

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

La presente investigación se ha dedicado al estudio del ángulo de presión, radio de curvatura y presión de contacto en los mecanismos de leva con palpador circular de traslación. Se ha utilizado como curvas de diseño para la ley de desplazamiento curvas de Bézier de continuidad  $C^2$ ,  $C^3$  y  $C^4$  con tramos rectos, por considerar que éstas representan de manera adecuada las funciones necesarias para el correcto diseño de la ley de desplazamiento y por tanto del perfil de una leva.

En el desarrollo del trabajo de investigación que ha dado lugar a la presente tesis se han alcanzado los objetivos inicialmente planteados en cuanto a:

- Definir la ley de desplazamiento por tramos rectos unidos por empalmes definidos con curvas de Bézier.
- Estudiar la idoneidad del grado de continuidad en los empalmes.
- Estudiar el ángulo de presión y el radio de curvatura de las levas cuya ley de desplazamiento se diseña con curvas de Bézier.

- Comparar los valores del ángulo de presión obtenidos con los empalmes propuestos y con los empalmes clásicos: cicloidales y armónicos.
- Generar gráficas para calcular el ángulo de presión y el radio de curvatura de las levas mencionadas.
- Estudiar los esfuerzos generados por el contacto de la leva y el palpador circular.
- Generar gráficas de la distribución de los esfuerzos de contacto.

En la investigación se han abordado las tres etapas de diseño de un mecanismo leva palpador: definición de la ley de desplazamiento del palpador, obtención del perfil de leva y comprobación del perfil de la leva. La investigación se ha centrado en las dos últimas etapas.

Del análisis de los aspectos teóricos encontrados en la bibliografía que trata el método de obtención de las leyes de desplazamiento diseñadas por curvas de Bézier para mecanismos leva palpador se concluye que las curvas de Bézier se adaptan al diseño de la ley de desplazamiento del palpador en función del movimiento de la leva debido a la suavidad y flexibilidad que presentan.

Igualmente de la bibliografía se concluye que éstas leyes pueden ser diseñadas por tramos de unión o por trayectos completos de movimiento de la leva (giro total de la leva) y que los dos métodos indistintamente tienen óptimos resultados de diseño siempre y cuando los puntos de control y la continuidad sean las correctas. En ésta tesis se utiliza el diseño por tramos de unión y se describen los diferentes tramos de unión que conforman el movimiento final del mecanismo leva palpador.

En la bibliografía se expone y se concluye que las curvas de Bézier permiten tener un buen control sobre las tres primeras derivadas de la ley de desplazamiento, que son las que intervienen en la descripción cinemática y dinámica del mecanismo. La primera derivada temporal de la ley de desplazamiento es la velocidad del palpador de la leva si la velocidad angular de la leva es constante, la segunda derivada es la aceleración y la tercera derivada es

la sobreaceleración del sistema, siendo la segunda derivada la encargada de intervenir en el análisis dinámico del mecanismo y la tercera derivada la que está más íntimamente relacionada con la generación de vibraciones del sistema. Se concluye igualmente que si existen discontinuidades en la tercera derivada, puede presentarse un problema serio en las levas de alta velocidad debido a las vibraciones producidas en el mecanismo las cuales pueden conducir a un acelerado fallo superficial por fatiga.

En esta tesis se estudia las curvas de Bézier de grados 4, 5, 6, 7, 8 y 9 con continuidades  $C^2$ ,  $C^3$  y  $C^4$  y se concluye que a pesar del comportamiento óptimo que presentan los diferentes grados de las curvas de Bézier durante el diseño de la ley de desplazamiento de la leva, la curva de Bézier de grado  $n = 4$  (movimiento de empalme de media subida inicio y media subida llegada) y la curvas de Bézier de grado  $n = 5$  (movimiento de transición de altura de subida completa) no deben utilizarse para el diseño de levas de alta velocidad debido a la discontinuidad (figuras 3.4, 3.8 y 3.12) presente en la tercera derivada de estos grado de curva de Bézier.

Del estudio de la bibliografía especializada en el tema de los mecanismos leva palpador, se concluye que es escasa aquella que aborda los temas de comprobación del perfil de la leva en los aspectos de ángulo de presión, radio de curvatura y presión de contacto para las leyes de desplazamiento diseñadas por curvas de Bézier. En la mayoría de los textos y artículos se tratan básicamente aspectos de levas diseñadas con leyes de desplazamiento cicloidales o armónicas, llamados en esta tesis curvas tradicionales.

Como criterio de diseño los autores especifican que es necesario mantener el ángulo de presión en valores inferiores a  $30^\circ$  para palpadores de traslación, debido a que la experiencia ha puesto de manifiesto que valores pequeños de ángulo de presión evitan cargas laterales excesivas (componente de la fuerza perpendicular al vástago) sobre el eje del palpador.

En esta tesis se estudia diversas curvas de Bézier para asegurar un amplio análisis de los aspectos de comprobación del perfil de la leva en lo referente al ángulo de presión y al radio de curvatura, la selección de estos tipos de curvas se debe a la conveniencia que se tiene de comparar diferentes leyes de desplazamiento de curvas de Bézier, de lo cual se concluye que para los tramos de transición de altura de subida completa las curvas de Bézier que mejor bondad presentan respecto a los otros grados de las curvas son las de Bézier de grado  $n = 5$ . Debido a que en lo referente al ángulo de presión es la que menor valor de este presenta para condiciones similares de trabajo, según se muestra en el ejemplo de la figura 5.5 y en lo referente al radio de curvatura es la que presenta mayor valor de la relación  $(R_c + R_r)/L$  lo que conlleva a que disminuya la posibilidad de encontrar un valor de radio de curvatura  $R_c$  negativo indeseado para un valor de radio de rodillo dado (tablas 4.8 a 4.16).

Del análisis de la bibliografía se expone que cuando en un mecanismo leva palpador de rodillo se presenta el caso de carga combinada: fuerza normal y fuerza tangencial, el estado de esfuerzos se distorsiona comparativamente con el caso a rodadura pura y se concluye que esto se debe a la carga tangencial, es de esperar que un pequeño deslizamiento ocasione una pequeña distorsión y que grandes deslizamientos ocasionen distorsiones mayores. Para este caso de carga combinada se deben tener en cuenta que los esfuerzos se muestran como componentes independientes, según se presenten o no.

Del análisis de los ejemplos mostrados en este trabajo de investigación se concluye que las variables tanto geométricas (ángulo de presión, radio de curvatura, huella de contacto, presión de contacto, esfuerzos de contacto, fuerza de contacto, deformación, etc.) como de la fuerza de contacto son fluctuantes durante todo el ciclo de giro de la leva y evidentemente están relacionadas entre sí.

Del estudio de las gráficas de los esfuerzos en la superficie (figuras 5.6, 5.7 y 5.8) se concluye que la curva de Bézier de grado  $n = 5$  es la que mejor se comporta comparativamente con las curvas de Bézier de grado  $n = 7$  y Bézier  $n = 9$  debido a que presenta valores de esfuerzos menores, lo que conlleva a que tenga mejores condiciones para el diseño final de la leva. Igualmente del estudio se observa que para las condiciones de las variables fuerza de

contacto, huella de contacto, presión de contacto y deformación es la curva de Bézier  $n = 5$  la que nuevamente tiene mejor comportamiento.

En la bibliografía se expone y se concluye que la teoría del esfuerzo efectivo de Von Mises  $\sigma'$  cumple los requerimientos de servir para analizar esfuerzos combinados y de servir para aplicarse a materiales dúctiles homogéneos o isotrópicos como son la mayor parte de los metales de la ingeniería. Se expone que esta teoría combina los esfuerzos aplicados en un punto y define el esfuerzo efectivo como aquel esfuerzo a tensión que genera la misma energía de distorsión que la que se produce por la combinación de los esfuerzos aplicados concluyendo que en general lo que ocurre al aplicar el esfuerzo efectivo es que cualquier combinación de esfuerzos de dos o tres dimensiones se convierte en un solo valor que puede ser comparado con cualquier criterio de resistencia.

De los ejemplos mostrados y tomando como referencia el esfuerzo efectivo de Von Mises (figuras 5.12 y 5.17) se concluye que el contacto leva palpador con valores de radio primario de la leva y valores de radio de rodillo similares ocasionan esfuerzos efectivos mayores que los que ocurren cuando el radio primario de la leva tiene un valor mayor, igualmente se observa y se concluye que a medida que va aumentando el radio primario de la leva los valores del esfuerzo efectivo tienden a disminuir hasta finalmente llegar a un valor asintótico que corresponde a un radio infinito para el caso de la leva con superficie plana.

En este trabajo se comparan las consideraciones de diseño (ángulo de presión y radio de curvatura), entre las curvas de Bézier y las llamadas en esta tesis curvas tradicionales y se concluye que son las curvas armónicas las que presentan mejores bondades para el diseño de las levas debido a que son las que presentan menor ángulo de giro mínimo necesario para no exceder el valor de  $30^\circ$  grados recomendado de ángulo de presión y que igualmente presentan mayor valor de la relación  $R_c + R_r$  lo que con lleva a que disminuya la posibilidad de encontrar un valor de radio de curvatura  $R_c$  negativo para un valor de radio de rodillo dado. En su orden después de la comparación siguen en bondad para el diseño las curvas las curvas de Bézier de grado  $n = 5$ , la curva cicloidal, la curva Bézier  $n = 7$  y por último la curva Bézier  $n = 9$ .

## 6.2 APORTACIONES DE LA TESIS

Las aportaciones logradas con el desarrollo de la tesis son las siguientes:

- Referidas a los aspectos de obtención del perfil de la leva:
  1. Se ha definido las leyes de desplazamiento por tramos rectos unidos por empalmes definidos con curvas de Bézier y se establecen las condiciones que deben cumplir los empalmes para el diseño del perfil de las levas.
  2. Se ha definido los conceptos: *Movimiento de transición de altura de subida completa*, *Movimiento de empalme de media subida inicio* y *movimiento de empalme de media subida llegada*, los cuales no se encuentran en la bibliografía consultada.
  
- Referidas a la comprobación del perfil de la leva:
  1. Se ha determinado tablas y gráficas referidas al estudio del ángulo de presión para el caso de leyes de desplazamiento definidas por curvas de Bézier y además, se expone el proceso de definición de las mismas.
  2. Se ha determinado tablas y gráficas referidas al estudio del ángulo de presión para el caso de leyes de desplazamiento definidas por curvas de Bézier y además, se expone el proceso de definición de las mismas.
  3. Se ha comparado las curvas de Bézier de grados  $n = 5$ ,  $n = 7$  y  $n = 9$  en lo referente al estudio del ángulo de presión y del radio de curvatura.

4. Se ha comparado las curvas de Bézier respecto a las curvas tradicionales (cicloidales y armónicas) para el tramo de unión de *movimiento de transición de altura de subida completa*, en lo referente al ángulo de presión y al radio de curvatura.
5. Se ha determinado por medio de ejemplos la variación de los esfuerzos producidos por el contacto entre la leva y el palpador circular de traslación, para el caso de levas cuya ley de desplazamiento ha sido diseñada por curvas de Bézier. Igualmente se muestra la variación de las variables ángulo de presión, radio de curvatura, huella de contacto, presión de contacto, fuerza de contacto y deformación para los mismo casos de curvas de Bézier.

### 6.3 RECOMENDACIONES

Una vez concluida la tesis, se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con los mecanismos leva palpador y se propone:

- Extender los estudios expuestos en esta tesis al estudio del diseño de levas por curvas de Bézier pero diseñando la ley de desplazamiento por trayectos completos de movimiento (giro total de la leva).
- Trabajar en mejorar el modelo dinámico utilizado en esta tesis para determinar la variación de la fuerza de contacto.
- Analizar con mayor detenimiento y buscar la razón de, el porque las curvas de Bézier de grado  $n = 5$  presentan mejor comportamiento que las curvas de Bézier de otros grados.

- Extender los estudios expuestos en esta tesis al estudio de otros tipos de palpadores, en especial a los palpadores de rodillo de rotación.