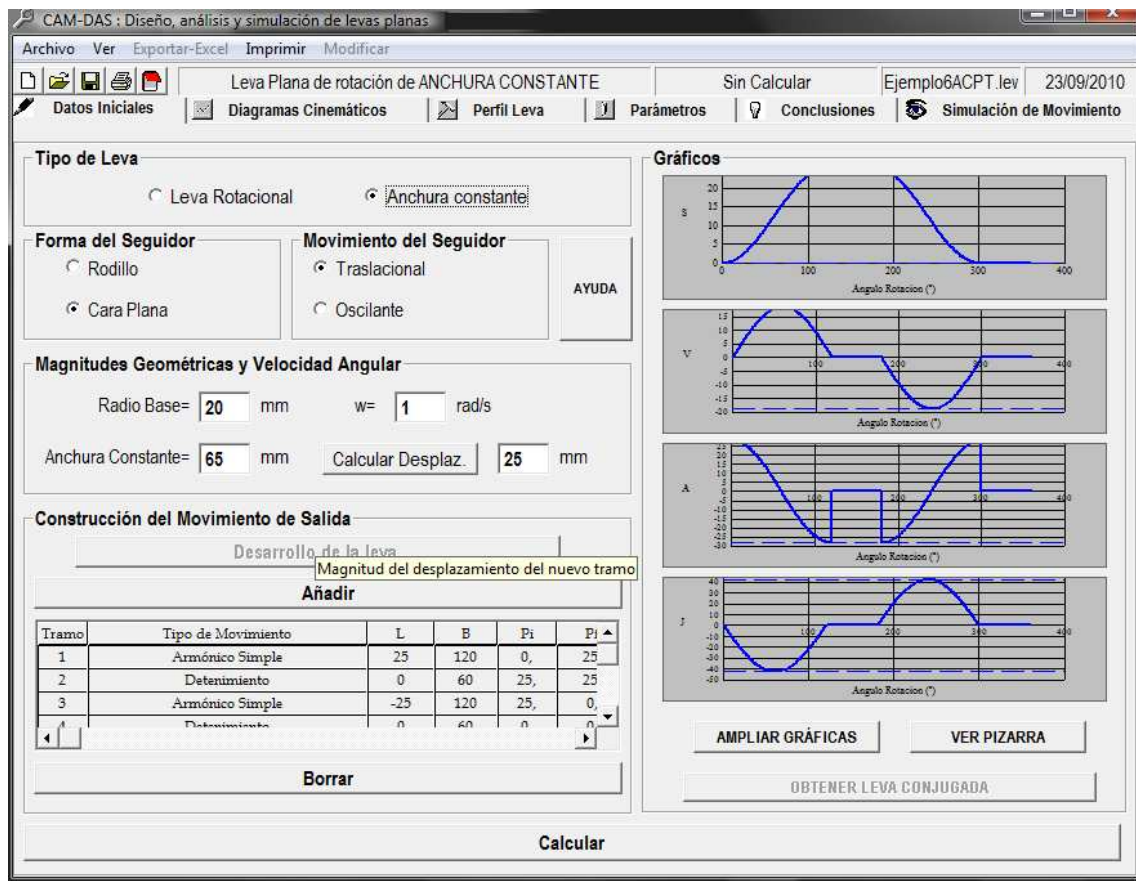


Fig. 7.49: "Datos Iniciales" para el Ejemplo6ACPT.lev

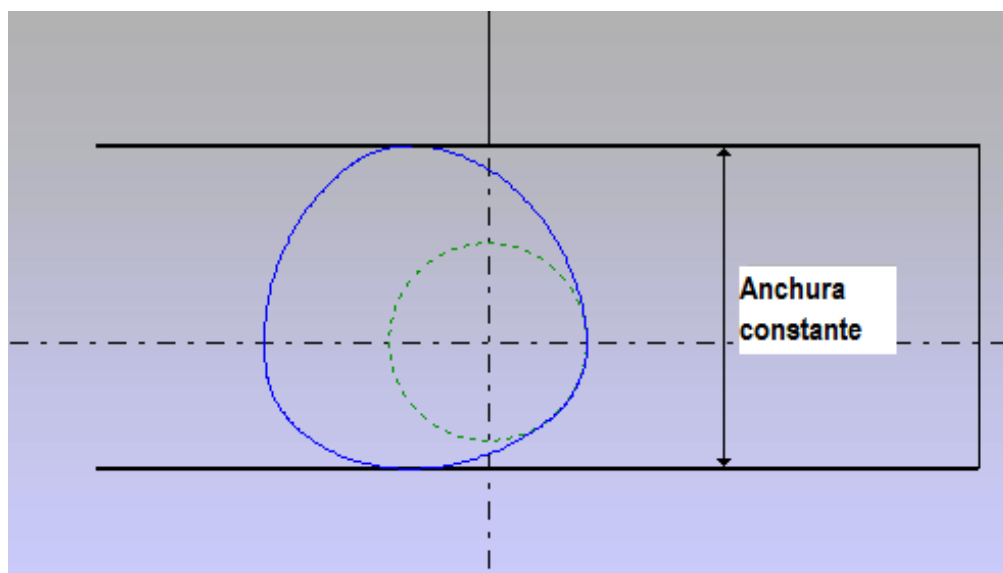


Fig. 7.50: Simulación para el Ejemplo6ACPT.lev



### 7.4.7 Ejemplo7CRT.lev

En esta ocasión el ejemplo nos presenta una leva de seguidor de rodillo con movimiento traslacional, donde la ley de desplazamiento contiene diez tramos, cinco de alejamiento y cinco de acercamiento de tipo Polinómico 4-5-6-7, con  $L = 20$  mm.

Debido a que la obtención de la conjugada es un proceso opcional, con este ejemplo y mostraremos su obtención.

**Tipo de Leva**

Leva Rotacional  Anchura constante

**Forma del Seguidor**

Rodillo  Cara Plana

**Movimiento del Seguidor**

Traslacional  Oscilante

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular**

Radio Base =  mm Excentricidad =  mm

Radio Seg. =  mm  $w =$  rad/s

**Construcción del Movimiento de Salida**

Armónico Simple L=  mm B=  °

Tramo	Tipo de Movimiento	L	B	Pi	Pj
1	Polinómico 4-5-6-7	20	36	0,	20
2	Polinómico 4-5-6-7	-20	36	20,	0,
3	Polinómico 4-5-6-7	20	36	0,	20
4	Polinómico 4-5-6-7	20	36	20,	0,

**Gráficos**

S

V

A

J

AMPLIAR GRÁFICAS VER PIZARRA

OBTENER LEVA CONJUGADA

Calcular

Fig. 7.51: "Datos Iniciales" para el Ejemplo7CRT.lev

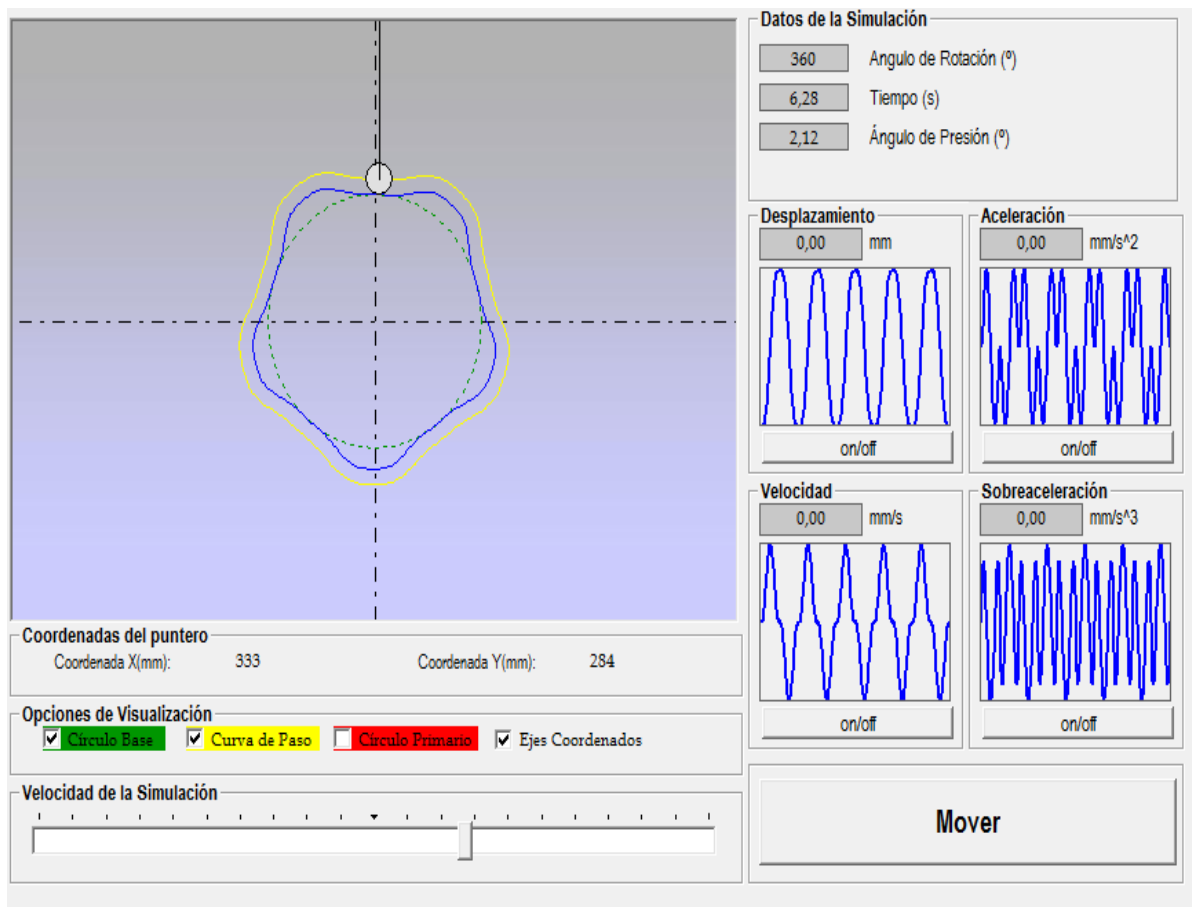


Fig. 7.52: “Simulación” para el Ejemplo7CRT.lev

Antes de iniciar el cálculo de la conjugada observaremos las características geométricas de la leva de partida o inicial en la figura 7.51, así como sus gráficas, con el fin de comparar con la conjugada que obtengamos. La figura 7.52 nos muestra la leva de partida en el momento inicial de su movimiento.

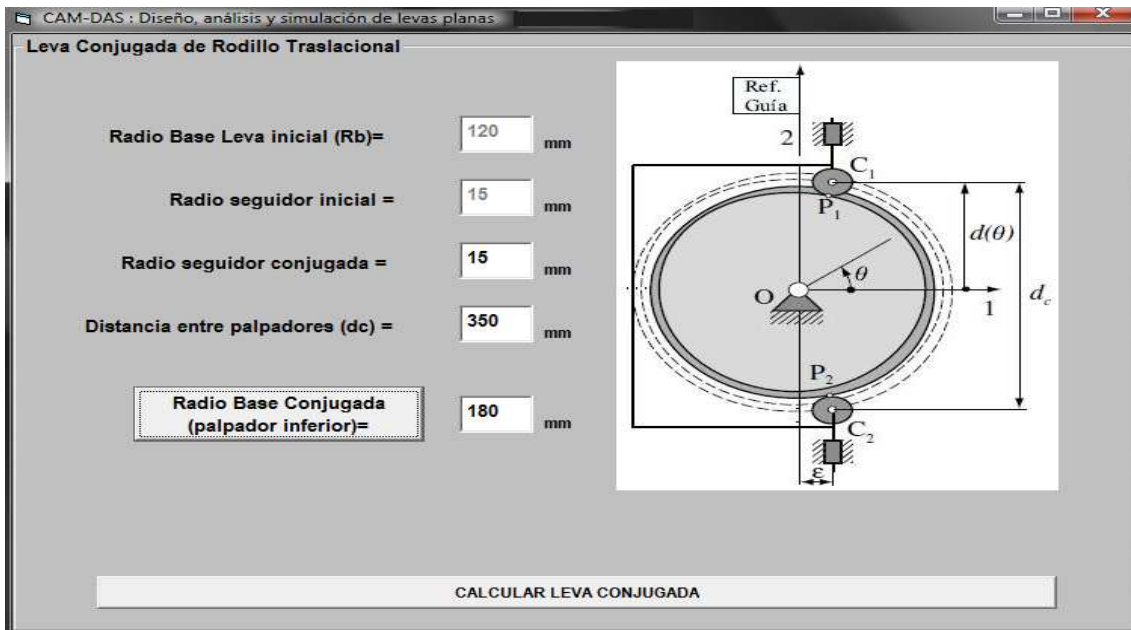


Fig. 7.53: “Dato Iniciales” para la leva conjugada del Ejemplo7CRT.lev

En la figura 7.53 observamos las magnitudes geométricas calculadas de la leva conjugada, debemos tener en cuenta que la distancia entre palpadores debe ser lo suficientemente grande para poder obtener un radio base de la conjugada que nos permita calcular una leva aceptable.

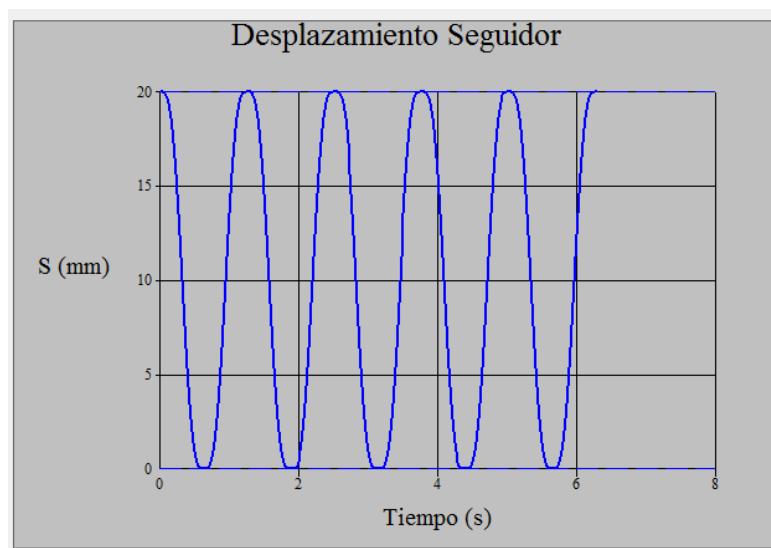


Fig. 7.54: Diagrama del Desplazamiento de la leva conjugada del Ejemplo7CRT.lev

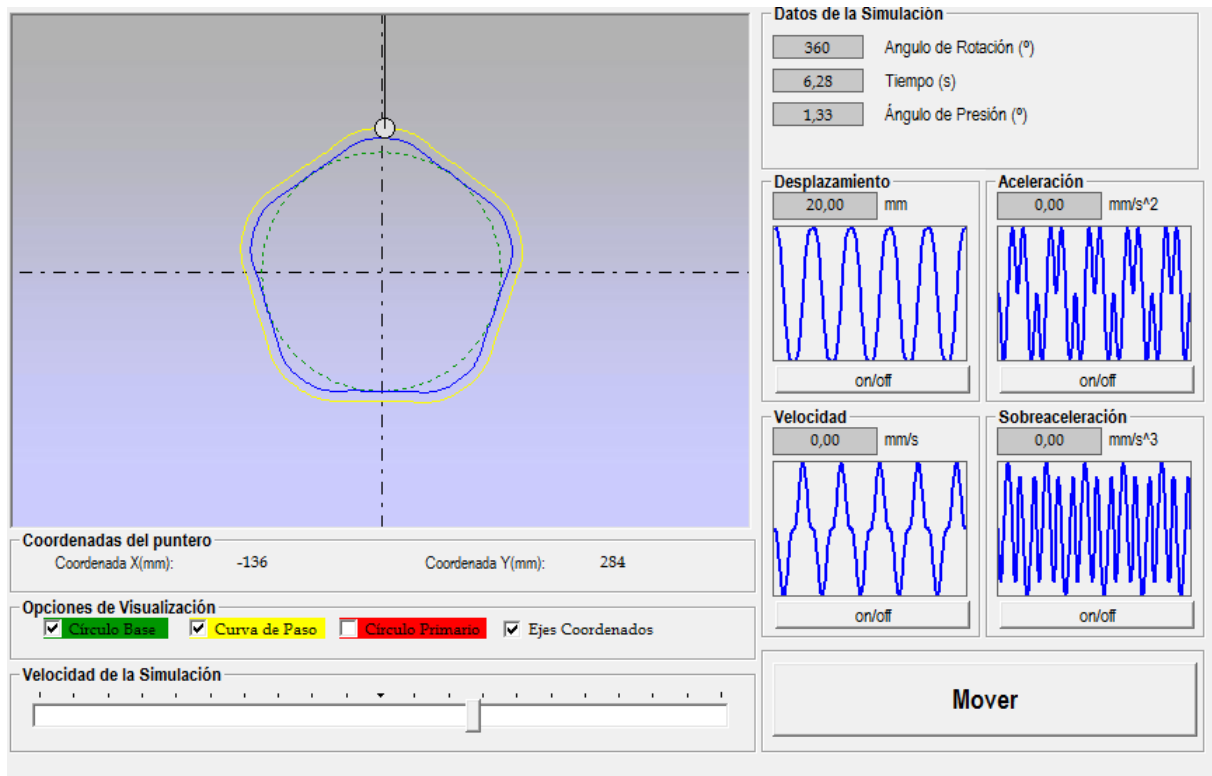


Fig. 7.55: "Simulación" para la leva conjugada del Ejemplo7CRT.lev

La figura 7.54 muestra el diagrama de desplazamiento del seguidor de la leva conjugada calculada, si nos fijamos el movimiento se inicia con un descenso al contrario que su conjugada. Esto también se observa en la simulación de la figura 7.51, el palpador de la leva conjugada iniciara su movimiento en un pico del perfil de leva, mientras que si nos fijamos en la figura 7.52 el movimiento se inicia en un valle del perfil.

Estas características harán que la leva inicial y su conjugada mantengan durante todo el recorrido una distancia entre los palpadores que para este caso será de 380 mm (figura 7.53).

### 7.4.8 Ejemplo8DA.lev

La abreviatura, DA, en este ejemplo hace referencia a sus tramos ambos del tipo armónico doble y con una duración de 180° tanto en el alejamiento como en la aproximación.

Una vez obtenida esta leva se calculará su conjugada, la cual aquí mostraremos.

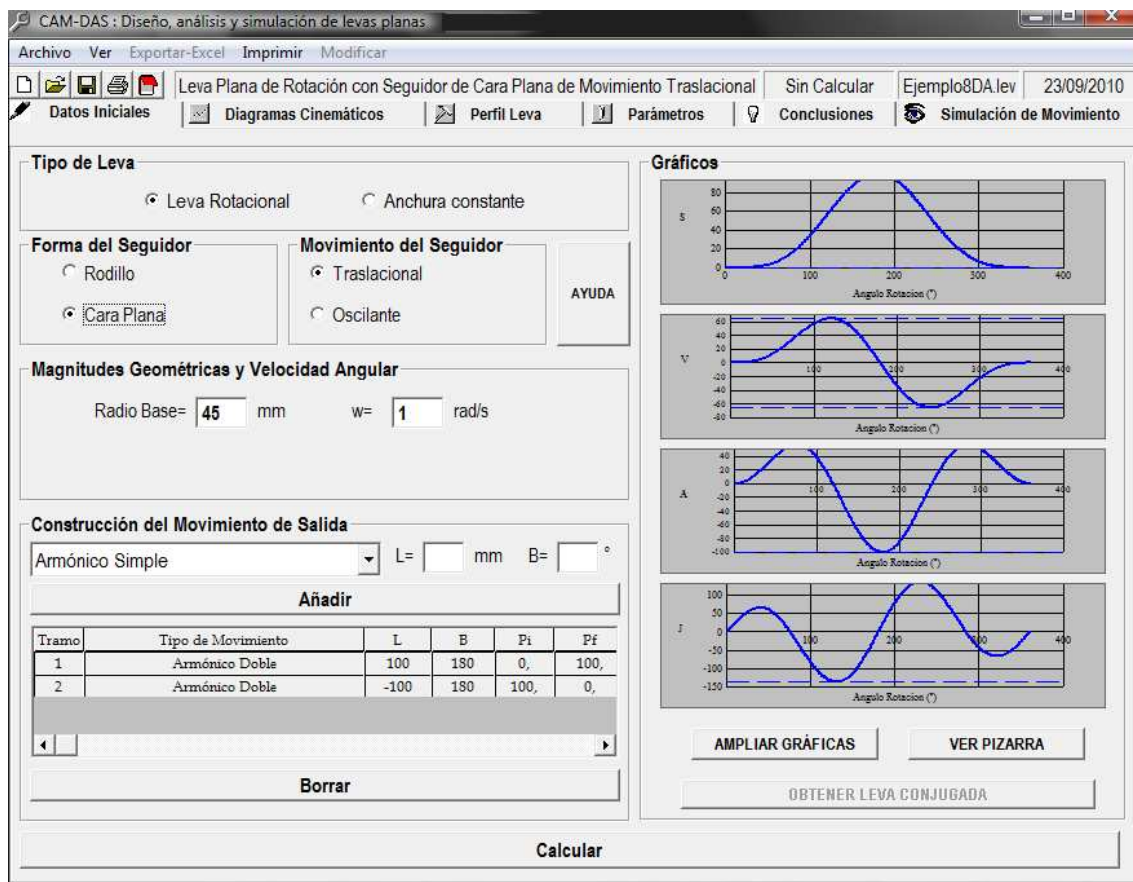


Fig. 7.56: "Datos Iniciales" para el Ejemplo8DA.lev

En la figura 7.56 puede observarse que el seguidor será de cara plana y movimiento traslacional.

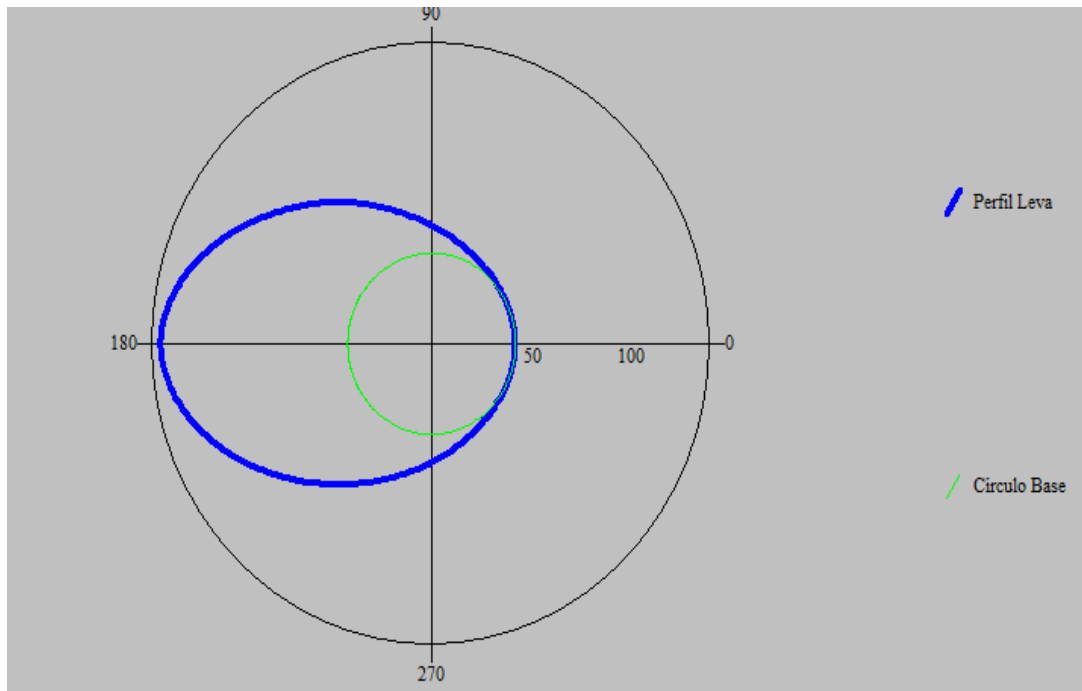


Fig. 7.57: "Perfil Leva" para Ejemplo8DA.lev

CAM-DAS : Diseño, análisis y simulación de levas planas

Archivo Ver Exportar-Excel Imprimir Modificar Ayuda

Leva Plana de Rotación con Seguidor de Cara Plana de Movimiento Traslacional Cálculo Realizado Ejemplo8DA.lev 22/09/2010

Datos Iniciales Diagramas Cinemáticos Perfil Leva Parámetros Conclusiones Simulación de Movimiento

**Tipo de Leva**  
 Leva Rotacional  Anchura constante

**Forma del Seguidor**  
 Rodillo  Cara Plana

**Movimiento del Seguidor**  
 Traslacional  Oscilante

**Magnitudes Geométricas y Velocidad Angular**  
 Radio Base= 80 mm  $w= 1$  rad/s

**Construcción del Movimiento de Salida**  
 Armónico Simple L= mm B= °

Tramo	Tipo de Movimiento	L	B	Pi	Pf
1	Armónico Doble	-100	180	100,	0,
2	Armónico Doble	100	180	0,	100,

**Gráficos**

S

V

A

F

AMPLIAR GRÁFICAS VER PIZARRA

OBTENER LEVA INICIAL

Fig. 7.58: "Datos Iniciales" para la leva conjugada del Ejemplo8DA.lev

La figura 7.58 nos presenta las características de la leva conjugada para una distancia entre palpadores de 225 mm, esta distancia ha sido asignada en el formulario correspondiente. Observemos que su movimiento se inicia con un descenso.

Su perfil se corresponde con el mostrado en la figura 7.59

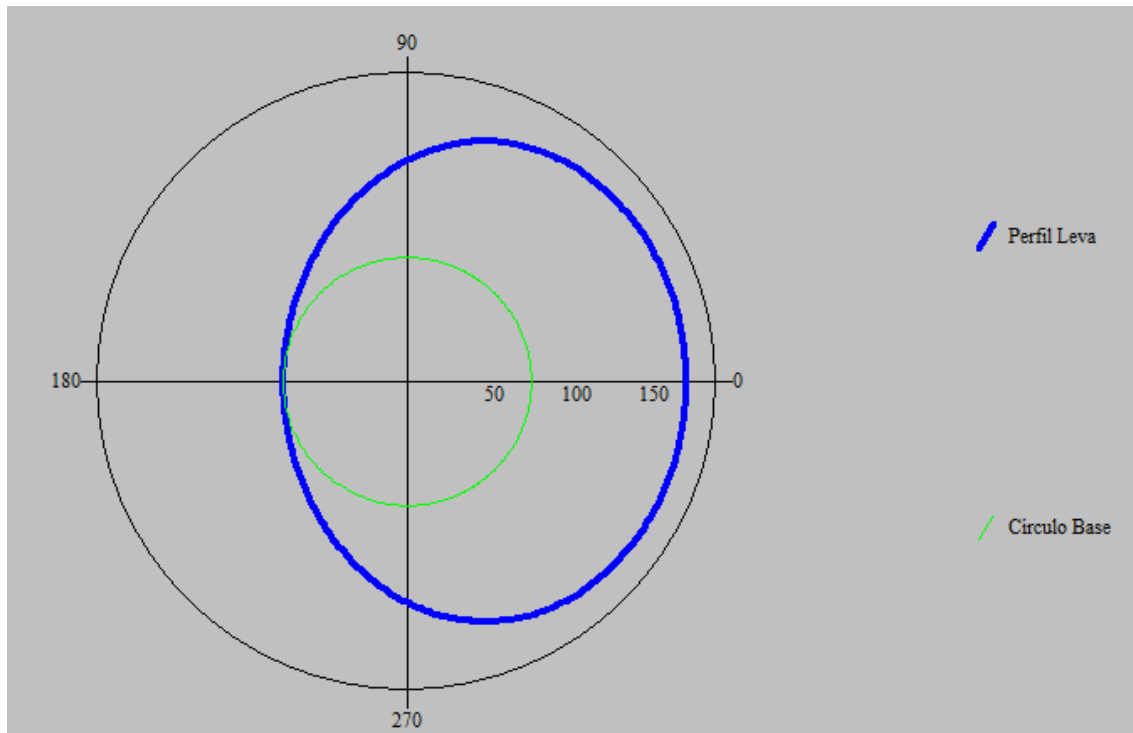


Fig. 7.59: "Perfil Leva" para la leva conjugada del *Ejemplo8DA.lev*

#### 7.4.9 Ejemplo9RT.lev

Este ejemplo se ha seleccionado debido a que la composición de la ley de movimiento de la leva está formada por múltiples tramos de diversos tipos de funciones.

Son ocho tramos que enumeramos a continuación:

1. Tramo de aceleración de onda senoidal modificada, se trata de un alejamiento de 10 mm durante 50° de giro de la leva.

2. Detenimiento de  $40^\circ$  de duración.
3. Tramo de tipo cicloidal, se vuelve al punto de partida, acercamiento de 10 mm y  $50^\circ$  de giro de la leva.
4. Detenimiento para un giro de la leva de  $40^\circ$ .
5. Tramo polinómico 3-4-5, alejamiento de 10 mm, durante  $50^\circ$  de giro de la leva.
6. Detenimiento, duración de  $40^\circ$ .
7. Tramo polinómico 4-5-6-7, en este caso de aproximación de 10 mm y  $50^\circ$  de giro para la leva.
8. Tramo de detenimiento, que cierra los  $360^\circ$  de giro con los  $40^\circ$  restantes.

El radio base es de 35 mm, el radio del seguidor 7 mm, sin excentricidad y una  $w = 1$  rad/s.

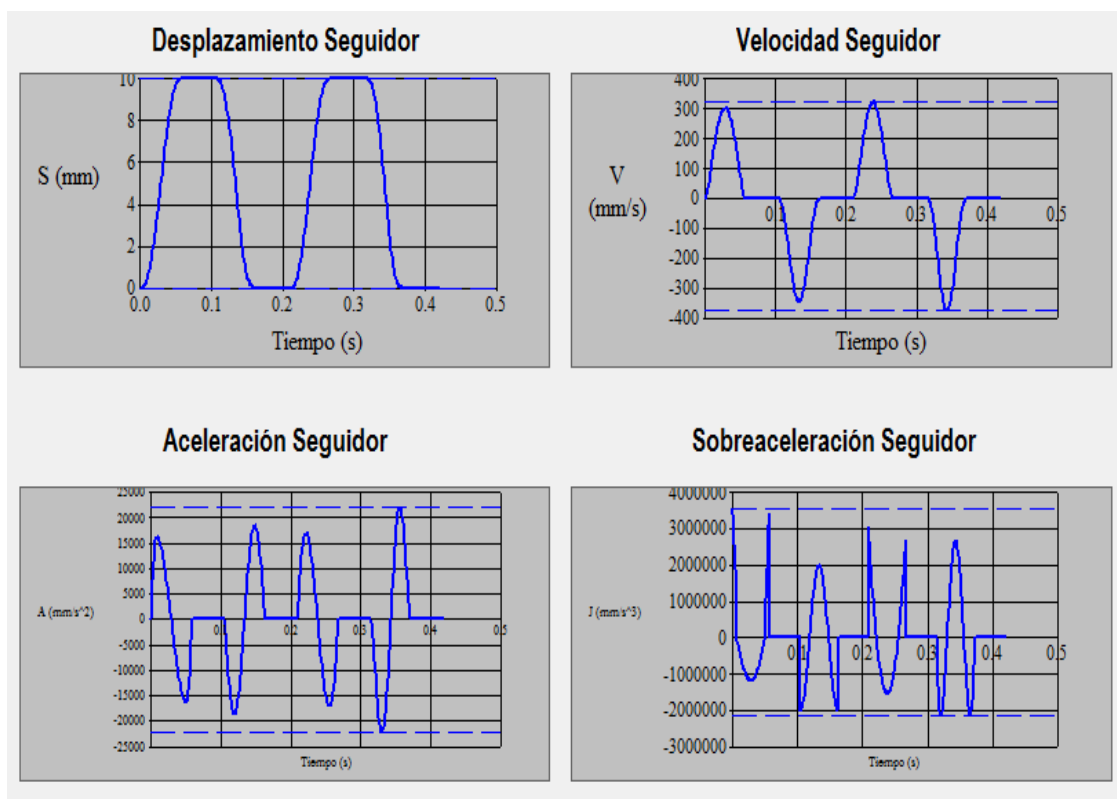


Fig. 7. 60: Diagramas dimensionados para el Ejemplo9RT.lev



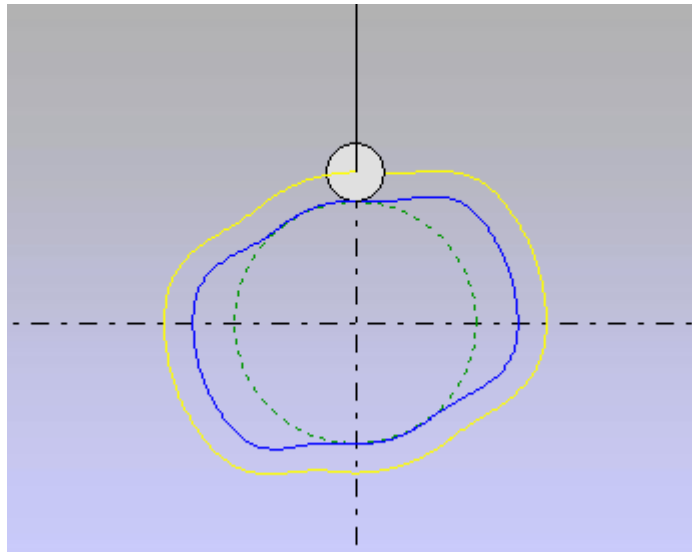


Fig. 7.61: "Simulación" para el Ejemplo9RT.lev

El perfil obtenido (figura 7.61) permite entender que gracias a las múltiples opciones que se tienen a la hora de configurar la ley de desplazamiento, se puede conseguir casi cualquier forma geométrica en los perfiles de levas.

Seleccionando las características geométricas adecuadas podremos obtener su conjugada de modo similar a los casos explicados.

#### **7.4.10 Ejemplo10EX.lev**

El ejemplo número diez presenta una leva excéntrica, de ahí su abreviatura (EX). Se trata de un perfil de leva cuya forma geométrica es una circunferencia, este perfil se obtiene con una ley de desplazamiento con dos tramos de 180° con movimiento de tipo armónico simple, un tramo de alejamiento y otro de aproximación, y seleccionando un seguidor plano traslacional.

Al tratarse el perfil de una circunferencia se puede deducir que es un caso particular de leva de anchura constante, donde la distancia será el propio diámetro de la circunferencia.

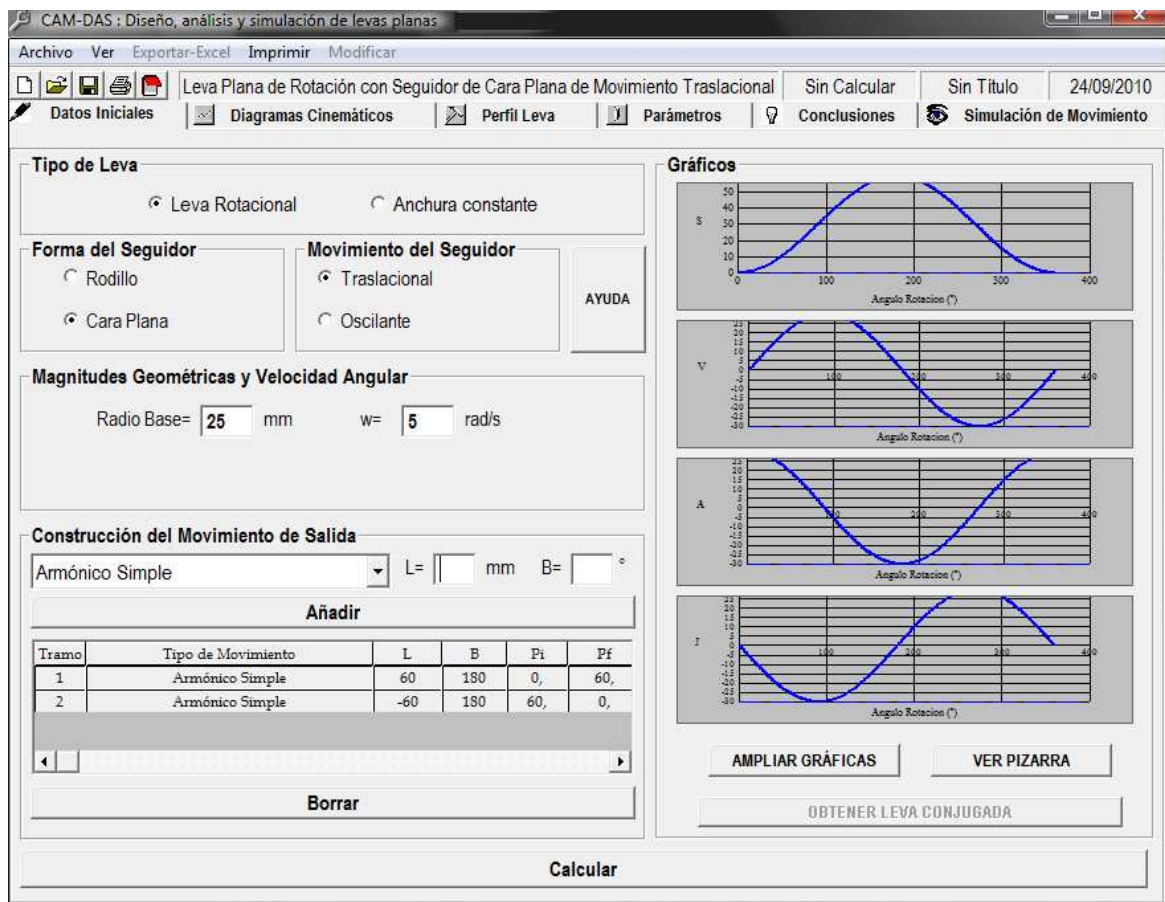


Fig. 7.62: "Datos Iniciales" para el Ejemplo10EX.lev

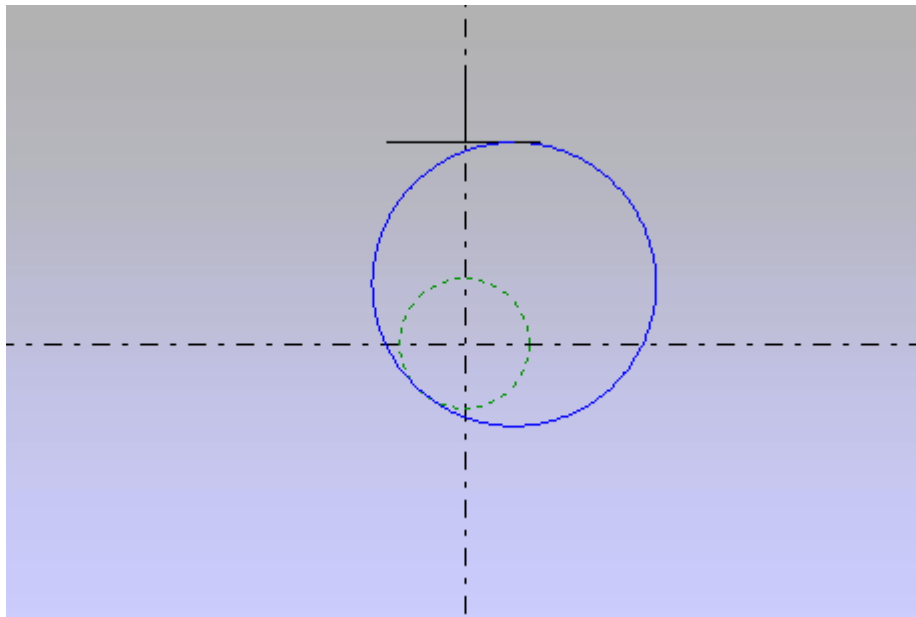


Fig. 7.63: "Simulación" para el Ejemplo10EX.lev

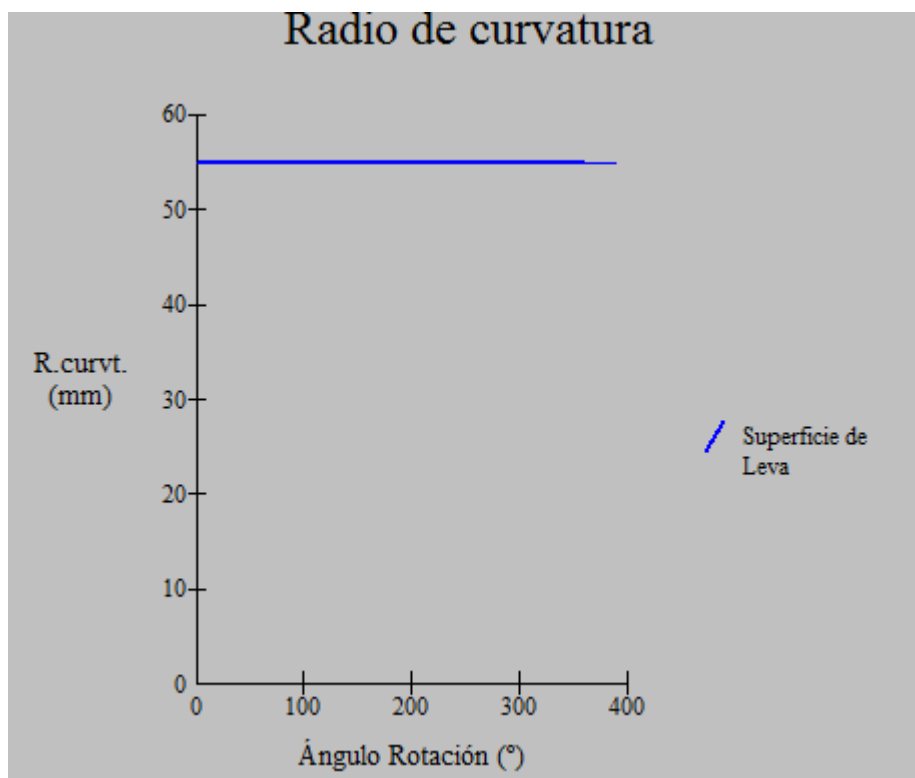


Fig. 7.64: Diagrama "Radio de Curvatura" para el Ejemplo10EX.lev

Es interesante que se observe el diagrama de la figura 7.64, el radio de curvatura sigue una línea recta de valor constante que se debe a la forma del perfil.

### 7.4.11 Ejemplo11RO.lev

El siguiente perfil de leva se ha obtenido a partir de la composición de la ley de desplazamiento que a continuación se detalla:

1. Tramo de detenimiento, durante el cual la leva girará 90°.
2. Tramo de ascenso de 25 mm, con movimiento de tipo polinómico 4-5-6-7 y un ángulo de giro de 90°.
3. Tramo de descenso de 10 mm, polinómico 4-5-6-7 y ángulo de 45°.
4. Tramo de ascenso de 10 mm, polinómico 4-5-6-7 y ángulo de 45°.
5. Tramo de descenso, con el que concluimos el giro completo de la leva, polinómico 4-5-6-7 y ángulo de 90°.

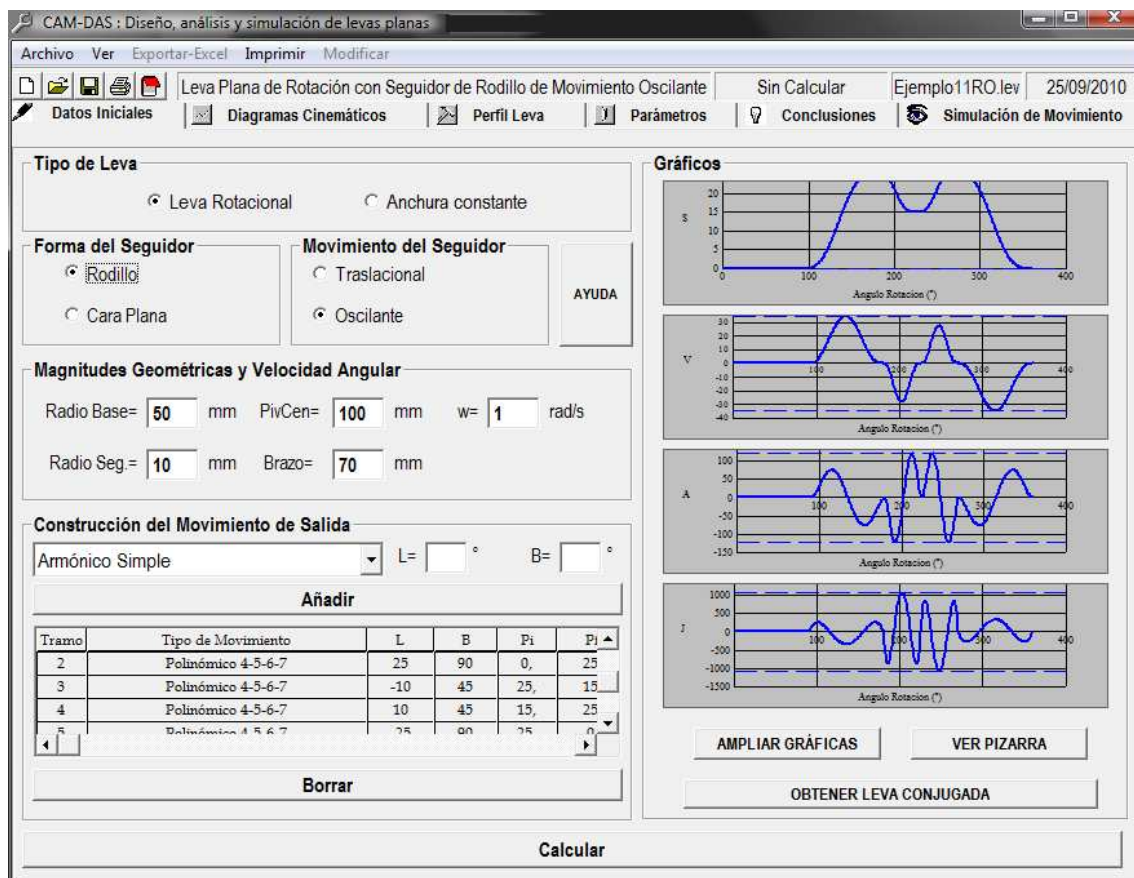


Fig. 7.65: "Datos Iniciales" para el Ejemplo11RO.lev

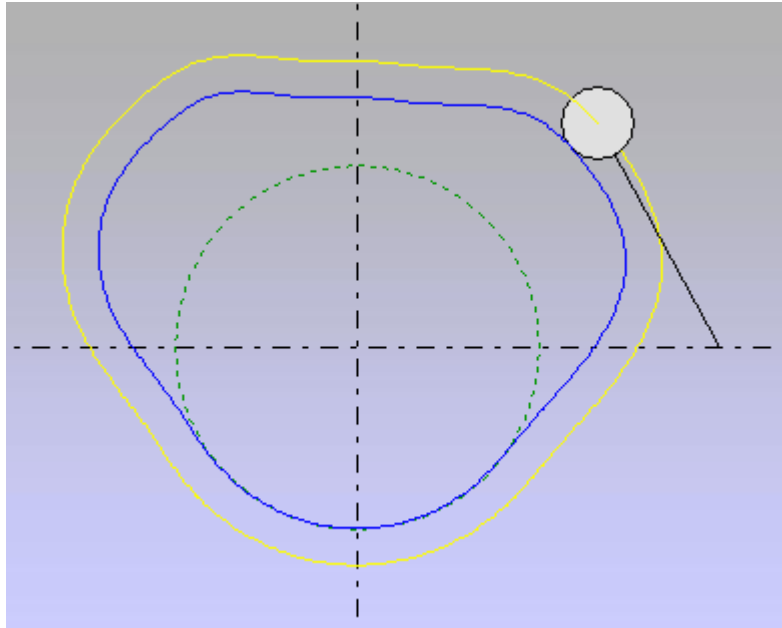


Fig. 7.66: "Simulación" para el Ejemplo11RT.lev

La leva obtenida tiene un perfil singular, libre de cúspides, y todos sus diagramas son continuos por lo que se trata de una leva aceptable.

Si se intenta obtener su conjugada, CAM-DAS advierte de la imposibilidad debido a problemas geométricos.

#### 7.4.12 Ejemplo12PO.lev

El último ejemplo que se presenta esta formado exclusivamente por tramos del tipo onda trapecial modificada, se trata de seis tramos de ascenso y descenso de  $10^\circ$  por cada  $60^\circ$  de giro de la leva, iniciando el movimiento con un ascenso.

Todas sus gráficas son continuas a excepción de la sobreaceleración por lo que la leva será apta para trabajar a bajas velocidades.

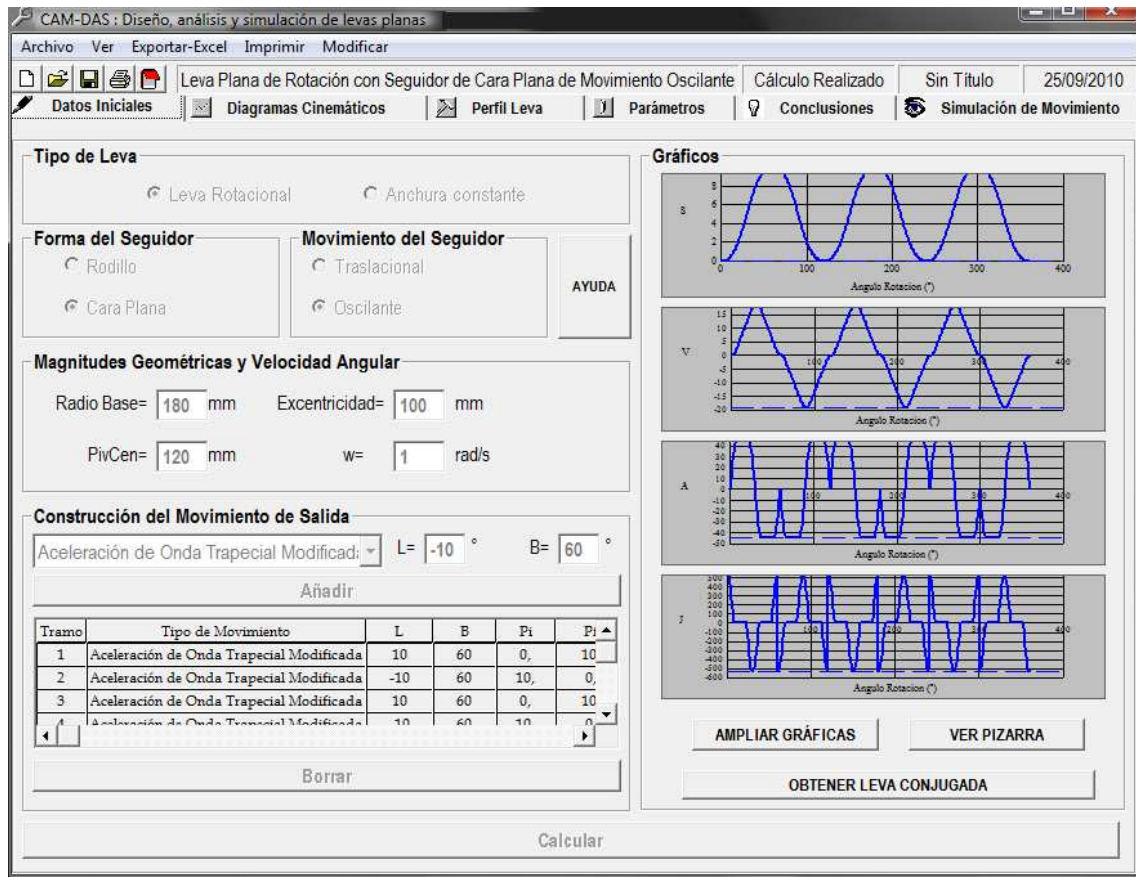


Fig. 7.67: "Datos Iniciales" para el Ejemplo12PO.lev

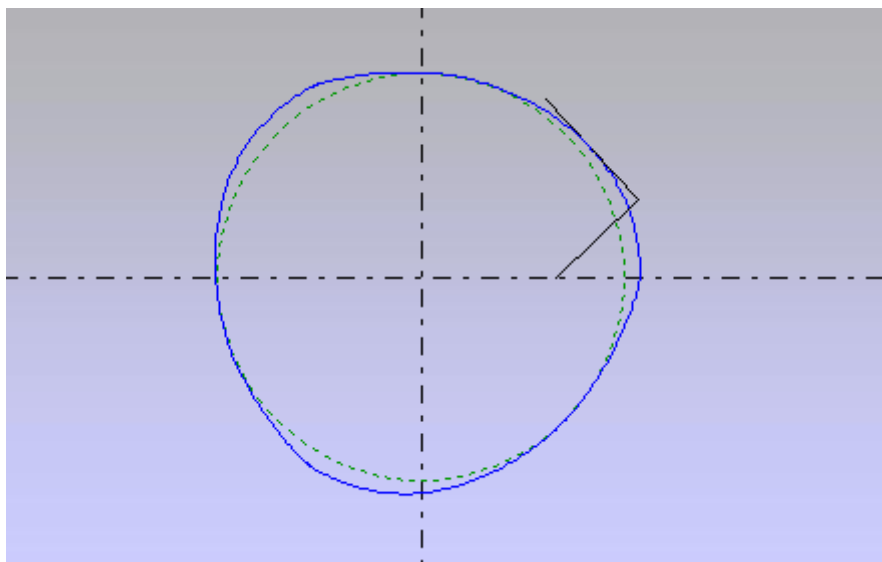


Fig. 7.68: "Simulación" para el Ejemplo12PO.lev

En la figura 7.68, se puede observar que el seguidor parece estar sobre el perfil, para no caer en posibles malas interpretaciones, como por ejemplo pensar que hay incursiones por debajo del círculo base, se debe tener en cuenta que el montaje se hará situando leva y seguidor en distintos planos, evitando cualquier problema.

## Capítulo 8: Versión en inglés. User guide CAM-DAS

CAM-DAS allows the cinematic calculation of planar cam of rotation from the geometric characteristics of the mechanism and of the specifications of movement wished for the follower, there being obtained the coordinates of his profile by a precision of 1 °.

CAM-DAS allows to see the mechanism in movement, changing speed of simulation or to stop it at any time, in addition offers the visualization of additional elements of support.

CAM-DAS was created as an application easy to use, without needing knowledge of theory of cam. It is done on a graphical, friendly and highly informative environment. It is a well tool for the education

### 8.1. Computer's Requirements

CAM-DAS is not necessary to install it in the computer.

Simply there is necessary the file (.exe), copying and pasting in the equipment that is wished.

- The application should work correctly on Windows 95 y later edition. There is recommended a processor of 100 Mhz or superior.
- The simulation of the movement improves with the use of a graphical compatible card SVGA 8Mb or better.
- Minimal resolution : 800x600 pixels.

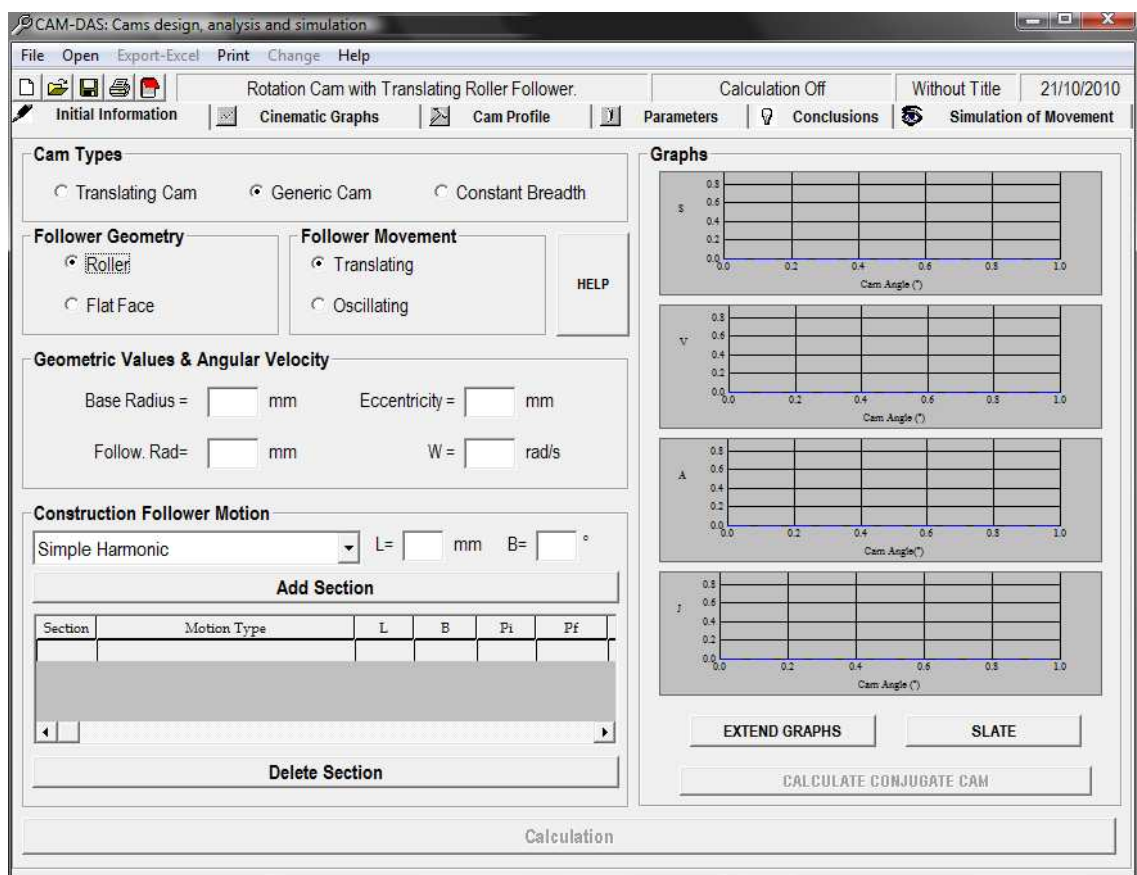


## 8.2 Instructions for use and description.

### 8.2.1 Initial Information

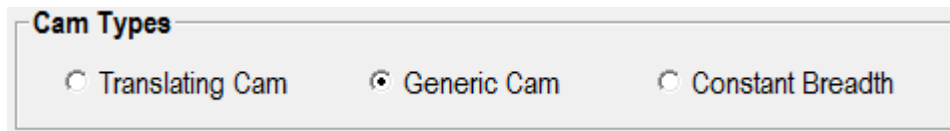
This one will be CAM-DAS's initial screen; in her we can observe two different parts:

Left part: it is the zone of introduction of information for the user (picture 8.1), later there is detailed by more precision each of his parts.



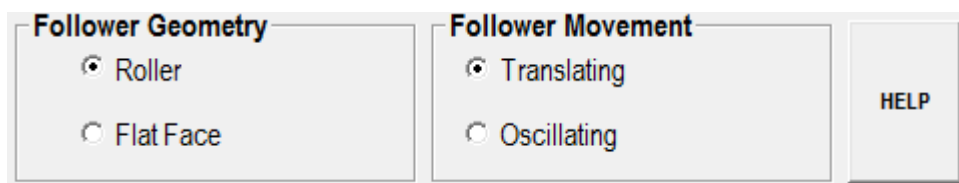
Pict. 8.1: Screen "Initial Information"

- **Cams Type:** (picture 8.2) In this zone we choose the type of cam that we want to calculate, translating cam, generic rotation cam or circular arc cams with constant breadth follower.



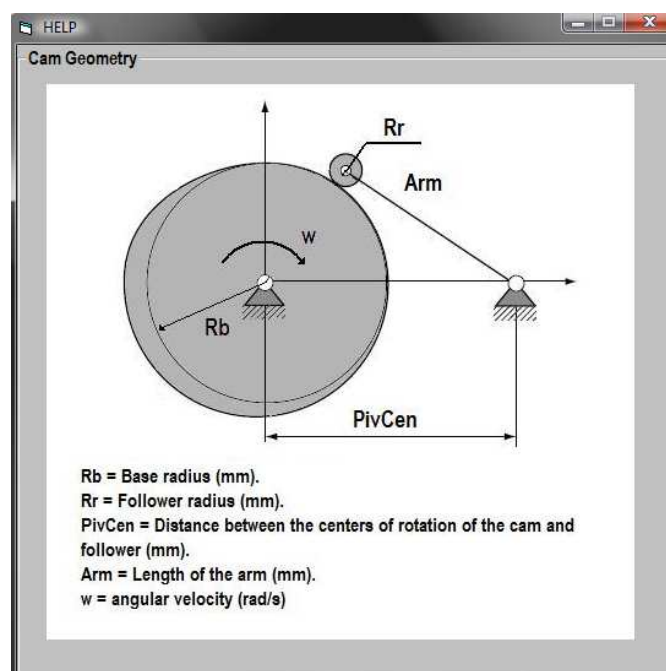
Pict. 8.2: Selection cam types

- **Follower geometry and follower movement:** (picture 8.3) With these buttons we choose the form for the follower and the type of movement that it is going to realize. If in the cams types we had selected "Generic cam", we will be able to combine later all the options of form and movement. If the choice is a "Constant Breadth", the movement of the follower will be for obligation "Translating", and if you choice is "Translating Cam" the follower will be roller with translating movement.



Pict. : 8.3: Selection follower geometry and follower movement.

- **Help:** (picture 8.3) pushing this button CAM-DAS it was showing us photos of help with the geometric magnitudes that the user must introduce .(picture 8.4)



Pict. 8.4: Help screen.

- **Geometric values and angular velocity:**

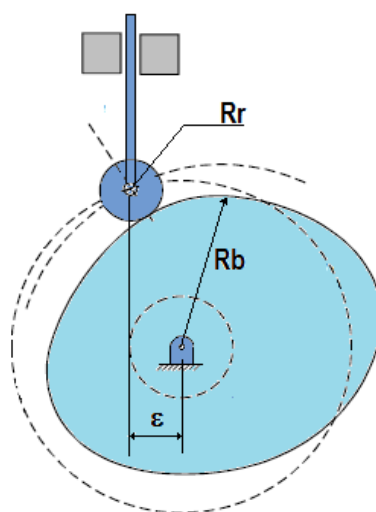
These fields must be carefully completed, are very important for the cam design

Depending on the type of follower and the movement there will be needed different types of geometric magnitudes, but has magnitudes jointly

- “Base Radius”
- “ $\omega$ ”: angular velocity, for fault the value is 1 rad/s.

**A. Cam of roller follower with translating motion.**

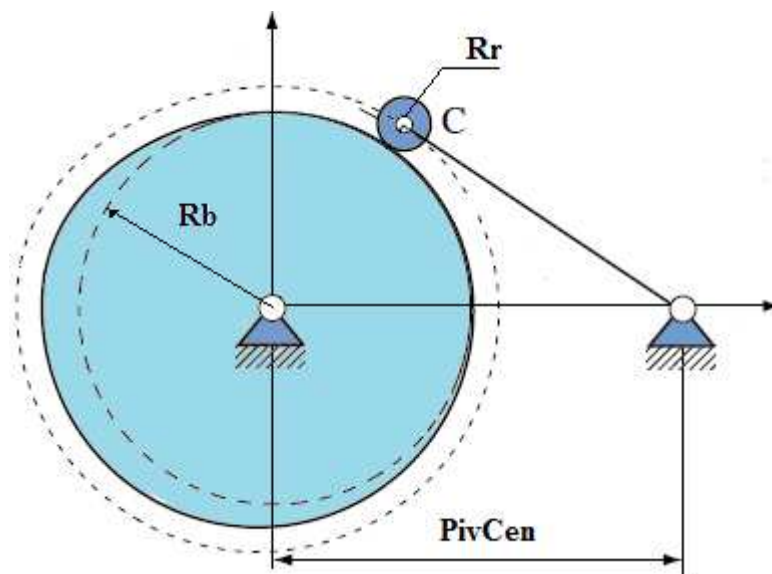
- “**Eccentricity**”, It is the minimal distance of the center of the follower to the vertical diameter of the circle base. This one is a parameter that it selecting adequately it allows to reduce the dimensions of the cam without concerning the efficiency of the mechanism, supporting the angle of pressure inside acceptable values. For definition it is the value of the eccentricity can neither overcome nor be equal in magnitude to the primary radius("Base Radius" + "Follower Radius").



Pict. 8.5: Geometric values for cam of roller follower with translating motion.

### B. Cam of roller follower with oscillating motion.

- “**PivCen**”, distance between the centers of rotation of the cam and the arm. His value must be a positive
- “**Arm**”, it holds the follower rested on the cam, is the distance between follower center and the center of rotation of the arm.



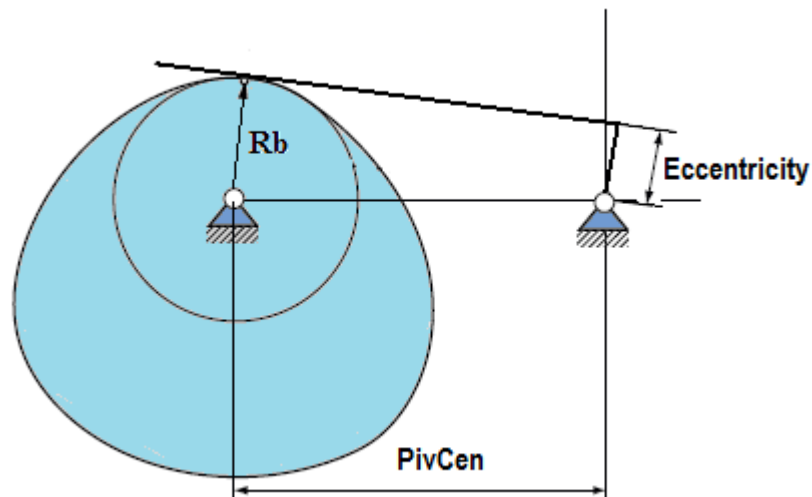
Pict. 8.6: Geometric values for cam of roller follower with oscillating motion.

### C. Cam of flat face follower with translating motion.

Only they are necessary the radius bases and the angular speed, information of the follower is not needed, the results that will appear include the minimal necessary length of the face of the same one.

### D. Cam of flat face follower with oscillating motion.

- “**PivCen**”, the same definition of the case B.
- “**Eccentricity**”, value defined in the picture 8.7.



Pict. 8.7: Geometric values for cam of flat face follower with oscillating motion..

### E. Circular arc cams with flat face constant breadth follower.

Besides the common magnitudes to all the cases since they are the radius base and the angular speed, the following information:

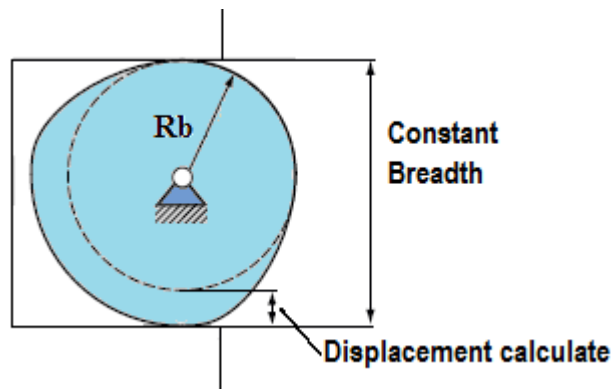
- **“Constant Breadth”**, distance between two parallel tangent lines to the cam profile, always will be constant.
- **“Calculate Displac.”** this button calculates the displacement that realized the mechanism.

**Geometric Values & Angular Velocity**

Base Radius=  mm       $w=$   rad/s

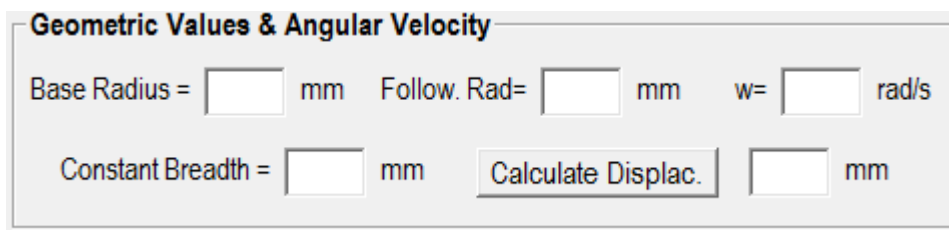
Constant Breadth=  mm        mm

Pict. 8.8: Geometric values and angular velocity for the case circular arc cams with flat face constant breadth follower.



Pict. 8.9: Circular arc cams with flat face constant breadth follower.

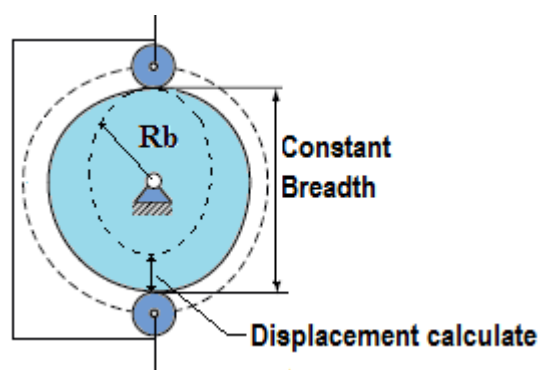
**F. Circular arc cams with roller constant breadth follower.**



Pict.8.10: Geometric values and angular velocity for the case circular arc cams with roller constant breadth follower.

- “ **Constant Breadth**”, for this case the distance that will remain constant, measures up diametrically between the points of contact cam - follower, in this case to the cam profile it is possible to name him of constant diameter.

The botton “**Calculate Displac.**” has the same function that in the previous case.



Pict. 8.11: circular arc cams with roller constant breadth follower.

**G. Translating cams.**

**Geometric Values & Linear Velocity**

Follower Radius =  mm

Length of the cam =  mm

V =  m/s

*Pict. 8.11: : Geometric values and linear velocity for the case translating cam.*

For this case the velocity is a linear velocity.

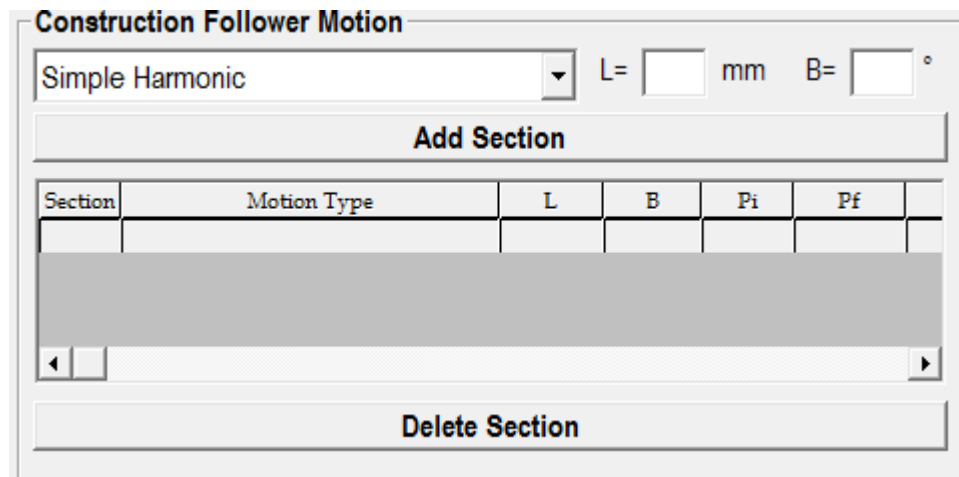
- **“Length of the cam”**, It is the total dimension that has the cam, later this length will divide in diverse sections (B), where the user will define the movement that wants for the follower.

• **Construction follower motion**

**A. Cases Generic Cams.**

The movement will be formed with the different curves that appear in the attached picture:

Modified Sine Curve	5° Degree Polynomial
Modified Trapezoidal Curve	7° Degree Polynomial
Double Harmonic	Semiharmonic Vf=0
Simple Harmonic	Semiharmonic Vi=0
Cycloidal	Semicycloidal Vf=0
Dwell	Semicycloidal Vi=0
3-4-5 Polynomial	Constant Velocity
4-5-6-7 Polynomial	



Pict. 8.12: Picture of construction follower motion

In the field "**L**" must write the value of the displacement, raise or descent, take the last point as a reference. For the first section the reference takes on the circle base for the flat followers and on the primary circle for the followers of roller. If the value of "**L**" is a zero the section will be a dwell.

The field "**B**" is the partial angle turned by the cam in every section. The total sum of angles must be 360°.

The sections will be incorporated into the button "**Add Section**", when the cam completes this one we will pulsate "**Calculation**".

If the information is correct, CAM-DAS was designing the cam and we will be able to see all his information.

With the button "**Delete Section**", we can erase the added sections.

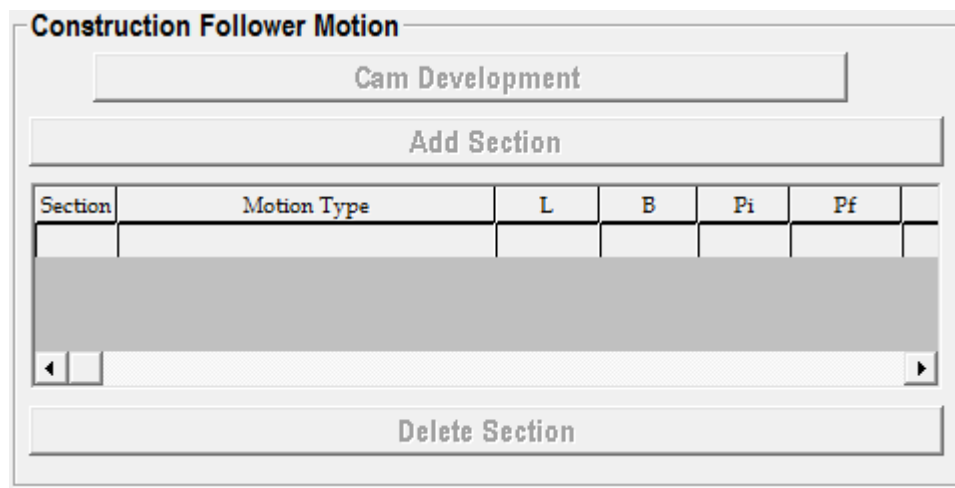
The picture under the button "**Add Section**", informs us about the information of the added sections.



## B. Case Constant Breadth Cams

For these cases the picture of construction of the movement is different.

In the initial configuration the picture will present three buttons “**Cam Development**”, “**Add Section**” y “**Delete Section**”, at first the buttons are inactive.



Pict. 8.13: Initial configuration of the screen construction follower motion for constant breadth cams.

The law of displacement of constant breadth is a law formed by two sections of harmonic simple movement and two dwell, where the first section will be a ascent, the movement of  $0$  to  $\pi$ . it is the inverse one of the one that is realized of  $\pi$  to  $2\pi$ .

The displacement depends on the radius base and of the constant breadth and will be calculated for the program.

After calculating the displacement, we will touch the button “**Cam Development**”, later we pulsate “**Calculation**” and the profile will be calculated.

### C. Case Translating Cams

The configuration of the screen for this type of levies is the same that the case generic cams.

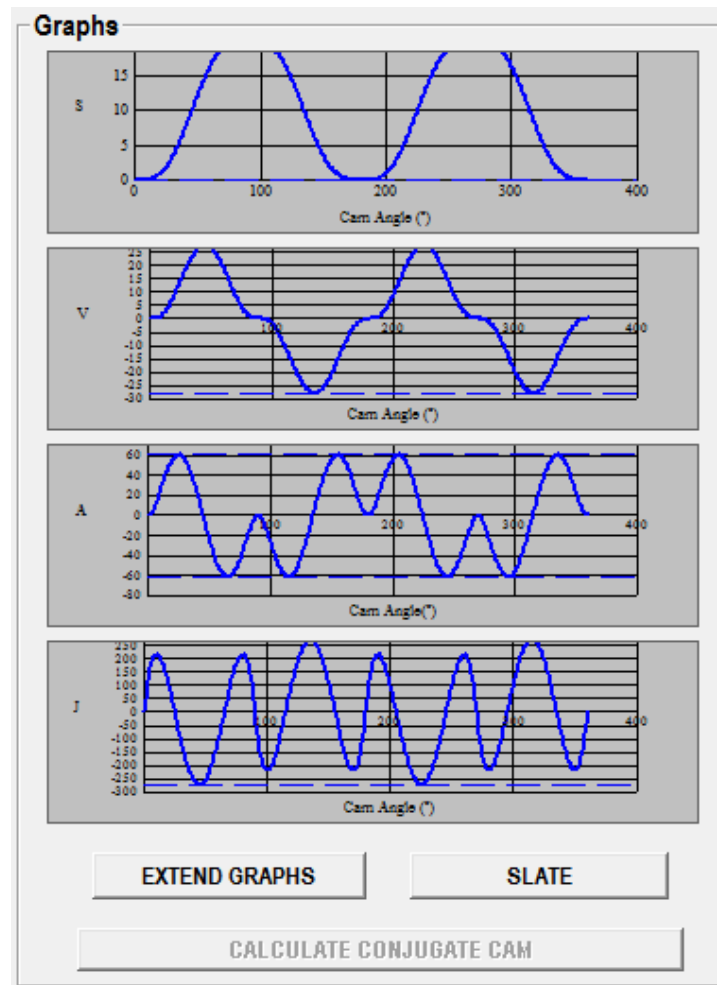
It is very important that it is known that the cam profile will remain definite directly, for these cases, on having defined the law of displacement that is wished for the follower.

In the field "**L**" must write the value of the displacement, take the last point as a reference.

The field "**B**" is the partial length crossed by the cam in every section. The total sum of length must be the same to the field "Length of the cam".

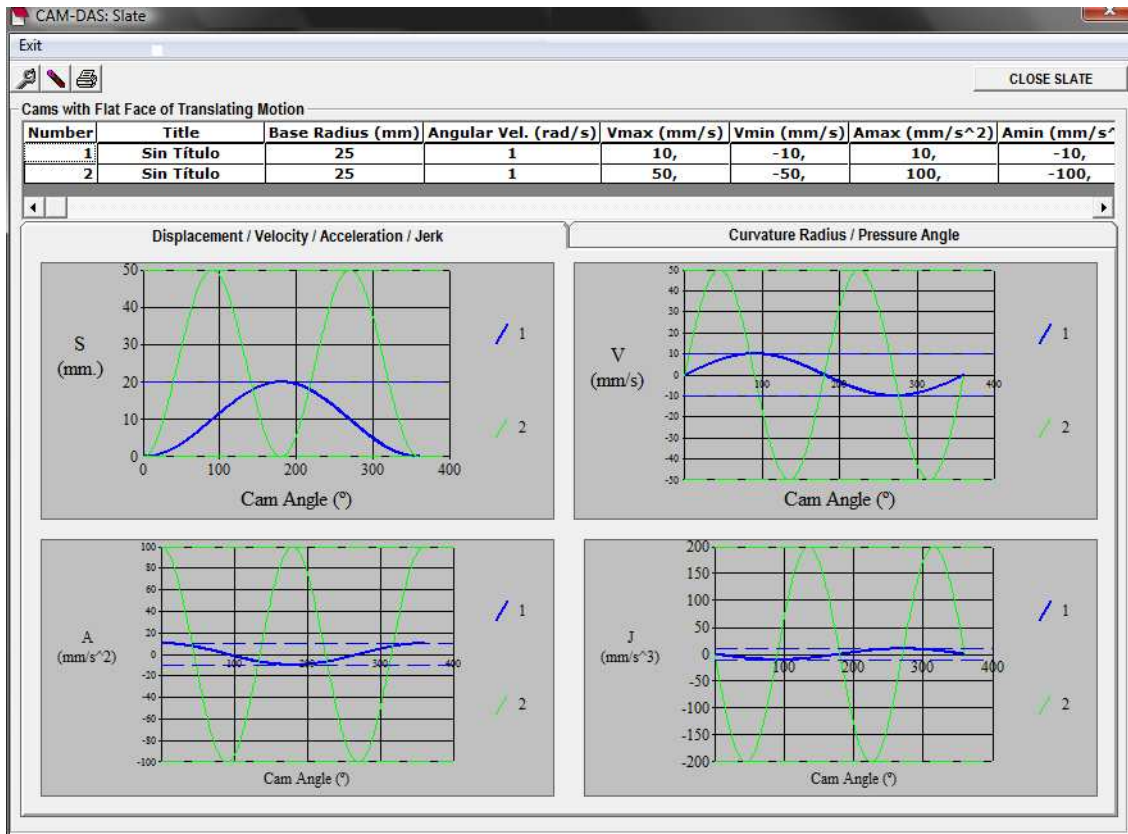
In the right part of the screen "Initial Information" we will find: (Picture 8.14)

- "**Graphs**", they occupy most of the right part, in them we will be able to observe the form of the graphs of displacement, velocity, acceleration and jerk, that will be loaded while we are constructing the movement of our cam. These graphs will serve us as information about the continuity of the successive derivatives of the displacement, and if the selected movement is correct.



Pict. 8.14: Right part of the screen "Initial Information"

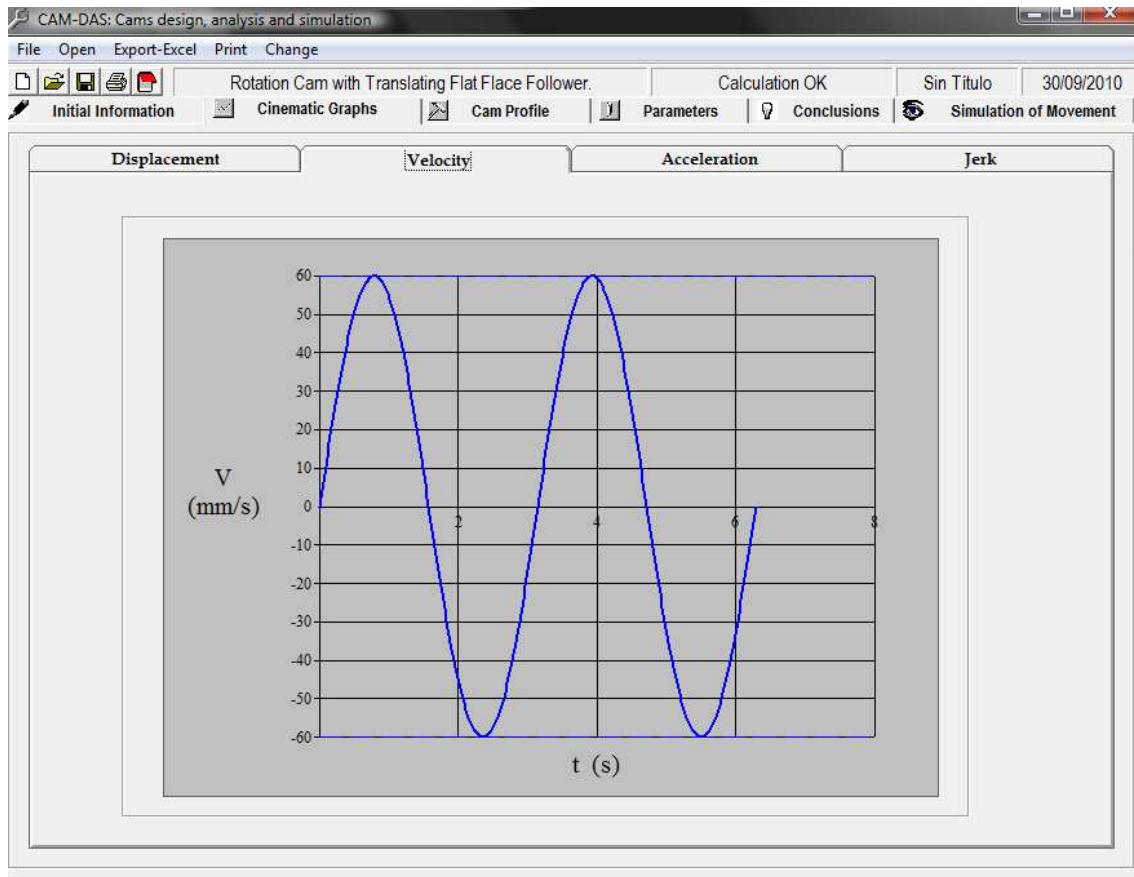
- **“Extend Graphs”**, (Picture 8.14) this button is to extend the graphs. The users will see much better the graphs.
- **“Slate”**, (Picture 8.15) the slate is an additional screen in which once opened they are adding the cams that are calculated. The information that it contains depends on the type of cam - follower that is treating itself.
- **“Calculate Conjugate Cam”**, (Picture 8.14) Only it will be active when we have our calculated profile. The calculation of the conjugate explains afterwards.



Pic. 8.15: Screen "Slate"

### 8.2.2 Cinematic Graphs

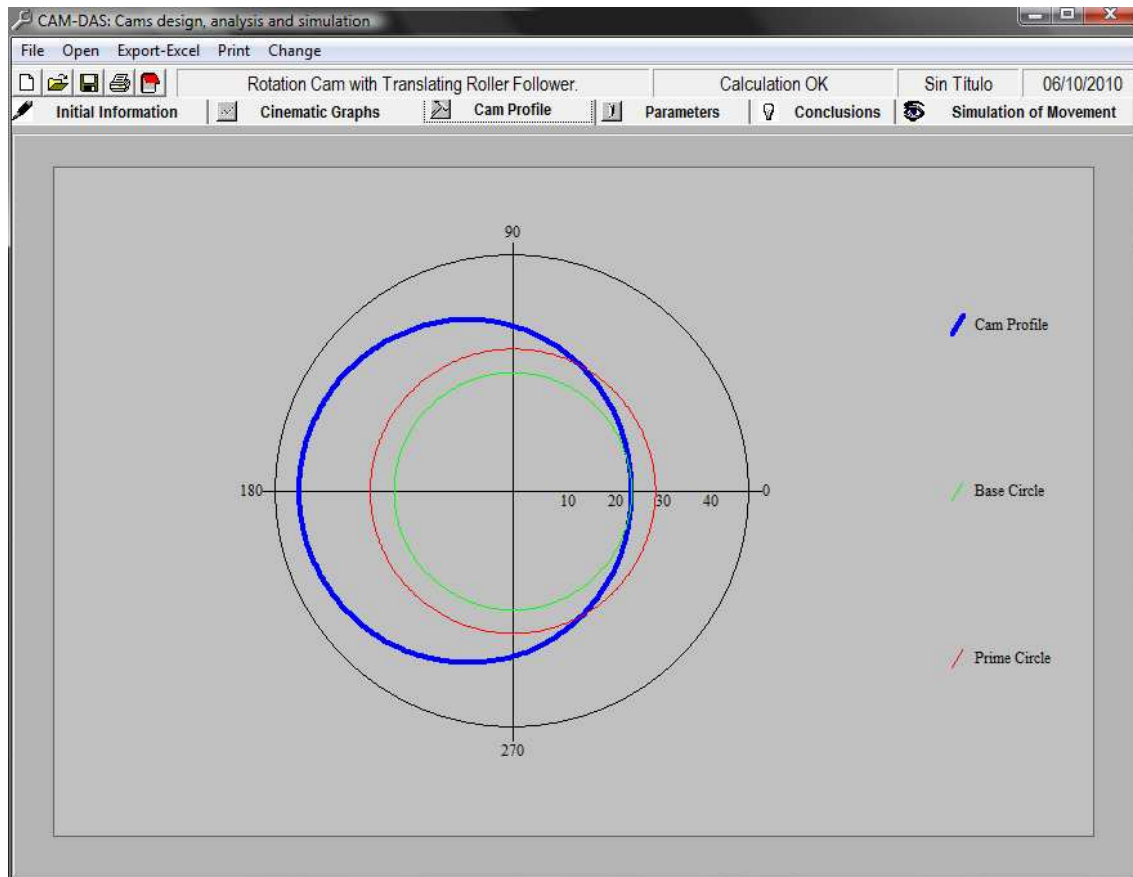
On this screen we will be able to observe the graphs of displacement, velocity, acceleration and jerk. These graphs are measured according to the cinematic parameters of the real movement.



Pic. 8.16: Screen "Cinematic Graphs"

### 8.2.3 Cam Profile

On this screen (picture 8.17) can be observed on a polar graph, the profile of the cam (blue) that has been obtained, the base circle (green) and the prime circle (red), if it is that a roller follower is using.



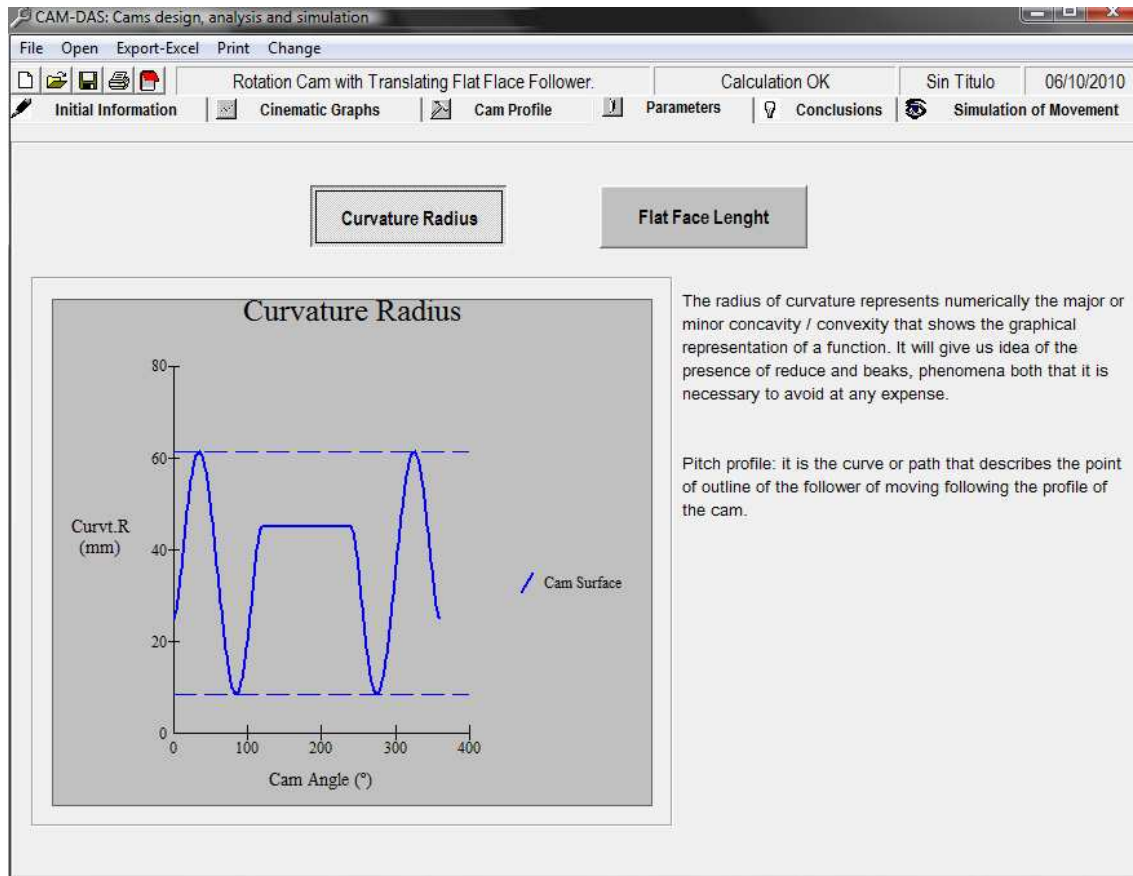
Pict. 8.17: Screen "Cam Profile".

## 8.2.4 Parameters

According to the case on the screen we will find:

- For cams with flat face follower, the buttons will appear on the screen: **"Curvature Radius"** y **"Flat Face Length"**.
- For cams with roller follower, the buttons are : **"Curvature Radius"** y **"Pressure Angle"**.

Touching the wished button, will appear the corresponding graph to the requested parameter, as well as a brief explanation about the parameter.



Pict. 8.18: Screen "Parameters"

### 8.2.5 Conclusions

In the low zone of the screen there appears a summary of all the obtained results and explanatory comments in the right part.

In the top part we will be able to see if the cam is correct, we have three cases:

- **Cam OK:** All the graphs are continuous, except the case constant breadth where it is allowed that the acceleration should be discontinuous. The pressure angle must be between his allowed values.
- **Not suitable cam for high speeds:** Allowed discontinuity in jerk graph.
- **Cam KO:** High pressure angle. The cam has beaks or reduce that they produce discontinuities in the graphs.

Concept	Maximum	Minimum	Comments
Displacement (mm)	60,	0,	Continuous
Velocity (mm/s)	107,43	-125,33	Continuous
Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	411,05	-411,05	Continuous
Jerk (mm/s <sup>3</sup> )	3134,85	-2192,35	Discontinuous
Convex Curvature Radius (mm)	---	20,	The profile is free of beaks and/or reduce
Pressure Angle (°)	33,11	-36,74	Pressure Angle>30°, High Pressure Angle

Fig. 8.19: Screen "Conclusions"



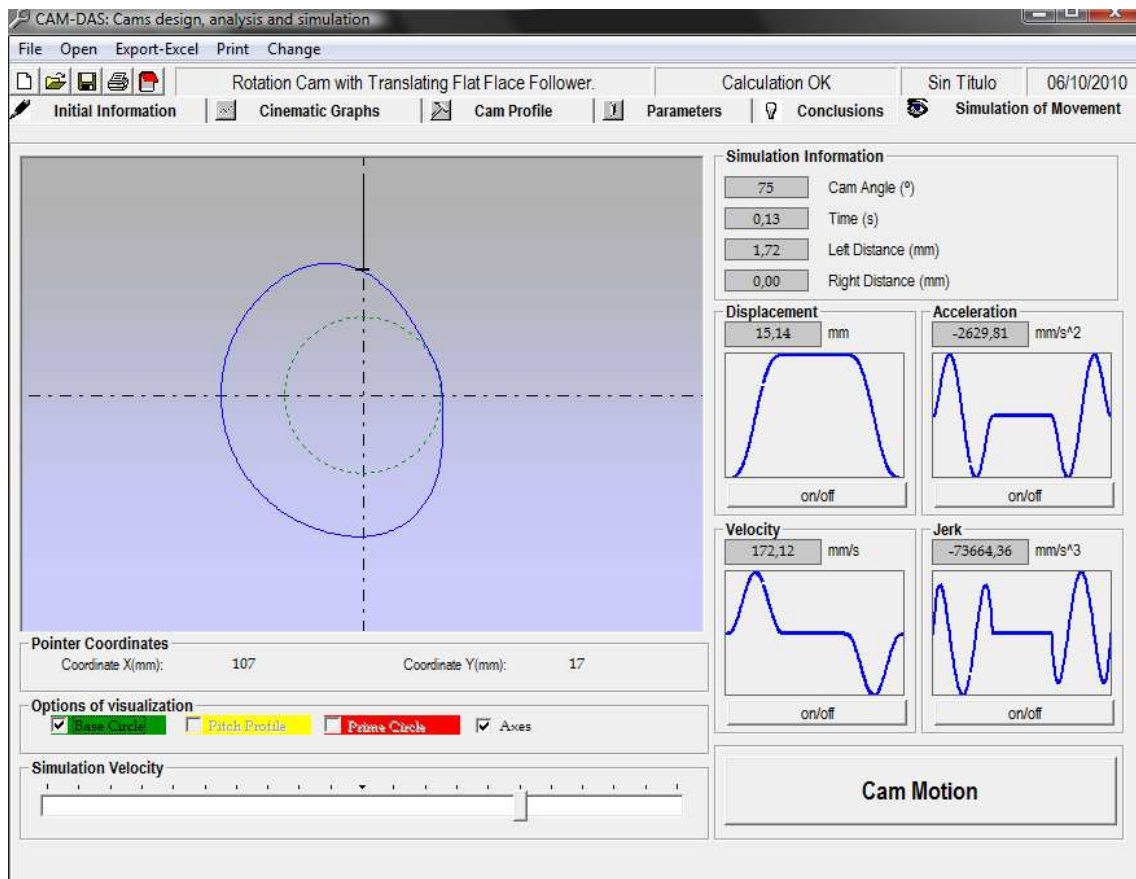
### 8.2.6 Simulation of Movement.

This option allows to see the cam that has been calculated with movement. To the left side is the image of the mechanism , under her they find the following options:

- **Pointer Coordinates:** Placing the pointer about the screen was informing us about the coordinates of any point of the cam.
  
- **Options of visualization:** For if we want to visualize the different options that it offers us.
  
- **Simulation Velocity:** To change the speed of movement of the mechanism.

To the right of the image of the mechanism they can be seen:

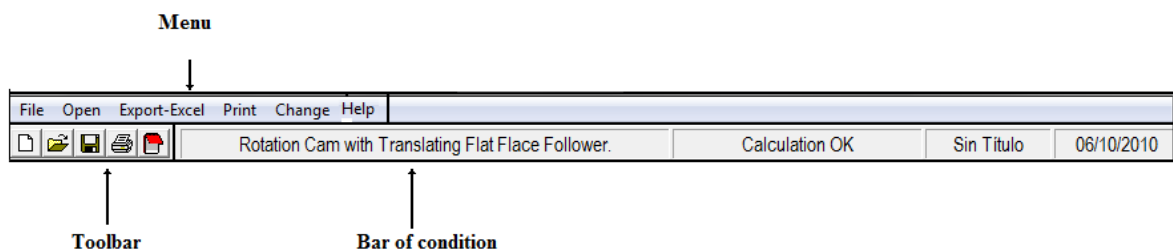
- **Simulation Information:** cam angle, time, sides lengths, pressure angle and others informations appears in this part.
  
- **Displacement, velocity, acceleration and jerk:** Small graphs that show the values in every instant.
  
- **Cam Motion/Cam Stop:** It initiates or stops the movement in any instant.



Pict. 8.20: Screen "Simulation of Movement".

### 8.2.7 Menu, Toolbar and Bar of condition

As a traditional application of the environment Windows, CAM-DAS has typical own elements of this operating system.



Pict. 8.21: Menu, Toolbar and Bar of condition

## A) Menu

- **File:** “New cam”, “Open cam...”, “Save cam”, “Save cam as...” y “Exit”. All these options are available at any time.

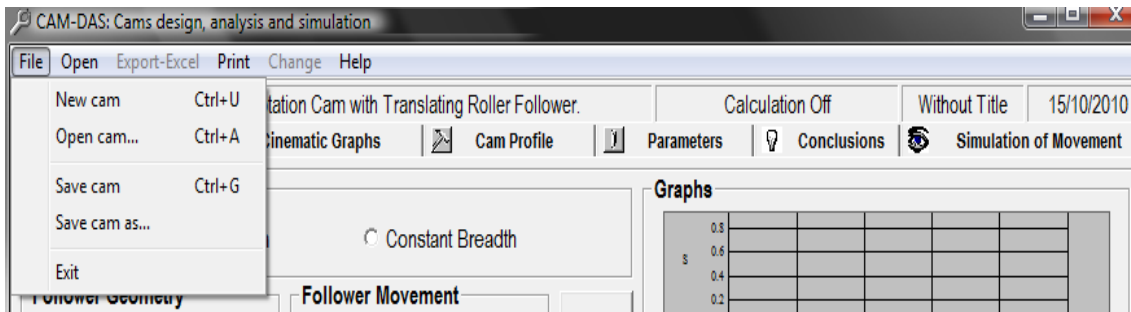
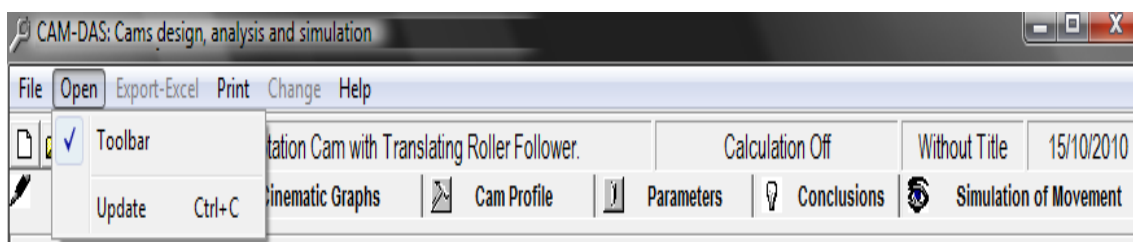


Fig. 8.22: Menu “File”

- **Open**

This menu presents two options:

- **Toolbar:** To visualize the toolbar and Bar of condition.
- **Update:** If we change the angular velocity it is necessary to update touching this button.

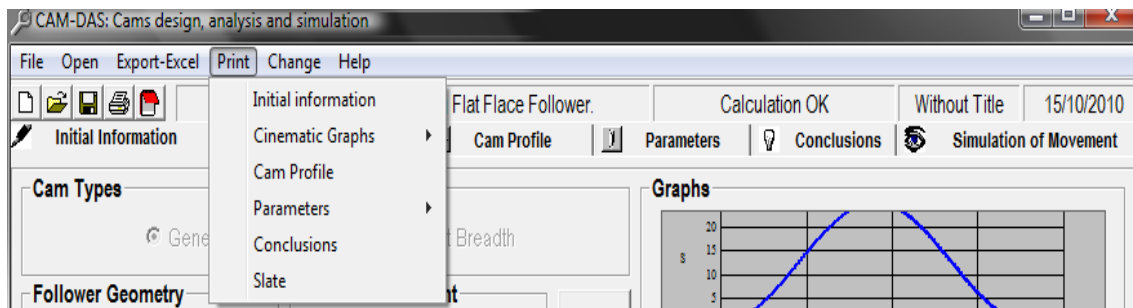


Pict. 8.23: Menu “Open”

- **Export-Excel:** This option activates when we have all the information of the cam, then we can export all the information to a table of excel.
- **Print:** Any of the first five screens (" Initial ", Information " Cinematic Graphs ", " Cam Profile ", "Parameters", "Conclusions") it is printable from this option of menu

The cinematic graphs can be print separately or all together, the submenus will allow us the only or joint impression.

Due to the limitations that Visual Basic presents, there is recommended that to visualize a few graphs with better conditions that the contributed ones for CAM-DAS, export themselves the information obtained to Excel and there are obtained the graphs that are wished.

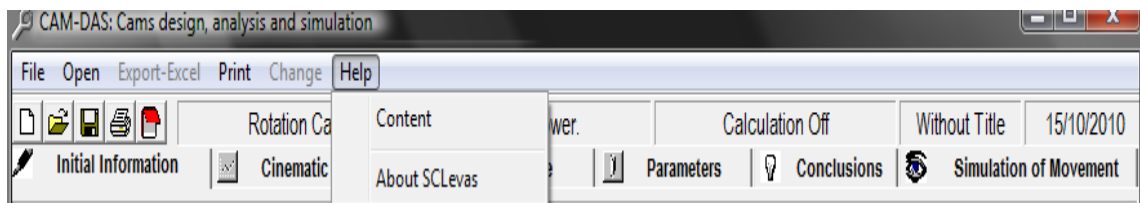


Pict. 8.24: Menu "Print"

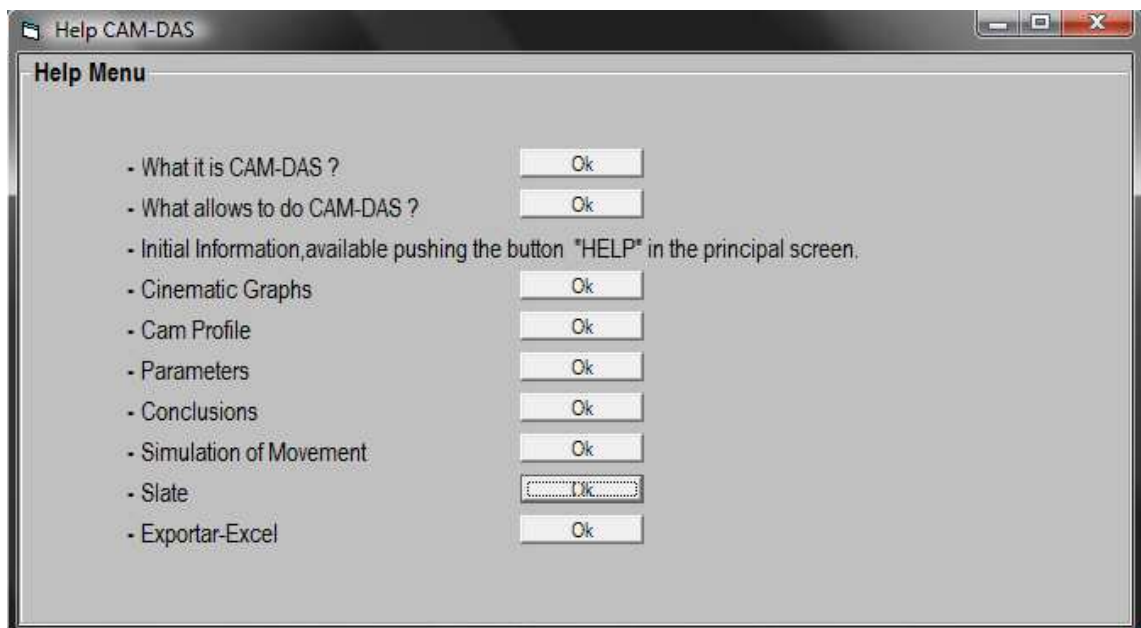
- **Change:** If the cam is calculated, the user can want to change any information for it we have the option change. For make any change with constant breadht cams it is necessary to begin with new one.
- **Help:** For the user who begins in CAM-DAS's use or in case of doubts for the use, has been created "Help". The menu consists of two options "Content" and "About CAM-DAS".

Touching "About CAM-DAS" information relative to the program will be visualized and a link with Universidad Carlos III de Madrid will be available.

Touching “Content” will be available a menu of help to solve all the doubts on the screens or the information that show the program. This menu follows the structure of user’s guide.

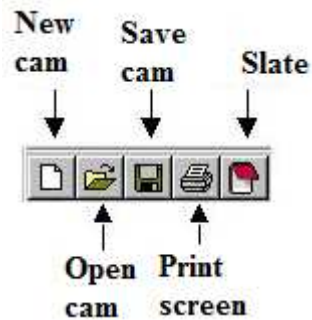


Pict. 8.25: Menu “Help”



Pict. 8.26: Menu available touching “Content”

## B) Toolbar



Pict 8.27: Toolbar´s Buttons

The toolbar is the set of buttons under the menu. It serves to give an access rapidly to some actions.

## C) Bar of condition



Pict. 8.28: Bar of condition

The bar presents information about the calculated cam. From left side to right it shows: type cam, type follower and movement, calculation made or not, title of file if the cam is save, and finally the date.

### 8.2.8 Calculate conjugate cams

To calculate the conjugate of any cam we will have to follow the instructions that CAM-DAS gives us in every moment.

The process of obtaining of conjugate cam will be able to begin when the calculation completes this of the initial cam and, certainly this one is acceptable.

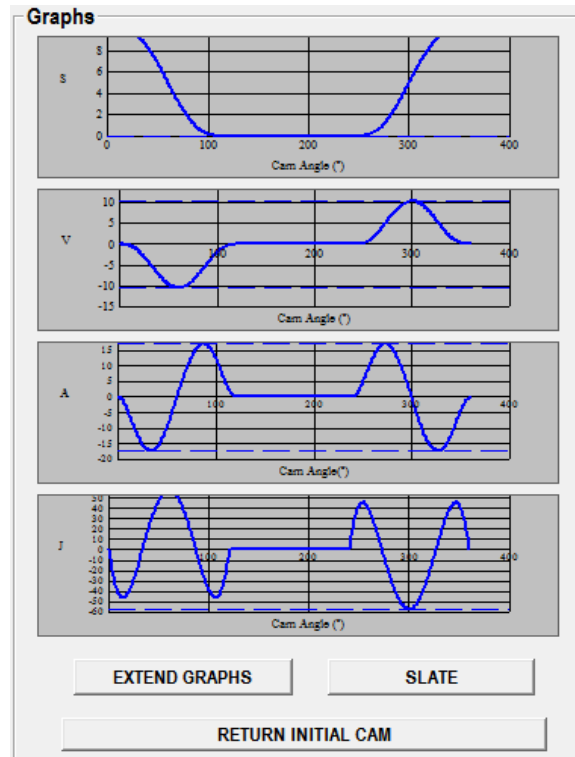
The information that we will have to give depends on the case of cam in which we are.

### 8.2.9 Come back to the initial cam

The user can return to the initial cam when it wants, touching the button “Return Initial Cam”.

Pushing the button the graphs were coming back to his initial condition, but we will have to introduce in the zone of “Geometric values and angular velocity” the values that CAM-DAS will indicate us of the initial cam.

With this information and touching “Calculation” the initial cam is ok.



Pict. 8.29: Button “Return Initial Cam”

## Capítulo 9: Conclusiones y trabajos futuros

### 9.1 Conclusiones

Tras finalizar el trabajo, puede concluirse que los objetivos que se propusieron al principio de este proyecto fin de carrera se han cumplido plenamente:

Resumidamente, se puede concluir que:

- Se ha cumplido a plena satisfacción el objetivo principal: *“Se ha creado la aplicación informática CAM-DAS, una herramienta de software ágil, intuitiva, amigable y muy completa, destinada al diseño, análisis y simulación de levas planas, con fines didácticos”*.

El usuario tendrá la capacidad de calcular, analizar y comprender de un modo fácil todos los factores que engloba el estudio cinemático de este tipo de mecanismos.

- La presentación visual de la aplicación ha sido optimizada para dotarla de un carácter didáctico superior al que tenía el programa de referencia SCLevas. La utilización del programa también se ve mejorada, ahora es más intuitivo, por lo que el usuario no necesitará grandes conocimientos de teoría de levas para realizar el diseño de cualquier tipo de leva.

La mejora de la interfaz con respecto al programa de referencia queda patente con el aumento de tamaño de las pantallas principales, tipo y tamaño de letra, la incorporación tanto de ayudas en nuevas ventanas para cada tipo de leva que permiten al usuario una mayor comprensión de la geometría de los mecanismos a calcular, como de ayuda interactiva basadas en el manual del usuario que guiarán al mismo durante todo el proceso de cálculo y análisis.

Se facilita al usuario una mejor interpretación de todas y cada una de las conclusiones gráficas que se obtienen en el estudio y se ofrece de un modo muy útil y ágil la posibilidad de comparación de los mecanismos calculados.

- Queda a disposición del usuario la posibilidad de estudiar de un modo completo, comprendiendo todos los factores que influyen en su diseño, los mecanismos desmodrómicos, entre ellos la leva conjugada de toda leva previamente calculada, levas



de anchura constante y las levas de diámetro constante, así como las levas alternativas o traslacionales.

Del análisis de los aspectos teóricos encontrados en la bibliografía que trata los mecanismos de leva desmodrómicos planos, se puede concluir que existe diversidad en cuanto a la nomenclatura que se utiliza para denominarlos, y se aprecia la falta de conceptos que esclarezcan el tema. Así, por ejemplo, las levas desmodrómicas son también llamadas: levas especiales, levas de accionamiento positivo y levas con cierre geométrico del par superior.

- Se han llevado a cabo mejoras de edición en prácticamente la totalidad de las ventanas que aparecen en la aplicación, entre ellas, se mejora la comprensión de las todas las gráficas debido a la posibilidad de aumentar su tamaño de visualización, diagramas cinemáticos más detallados, explicaciones teóricas para cada parámetro, accesos directos a la pizarra, etc.
- Todas las pantallas puede ser imprimidas con todo detalle y mayor facilidad, seleccionando en los menús creados especialmente para la impresión el diagrama, parámetro o pantalla que se desee.
- Debido a la implementación del programa con Visual Basic 6.0, el programa referencia estaba creado con la versión anterior, se consigue eliminar la instalación e integrar la herramienta completa en un solo fichero (.exe)
- Se ha elaborado un manual del usuario de la aplicación, tanto para la versión en español como para la versión traducida, en el que se describen con detalle todas las ventanas que forman la interfaz gráfica del programa informático y la funcionalidad de las mismas.
- La nueva biblioteca de ejemplos que ofrece CAM-DAS al usuario, contiene hasta doce interesantes levas de todos los tipos que pueden estudiarse con el programa. Todos estos ejemplos están incluidos en el manual del usuario.
  - Se presenta la versión de CAM-DAS traducida al inglés. La traducción de la aplicación supone una importante ampliación del abanico de usuarios a los que en principio estaba destinado el programa. Esta versión presenta las mismas características que la versión original, con las ventajas que ello conlleva.

Por tanto, la aplicación informática creada, CAM-DAS, por su contenido, diseño visual y sencillez de uso, permitirá que pueda ser utilizada con fines docentes en asignaturas donde se estudie la cinemática de los mecanismos leva-seguidor.

## 9.2 Trabajos futuros

El proyecto presentado trata sólo de una parte fundamental en el cálculo de una leva: el análisis cinemático. Un estudio dinámico del mecanismo suele tener entre sus datos de partida los resultados cinemáticos. La modularidad con la que está desarrollado el programa facilitaría la tarea de ampliar con un bloque dinámico (para la determinación de la fuerza dinámica de la leva y del momento requerido para impulsar el eje) que tomase entre sus datos de partida los resultados obtenidos con CAM-DAS. Estos resultados se encuentran almacenados en vectores públicos, por lo que su acceso puede hacerse desde cualquier punto del programa sin necesidad de modificar el código.

En futuros trabajos se recomienda abordar el estudio de la interacción física entre leva y seguidor, analizando los esfuerzos de contacto (tensiones de Hertz) en el punto de contacto leva-palpador. Por otro lado se podría incorporar la posibilidad de incorporar curvas de desplazamiento personalizadas por el propio usuario o añadir a las ya existentes nuevos tipos de curvas, por ejemplo curvas Bézier y B-spline.

Entre los resultados del programa se encuentran las coordenadas del perfil de la leva. Si se pretendiese fabricar, se podría crear un programa de control numérico que utilizase dichas coordenadas. La forma de hacerlo sería tomar directamente los puntos discretos que conforman el perfil, a través de la exportación de resultados a Excel, e implementarlos en un programa. Esta opción, aunque factible, puede resultar un poco tediosa. La misma modularidad que antes facilitaba la tarea de crear un bloque dinámico, posibilitaría también la opción de añadir un procedimiento que tomase como datos de partida las coordenadas del perfil de la leva y diese como resultado un fichero \*.dxf (drawing exchange format). Este tipo de archivos son ficheros de texto normales en código ASCII, basados en un estándar de facto (original de AutoDesk), que sirven para facilitar el intercambio de gráficos entre aplicaciones CAD; la mayor parte de ellas son compatibles con este formato. Así se podría crear un enlace entre CAM-DAS y un sistema CAD/CAM que simplificaría la tarea de fabricar la leva calculada (figura 9.1).

El programa es SDI (Simple Document Interface), esta singularidad permitiría incorporar la aplicación CAM-DAS en una mayor, MDI (Multiple Document Interface), que podría englobar otros tipos de levas o mecanismos. Cada programa individual podría ser desarrollado de forma prácticamente independiente. Sería necesario seguir unos mínimos criterios de normalización, en general relativos a la presentación. De este modo podría conseguirse un macropaquete integrado de gran utilidad didáctica en el análisis de los mecanismos escogidos (figura 9.2).

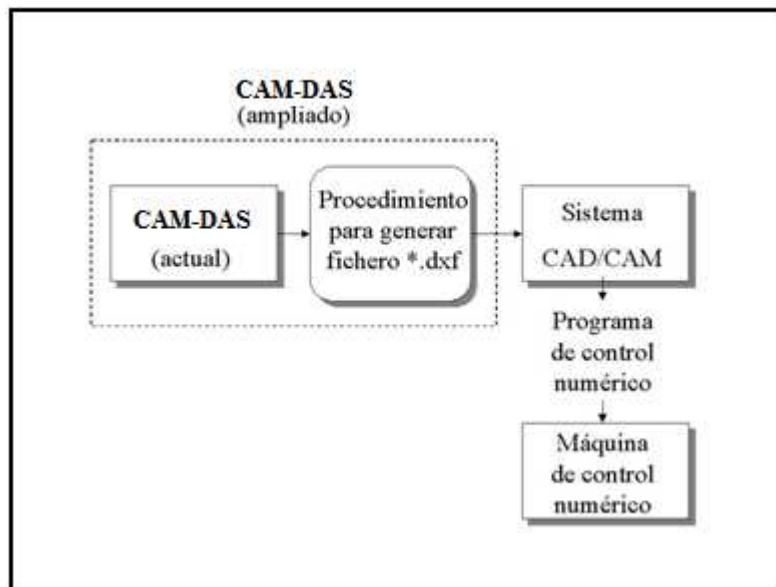


Figura 9.1: Enlace con un sistema CAD/CAM.

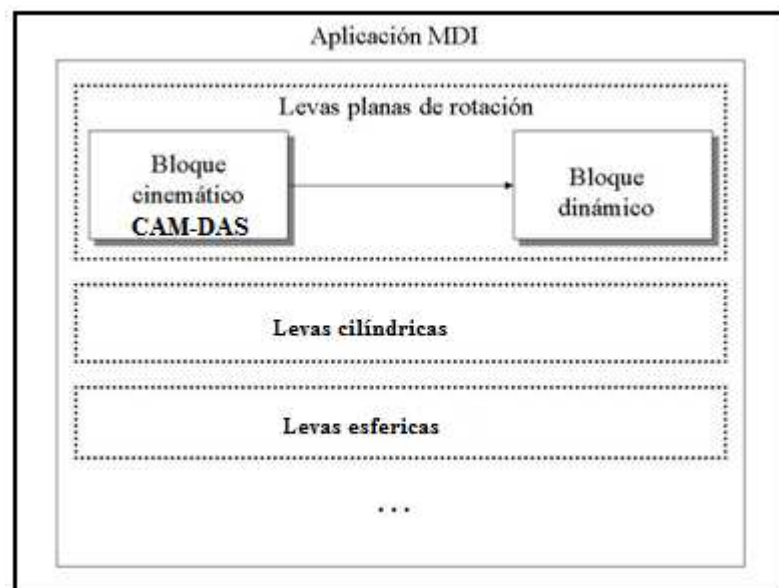


Figura 9.2: Aplicación MDI con otros tipos de levas o mecanismos.

## Bibliografía y recursos de Internet

### B1. Principales Referencias Bibliográficas

1. Diseño de maquinaria. Robert L. Norton, Mc Graw Hill. 4ª edición. 2009.
2. Cam, Design and Manufacturing Handbook, Robert L. Norton, Industrial Press, Inc. 2001.
3. Cam Design Handbook: Dynamics and Accuracy, Harold A. Rothbart, Mc Graw Hill. 2003
4. Teoría de máquinas y mecanismos. Joseph Edward Shigley/John Joseph Uicker, Jr. Mc Graw Hill. 1995.
5. Chen, F. Y. Mechanics and Design of Cam mechanisms. Ed. Pergamon Press Inc. U.S.A. 1982.
6. Cardona, S. y Clos, D. Teoría de Máquinas (Edición en Castellano). Ed. UPC. Barcelona. 2001.
7. Aportación al estudio de levas desmodrómicas. Enrique E. Zayas Figueras, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Noviembre 2001.
8. Diseño de mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G. Erdman/George N. Sandor, Prentice Hall. 1998.

### B2. Principales Referencias a Páginas Web

1. Curso de Visual Basic 6.0. [www.areaint.com](http://www.areaint.com) ⇒ Último acceso Enero, 2010.  
Página que ofrece formación a través de internet.
2. <http://daedsoft.blogspot.com/> ⇒ Último acceso Enero, 2010  
Programando en serio con Visual Basic (Curso de programación avanzada). Segunda Edición 2008. Andrés Escobar Duque.
3. <http://www.lawebdelprogramador.com/> ⇒ Página web dedicada al mundo de la programación. Dispone de numerosos y variados tutoriales.
4. <http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/indices.htm> ⇒ Último acceso Octubre, 2010.  
Página web de la Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I - Castellón – España.
5. <http://demaquinas.blogspot.com/.html> ⇒ Último acceso Octubre, 2010.  
Blog sobre teoría de levas.
6. <http://www.ul.ie> ⇒ Último acceso Octubre, 2010.  
Página web de la Universidad de Limerick (Irlanda) con teoría de levas y gráficos animados (\*.gif).

### B3. Principales artículos consultados.

1. “Analysis and synthesis of the displacement function of the follower in constant-breadth cam mechanisms”. E.E. Zayas, S. Cardona, L. Jordi. *Mechanism and Machine Theory*, No. 44 (2009), pp. 1938–1949.
2. “Kinematic and dynamic analysis of mechanisms with cams”. Alberto Cardona and Michel Géradin. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, No. 103 (1993), pp. 115-134.
3. “Synthesis of constant-breadth cam mechanisms”. Zhonghe Ye and Michael R. Smith. *Mechanism and Machine Theory*, No 37 (2002), pp. 941–953
4. “Optimum design of cam mechanisms with oscillating flat-face followers”. Q Yu and H.P. Lee. *Mechanics Research Communications* Vol. 23, No. 2, pp. 181-187, 1996.