

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PREÁMBULO

En los últimos años el diseño de componentes oleohidráulicos se ve condicionado por un exigente aumento de potencia específica, es decir, de la relación máxima potencia/mínimo volumen (peso). El camino más fácil para adaptarse a esta tendencia es el aumento del nivel de presión de trabajo y la disminución de las dimensiones de estos componentes. Sin embargo, esto conlleva poner al límite la resistencia de los materiales, y en la mayoría de los casos, un incremento excesivo del nivel de vibraciones y contaminación sonora.

En relación a esta problemática hay que destacar la gran cantidad de documentos técnicos que se han publicado a lo largo de la última década y que tienen como objetivo fundamental la optimización de los componentes oleohidráulicos, en particular bombas de desplazamiento volumétrico positivo, en aras a conseguir componentes respetuosos con el medio ambiente.

Este avance tecnológico que vive la oleohidráulica como consecuencia de las mejoras introducidas en esta dirección se puede evidenciar en cantidad de sectores industriales en los que la innovación es una constante. Como ejemplo, se desea destacar el sector de la automoción. En este sector se puede encontrar ingenios oleohidráulicos a todos los niveles, desde los vehículos de Formula 1 hasta la moderna maquinaria agrícola.

Es en este ámbito donde se ha situado la aplicación de este trabajo de investigación y el que ha motivado el interés científico del autor. Esta tesis esta dedicada en su totalidad al estudio del comportamiento y caracterización fluidodinámica de bombas oleohidráulicas tipo *gerotor* que se utilizan, entre otras aplicaciones, en:

- Sistemas de lubricación de motores de combustión interna
- Sistemas de bombeo de combustible en motores de combustión interna
- Sistemas de servodirección, etc.

1.2 LA BOMBA GEROTOR

El presente trabajo se circunscribe al estudio de bombas de desplazamiento volumétrico positivo constante, en particular, las bombas de engranajes que utilizan perfiles trocoidales y que se denominan *bombas gerotor*. El origen de esta palabra se debe atribuir a Myron F. Hill, al que se podría considerar como padre del gerotor. Hill desarrolló una teoría geométrica muy elaborada acerca este tipo de rotor, al cual denominó GEROTOR, siglas en inglés de las palabras ‘GEnenerated ROTOR’.

El estudio llevado a cabo en la presente tesis es genérico, pero en los casos en que se debe particularizar, se ha utilizado como unidad de referencia una bomba gerotor de lubricación de un motor de combustión interna (Figura 1.1 izquierda). Esta bomba se localiza en el interior del cárter del motor y es accionada directamente por el cigüeñal, sin correas de transmisión.

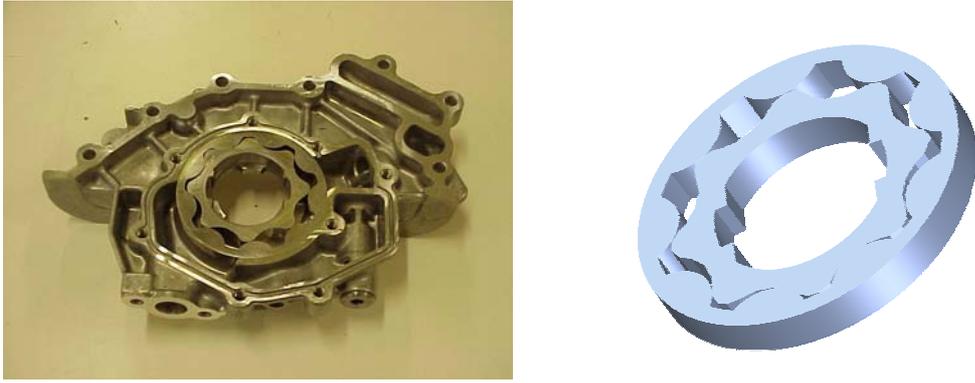


Figura 1.1. Bomba gerotor de lubricación de un motor de combustión interna (izquierda) y conjunto rueda dentada interior y exterior generadas por perfiles trocoidales (derecha)

La bomba está constituida por cuatro piezas principales: la rueda dentada interior, la rueda dentada exterior, la carcasa o cuerpo de la bomba y la tapa para producir el cierre del conjunto. Como miembro auxiliar, presenta una válvula limitadora de presión que está situada entre la zona de impulsión y de aspiración. Su presión de taraje se sitúa a 0.6 MPa.

La parte esencial de la bomba gerotor se muestra en la Figura 1.1 derecha y consiste en un engranaje formado por un piñón que engrana con un anillo dentado o corona. Los dientes del engranaje están generados por perfiles trocoidales. Para conseguir el engrane, la rueda dentada interior (piñón) tiene un diente (lóbulo) menos que la rueda dentada exterior (corona).

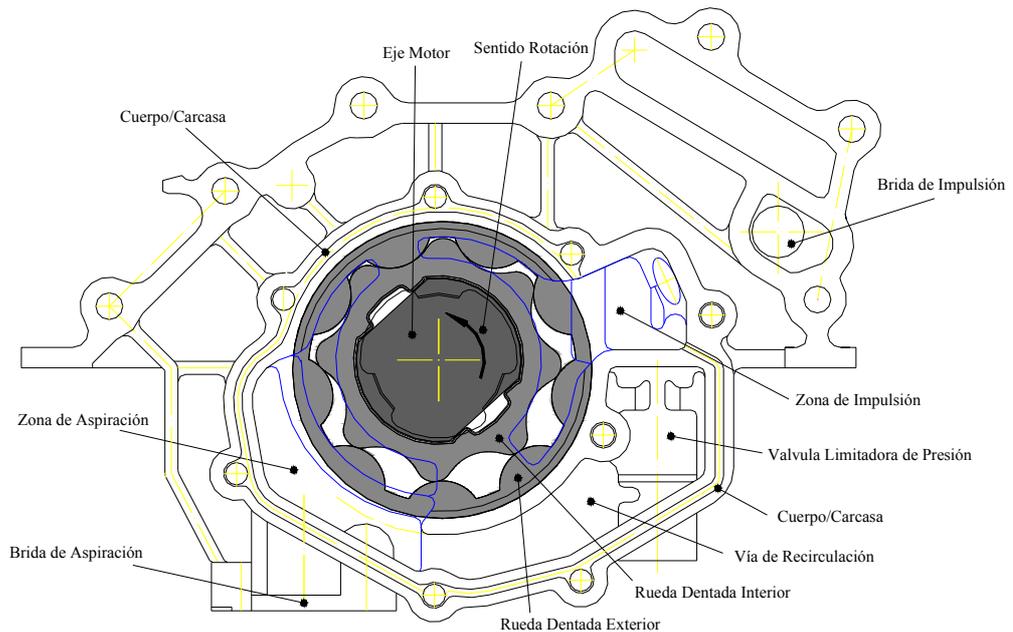


Figura 1.2. Esquema de la bomba gerotor

Acerca de su funcionamiento, se conoce que la rueda dentada interior recibe el par de giro del eje motor (cigüeñal) y es la encargada de transmitir el par del movimiento de rotación a la rueda dentada exterior, de forma que cada lóbulo de la rueda dentada interior se desliza en permanente contacto con la superficie de la rueda dentada exterior. Estos puntos de contacto entre ambos forman un número de cámaras estancas igual al número de lóbulos de la rueda dentada exterior, manteniendo al fluido encerrado en ellas (Figura 1.2).

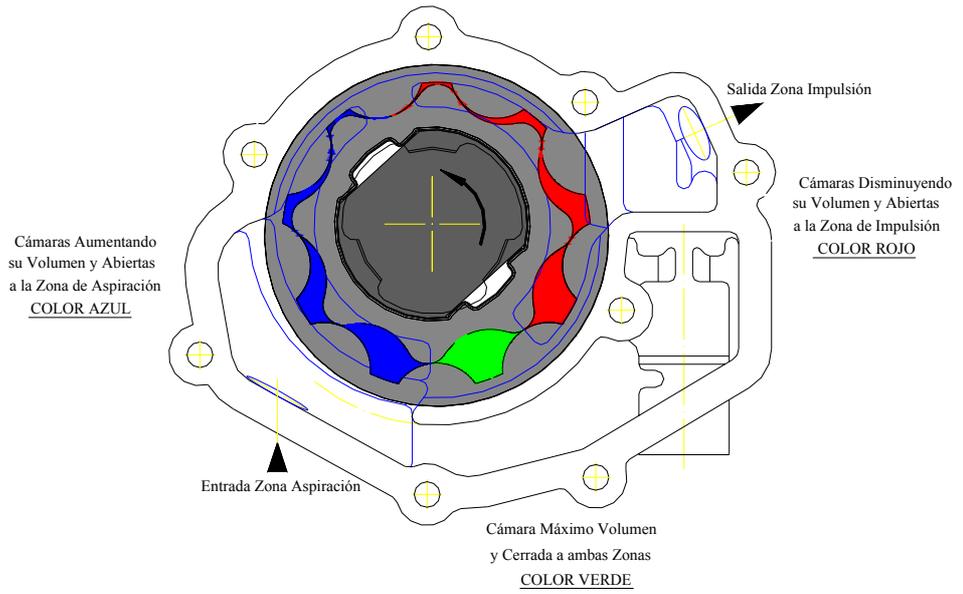


Figura 1.3. Esquema de las ruedas dentadas en la posición de la cámara de máximo volumen en el cuerpo de la bomba

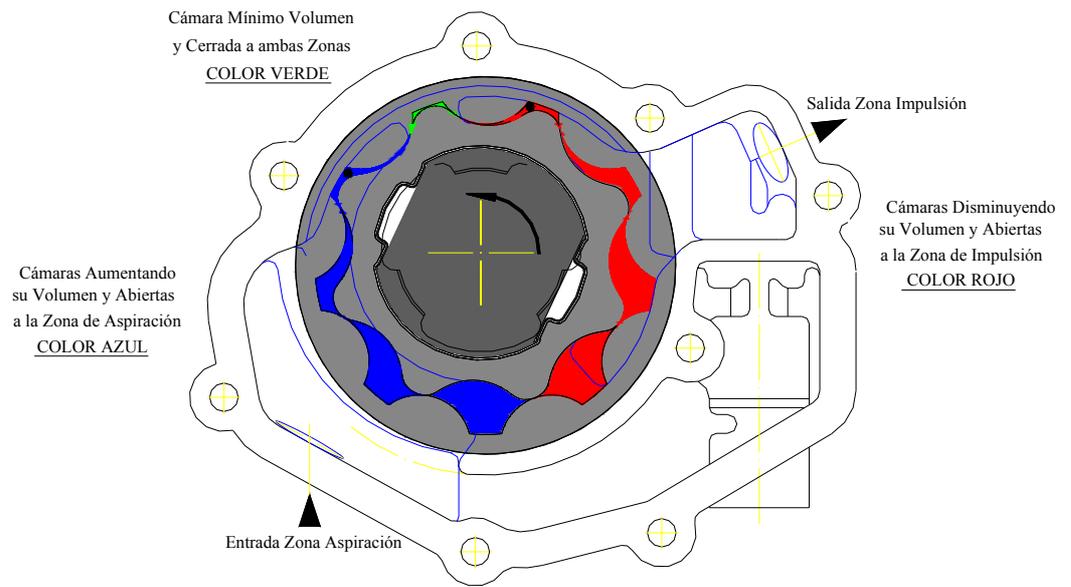


Figura 1.4. Esquema de las ruedas dentadas en la posición de la cámara de mínimo volumen en el cuerpo de la bomba

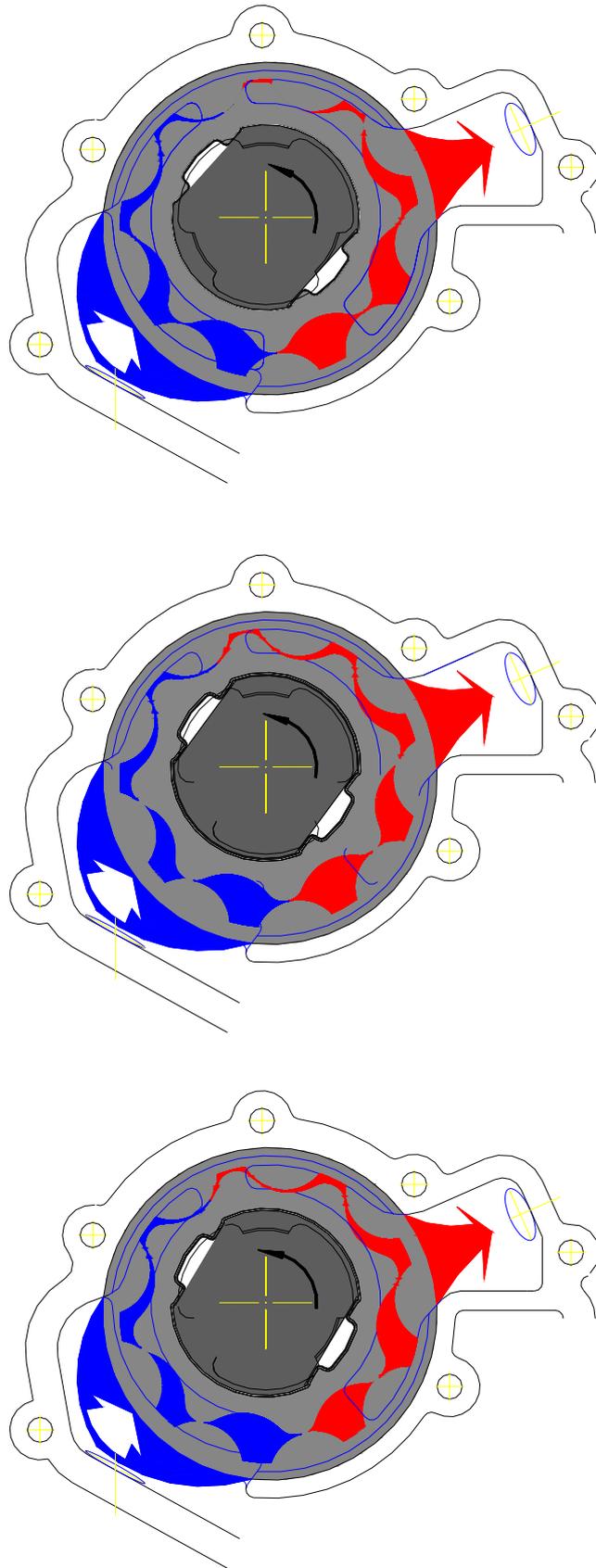


Figura 1.5. Evolución del volumen de las cámaras desde cámara de máximo volumen a cámara de mínimo volumen

En la acción de bombeo, las cámaras siempre están conectadas secuencialmente a la zona de aspiración y a la zona de impulsión, excepto cuando las cámaras adquieren su volumen máximo (Figura 1.3) y mínimo (Figura 1.4). En estos dos casos, la cámara se encuentra aislada a ambas zonas. Partiendo de la posición de la cámara de máximo volumen hasta la posición de la cámara de mínimo volumen (Figura 1.3-Figura 1.5-Figura 1.4), la acción de bombeo se produce por la variación del volumen de las cámaras estancas con la rotación completa del conjunto del engranaje. Las cámaras conectadas y abiertas a la zona de aspiración aumentan su volumen, y en consecuencia, se produce una depresión que permite la entrada de fluido desde el depósito a través de la brida de aspiración, llegando a la zona de aspiración y llenando las cámaras. Por otro lado, las cámaras conectadas y abiertas a la zona de impulsión disminuyen su volumen, y en consecuencia, desplazan un volumen de fluido desde el interior de las cámaras al colector de la zona de impulsión, y a través de la brida de impulsión al circuito oleohidráulico donde la bomba se encuentre conectada.

A pesar de que el estudio teórico desarrollado es genérico, en ciertos apartados de la tesis se ha recurrido a bombas prototipo para su ensayo. Estas unidades de referencia han sido facilitadas por la empresa *Aleaciones de Metales Sinterizados, S.A.* (AMES). Del mismo modo, los componentes oleohidráulicos utilizados para la construcción del banco de ensayos han sido facilitados por la empresa *Pedro Roquet, S.A.* A ambas empresas, mostrar el más sincero agradecimiento por su desinteresada colaboración.

1.3 ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

Desde que Myron F. Hill publicó su primer trabajo explicando el engranaje gerotor, muchos han sido hasta la actualidad los que han orientado sus investigaciones al estudio en profundidad de ruedas dentadas generadas por perfiles trocoidales (modificados o no) para su aplicación al diseño de bombas gerotor, así como a la concepción de nuevas variantes para aplicaciones concretas y prestaciones específicas cada vez mejores. De todos ellos, cabe destacar los trabajos de Colbourne, Stryczek, Mimmi & Pennachi y Shung & Pennock.

Son pocos los científicos que abordan un estudio global que comprenda la geometría de los perfiles, la cinemática del engrane, las tensiones en los puntos de contacto y el comportamiento dinámico de una bomba gerotor, de una forma coherente y unificada.

Con relación a la geometría de los engranajes trocoidales, aquí cabe destacar los trabajos de Stryczek que en base a una teoría básica reunifica los estudios de algunos antecesores y arroja un nuevo planteamiento de las propiedades de los perfiles trocoidales donde se cambia el concepto de usar a trozos las curvas epitrocoides e hipotrocoides para la formación de dientes envolventes, por un nuevo concepto de utilizar las curvas trocoides completas para el desarrollo de un par de ruedas dentadas que presentan interesantes características para trabajar como bomba o motor oleohidráulico.

En ciertos casos, los requisitos geométrico, fluidodinámico y tecnológico conllevan a ciertas modificaciones del perfil con relación a su perfil teórico. Así, la rueda dentada exterior que tiene los lóbulos formados por una curva equidistante a la curva base, se ve sustituida por una curva en forma de arco circular o no circular (elíptico, sinusoidal, etc.). El desarrollo de los lóbulos no circulares es más complicado, y no se obtienen beneficios significativos desde el punto de vista de la capacidad volumétrica.

En el desarrollo de las ecuaciones que permiten calcular la capacidad volumétrica de una bomba, la mayoría de los investigadores utilizan una serie de hipótesis simplificadoras. Si bien los resultados obtenidos siguiendo estos modelos se pueden considerar, desde el punto de vista de la ingeniería, satisfactorios, desde el punto de vista científico queda pendiente un tratamiento genérico a partir de la cinemática del engrane. En esta línea, en los últimos años, destacan los trabajos desarrollados por Nerveña y Litvin.

Algunos de los estudios emprendidos se han orientado hacia el diseño de bombas gerotor con el objetivo de conseguir la máxima capacidad volumétrica con las mínimas tensiones de contacto entre dientes. Hasta ahora, habida cuenta que ambas características son contrapuestas, la última palabra sobre la idoneidad del perfil de los dientes ha sido dictada por la experimentación. Aquí se hace evidente la necesidad de disponer de un método de cálculo por Elementos Finitos que pueda interaccionar con los métodos de cálculo ya desarrollados que permiten evaluar la capacidad volumétrica de la bomba partiendo de los parámetros característicos del engranaje trocoidal.

En los últimos años, los técnicos están muy motivados por todo aquello que contribuye a reducir el ruido emitido por los sistemas oleohidráulicos. Como ha sido demostrado por varios investigadores (entre otros Edge, 1980), el origen de estas perturbaciones hay que buscarlo en el proceso de generación de las pulsaciones de caudal en el interior de la bomba, en consecuencia, cualquier avance en este terreno debe pasar ineludiblemente por la simulación del comportamiento dinámico de estas unidades.

Muchos de los estudios emprendidos en esta dirección se limitan a dar como resultado una descripción cualitativa del funcionamiento dinámico de la bomba, explicando los fenómenos más influyentes en la generación de las pulsaciones de caudal. Otros estudios de mayor alcance ofrecen como resultado el caudal instantáneo en función del ángulo de giro, y la evolución de la pulsación de presión en la brida de impulsión. Para la validación de estos modelos, se recurre a la comparación de las pulsaciones de presión obtenidas vía simulación con las pulsaciones de presión medidas experimentalmente a la salida de la bomba. Habida cuenta que las pulsaciones de presión se ven influenciadas por su interacción con la propia instalación, queda en entredicho la validez de estos modelos. Se encuentra a faltar pues, un modelo de simulación que tomando como base las dimensiones de los engranajes trocoidales permita evaluar su comportamiento dinámico real, y en particular, las pulsaciones de caudal (característica intrínseca del funcionamiento de la bomba), y su validación experimental utilizando el método propuesto en la norma ISO 10767.

1.4 OBJETIVO DE LA TESIS

El presente trabajo se circunscribe al estudio de una bomba gerotor, con el fin de profundizar en el conocimiento de la generación de engranajes trocoidales, del mecanismo de engrane, de su comportamiento mecánico y de los fenómenos dinámicos que tienen lugar en él, y por último llegar a establecer y validar un modelo de simulación que permita prever con exactitud sus prestaciones, una vez conocida su morfología y estructura.

Con relación a la geometría y mecanismo de engrane, como punto de partida se toman los estudios de Stryczek, Mimmi y Nervegna. Se pretende englobar estos conocimientos y proponer una teoría unificada, coherente y completa que sirva de base para las metodologías propuestas a lo largo de la tesis.

Para el cálculo de las tensiones de contacto, se analiza el método de Colbourne y se propone un método alternativo basado en el Método de los Elementos Finitos. Además de que el MEF tiene un reconocido potencial en el cálculo estructural, destaca por un nivel de flexibilidad lo que facilita en gran medida el proceso de optimización de la forma geométrica de los perfiles de dientes.

Para el estudio dinámico de la bomba gerotor se propone hacer un estudio del comportamiento fluidodinámico en base a un método de simulación física (Método de BondGraph) que incida directamente en el cálculo de las pulsaciones de caudal. La metodología numérica desarrollada se contrasta con la técnica experimental (Método de la 'Fuente Secundaria') que permite la comparación directa de los resultados obtenidos por ambas vías.

Alcanzar estos objetivos implica disponer de un estudio global que comprende la geometría de los perfiles, la cinemática del engrane, las tensiones en los puntos de contacto y el comportamiento dinámico de una bomba gerotor, de una forma coherente y unificada, así como disponer de las herramientas suficientes y necesarias (modelos teóricos, bancos de ensayo y protocolos de pruebas) para el óptimo diseño de bombas de desplazamiento volumétrico positivo tipo gerotor habida cuenta a su creciente interés en un número importante de aplicaciones en un sector tecnológico de permanente innovación.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La organización de la tesis se ha llevado a cabo en 7 Capítulos.

El Capítulo 1 presenta una introducción de la bomba gerotor, el estado del problema, los objetivos de la presente tesis y su organización.

El Capítulo 2 presenta el Estado del Arte de la geometría de las ruedas dentadas del engranaje y sus perfiles trocoidales, el desplazamiento volumétrico positivo instantáneo, fuerzas y máximas tensiones de contacto, la simulación del comportamiento dinámico y las técnicas experimentales para estudiar el comportamiento de un engranaje generado mediante perfiles trocoidales.

El Capítulo 3 presenta el análisis del desplazamiento volumétrico positivo de una bomba de engranajes con perfiles trocoidales. Primeramente, se expone el estudio de la geometría del engranaje de perfil trocoidal teórico y modificado. A continuación se desarrolla un análisis matemático para obtener las ecuaciones paramétricas de las ruedas dentadas y la línea de puntos de contacto. Conocida la geometría, el análisis matemático se amplía al cálculo del desplazamiento volumétrico de la bomba mediante métodos analíticos y las características volumétricas de volumen desplazado, capacidad volumétrica, caudal teórico ideal e irregularidad del caudal.

El Capítulo 4 presenta el estudio de la magnitud de las máximas tensiones de contacto del engranaje de perfil trocoidal mediante el análisis del método de Colbourne para el que se propone un método modificado y el Método de los Elementos Finitos. El capítulo se complementa con un análisis crítico de ambos métodos.

El Capítulo 5 presenta la modelización y simulación mediante la técnica de BondGraph de una bomba gerotor. Un primer análisis matemático, desarrolla un submodelo de una cámara en tres niveles: inferior, intermedio y superior. En un segundo análisis matemático, se describe el modelado de la interacción del engranaje de perfiles trocoidales con las zonas de aspiración e impulsión y las fronteras de circulación de fluido practicadas en el cuerpo de la bomba, así como el caudal de fugas, formando el modelo fluidodinámico de una bomba gerotor. La simulación mediante el método de BondGraph permite, de entre otras variables, obtener directamente el caudal instantáneo y la pulsación de caudal de una bomba gerotor.

El Capítulo 6 expone un resumen teórico del método de la fuente secundaria para la evaluación experimental de las pulsaciones de caudal de una bomba, la descripción del banco de ensayos diseñado y construido para implementar la técnica experimental, su aplicación a la caracterización de una bomba gerotor y la comparación con el modelo de simulación desarrollado.

El Capítulo 7 recoge las conclusiones más importantes derivadas y una propuesta de futuras líneas de investigación se desprende del trabajo realizado en la presente tesis.

El documento se complementa con un apartado dedicado a Nomenclatura y Bibliografía empleadas en la tesis.