

7 CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES FINALES

Los objetivos definidos desde el inicio de la tesis se han cubierto ampliamente. En general, se dispone de los conocimientos básicos y de las metodologías de cálculo necesarias para analizar en detalle los fenómenos más significativos que condicionan el funcionamiento real de las bombas gerotor.

Con relación a los apartados que contemplan la cinemática y la estática del engranaje trocoidal de una bomba gerotor, hay que reseñar los siguientes logros:

- Se han deducido analíticamente las ecuaciones de los perfiles de dientes del engranaje y la línea de puntos de contacto en función de cuatro parámetros básicos, de forma que se dispone de una herramienta sobre cuya base poder desarrollar el cálculo del desplazamiento volumétrico, las variaciones de los volúmenes de las cámaras en función del ángulo de rotación, así como para el cálculo de las tensiones de contacto.

En concreto, para evaluar las características volumétricas se han desarrollado, puesto a punto y comparado dos métodos: uno numérico que se fundamenta en el análisis integral-derivativo, y el otro que se fundamenta en el análisis derivativo-integral en sus dos posibles versiones, la analítica y la numérica. La concordancia de resultados obtenidos utilizando estos métodos es muy buena; en cualquier caso, cabe concluir que las discrepancias son inferiores al 0,5 %. La preferencia entre estos métodos es una cuestión que depende del tipo de resultado que se pretenda alcanzar y la aceptación previa de un cierto nivel de complejidad del soporte matemático.

- Con relación a la estática, en particular, para el cálculo de las tensiones de contacto, también se han propuesto y desarrollado dos metodologías de cálculo. Un primer método parte de la teoría desarrollada por Colbourne, implementado con una variante para el cálculo de los puntos de contacto. Este método es adecuado para ruedas dentadas exteriores donde el perfil del lóbulo o diente es ajustable a un arco circular. Puesto que su aplicación es muy restrictiva, se ha creído oportuno proponer un método alternativo implementado con el Método de los Elementos Finitos mucho más genérico. Este último ha proporcionado los valores de la magnitud de la máxima tensión de contacto más fiables y ha demostrado un alto nivel de flexibilidad que facilita en gran medida el proceso de optimización de la forma geométrica de los perfiles de dientes. Entre ambos métodos se han estimado diferencias en el valor de las tensiones de contacto máximas del orden del 20 %. En general, el método de Colbourne modificado subestima el valor de las tensiones de contacto. Paralelamente a estos estudios, se han realizado ensayos experimentales mediante la técnica experimental de fotoelasticidad. A pesar de que los resultados obtenidos se sitúan dentro del mismo orden de magnitud, se consideran poco fiables habida cuenta el nivel de confianza en la calibración del espectro de colores.

Con relación al estudio del comportamiento dinámico de la bomba, se entiende que se ha dado un salto muy significativo en la modelización del funcionamiento real de la bomba gerotor, si se atiende a que la mayoría de los trabajos a los que se ha tenido acceso, y que se han referenciado en esta tesis, se limitan básicamente al cálculo del caudal instantáneo y de las pulsaciones de presión que reinan a la salida de la bomba, permitiendo solamente describir de forma cualitativa el funcionamiento real. En el mejor de los casos, los resultados de estas simulaciones han sido simplemente contrastados con los resultados de una medición directa de la presión a la salida de la bomba. Es conocido que estas mediciones de la presión quedan enmascaradas por la influencia del circuito oleohidráulico en el cual esta instalada la bomba. Esto, evidentemente, condiciona las conclusiones que se pueden sacar de los citados modelos.

Para evitar estos inconvenientes, en esta tesis se ha marcado como objetivo prioritario el desarrollo de un modelo de simulación que permita la evaluación de cualquier magnitud física y su evolución en el tiempo que explican lo que ocurre en cada una de las cámaras y conductos que configuran la bomba. Para el caso particular de la evaluación de las pulsaciones de caudal, este modelo de simulación se ha complementado con una metodología experimental, basada en un método de ensayo normalizado y ampliamente contrastado. Este método experimental permite medir de forma indirecta las pulsaciones de caudal, y en consecuencia, validar el modelo propuesto.

Con relación a esta parte de la tesis, cabe destacar los siguientes logros:

- La elaboración de un modelo de simulación de la bomba gerotor utilizando el método de los diagramas de enlace (BondGraph). La técnica de BondGraph ha permitido añadir niveles de complejidad variables y, en consecuencia, evaluar la importancia relativa de la geometría del engranaje trocoidal, de las tolerancias de fabricación, etc. que en conjunto configuran los aspectos más críticos de un óptimo diseño.
- De entre una amplia gama de resultados obtenidos, consecuencia de la explotación numérica del modelo de simulación propuesto, merece especial atención la deducción de las pulsaciones de caudal como característica intrínseca del funcionamiento real de la bomba.
- A pesar de todo ello, la modelización teórica desarrollada contempla todavía una serie de simplificaciones. Así, en el modelo teórico se ha considerado que los ejes de la rueda dentada interior y exterior están fijos, mientras que en la bomba gerotor, éstos tienen un movimiento relativo respecto a sus centros geométricos virtuales. Con relación a las geometrías que definen las fronteras de circulación de fluido también se han introducido algunas simplificaciones, en particular, se ha anulado la geometría de las ranuras de descompresión en aras a reducir el tiempo de cálculo.
- Para estas situaciones de mayor complejidad, se puede presuponer que la pulsación de caudal obtenida por simulación resulta ser ligeramente diferente en forma y con una amplitud superior a la generada por una bomba real. Los resultados de las simulaciones realizadas con relación a algunas geometrías concretas de las ranuras de descompresión, permite estimar reducciones de la amplitud de las pulsaciones de caudal superiores al 50 %.
- El estudio teórico se ha completado con el desarrollo de una metodología experimental que tiene como soporte la utilización de dos bancos de ensayo diseñados de acuerdo con la norma ISO 10767-1 92/84247: uno en el Fluid Power Centre de la University of Bath, y otro diseñado y construido específicamente para esta tesis en el laboratorio del centro LABSON.
- Se considera que la metodología experimental utilizada es adecuada a pesar de que los resultados obtenidos en los distintos bancos de ensayos muestren ciertas discrepancias, en particular, a bajas velocidades de accionamiento.

- En base a un determinado número de ensayos comparativos de la misma bomba gerotor en iguales condiciones de ensayo en ambos bancos, se ha llegado a la conclusión de que en el banco de ensayo del laboratorio del centro LABSON es necesario realizar ciertas mejoras y optimizar algunos aspectos del tratamiento numérico. Entre éstos, cabe citar la implementación de una bomba de sobrepresión y el desarrollo de nuevos algoritmos de extrapolación de resultados (amplitud y fase) de las frecuencias de los armónicos principales de la fuente secundaria a los correspondientes de la bomba en ensayo, de acuerdo a un comportamiento dinámico previamente establecido.
- Dejando al margen las metodologías utilizadas y centrando la atención en los resultados obtenidos, se observa que las amplitudes (pico a pico) de las pulsaciones de caudal obtenidas por vía experimental en el Fluid Power Centre son inferiores y más regulares que las obtenidas en el laboratorio del centro LABSON.
- Los resultados obtenidos en el laboratorio del centro LABSON manifiestan una cierta discrepancia con relación a una pulsación de caudal ‘ideal’ a medida que disminuye la velocidad de accionamiento de la bomba gerotor.
- Estas diferencias de amplitud son evidentes, tanto entre resultados experimentales obtenidos en ambos bancos, como entre éstos y los obtenidos numéricamente. Cabe destacar que los resultados numéricos se corresponden a una situación idealizada, sin ranuras de descompresión y ejes de rotación de las ruedas dentadas fijos. Cualquier modificación en la geometría de las fronteras de circulación de fluido tiene una influencia significativa en la reducción de las amplitudes de las pulsaciones de caudal teóricas.
- En cualquier caso, se puede afirmar con rotundidad que el modelo desarrollado en base al método de BondGraph tiene un enorme potencial cuando se desea evaluar el comportamiento dinámico de una bomba gerotor.

7.2 PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS

En resumen se puede concluir que el trabajo realizado ha sido gratificante.

Por último, se desea comentar que durante la realización de las tesis se ha vivido intensamente las investigaciones de otros grupos de trabajo, en particular, los trabajos del *Politecnico di Torino*. Este hecho ha incidido muy positivamente en este trabajo, por una parte porque ha confirmado que la línea de investigación desarrollada en la tesis iba en la dirección adecuada y por otra, porque ha permitido ver nuevos horizontes.

El número de líneas de trabajo e investigación que se pueden seguir es enorme. Y algunas son evidentes. En primer lugar, sería muy interesante analizar la influencia del movimiento de los engranajes trocoidales cuando éstos giran alrededor de unos ejes que no se mantienen fijos en el tiempo, sino que describen orbitas en el interior de sus alojamientos para una rotación completa del conjunto del engranaje. Esta línea tendría dos vertientes: una la resistencia mecánica y otra la fluidodinámica.

También sería interesante estudiar el comportamiento de engranajes trocoidales con dientes (lóbulos) asimétricos, de tal forma que un flanco esté diseñado en base a minimizar tensiones de contacto y el otro estuviera concebido con el objetivo de reducir notablemente la irregularidad del caudal instantáneo impulsado.

Dentro de las actuaciones inmediatas, se encuentra realizar un estudio sistemático y en profundidad de las ranuras de descompresión y poder acotar su influencia en las pulsaciones de caudal y generación de ruido.

A otro nivel quedan una serie de actuaciones a realizar a corto plazo como son:

- Incorporar un circuito secundario de sobrepresión en el banco de ensayos del laboratorio del centro LABSON
- Implementación a los algoritmos de cálculo de la impedancia de la fuente, de mejores ajustes y extrapolación de resultados en el método experimental de la fuente secundaria
- Implementar algunos algoritmos desarrollados en un entorno informático más interactivo con el usuario.
- Llevar a cabo un gran número de ensayos con bombas oleohidráulicas de diferentes tipos en los dos bancos de ensayos descritos en la tesis para contrastar la metodología experimental en una amplia gama de bomba oleohidráulicas.

A quienes deseen seguir el camino abierto en esta tesis se les brinda la oportunidad de abordar estos problemas.