

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La presente investigación se ha dedicado al estudio de los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, en especial, de los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante. Estos mecanismos son poco estudiados en la bibliografía que aborda el tema de leva.

En el desarrollo del trabajo de investigación que ha dado lugar a la presente tesis **Aportación al estudio de levas desmodrómicas**, se han alcanzado los objetivos inicialmente planteados en cuanto a:

- Aportar fundamentos teóricos relacionados con los mecanismos desmodrómicos mencionados.
- Definir las leyes de desplazamiento del palpador y estudiar las características de las mismas en dichos mecanismos.
- Desarrollar un método analítico general que permita obtener perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, más sencillo y comprensible para el diseñador, que los encontrados en la bibliografía especializada.

En el trabajo de investigación se han abordado las tres etapas de la secuencia de diseño de un mecanismo de 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 primeras etapas.

Del estudio de la bibliografía especializada en el tema mecanismo leva-palpador, se concluye que es escasa aquella que aborda a los mecanismos desmodrómicos planos. Dentro de ella, cabe señalar, que se expone la teoría de manera poco clara. En la mayoría de los textos y artículos se tratan básicamente aspectos de levas conjugadas con palpadores rotatorios y levas de anchura constante, muy utilizadas en la maquinaria textil.

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. En esta investigación se ha utilizado el adjetivo desmodrómico partiendo de su significado y se ha definido el concepto de mecanismo de leva desmodrómico, no explicado en la bibliografía consultada, este es:

Mecanismo de leva desmodrómico: es aquel mecanismo de leva que utiliza dos pares superiores conjugados de manera que ambos imponen la misma restricción cinemática garantizando la

bilateralidad global, es decir, la pérdida de contacto en uno de los pares queda impedido por el otro par.

Muchos autores denominan con un mismo término a diferentes mecanismos desmodrómicos, concluyéndose que no están claros los conceptos para diferenciarlos. Por esta razón, se han definido los conceptos de leva de anchura y diámetro constante, así:

Leva de anchura constante: es aquella que tiene la característica de mantener una distancia constante d_c entre dos palpadores planos paralelos tangentes al perfil de la leva.

Leva de diámetro constante: es aquella en que la distancia entre dos puntos diametralmente opuestos es d_c constante. Para los palpadores de rodillo el diámetro constante hace referencia a la curva de paso.

En la bibliografía no se exponen todas las características de la ley de desplazamiento del palpador necesarias para obtener el perfil de leva de anchura y diámetro constante, ni tampoco una denominación que las identifique. En la tesis se han explicado aspectos de las leyes de desplazamiento del palpador en el caso de tales levas, denominando las leyes en función del movimiento del palpador que la leva acciona, esto ayuda durante la secuencia de diseño del mecanismo leva-palpador. Para los palpadores traslatorios, la ley se ha denominado *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y cuando el palpador es rotatorio *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

De la caracterización de las leyes de desplazamiento del palpador para el caso de levas de anchura y diámetro constante, se concluye que:

- Si el doble palpador tiene movimiento de translación, la ley presenta la siguiente característica:
 - a) Se puede definir en el tramo de 0 a π radianes de ángulo de rotación de la leva –utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD–, y de π a 2π ha de ser tal que se cumpla la condición: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
- Para un doble palpador paralelo con movimiento de rotación:
 - a) La ley desplazamiento se obtiene diseñando un primer tramo –como en el caso anterior, utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD– y el segundo tramo se obtiene por cálculo, utilizando las expresiones que se deducen de la condición de desmodromía (Ec. 4.1).

$$\sin d(\theta) + \sin d(\theta + \delta) = \frac{l_{2\text{inf}} - l_{2\text{sup}}}{l_1} \quad (4.1)$$

- b) Si en el doble palpador se cumple que $l_{2\text{inf}} \neq l_{2\text{sup}}$, el tramo diseñado de la ley de desplazamiento no alcanza los π radianes de ángulo de giro de la leva, el resto se define por cálculo.
- c) Cuando la geometría del doble palpador es tal que, los brazos superior e inferior son iguales, es decir, la parte derecha de la Ec.4.1 es igual a cero, entonces el primer tramo de la ley de desplazamiento del palpador se puede definir desde 0 a π , teniendo en cuenta que $d(\theta)$ debe de ser cero en esos valores y además, la curva debe de tener una pendiente pequeña próxima a π , para que el tramo calculado no sobre pase los 2π radianes.

En el trabajo de investigación se definen las leyes de desplazamiento del palpador con curvas de Bézier no paramétricas en la mayoría de los casos de obtención del perfil y curvas B-splines no paramétricas en otro. Se concluye que es suficiente para las leyes de poca complejidad –como las aquí utilizadas– trabajar con las curvas de Bézier mencionadas y que éstas dan flexibilidad en el diseño de las leyes de desplazamiento coincidiendo con lo planteado por Reyes [2000]. La definición con B-splines es más complicada y se considera más adecuado utilizarla en el caso de leyes de desplazamiento complejas, por ejemplo, con tramos de pendiente constante.

Se ha presentado un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular, como herramienta para la investigación de las leyes de desplazamiento en los mecanismos leva-palpador de este tipo. Este método es sencillo y da flexibilidad para obtener diferentes perfiles de anchura constante, los cuales generan leyes de desplazamiento con continuidad C^1 . Se considera que este método puede ser adecuado para generar perfiles de levas que giren a bajas velocidades, si bien adolece de no ser un proceso de síntesis directa.

Se han establecido las restricciones de diseño para obtener levas de anchura y diámetro constante utilizando el método analítico-vectorial propuesto para obtener perfiles de levas conjugadas que accionan palpadores translatorios, estas son:

- Cuando el doble palpador es plano:
 - a) La ley de desplazamiento debe de ser de anchura constante: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
 - b) La distancia entre los palpadores superior e inferior debe de ser: $d_c = 2R_b + s_{\text{máx}}(\theta)$.
- Cuando el doble palpador es circular o puntual, además de las restricciones anteriores se coloca la siguiente:
 - a) Excentricidad del palpador igual cero, $\varepsilon = 0$.

Para la obtención y el análisis de la ley de desplazamiento del palpador en mecanismos de anchura constante de arco circular con palpadores rotatorios, se ha expuesto un método basado en el análisis de levas de excéntricas permitiendo obtener la ley de desplazamiento buscada.

En la tesis se plantean tanto los métodos gráficos como los analíticos para la obtención del perfil de leva. Los primeros se explican partiendo del criterio de que facilitan la comprensión del proceso de generación del perfil. Se han introducido aspectos que facilitan la obtención gráfica del perfil de leva –por ejemplo, en el caso de palpadores de rotación, donde en lugar de trabajar con el método de intersección de curvas para hallar el punto de trazo, se trabaja directamente con el ángulo de desplazamiento del palpador. Además, se resumen en pocos pasos los procedimientos gráficos, haciendo más sencilla y compacta la explicación de la secuencia de obtención del perfil. De lo planteado se puede concluir que los procedimientos gráficos son importantes para la comprensión del proceso de generación del perfil de leva y aquí se muestran de una manera que los hace de fácil comprensión y aplicación.

Los métodos analíticos se exponen partiendo del criterio de que son los que se utilizan en la actualidad debido al desarrollo de los medios de cómputo y a sus ventajas. Se utiliza para explicarlos, el enfoque analítico-vectorial expuesto por Cardona y Clos [2001], considerando que éste es de más fácil comprensión y más conciso respecto a los métodos analíticos planteados por otros autores. En este caso, se incluyen expresiones para el cálculo del ángulo inicial de desplazamiento del palpador rotatorio y las expresiones para el cálculo del perfil del palpador circular de rotación. A modo de conclusión se observa que existen varios enfoques analíticos, mucho de los cuales son tediosos, se pretende entonces facilitar el trabajo a los diseñadores proponiendo enfoques analíticos más comprensibles.

Se expone un método analítico-vectorial general que permite obtener tanto los perfiles de levas conjugadas como los de anchura y diámetro constante, con palpadores translatorios y rotatorios, estableciendo ciertas restricciones durante el diseño. El método no es tedioso, ni complicado.

4.2 Aportaciones de la tesis

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

– Referidas a los aspectos teóricos de los mecanismos desmodrómicos:

1. Se definen los conceptos de: *Mecanismos de leva desmodrómico*, *Mecanismo de leva de anchura constante* y *Mecanismo de leva de diámetro constante*; no explicados en la bibliografía consultada.
2. Se establecen las condiciones que deben cumplir las leyes de desplazamiento del palpador –condiciones de desmodromía– en mecanismos de levas de anchura constante denominándolas: *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

- Con respecto al análisis y síntesis de las leyes de desplazamiento:
 1. Se determinan las características de las leyes de desplazamiento de los palpadores traslatorios y rotatorios en los mecanismos de anchura constante. Además, se expone el proceso de definición de las mismas.
 2. En el caso de los mecanismos de levas conjugadas, se adecuan las expresiones de las leyes de desplazamiento para el palpador inferior. Así, para palpadores traslatorios se introduce en dichas expresiones el término d_c –distancia entre palpadores– y para los rotatorios el ángulo β –ángulo entre palpadores.
- Referente a los métodos de obtención del perfil:
 1. Se expone un método analítico-vectorial sencillo y conciso que permite obtener los perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, tanto para el caso de palpadores traslatorios como para el caso de los rotatorios.
 2. Se establecen las restricciones de diseño para la obtención de perfiles de anchura constante y diámetro constante, utilizando el método de generar levas conjugadas.
 3. Se muestra un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular.
 4. En el caso de los procedimientos gráficos, se sintetizan los pasos a seguir en la obtención del perfil y se introducen modificaciones en el caso de palpadores rotatorios que hacen más sencillos los procedimientos.

4.3 Recomendaciones

Una vez concluida la tesis, se considera que resultaría interesante investigar otros aspectos relacionados con los mecanismos desmodrómicos aquí estudiados. Se propone:

1. Trabajar en la etapa de comprobación del perfil de la leva, verificando los perfiles obtenidos por los métodos analíticos propuestos, a través de la determinación del radio de curvatura del perfil y del ángulo de presión en el mecanismo. De este modo, lograr un mejor dimensionado del mecanismo leva-palpador.
2. Estudiar los esfuerzos de contacto –tensiones de Hertz– en el punto de contacto leva-palpador. Así, poder establecer un radio de base de la leva durante el proceso de diseño, que garantice desde un inicio que el perfil a obtener no presentará características geométricas no deseadas.
3. Realizar un estudio del comportamiento dinámico –determinación de la fuerza dinámica de la leva y del momento requerido para impulsar el eje de levas– en los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, utilizando leyes de desplazamiento del palpador

diseñadas con curvas de Bézier y B-spline. Sugerir a partir de este estudio que mecanismo es más conveniente, así como que curvas dan mejores resultados.

4. Crear un programa informático para el diseño de levas que permita utilizar en la etapa de definición de leyes de desplazamiento del palpador, tanto las técnicas tradicionales como los métodos adecuados para el CAGD, en especial, las curvas de Bézier no paramétricas y las curvas B-splines no paramétricas. Se sugiere que se utilice el enfoque analítico-vectorial expuesto en la tesis para la obtención del perfil de levas, en mecanismos leva-palpador tanto con cierre del par superior por fuerza como en mecanismos desmodrómicos.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La presente investigación se ha dedicado al estudio de los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, en especial, de los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante. Estos mecanismos son poco estudiados en la bibliografía que aborda el tema de leva.

En el desarrollo del trabajo de investigación que ha dado lugar a la presente tesis **Aportación al estudio de levas desmodrómicas**, se han alcanzado los objetivos inicialmente planteados en cuanto a:

- Aportar fundamentos teóricos relacionados con los mecanismos desmodrómicos mencionados.
- Definir las leyes de desplazamiento del palpador y estudiar las características de las mismas en dichos mecanismos.
- Desarrollar un método analítico general que permita obtener perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, más sencillo y comprensible para el diseñador, que los encontrados en la bibliografía especializada.

En el trabajo de investigación se han abordado las tres etapas de la secuencia de diseño de un mecanismo de 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 primeras etapas.

Del estudio de la bibliografía especializada en el tema mecanismo leva-palpador, se concluye que es escasa aquella que aborda a los mecanismos desmodrómicos planos. Dentro de ella, cabe señalar, que se expone la teoría de manera poco clara. En la mayoría de los textos y artículos se tratan básicamente aspectos de levas conjugadas con palpadores rotatorios y levas de anchura constante, muy utilizadas en la maquinaria textil.

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. En esta investigación se ha utilizado el adjetivo desmodrómico partiendo de su significado y se ha definido el concepto de mecanismo de leva desmodrómico, no explicado en la bibliografía consultada, este es:

Mecanismo de leva desmodrómico: es aquel mecanismo de leva que utiliza dos pares superiores conjugados de manera que ambos imponen la misma restricción cinemática garantizando la

bilateralidad global, es decir, la pérdida de contacto en uno de los pares queda impedido por el otro par.

Muchos autores denominan con un mismo término a diferentes mecanismos desmodrómicos, concluyéndose que no están claros los conceptos para diferenciarlos. Por esta razón, se han definido los conceptos de leva de anchura y diámetro constante, así:

Leva de anchura constante: es aquella que tiene la característica de mantener una distancia constante d_c entre dos palpadores planos paralelos tangentes al perfil de la leva.

Leva de diámetro constante: es aquella en que la distancia entre dos puntos diametralmente opuestos es d_c constante. Para los palpadores de rodillo el diámetro constante hace referencia a la curva de paso.

En la bibliografía no se exponen todas las características de la ley de desplazamiento del palpador necesarias para obtener el perfil de leva de anchura y diámetro constante, ni tampoco una denominación que las identifique. En la tesis se han explicado aspectos de las leyes de desplazamiento del palpador en el caso de tales levas, denominando las leyes en función del movimiento del palpador que la leva acciona, esto ayuda durante la secuencia de diseño del mecanismo leva-palpador. Para los palpadores traslatorios, la ley se ha denominado *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y cuando el palpador es rotatorio *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

De la caracterización de las leyes de desplazamiento del palpador para el caso de levas de anchura y diámetro constante, se concluye que:

- Si el doble palpador tiene movimiento de translación, la ley presenta la siguiente característica:
 - a) Se puede definir en el tramo de 0 a π radianes de ángulo de rotación de la leva –utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD–, y de π a 2π ha de ser tal que se cumpla la condición: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
- Para un doble palpador paralelo con movimiento de rotación:
 - a) La ley desplazamiento se obtiene diseñando un primer tramo –como en el caso anterior, utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD– y el segundo tramo se obtiene por cálculo, utilizando las expresiones que se deducen de la condición de desmodromía (Ec. 4.1).

$$\sin d(\theta) + \sin d(\theta + \delta) = \frac{l_{2\text{inf}} - l_{2\text{sup}}}{l_1} \quad (4.1)$$

- b) Si en el doble palpador se cumple que $l_{2\text{inf}} \neq l_{2\text{sup}}$, el tramo diseñado de la ley de desplazamiento no alcanza los π radianes de ángulo de giro de la leva, el resto se define por cálculo.
- c) Cuando la geometría del doble palpador es tal que, los brazos superior e inferior son iguales, es decir, la parte derecha de la Ec.4.1 es igual a cero, entonces el primer tramo de la ley de desplazamiento del palpador se puede definir desde 0 a π , teniendo en cuenta que $d(\theta)$ debe de ser cero en esos valores y además, la curva debe de tener una pendiente pequeña próxima a π , para que el tramo calculado no sobre pase los 2π radianes.

En el trabajo de investigación se definen las leyes de desplazamiento del palpador con curvas de Bézier no paramétricas en la mayoría de los casos de obtención del perfil y curvas B-splines no paramétricas en otro. Se concluye que es suficiente para las leyes de poca complejidad –como las aquí utilizadas– trabajar con las curvas de Bézier mencionadas y que éstas dan flexibilidad en el diseño de las leyes de desplazamiento coincidiendo con lo planteado por Reyes [2000]. La definición con B-splines es más complicada y se considera más adecuado utilizarla en el caso de leyes de desplazamiento complejas, por ejemplo, con tramos de pendiente constante.

Se ha presentado un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular, como herramienta para la investigación de las leyes de desplazamiento en los mecanismos leva-palpador de este tipo. Este método es sencillo y da flexibilidad para obtener diferentes perfiles de anchura constante, los cuales generan leyes de desplazamiento con continuidad C^1 . Se considera que este método puede ser adecuado para generar perfiles de levas que giren a bajas velocidades, si bien adolece de no ser un proceso de síntesis directa.

Se han establecido las restricciones de diseño para obtener levas de anchura y diámetro constante utilizando el método analítico-vectorial propuesto para obtener perfiles de levas conjugadas que accionan palpadores translatorios, estas son:

- Cuando el doble palpador es plano:
 - a) La ley de desplazamiento debe de ser de anchura constante: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
 - b) La distancia entre los palpadores superior e inferior debe de ser: $d_c = 2R_b + s_{\text{máx}}(\theta)$.
- Cuando el doble palpador es circular o puntual, además de las restricciones anteriores se coloca la siguiente:
 - a) Excentricidad del palpador igual cero, $\varepsilon = 0$.

Para la obtención y el análisis de la ley de desplazamiento del palpador en mecanismos de anchura constante de arco circular con palpadores rotatorios, se ha expuesto un método basado en el análisis de levas de excéntricas permitiendo obtener la ley de desplazamiento buscada.

En la tesis se plantean tanto los métodos gráficos como los analíticos para la obtención del perfil de leva. Los primeros se explican partiendo del criterio de que facilitan la comprensión del proceso de generación del perfil. Se han introducido aspectos que facilitan la obtención gráfica del perfil de leva –por ejemplo, en el caso de palpadores de rotación, donde en lugar de trabajar con el método de intersección de curvas para hallar el punto de trazo, se trabaja directamente con el ángulo de desplazamiento del palpador. Además, se resumen en pocos pasos los procedimientos gráficos, haciendo más sencilla y compacta la explicación de la secuencia de obtención del perfil. De lo planteado se puede concluir que los procedimientos gráficos son importantes para la comprensión del proceso de generación del perfil de leva y aquí se muestran de una manera que los hace de fácil comprensión y aplicación.

Los métodos analíticos se exponen partiendo del criterio de que son los que se utilizan en la actualidad debido al desarrollo de los medios de cómputo y a sus ventajas. Se utiliza para explicarlos, el enfoque analítico-vectorial expuesto por Cardona y Clos [2001], considerando que éste es de más fácil comprensión y más conciso respecto a los métodos analíticos planteados por otros autores. En este caso, se incluyen expresiones para el cálculo del ángulo inicial de desplazamiento del palpador rotatorio y las expresiones para el cálculo del perfil del palpador circular de rotación. A modo de conclusión se observa que existen varios enfoques analíticos, mucho de los cuales son tediosos, se pretende entonces facilitar el trabajo a los diseñadores proponiendo enfoques analíticos más comprensibles.

Se expone un método analítico-vectorial general que permite obtener tanto los perfiles de levas conjugadas como los de anchura y diámetro constante, con palpadores translatorios y rotatorios, estableciendo ciertas restricciones durante el diseño. El método no es tedioso, ni complicado.

4.2 Aportaciones de la tesis

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

- Referidas a los aspectos teóricos de los mecanismos desmodrómicos:
 1. Se definen los conceptos de: *Mecanismos de leva desmodrómico*, *Mecanismo de leva de anchura constante* y *Mecanismo de leva de diámetro constante*; no explicados en la bibliografía consultada.
 2. Se establecen las condiciones que deben cumplir las leyes de desplazamiento del palpador –condiciones de desmodromía– en mecanismos de levas de anchura constante denominándolas: *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

- Con respecto al análisis y síntesis de las leyes de desplazamiento:
 1. Se determinan las características de las leyes de desplazamiento de los palpadores traslatorios y rotatorios en los mecanismos de anchura constante. Además, se expone el proceso de definición de las mismas.
 2. En el caso de los mecanismos de levas conjugadas, se adecuan las expresiones de las leyes de desplazamiento para el palpador inferior. Así, para palpadores traslatorios se introduce en dichas expresiones el término d_c –distancia entre palpadores– y para los rotatorios el ángulo β –ángulo entre palpadores.
- Referente a los métodos de obtención del perfil:
 1. Se expone un método analítico-vectorial sencillo y conciso que permite obtener los perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, tanto para el caso de palpadores traslatorios como para el caso de los rotatorios.
 2. Se establecen las restricciones de diseño para la obtención de perfiles de anchura constante y diámetro constante, utilizando el método de generar levas conjugadas.
 3. Se muestra un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular.
 4. En el caso de los procedimientos gráficos, se sintetizan los pasos a seguir en la obtención del perfil y se introducen modificaciones en el caso de palpadores rotatorios que hacen más sencillos los procedimientos.

4.3 Recomendaciones

Una vez concluida la tesis, se considera que resultaría interesante investigar otros aspectos relacionados con los mecanismos desmodrómicos aquí estudiados. Se propone:

1. Trabajar en la etapa de comprobación del perfil de la leva, verificando los perfiles obtenidos por los métodos analíticos propuestos, a través de la determinación del radio de curvatura del perfil y del ángulo de presión en el mecanismo. De este modo, lograr un mejor dimensionado del mecanismo leva-palpador.
2. Estudiar los esfuerzos de contacto –tensiones de Hertz– en el punto de contacto leva-palpador. Así, poder establecer un radio de base de la leva durante el proceso de diseño, que garantice desde un inicio que el perfil a obtener no presentará características geométricas no deseadas.
3. Realizar un estudio del comportamiento dinámico –determinación de la fuerza dinámica de la leva y del momento requerido para impulsar el eje de levas– en los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, utilizando leyes de desplazamiento del palpador

diseñadas con curvas de Bézier y B-spline. Sugerir a partir de este estudio que mecanismo es más conveniente, así como que curvas dan mejores resultados.

4. Crear un programa informático para el diseño de levas que permita utilizar en la etapa de definición de leyes de desplazamiento del palpador, tanto las técnicas tradicionales como los métodos adecuados para el CAGD, en especial, las curvas de Bézier no paramétricas y las curvas B-splines no paramétricas. Se sugiere que se utilice el enfoque analítico-vectorial expuesto en la tesis para la obtención del perfil de levas, en mecanismos leva-palpador tanto con cierre del par superior por fuerza como en mecanismos desmodrómicos.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La presente investigación se ha dedicado al estudio de los mecanismos leva-palpador desmodrómicos planos, en especial, de los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante. Estos mecanismos son poco estudiados en la bibliografía que aborda el tema de leva.

En el desarrollo del trabajo de investigación que ha dado lugar a la presente tesis **Aportación al estudio de levas desmodrómicas**, se han alcanzado los objetivos inicialmente planteados en cuanto a:

- Aportar fundamentos teóricos relacionados con los mecanismos desmodrómicos mencionados.
- Definir las leyes de desplazamiento del palpador y estudiar las características de las mismas en dichos mecanismos.
- Desarrollar un método analítico general que permita obtener perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, más sencillo y comprensible para el diseñador, que los encontrados en la bibliografía especializada.

En el trabajo de investigación se han abordado las tres etapas de la secuencia de diseño de un mecanismo de 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 primeras etapas.

Del estudio de la bibliografía especializada en el tema mecanismo leva-palpador, se concluye que es escasa aquella que aborda a los mecanismos desmodrómicos planos. Dentro de ella, cabe señalar, que se expone la teoría de manera poco clara. En la mayoría de los textos y artículos se tratan básicamente aspectos de levas conjugadas con palpadores rotatorios y levas de anchura constante, muy utilizadas en la maquinaria textil.

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. En esta investigación se ha utilizado el adjetivo desmodrómico partiendo de su significado y se ha definido el concepto de mecanismo de leva desmodrómico, no explicado en la bibliografía consultada, este es:

Mecanismo de leva desmodrómico: es aquel mecanismo de leva que utiliza dos pares superiores conjugados de manera que ambos imponen la misma restricción cinemática garantizando la

bilateralidad global, es decir, la pérdida de contacto en uno de los pares queda impedido por el otro par.

Muchos autores denominan con un mismo término a diferentes mecanismos desmodrómicos, concluyéndose que no están claros los conceptos para diferenciarlos. Por esta razón, se han definido los conceptos de leva de anchura y diámetro constante, así:

Leva de anchura constante: es aquella que tiene la característica de mantener una distancia constante d_c entre dos palpadores planos paralelos tangentes al perfil de la leva.

Leva de diámetro constante: es aquella en que la distancia entre dos puntos diametralmente opuestos es d_c constante. Para los palpadores de rodillo el diámetro constante hace referencia a la curva de paso.

En la bibliografía no se exponen todas las características de la ley de desplazamiento del palpador necesarias para obtener el perfil de leva de anchura y diámetro constante, ni tampoco una denominación que las identifique. En la tesis se han explicado aspectos de las leyes de desplazamiento del palpador en el caso de tales levas, denominando las leyes en función del movimiento del palpador que la leva acciona, esto ayuda durante la secuencia de diseño del mecanismo leva-palpador. Para los palpadores traslatorios, la ley se ha denominado *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y cuando el palpador es rotatorio *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

De la caracterización de las leyes de desplazamiento del palpador para el caso de levas de anchura y diámetro constante, se concluye que:

- Si el doble palpador tiene movimiento de translación, la ley presenta la siguiente característica:
 - a) Se puede definir en el tramo de 0 a π radianes de ángulo de rotación de la leva –utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD–, y de π a 2π ha de ser tal que se cumpla la condición: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
- Para un doble palpador paralelo con movimiento de rotación:
 - a) La ley desplazamiento se obtiene diseñando un primer tramo –como en el caso anterior, utilizando los métodos tradicionales o los propios para el CAGD– y el segundo tramo se obtiene por cálculo, utilizando las expresiones que se deducen de la condición de desmodromía (Ec. 4.1).

$$\sin d(\theta) + \sin d(\theta + \delta) = \frac{l_{2\text{inf}} - l_{2\text{sup}}}{l_1} \quad (4.1)$$

- b) Si en el doble palpador se cumple que $l_{2\text{inf}} \neq l_{2\text{sup}}$, el tramo diseñado de la ley de desplazamiento no alcanza los π radianes de ángulo de giro de la leva, el resto se define por cálculo.
- c) Cuando la geometría del doble palpador es tal que, los brazos superior e inferior son iguales, es decir, la parte derecha de la Ec.4.1 es igual a cero, entonces el primer tramo de la ley de desplazamiento del palpador se puede definir desde 0 a π , teniendo en cuenta que $d(\theta)$ debe de ser cero en esos valores y además, la curva debe de tener una pendiente pequeña próxima a π , para que el tramo calculado no sobre pase los 2π radianes.

En el trabajo de investigación se definen las leyes de desplazamiento del palpador con curvas de Bézier no paramétricas en la mayoría de los casos de obtención del perfil y curvas B-splines no paramétricas en otro. Se concluye que es suficiente para las leyes de poca complejidad –como las aquí utilizadas– trabajar con las curvas de Bézier mencionadas y que éstas dan flexibilidad en el diseño de las leyes de desplazamiento coincidiendo con lo planteado por Reyes [2000]. La definición con B-splines es más complicada y se considera más adecuado utilizarla en el caso de leyes de desplazamiento complejas, por ejemplo, con tramos de pendiente constante.

Se ha presentado un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular, como herramienta para la investigación de las leyes de desplazamiento en los mecanismos leva-palpador de este tipo. Este método es sencillo y da flexibilidad para obtener diferentes perfiles de anchura constante, los cuales generan leyes de desplazamiento con continuidad C^1 . Se considera que este método puede ser adecuado para generar perfiles de levas que giren a bajas velocidades, si bien adolece de no ser un proceso de síntesis directa.

Se han establecido las restricciones de diseño para obtener levas de anchura y diámetro constante utilizando el método analítico-vectorial propuesto para obtener perfiles de levas conjugadas que accionan palpadores translatorios, estas son:

- Cuando el doble palpador es plano:
 - a) La ley de desplazamiento debe de ser de anchura constante: $d(\theta) + d(\theta + \pi) = \text{constante}$.
 - b) La distancia entre los palpadores superior e inferior debe de ser: $d_c = 2R_b + s_{\text{máx}}(\theta)$.
- Cuando el doble palpador es circular o puntual, además de las restricciones anteriores se coloca la siguiente:
 - a) Excentricidad del palpador igual cero, $\varepsilon = 0$.

Para la obtención y el análisis de la ley de desplazamiento del palpador en mecanismos de anchura constante de arco circular con palpadores rotatorios, se ha expuesto un método basado en el análisis de levas de excéntricas permitiendo obtener la ley de desplazamiento buscada.

En la tesis se plantean tanto los métodos gráficos como los analíticos para la obtención del perfil de leva. Los primeros se explican partiendo del criterio de que facilitan la comprensión del proceso de generación del perfil. Se han introducido aspectos que facilitan la obtención gráfica del perfil de leva –por ejemplo, en el caso de palpadores de rotación, donde en lugar de trabajar con el método de intersección de curvas para hallar el punto de trazo, se trabaja directamente con el ángulo de desplazamiento del palpador. Además, se resumen en pocos pasos los procedimientos gráficos, haciendo más sencilla y compacta la explicación de la secuencia de obtención del perfil. De lo planteado se puede concluir que los procedimientos gráficos son importantes para la comprensión del proceso de generación del perfil de leva y aquí se muestran de una manera que los hace de fácil comprensión y aplicación.

Los métodos analíticos se exponen partiendo del criterio de que son los que se utilizan en la actualidad debido al desarrollo de los medios de cómputo y a sus ventajas. Se utiliza para explicarlos, el enfoque analítico-vectorial expuesto por Cardona y Clos [2001], considerando que éste es de más fácil comprensión y más conciso respecto a los métodos analíticos planteados por otros autores. En este caso, se incluyen expresiones para el cálculo del ángulo inicial de desplazamiento del palpador rotatorio y las expresiones para el cálculo del perfil del palpador circular de rotación. A modo de conclusión se observa que existen varios enfoques analíticos, mucho de los cuales son tediosos, se pretende entonces facilitar el trabajo a los diseñadores proponiendo enfoques analíticos más comprensibles.

Se expone un método analítico-vectorial general que permite obtener tanto los perfiles de levas conjugadas como los de anchura y diámetro constante, con palpadores translatorios y rotatorios, estableciendo ciertas restricciones durante el diseño. El método no es tedioso, ni complicado.

4.2 Aportaciones de la tesis

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

- Referidas a los aspectos teóricos de los mecanismos desmodrómicos:
 1. Se definen los conceptos de: *Mecanismos de leva desmodrómico*, *Mecanismo de leva de anchura constante* y *Mecanismo de leva de diámetro constante*; no explicados en la bibliografía consultada.
 2. Se establecen las condiciones que deben cumplir las leyes de desplazamiento del palpador –condiciones de desmodromía– en mecanismos de levas de anchura constante denominándolas: *Ley de anchura constante para palpadores con movimiento de translación* y *Ley de anchura constante para leva con doble palpador plano rotatorio de caras paralelas*.

- Con respecto al análisis y síntesis de las leyes de desplazamiento:
 1. Se determinan las características de las leyes de desplazamiento de los palpadores traslatorios y rotatorios en los mecanismos de anchura constante. Además, se expone el proceso de definición de las mismas.
 2. En el caso de los mecanismos de levas conjugadas, se adecuan las expresiones de las leyes de desplazamiento para el palpador inferior. Así, para palpadores traslatorios se introduce en dichas expresiones el término d_c –distancia entre palpadores– y para los rotatorios el ángulo β –ángulo entre palpadores.
- Referente a los métodos de obtención del perfil:
 1. Se expone un método analítico-vectorial sencillo y conciso que permite obtener los perfiles de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, tanto para el caso de palpadores traslatorios como para el caso de los rotatorios.
 2. Se establecen las restricciones de diseño para la obtención de perfiles de anchura constante y diámetro constante, utilizando el método de generar levas conjugadas.
 3. Se muestra un método analítico-geométrico para obtener perfiles de anchura constante de arco circular.
 4. En el caso de los procedimientos gráficos, se sintetizan los pasos a seguir en la obtención del perfil y se introducen modificaciones en el caso de palpadores rotatorios que hacen más sencillos los procedimientos.

4.3 Recomendaciones

Una vez concluida la tesis, se considera que resultaría interesante investigar otros aspectos relacionados con los mecanismos desmodrómicos aquí estudiados. Se propone:

1. Trabajar en la etapa de comprobación del perfil de la leva, verificando los perfiles obtenidos por los métodos analíticos propuestos, a través de la determinación del radio de curvatura del perfil y del ángulo de presión en el mecanismo. De este modo, lograr un mejor dimensionado del mecanismo leva-palpador.
2. Estudiar los esfuerzos de contacto –tensiones de Hertz– en el punto de contacto leva-palpador. Así, poder establecer un radio de base de la leva durante el proceso de diseño, que garantice desde un inicio que el perfil a obtener no presentará características geométricas no deseadas.
3. Realizar un estudio del comportamiento dinámico –determinación de la fuerza dinámica de la leva y del momento requerido para impulsar el eje de levas– en los mecanismos de levas conjugadas y de anchura y diámetro constante, utilizando leyes de desplazamiento del palpador

diseñadas con curvas de Bézier y B-spline. Sugerir a partir de este estudio que mecanismo es más conveniente, así como que curvas dan mejores resultados.

4. Crear un programa informático para el diseño de levas que permita utilizar en la etapa de definición de leyes de desplazamiento del palpador, tanto las técnicas tradicionales como los métodos adecuados para el CAGD, en especial, las curvas de Bézier no paramétricas y las curvas B-splines no paramétricas. Se sugiere que se utilice el enfoque analítico-vectorial expuesto en la tesis para la obtención del perfil de levas, en mecanismos leva-palpador tanto con cierre del par superior por fuerza como en mecanismos desmodrómicos.