

6 BOMBAS DE ENGRANAJES CON PERFILES TROCOIDALES. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.

6.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se llevo a cabo el análisis fluidodinámico de las bombas de engranajes con perfiles trocoidales mediante la simulación por BondGraph. El objetivo fue el cálculo del caudal instantáneo impulsado por la bomba mediante técnicas de simulación.

En el presente capítulo el trabajo se orienta a la evaluación del comportamiento fluidodinámico de las bombas de engranajes con perfiles trocoidales por vía experimental. Los objetivos son:

- Disponer de una metodología experimental consolidada.
- Validar el modelo de simulación desarrollado

Tal como se menciona en el capítulo de Estado del Arte, de todos los métodos experimentales estudiados que permiten valorar el caudal instantáneo en una bomba oleohidráulica, se ha considerado como más contrastado e interesante el método denominado de la ‘fuente secundaria’.

Para una mayor facilidad en la exposición, este capítulo se ha dividido en cuatro partes:

- (A) *Parte A.* Resumen teórico del método de la fuente secundaria.
- (B) *Parte B.* Técnica experimental.
- (C) *Parte C.* Aplicación a la caracterización experimental de una bomba gerotor.
- (D) *Parte D.* Comparación con el modelo de simulación desarrollado

PARTE A

6.2 EL RUIDO EN LOS SISTEMAS OLEOHIDRÁULICOS

El ruido en los sistemas oleohidráulicos puede manifestarse de tres formas:

- (a) *Ruido Aéreo ('RA').* Se define como el ruido sonoro a los efectos de la propagación de las perturbaciones de presión a través del aire ambiente y es detectado de forma audible por el oído.
- (b) *Ruido Estructural ('RE').* Se define como el ruido que es consecuencia de las vibraciones mecánicas de los componentes del circuito.
- (c) *Ruido Fluídico ('RF').* Se define como el ruido que se genera como consecuencia de la fluidodinámica del fluido en el interior de un elemento (tubería, válvula, bomba, etc.).

Las tres formas de ruido están relacionadas entre sí. El *RE* tiende a ser la causa directa del *RA*.

El *RF* es la forma de ruido menos tangible. Sin embargo, es la mayor causa de *RE* y en consecuencia, de *RA*. Además, el *RF* puede ser propagado a largas distancias a través de los conductos oleohidráulicos de los circuitos.

La relación entre *RF*, *RE* y *RA* es extraordinariamente compleja. La transmisión del ruido fluido a ruido estructural depende de un número importante de factores, incluyendo el tipo y el espaciado entre el montaje de los conductos, el número de codos y la longitud de los conductos rígidos y flexibles. Igualmente, la transmisión de ruido estructural al ruido aéreo depende de un número importante de factores, incluyendo las condiciones acústicas del ambiente donde el sistema está situado.

El control de las tres formas de ruido es diferente. Por tanto, se habla de cada una de ellas por separado. Así, el control efectivo del ruido depende principalmente en identificar el causante del ruido más severo. Aunque el *RF* no es el que describe todo lo relacionado con el ruido en sistemas oleohidráulicos, sí se puede identificar como la causa fundamental del *RE* y *RA*. De esta forma, cualquier mejora que pueda realizarse sobre las características del ruido fluido del sistema, debería transformarse en la consecuente mejora en el ruido estructural y aéreo.

Las principales fuentes de *RF* en sistemas oleohidráulicos tienden a ser las bombas, motores y válvulas. Más del 95% de los problemas de ruido pueden ser atribuidos a bombas y motores oleohidráulicos. Esta sección de la tesis se concentra en el estudio del *RF* producido por bombas de desplazamiento volumétrico positivo, concretamente en bombas de engranajes con perfiles trocoidales.

Las bombas de desplazamiento volumétrico positivo generan un caudal instantáneo pulsatorio. La pulsación de caudal tiende a presentar una forma de onda oscilatoria periódica debido a la propia naturaleza cíclica del principio de funcionamiento de la bomba. Así, bombas de tipos diferentes presentan características distintas de la onda de pulsación de caudal, y en consecuencia, niveles de ruido distintos. De aquí nace la necesidad de definir una medida característica simple mediante la cual las características del ruido generado puedan ser comparadas.

A priori, la medida directa de las pulsaciones de presión a la salida de la bomba debería ser suficiente. Sin embargo, no es factible debido a su fuerte dependencia e interacción con las características del circuito (tubería y válvulas) donde la bomba está conectada. Como alternativa, la evaluación de la pulsación de caudal de una bomba es una característica intrínseca de la bomba e independiente del circuito.

Sin embargo, no es posible una lectura directa de la pulsación de caudal ya que no es conocido un sensor de estas características. La única solución es optar por un metodología experimental indirecta, es decir, medir las pulsaciones de presión en distintos puntos y mediante algoritmos específicos de cálculo deducir las pulsaciones de caudal.

La pulsación de caudal de una bomba puede descomponerse en:

- *Pulsación Cinemática*. La pulsación cinemática es función de la geometría de la bomba y es independiente de la presión.
- *Pulsación Dinámica*. La pulsación dinámica depende de la presión y puede ser atribuida a la compresibilidad, fugas e inercia del fluido.

En general, la pulsación cinemática puede ser evaluada con bastante precisión desde el conocimiento de la geometría de la bomba. Sin embargo, la pulsación dinámica es mucho más difícil de predecir, como se ha demostrado en el capítulo anterior.

6.3 EL MÉTODO DE LA 'FUENTE SECUNDARIA' PARA LA MEDICIÓN DE LA PULSACIÓN DE PRESIÓN

El método de la *fente secundaria* está basado sobre el análisis las características de una onda estacionaria en una tubería o conducto rígido. Toda la teoría desarrollada en este punto parte de los trabajos de K.A. Edge and D.N. Johnston (Edge-Johnston, 1990). A continuación se expone un resumen elaborado en base a los artículos consultados en la bibliografía con el objetivo de incidir en los conceptos básicos del método.

6.3.1 Análisis del Ruido Fluido en una Tubería Rígida

En este análisis se realiza una analogía entre circuitos oleohidráulicos y circuitos eléctricos, ya que en numerosos aspectos se comportan de forma similar. Así, el flujo puede ser considerado equivalente a la intensidad de la corriente, y la presión equivalente al voltaje. El concepto de impedancia eléctrica es extendido al de impedancia oleohidráulica, de forma:

Eléctrico	Oleohidráulico
$impedancia = \frac{voltaje}{intensidad}$	$impedancia = \frac{presión}{flujo}$

De igual forma, los conceptos de inductancia eléctrica, capacitancia, resistencia y reactancia pueden ser también extendidos a sus equivalentes oleohidráulicos. Con tal de proporcionar un análisis razonablemente sencillo se deben proponer una serie de hipótesis:

1. El fluido es homogéneo y Newtoniano
2. El flujo es laminar y axisimétrico
3. Las perturbaciones son pequeñas de forma que cualquier variación en las propiedades del fluido pueden ser consideradas despreciables
4. La distribución de presión y el perfil de velocidad en cada sección de la tubería es uniforme, con lo que se puede asumir ondas planas
5. La velocidad media del fluido puede ser considerada despreciable comparada con la velocidad del sonido en el fluido
6. Se consideran condiciones isentrópicas

Se considera un elemento de fluido infinitesimal en una tubería rígida sujeto a una onda plana,

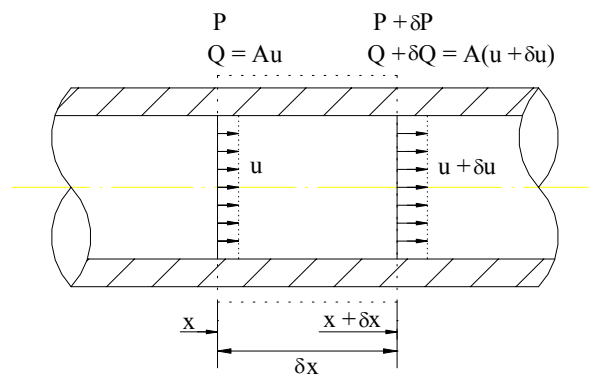


Figura 6.1. Elemento de fluido en una tubería

En base a la ecuación de continuidad se deduce que:

$$-\frac{\delta q}{\delta x} = \frac{A}{B_{eff}} \frac{\delta p}{\delta t} \quad (6.1)$$

donde A es el área de la sección recta de la tubería rígida y B_{eff} es el módulo de compresibilidad efectivo del fluido. Considerando ahora las fuerzas que actúan sobre el fluido,

$$-\frac{\delta p}{\delta x} = Rq + \frac{\rho}{A} \frac{\delta q}{\delta t} \quad (6.2)$$

donde ρ es la densidad del fluido y R es el coeficiente de resistencia. Como el análisis debe ser llevado a cabo en el dominio frecuencial, se aplica una transformación de Fourier,

$$F(\delta/\delta t) = j\omega \quad (6.3)$$

de forma que,

$$-\frac{\delta Q}{\delta x} = \frac{A}{B_{eff}} j\omega P \quad (6.4)$$

y,

$$-\frac{\delta P}{\delta x} = \left[R + \frac{j\omega\rho}{A} \right] Q \quad (6.5)$$

Mediante la combinación de estas ecuaciones, las ecuaciones de onda son,

$$-\frac{\delta^2 Q}{\delta x^2} = \gamma^2 Q \quad (6.6)$$

$$-\frac{\delta^2 P}{\delta x^2} = \gamma^2 P \quad (6.7)$$

donde γ es el coeficiente de propagación de onda como,

$$\gamma = j\omega \sqrt{\frac{\rho}{B_{eff}}} \xi \quad (6.8)$$

$$\xi = \left[1 + \frac{AR}{j\omega\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.9)$$

El módulo de compresibilidad efectivo B_{eff} es de difícil predicción y puede estar afectado por la elasticidad-deformación de la pared de la tubería y la presencia de aire atrapado en el fluido. El efecto de la elasticidad-deformación de la pared de la tubería se puede tener en cuenta mediante la ecuación,

$$B_{eff} = \frac{B_r}{1 + \frac{B_r}{E} \frac{\bar{d}}{t} c_1} \quad (6.10)$$

donde \bar{d} es el diámetro medio entre el diámetro interno y externo de la tubería, t es el espesor de la pared de la tubería y E es el módulo de Young de la tubería. B_T es el modulo de compresibilidad isentrópico del fluido y es función de la presión media y de la temperatura. Normalmente, su valor puede ser obtenido de la tabla de propiedades del fluido publicadas por el fabricante.

c_l es un factor que es función de la tensión longitudinal y deformación en la tubería, la cual es dependiente de cómo es fijada la tubería. El efecto de este factor es de difícil predicción, y más en el particular caso de la pulsación de presión donde las presiones instantáneas varían a lo largo de la tubería. Sin embargo, los efectos son pequeños y en este caso se asume que la tensión longitudinal de la tubería puede ser ignorada, en cuyo caso,

$$c_l = \frac{2t(1+\nu)}{\bar{d}} + \frac{\bar{d}}{\bar{d}+t} \quad (6.11)$$

donde ν es el módulo de Poisson de la pared de la tubería.

Otra consideración a tener en cuenta en este análisis son los efectos de la propagación de la onda en el material de la pared de la tubería. En el caso de una tubería rígida, estos efectos tienen una mínima influencia en las propiedades de propagación de la onda del fluido. Cosa distinta se produce en los tubos flexibles.

El coeficiente de resistencia R se define como la caída de presión por unidad de longitud y por unidad de flujo. En teoría, para una onda plana habría un gradiente de velocidad infinito en la pared de la tubería, y en consecuencia una tensión cortante infinita, con lo cual el coeficiente de resistencia sería infinito. Esto da lugar a una solución no razonable y muestra que el modelo es demasiado simple. De hecho, para condiciones estacionarias, el flujo es laminar totalmente desarrollado y el perfil de velocidades es parabólico.

El modelo se puede ampliar incorporando un perfil de velocidades no uniforme a través de la tubería (Johnston, 1990). La solución de las ecuaciones (6.6), (6.7) y (6.8) ofrece,

$$\xi = \left[1 - \frac{2}{N_s J^{3/2}} \frac{J_1(N_s J^{3/2})}{J_0(N_s J^{3/2})} \right]^{-1/2} \quad (6.12)$$

donde J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de primer y segundo orden respectivamente, y N_s es el número adimensional llamado ‘número de onda’, el cual puede ser considerado como una función del ratio de las fuerzas inerciales frente las fuerzas viscosas,

$$N_s = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (6.13)$$

Las funciones de Bessel tienden a ser difíciles de evaluar. Sin embargo, el efecto del perfil de velocidad no uniforme puede ser tenido en cuenta en el modelo original de la ecuación (6.9) si se considera que la densidad ρ y la resistencia R como funciones que varían con N_s . Así,

$$\xi = \sqrt{\left(K_1 + \frac{8K_2}{jN_s^2} \right)} \quad (6.14)$$

donde K_1 y K_2 representan la variación de la densidad efectiva y la viscosidad efectiva del fluido debido a la variación del perfil de velocidad de la onda con la frecuencia. Las ecuaciones

teóricas que definen K_1 y K_2 son aparatosas ya que implican las funciones de Bessel. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones de ruido fluídico oleohidráulico, la frecuencia y la viscosidad son tales que el número N_s excede de 10. En esta región, la densidad efectiva y la resistencia pueden ser definidas de forma muy exacta tomando aproximaciones asintóticas, de forma que,

$$K_1 \equiv \frac{\rho_{eff}}{\rho} = 1 + \frac{\sqrt{2}}{N_s} \quad (6.15)$$

$$K_2 \equiv \frac{R_{eff}}{R} = 0.425 + 0.175N_s \quad (6.16)$$

Aunque estrictamente hablando las ecuaciones (6.14), (6.15) y (6.16) son sólo aplicables a flujo laminar, también pueden ser aplicadas a flujo turbulento para un rango limitado del número de Reynolds.

Las ecuaciones de onda (6.6), (6.7) tienen como solución general,

$$P(\omega, x) = Fe^{-\gamma x} + Ge^{\gamma x} \quad (6.17)$$

$$Q(\omega, x) = \frac{Fe^{-\gamma x} - Ge^{\gamma x}}{Z_0} \quad (6.18)$$

donde,

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\rho B_{eff}}}{A} \xi \quad (6.19)$$

y F y G dependen de las condiciones de contorno, γ representa la manera con la cual la onda se propaga a lo largo de la tubería y Z_0 es conocida como ‘impedancia característica’.

El término $Fe^{-\gamma x}$ representa una onda que viaja en la dirección positiva a lo largo de la tubería. Z_0 es el coeficiente complejo de la onda de presión respecto la onda de flujo o caudal. De forma similar, el término $Ge^{\gamma x}$ representa una onda que viaja en la dirección opuesta. Se desea apuntar que P es una magnitud escalar y Q una magnitud vectorial, de forma que el signo menos es necesario en la ecuación (6.18) para indicar la dirección contraria.

6.3.2 Aplicación de las Ecuaciones de Onda a un Sistema Oleohidráulico Simple

Se considera el sistema simple representado en la Figura 6.2, el cual consiste en una bomba (la fuente), una tubería rígida y una válvula de carga (la terminación).

La bomba actúa como una fuente de ruido fluídico y produce una pulsación de caudal Q_s . Se asume que la pulsación de caudal se genera a la salida de la bomba. También se puede considerar que la bomba tiene una impedancia en paralelo con la pulsación de caudal conocida como *impedancia de la fuente* Z_s . La forma de esta impedancia es compleja, pero básicamente es la composición de los efectos capacitivos, inductivos y resistivos del fluido que está contenido en el interior de la bomba. El modelo de la bomba con una pulsación de caudal en paralelo con una impedancia es equivalente al modelo de un generador (Norton) que es usado en ingeniería eléctrica como modelo de fuentes de intensidad.

La válvula de carga podría ser una fuente de ruido fluídico, debido a cavitación y/o oscilación. Estos efectos son ignorados en este análisis y la válvula se asume como un elemento puramente pasivo representado por una impedancia Z_T .

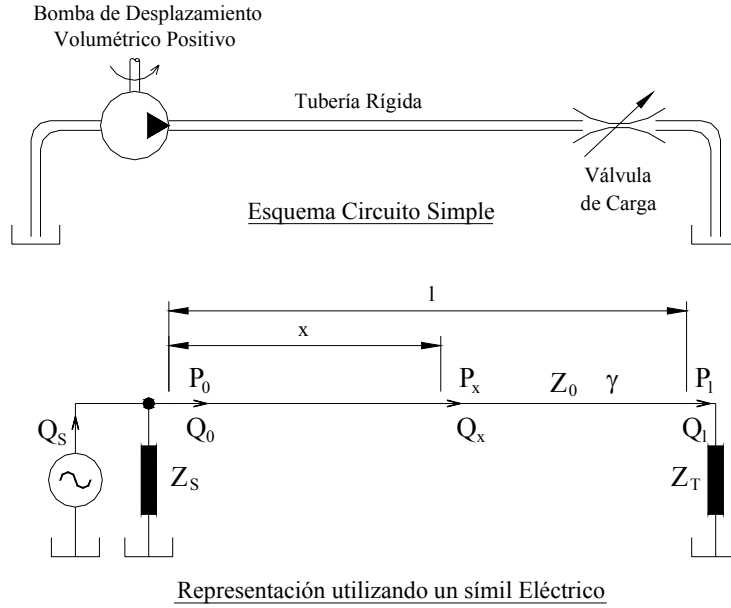


Figura 6.2. Circuito simple y notación de impedancia

La condiciones de contorno en la carga ($x = l$) está definido por el coeficiente de impedancia,

$$Z_T = \frac{P_l}{Q_l} \quad (6.20)$$

donde P_l es la pulsación de presión en la posición $x = l$ y Q_l es la pulsación de caudal en la posición $x = l$. Las condiciones de contorno en la fuente ($x = 0$) conciernen a la fuente de pulsación de caudal de la bomba Q_s y los efectos de carga de la impedancia de la fuente Z_s en la fuente de pulsación de caudal. Así,

$$Q_0 = Q_s - \frac{P_0}{Z_s} \quad (6.21)$$

donde P_0 es la pulsación de presión en la posición $x = 0$ y Q_0 es la pulsación de caudal en la posición $x = 0$.

Aplicando estas condiciones de contorno a las ecuaciones (6.17) y (6.18), se puede determinar las expresiones para los coeficiente F y G como,

$$F = \frac{Q_s Z_s Z_0}{Z_s + Z_0} \frac{1}{1 - \rho_s \rho_T e^{-2\gamma l}} \quad (6.22)$$

$$G = \frac{Q_s Z_s Z_0}{Z_s + Z_0} \frac{\rho_T e^{-2\gamma l}}{1 - \rho_s \rho_T e^{-2\gamma l}} \quad (6.23)$$

donde ρ_s es el *coeficiente de reflexión de la fuente* y está definido como el coeficiente complejo de la onda de presión incidente respecto la onda de presión reflejada en ese punto. De igual forma, ρ_T es el *coeficiente de reflexión de la terminación* y representa la forma con que la onda que viaja desde la terminación es reflejada en la fuente.

Los dos coeficientes están relacionados con la impedancia de la fuente y la de la terminación. Considérese la reflexión que ocurre en la terminación. La pulsación de presión en la

terminación P_l viene dada por la suma de la onda de presión incidente P_i y la reflejada P_r ,

$$P_l = P_i + P_r \quad (6.24)$$

La pulsación de caudal en este punto Q_l es igualmente la suma algebraica de la onda de flujo incidente Q_i y la reflejada Q_r ,

$$Q_l = Q_i + Q_r \quad (6.25)$$

de forma que,

$$\frac{P_i}{Q_i} = \frac{P_r}{Q_r} = Z_0 \quad (6.26)$$

Substituyendo la ecuación (6.26) en la ecuación (6.25),

$$Q_l = \frac{P_i - P_r}{Z_0} \quad (6.27)$$

A continuación, se sustituye la ecuación (6.27) y (6.25) en la ecuación (6.20),

$$Z_r = Z_0 \frac{P_i + P_r}{P_i - P_r} \quad (6.28)$$

Por definición,

$$\rho_r = \frac{P_r}{P_i} \quad (6.29)$$

De aquí,

$$Z_r = Z_0 \frac{1 + \rho_r}{1 - \rho_r} \quad (6.30)$$

Reordenando,

$$\rho_r = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0} \quad (6.31)$$

Mediante un procedimiento idéntico al expuesto, se determina el coeficiente de reflexión de la fuente,

$$\rho_s = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (6.32)$$

Debido a la fricción en la tubería y a las reflexiones incompletas, $|\rho_s|$ y $|\rho_r|$ son menores que la unidad.

A continuación, substituyendo las expresiones para F y G , ecuaciones (6.22) y (6.23), en las ecuaciones (6.17) y (6.18), se puede determinar las expresiones que definen la pulsación de presión y la pulsación de caudal en cualquier punto x a lo largo de la tubería rígida como,

$$P_x = \frac{Q_s Z_s Z_0}{Z_s + Z_0} \frac{e^{-\gamma x} + \rho_r e^{-\gamma(2l-x)}}{1 - \rho_s \rho_r e^{-2\gamma l}} \quad (6.33)$$

$$Q_x = \frac{Q_s Z_s}{Z_s + Z_0} \frac{e^{-\gamma x} - \rho_r e^{-\gamma(2l-x)}}{1 - \rho_s \rho_r e^{-2\gamma l}} \quad (6.34)$$

Estas ecuaciones son fundamentales para entender el comportamiento del ruido fluídico en los sistemas oleohidráulicos. Sin embargo, son expresiones que presentan complejidad y es útil una explicación física de sus términos más relevantes.

Se toma la ecuación (6.33) y se divide en dos,

$$P_x = \underbrace{Q_s \left[\frac{Z_s Z_0}{Z_s + Z_0} \right]}_A \underbrace{\left[\frac{e^{-jx} + \rho_T e^{-j(2l-x)}}{1 - \rho_s \rho_T e^{-2jx}} \right]}_B$$

La parte A tiene unidades de presión y representa la presión que sería generada a la salida de la bomba en ausencia de reflexiones en la terminación.

La parte B es adimensional y representa el comportamiento de las ondas que son generadas por la parte A . El término e^{-jx} en el numerador representa la onda que se está propagando en la dirección positiva de la tubería. El término $\rho_T e^{-j(2l-x)}$ representa la onda después de la reflexión en la terminación, siendo ρ_T la amplitud y el cambio de fase que se produce en la reflexión y $(2l - x)$ la distancia total que la onda ha viajado desde la fuente. El denominador representa los efectos acumulativos de las subsecuentes reflexiones de la onda.

6.3.3 Evaluación de las Características de la Onda Estacionaria en una Tubería Rígida

Debido a la naturaleza compleja de la onda estacionaria en el interior de la tubería, no es suficiente la medición de la pulsación de presión o caudal en un único punto. Para llegar a obtener una definición completa de las características de la onda, es necesario adquirir más información. Para cualquier frecuencia, la pulsación de presión y caudal para cualquier punto a lo largo de la tubería se define mediante las ecuaciones ya conocidas,

$$P(\omega, x) = F e^{-jx} + G e^{jx} \quad (6.35)$$

$$Q(\omega, x) = \frac{F e^{-jx}}{Z_0} - \frac{G e^{jx}}{Z_0} \quad (6.36)$$

Asumiendo evaluados Z_0 y γ , es necesario el conocimiento de los dos coeficientes complejos F y G , los cuales representan las ondas de presión viajando en ambas direcciones, para poder definir las características de la onda estacionaria en el interior de la tubería. Pero estos coeficientes no se pueden medir directamente; para cualquier punto de la tubería, la medida de la pulsación de presión y caudal es la suma de dos ondas de presión o flujo. Sin embargo, las dos ondas pueden llegar a deducirse ya que al menos se toman dos mediciones de amplitud y fase separadas y distintas a lo largo de la tubería, que podrían ser:

- (a) *Medición de la pulsación de presión y caudal* en cualquier punto a lo largo de la tubería
- (b) *Dos mediciones de la pulsación de presión* en dos localizaciones distintas a lo largo de la tubería
- (c) *Dos mediciones de la pulsación de caudal* en dos localizaciones distintas a lo largo de la tubería

Las mediciones de pulsación de caudal son difíciles y costosas. Además, estas técnicas pueden ser intrusivas en las características del flujo y pueden afectar a las características del sistema. La pulsación de presión puede ser medida más fácilmente. Los transductores de presión de alta

frecuencia son de fácil adquisición y más económicos, y las técnicas de medición son más simples sin necesidad de introducir distorsión en el sistema. Por estas razones, es más usual las mediciones de pulsación de presión exclusivamente.

Así, tomando la medición de pulsación de presión, las amplitudes y las fases relativas de las dos ondas pueden deducirse ya que al menos se miden y toman dos armónicos de la pulsación de presión por separado, incluida la información de la fase, en dos localizaciones distintas a lo largo de la tubería.

Se desea definir la onda estacionaria en términos de la onda de presión en ambas direcciones. Habiendo medido la presión compleja P_1 y P_2 en dos puntos x_1 y x_2 a lo largo de la tubería, los coeficientes complejos F y G pueden ser definidos manipulando la ecuación (6.35) como,

$$F = \frac{P_1 e^{jx_2} - P_2 e^{jx_1}}{e^{-j\gamma(x_1-x_2)} - e^{j\gamma(x_1-x_2)}} \quad (6.37)$$

$$G = \frac{P_1 e^{-jx_2} - P_2 e^{-jx_1}}{e^{-j\gamma(x_1-x_2)} - e^{j\gamma(x_1-x_2)}} \quad (6.38)$$

Ahora, mediante las ecuaciones (6.22), (6.23), (6.37) y (6.38) se obtiene,

$$\rho_r = \frac{G}{F} e^{2j\ell} = \frac{P_1 e^{-jx_2} - P_2 e^{-jx_1}}{P_1 e^{jx_2} - P_2 e^{jx_1}} e^{2j\ell} = \frac{e^{-j\gamma(x_2-x_1)} - \frac{P_2}{P_1}}{e^{j\gamma(x_2-x_1)} - \frac{P_2}{P_1}} e^{2j\gamma(\ell-x_1)} \quad (6.39)$$

Por tanto, es posible calcular el coeficiente de reflexión de la terminación y de aquí, la impedancia de la terminación, con la medición de la pulsación de presión en dos o mas puntos a lo largo de la tubería. Si ρ_s y Z_s fueran conocidos, sería posible calcular la pulsación de caudal de la fuente Q_s mediante la ecuación (6.23). Sin embargo, ρ_s y Z_s no pueden ser calculados con este método, sin importar cuantos transductores de presión sean usados. La razón física para explicar este fenómeno es que el efecto de las reflexiones en la fuente produce ondas que viajan en la misma dirección que la onda original que sale de la fuente. Estas ondas no pueden ser diferenciadas entre sí ya que viajan a la misma velocidad, con lo que ρ_s no puede ser calculado, aunque la calidad de la forma de la onda estacionaria definida sea muy buena.

Así, se necesita más información para medir la impedancia de la fuente y el coeficiente de reflexión de la fuente. La técnica usada en el ‘Trombón Hidráulico’ descrita por Edge (Edge, 1983) y métodos relacionados con éste, es alterar la dimensiones del circuito o su configuración durante el ensayo. Así, en teoría, es posible calcular ρ_s y Z_s cambiando la impedancia de entrada del sistema. Sin embargo, el cálculo es muy propenso al error en la práctica. Esto fue probado en la técnica ‘Trombón Hidráulico’ mediante numerosos ensayos con diferentes longitudes de la tubería.

Con tal de evitar y superar los problemas de los métodos de extensión de la longitud de la tubería, un método alternativo fue propuesto por Johnston (Johnston, 1987) denominado el *método de la ‘fuente secundaria’*.

6.3.4 El Método de la ‘Fuente Secundaria’

La base de esta técnica es el uso de una segunda fuente de ruido fluídico situada en la terminación del sistema simple de la Figura 6.2, y que es presentado en la Figura 6.3.

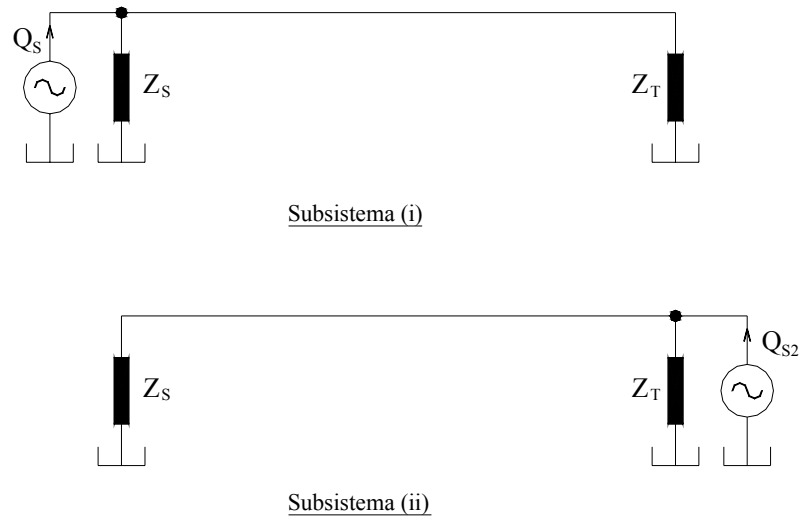


Figura 6.3. Análisis del método de la fuente secundaria

El sistema puede ser analizado como dos subsistemas. El subsistema (i) ya conocido y que presenta la pulsación de caudal Q_S de la bomba en ensayo que desea ser calculada. El subsistema (ii) tiene como terminación la impedancia de la fuente Z_S de la bomba en ensayo y un nuevo generador Q_{S2} que es la pulsación de caudal de la fuente secundaria.

Se asume que el ruido fluídico de cada fuente es separable. Así, cuando la frecuencia de los armónicos de la pulsación de presión de cada fuente es diferente, la pulsación de presión producida por cada fuente puede ser examinada de forma aislada la una de la otra. Considerando la onda de presión desde la fuente secundaria, la terminación se convierte en la impedancia de la fuente de la bomba en ensayo. La pulsación de presión P_x en cualquier punto a lo largo de la tubería rígida debido sólo a la fuente secundaria se presenta como,

$$P_x = \frac{Q_{S2} Z_T Z_0}{Z_T + Z_0} \frac{e^{-\gamma(l-x)} + \rho_s e^{-\gamma(l+x)}}{1 - \rho_s \rho_T e^{-2\gamma l}} \quad (6.40)$$

En otras palabras: analizando las características de la onda estacionaria de la pulsación de presión desde la fuente secundaria a solas, es posible calcular el coeficiente de reflexión de la fuente ρ_s , y de aquí calcular la impedancia de la fuente Z_S . Finalmente, analizando la pulsación de presión desde la bomba en ensayo, como se muestra en el subsistema (ii), el coeficiente de reflexión de la terminación puede ser evaluado y se dispone de suficiente información para evaluar la pulsación de caudal de la fuente Q_S como,

$$Q_S = \frac{F(Z_S + Z_0)(1 - \rho_s \rho_T e^{-2\gamma l})}{Z_S Z_0} \quad (6.41)$$

Esto forma la base de la técnica para la medición de las características del ruido fluídico de una bomba de desplazamiento volumétrico positivo. La técnica se puede dividir en dos secciones diferenciadas:

- La medición de la impedancia de la fuente Z_S
- La medición de la fuente de pulsación de caudal. Esta sección también requiere la medición de la impedancia de la terminación para que las características de

impedancia del sistema estén totalmente definidas.

6.3.4.1 Medición de la Impedancia de la Fuente

Con tal de medir Z_s y ρ_s es necesario determinar la pulsación de presión generado por la fuente secundaria. Es esencial que la fuente secundaria pueda ser aislada de cualquier pulsación de presión procedente de la bomba en ensayo. Esta condición deber ser conseguida desde dos formas,

- *La bomba en ensayo debe estar parada.* Esto es necesario ya que cualquier cambio en las condiciones de trabajo de la bomba podría posiblemente afectar a las características de la impedancia de la fuente
- *La frecuencia de los armónicos de ambas fuentes debe ser diferente* (asumiendo que la pulsación de presión desde la fuente secundaria es periódica)

Por tanto, más que la bomba en ensayo sea parada, es necesario asegurar que las frecuencias de los armónicos de la fuente secundaria no coincidan con las frecuencias de los armónicos de la bomba en ensayo. El sistema de adquisición de datos debe tener un rango de frecuencias suficientemente elevado para ser capaz de rechazar los componentes de los armónicos producidos por la bomba en ensayo.

De esta forma, los valores experimentales de Z_s obtenidos serán a frecuencias que no corresponden a las frecuencias de los armónicos de la bomba en ensayo. Para poder determinar la pulsación de caudal de la fuente es necesario estimar los valores de la impedancia de la fuente a las frecuencias de los armónicos de la bomba en ensayo. Esto se puede conseguir a través de dos métodos:

- Mediante la interpolación entre los resultados experimentales adyacentes de Z_s
- Mediante la aplicación de un modelo matemático adecuado y eficaz a los resultados experimentales de Z_s

La técnica del modelo matemático tiene el efecto de reducir los efectos del error experimental en las mediciones de la impedancia de la fuente. Es importante y crítico que la forma del modelo proporcione una representación adecuada de la impedancia de la fuente para obtener una buena correlación entre las mediciones y los puntos experimentales a obtener.

6.3.4.2 Ruido Fluídico de la Fuente Secundaria

La pulsación de presión a producir por la fuente secundaria debe satisfacer los siguientes criterios:

- Deber presentar frecuencias de los armónicos estables para permitir mediciones precisas
- Debe contener un adecuado número de armónicos tal que se puedan medir sobre una ancha banda de frecuencias que cubran la banda de frecuencia equivalente a la pulsación de presión generada por la bomba bajo ensayo

Se han considerado diferentes tipos de fuente secundaria como son un vibrador electromagnético con un mecanismo de pistón, una bomba de desplazamiento volumétrico positivo y un generador de pulsos. De todos ellos, es el generador de pulsos el que ha mostrado mejores resultados.

El generador de pulsos propuesto es una válvula rotativa que produce un corte de flujo instantáneo en la línea de presión por cada revolución de la misma. Así, se produce un flujo periódico, una pulsación de caudal que consiste en un tren de pulsos de muy corta duración. Debido a que la duración de los pulsos es muy corta comparada con el periodo del ciclo, el espectro de esta señal muestra un número significativo de armónicos. Aunque la pulsación de caudal no es particularmente controlable, ésta es una solución simple y efectiva.

6.3.5 Optimización de la Posición de los Transductores de Presión

La posición longitudinal de los transductores de presión es crítica para el análisis de la onda estacionaria, y de aquí para el cálculo de ρ_T , ρ_S , Z_S y Q_S . Para poder obtener buenos resultados, la configuración debe ser diseñada de forma que la predicción de las anteriores cuatro variables sea tan insensible como sea posible a los errores en la medición de la presión. Bajo ciertas condiciones, pequeños errores experimentales pueden conducir a enormes errores en los resultados, en cuyo caso las ecuaciones se presentarían mal condicionadas. Esta situación debe ser evitada todo lo que se pueda.

Si la distancia entre los dos transductores de presión corresponde exactamente con un múltiplo entero de la mitad de la longitud de onda de un armónico en particular y si, como es normalmente el caso, las pérdidas resistivas son menospreciadas, sucede que es imposible identificar los valores de F y G a ese armónico. La razón radica en que la relación entre las dos pulsaciones de presión medidas puede ser satisfecha por un número infinito de combinaciones de los valores de F y G . Esta condición representa que la pulsación de presión en el transductor es igual en amplitud y en fase o anti-fase con el otro transductor.

Sin embargo, si la distancia entre los transductores es cercana, pero no igual, a un múltiplo entero de la mitad de la longitud de onda, F y G pueden ser evaluados, pero pequeños errores en la medición de las presiones serán ampliados hasta dar grandes errores en F y G . Esta condición podría ser difícil o imposible de evitar cuando se considera el rango de ensayos y se realiza sobre una amplia banda de frecuencias.

El problema se resuelve midiendo la presión en más de dos puntos y con diferentes distancias de espaciado entre cada par de transductores. Además, el uso de más de un transductor de presión tiene la ventaja añadida de suavizar el efecto aleatorio y de error de calibración en los resultados experimentales, así como el cálculo de la velocidad del sonido en el fluido directamente de las mediciones de la pulsación de presión.

PARTE B

6.4 BANCO DE ENSAYOS PARA LA MEDICIÓN DE LA PULSACIÓN DE CAUDAL EN EL LABORATORIO DEL LABSON

Con tal de llevar a cabo las mediciones de pulsación de caudal se ha diseñado y construido un banco de ensayos en el laboratorio del LABSON.

6.4.1 Descripción del Circuito Oleohidráulico

En la Figura 6.1 se presenta un esquema del circuito oleohidráulico que se emplea en el método de la fuente secundaria.

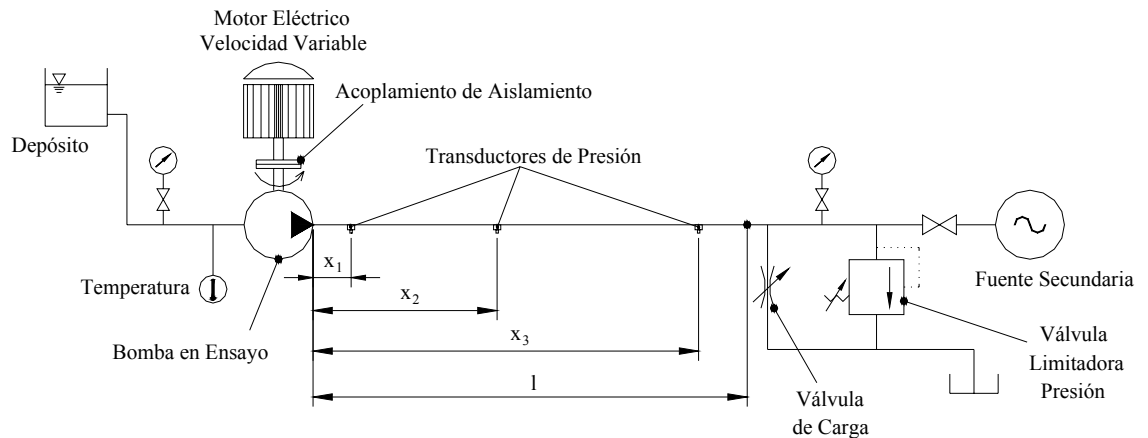


Figura 6.4. Esquema del circuito oleohidráulico a emplear en la técnica de la fuente secundaria

La bomba en ensayo descarga directamente en un tubería rígida recta. A lo largo de la longitud de la tubería se instalan tres transductores de presión, montados de forma que sus diafragmas están enrasados con la pared interior de la tubería. La longitud de la tubería y su ajuste con la bomba en ensayo forman la parte del sistema donde la onda estacionaria es analizada. Por tanto, es crucial que no haya obstaculización del flujo, ramificaciones o espacios libres que puedan afectar a los resultados, en particular en la unión bomba-tubería. También se debe tener especial cuidado para evitar formación de bolsas de aire atrapado a lo largo de la longitud de la tubería.

El circuito de carga y el de la fuente secundaria se instalan al final de la zona de medición. La carga es generada mediante el montaje de una simple válvula restrictiva en paralelo con la zona de medición, al igual que una válvula limitadora de presión con la finalidad de protección y seguridad y cuya presión de taraje se sitúa algo por encima de la presión de trabajo.

Un detector es dispuesto en el eje de la bomba en ensayo y en el eje de la fuente secundaria con tal de disponer de una señal de tren de pulsos que sirva para conocer la velocidad de giro así como de referencia.

6.4.2 Criterios de Diseño del Banco de Ensayos

Principalmente, los criterios de diseño obedecen a dos factores: el elemento a ensayar y las mediciones que se desean realizar.

El elemento a ensayar es una bomba oleohidráulica de desplazamiento volumétrico positivo cuyo perfil del engranaje está generado mediante perfiles trocoidales, también conocida como bomba gerotor. Sin embargo, también se desea que sea versátil y que puedan realizarse ensayos con otro tipo de bombas oleohidráulicas de desplazamiento positivo. Así, se toma las especificaciones básicas de funcionamiento de la bomba gerotor en estudio más las especificaciones básicas fundamentales definidas por la normativa ISO-4409 para el ensayo en régimen permanente, las cuales se resumen a continuación:

Especificaciones de Diseño	
Presión máxima	80 bar
Caudal máximo	60 l/min
Velocidad máxima de giro del motor	6,000 rpm
Par máximo	120 Nm
Potencia máxima	18.5 kW

Tabla 6.1. Especificaciones básicas de diseño del banco de ensayos

Las mediciones que se desean realizar son las de pulsación de caudal de la bomba gerotor a ensayar. Así, partiendo de las especificaciones de diseño se deben incluir nuevas especificaciones para la medición de la pulsación de caudal. Estas nuevas especificaciones son las propias del método de la fuente secundaria y que se encuentran recogidas en la normativa ISO CD 10767-1 92/84247.

El banco de ensayos está formado por la estructura, los componentes y sistema de accionamiento y el circuito básico oleohidráulico.

Estructura

La estructura del banco de ensayos ha de proporcionar la transmisión de la potencia de forma estable e independiente entre los elementos que la constituyen.

La estructura del banco la forma la bancada primaria donde se fijan el resto de elementos y que los sitúa aproximadamente a 0.840 m del suelo. Sobre la bancada primaria se enclava la bancada secundaria. Sobre la bancada secundaria se fijan el motor eléctrico y la bomba a ensayar y todo el sistema de accionamiento. Por último, una estructura de perfiles sobre la bancada primaria permite situar los depósitos del circuito oleohidráulico a altura de 1.558 m del suelo y por encima de la altura donde se monta la bomba a ensayar. La Figura 6.5 muestra un esquema general del banco de ensayos.

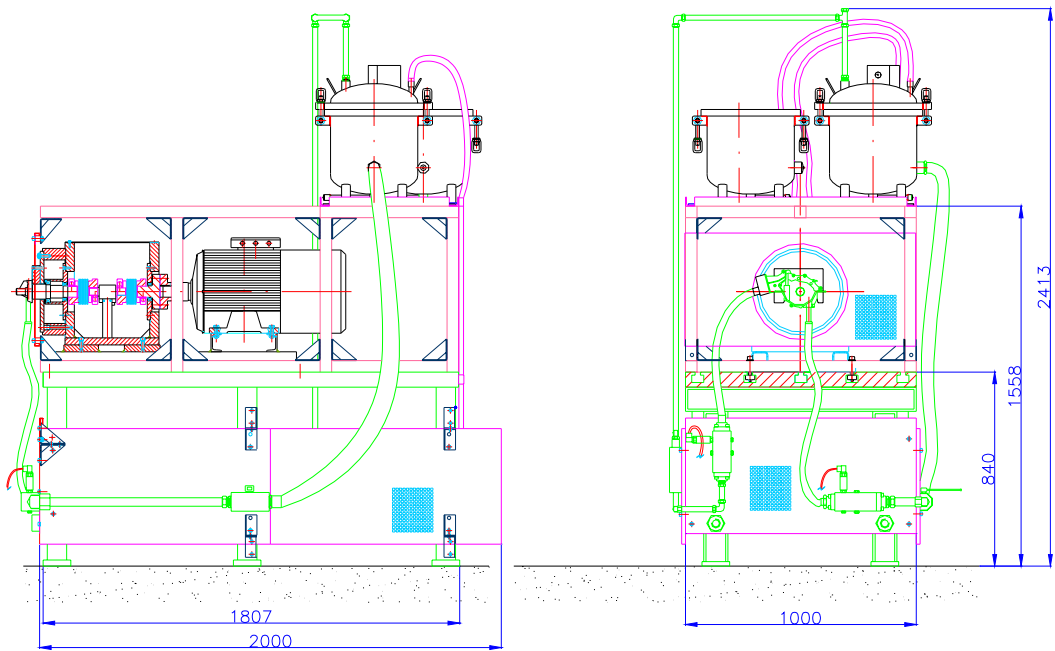


Figura 6.5. Esquema general del banco de ensayos.

Componentes y Sistema de Accionamiento

Los componentes del banco de ensayos son:

- *Convertidor de Frecuencia.* El convertidor de frecuencia permite variar la frecuencia de la señal de salida y permite regular la velocidad del motor eléctrico en un rango de 1–6,000 rpm. Fabricante: ABB. Modelo: SAMI GS ACS501-025-3-00P200000.
- *Motor Eléctrico.* Motor de corriente alterna de cuatro polos de 18.5 kW de potencia, velocidad nominal 1,450 rpm y rango 1–6,000 rpm. Fabricante: ABB. Modelo: SDM602-018k5-180.
- *Sensor de Par.* El sensor de par tiene como función medir el par de accionamiento de la bomba a ensayo. El sensor proporciona dos señales de 0 a ± 5 V para la medición del par en dos fondos de escala de medición: 20 Nm y 200 Nm. Además proporciona una señal TTL de medición de ángulo girado y control de velocidad de giro (360 impulsos $2 \times \text{TTL}90^\circ$). Fabricante: Lorenz Messtechnik GMBH. Modelo: DR-2112. El sensor ha sido convenientemente calibrado por el fabricante y comprobado en el laboratorio de LABSON.

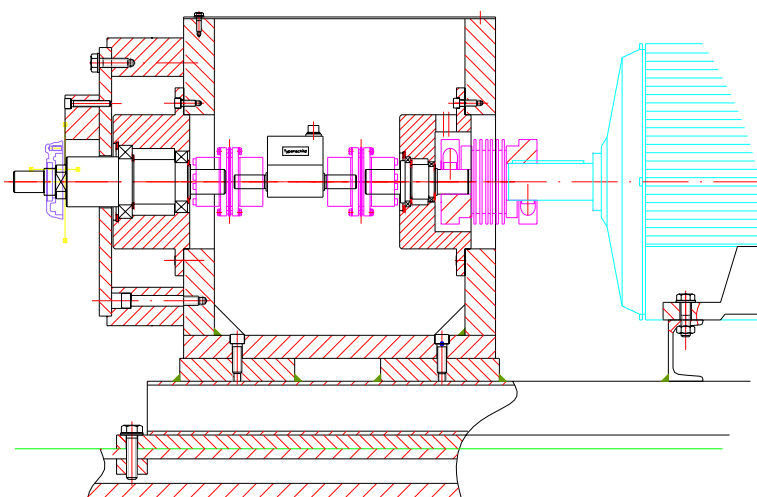


Figura 6.6. Detalle de la bancada secundaria, componentes y sistema de accionamiento

El sistema de accionamiento del banco de ensayo esta formado por:

- *Ejes Intermedios y Cojinetes.* La rueda dentada interior de la bomba gerotor es accionada por el eje del motor eléctrico. Sin embargo, este accionamiento no es directo. Entre el eje del motor eléctrico hasta la rueda dentada interior de la bomba se encuentran dos ejes intermedios y el sensor de par. Así, existe el primer eje intermedio denominado *ME-SP* que une el eje del motor eléctrico con el primer eje del sensor de par. El segundo eje intermedio denominado *SP-B* que une el segundo eje del sensor de par con la rueda dentada interior de la bomba gerotor. Cada eje intermedio se gira libremente mediante dos rodamientos de bolas que cumplen los criterios de diseño del banco. Fabricante: INA. Modelo: En función del alojamiento y eje.
- *Acoplamientos Elásticos.* Los acoplamientos utilizados en la instalación son de dos tipos. Para la unión del eje intermedio *ME-SP* y el eje del motor eléctrico se utiliza un acoplamiento tipo muelle del fabricante R+W y modelo BK2. Para la unión del primer eje del sensor de par y el eje intermedio *ME-SP* se utiliza un acoplamiento tipo fuelle del fabricante Lorenz Messtechnik GMBH y modelo TYP 950.320. Igualmente, para la unión del segundo eje del sensor de par y el eje intermedio *SP-B* se utiliza un

acoplamiento tipo fuelle del fabricante Lorenz Messtechnik GMBH y modelo TYP 950.320.

La Figura 6.6 muestra un detalle de la bancada secundaria y los componentes y sistema de accionamiento que soporta.

Circuito Básico Oleohidráulico

El circuito básico oleohidráulico básico de acuerdo con la ISO-4409, se muestra en la Figura 6.7 y se compone de:

1. *Depósito.* El depósito tiene como función contener el fluido de trabajo del circuito hidráulico. Se han dispuesto dos depósitos formados por vaso y tapa. Los dos vasos permiten poder realizar pruebas con dos aceites diferentes. Cada vaso tiene una capacidad de 38 litros. La tapa tiene instalado una resistencia calefactora que permite ensayar el fluido de trabajo a diferentes temperaturas y un serpentín de refrigeración.
2. *Tubería de Aspiración y Transductores de Aspiración.* La tubería de aspiración conecta el depósito con la brida de aspiración de la bomba en ensayo. Atendiendo a las especificaciones básicas y criterios de diseño se han instalado transductores de aspiración de presión estática modelo BOURDON-SEDEME E713-033-B22A de presión estática absoluta hasta 10 bar.
3. *Bomba en ensayo.*
4. *Tubería de Impulsión y Transductores de impulsión.* La tubería de impulsión conecta la brida de impulsión de la bomba en ensayo con el depósito. Atendiendo a las especificaciones básicas y criterios de diseño se han instalado transductores de impulsión de presión estática modelo BOURDON-SEDEME E713-033-B26R de presión estática relativa hasta 25 bar.
5. *Válvula Limitadora de Presión. Seguridad del Circuito.* Esta válvula limita la presión máxima a la que se puede llegar en el ensayo. Fabricante: ROQUET, S.A. Modelo: SGRA06/G11.
6. *Válvula Limitadora de Presión. Control de la Presión del Ensayo.* Esta válvula permite controlar la presión de ensayo fijándola en un valor determinado. Fabricante: ROQUET, S.A. Modelo: SGRA06/G11.
7. *Intercambiador de Calor.* Control de la temperatura del fluido de trabajo. El intercambiador de calor y la resistencia eléctrica se encuentra fijado en la tapa del depósito.
8. *Transductores del Caudalímetro.*
9. *Caudalímetro.* Medición del caudal impulsado por la bomba.

El banco de ensayos posee un manual de mantenimiento y la correspondiente evaluación medioambiental.

Información más detallada del banco de ensayos puede ser obtenida en el proyecto final de carrera referido en la bibliografía (Ortega de Mingo, 1999).

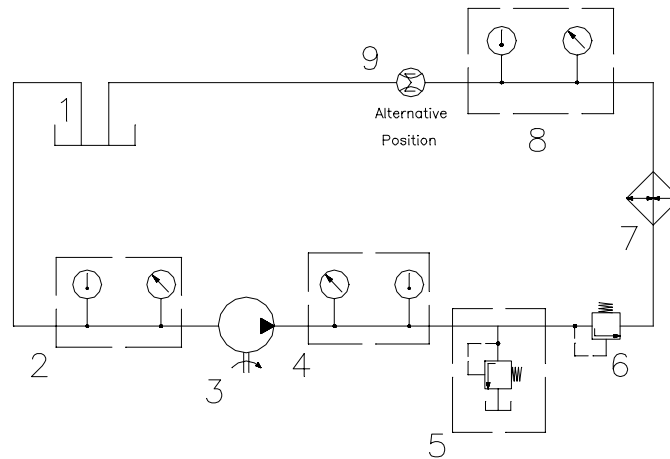


Figura 6.7. Esquema circuito básico de ensayo

En la Fotografía 6.1 se muestra una panorámica del banco de ensayos.



Fotografía 6.1. Panorámica del banco de ensayos

Circuito Oleohidráulico para el Cálculo de la Pulsación de Caudal

Para la medición de la pulsación de caudal se va a emplear el método de la fuente secundaria. La normativa ISO CD 10767-1 92/84247 titulada ‘*Hydraulic fluid power – Methods for determining pressure ripple levels generated in systems and components – Part 1. Precision method for pumps*’ describe el procedimiento para la determinación del valor de la pulsación de caudal fuente, la impedancia fuente y los niveles de pulsación de presión generados por las bombas oleohidráulicas de desplazamiento volumétrico positivo. Los valores a obtener son:

- (a) La amplitud en [l/s] de la pulsación de caudal de la fuente (bomba en ensayo) sobre diez armónicos individuales de la frecuencia de bombeo
- (b) La amplitud en $[N \cdot s/m^5]$ y fase en grados de la impedancia de la fuente (bomba en ensayo) sobre diez armónicos individuales de la frecuencia de bombeo
- (c) La pulsación de presión en [bar] correspondiente a la bomba en ensayo descargando en el interior de una tubería rígida recta de igual diámetro interno que el puerto de descarga de la bomba, con una terminación anacoica.

Esta normativa es aplicable a todos los tipos de bombas oleohidráulicas de desplazamiento volumétrico positivo operando bajo condiciones estacionarias y en un rango de la frecuencia de bombeo entre 50 Hz a 400 Hz y es una guía que engloba toda la teoría y metodología del método de la fuente secundaria para el cálculo de la pulsación de caudal fuente que ha sido expuesta y desarrollada en los capítulos anteriores.

Partiendo de esta normativa, a continuación en la presente sección de la tesis se han seguido sus instrucciones para el diseño y construcción del circuito oleohidráulico para el cálculo de la pulsación de caudal de la fuente o generador, siendo en este caso la bomba en ensayo la bomba de engranajes de perfiles trocoidales. En la Figura 6.8 se presenta un esquema del circuito oleohidráulico para el cálculo de la pulsación de caudal.

La bomba de ensayo descarga directamente en una tubería rígida recta. A lo largo de su longitud de la tubería se instalan tres transductores de presión piezoeléctricos KISTLER, montados de forma que sus diafragmas están enrasados con la pared interior de la tubería. La longitud de la tubería y su ajuste con la bomba en ensayo vienen condicionados para la correcta medición de la onda estacionaria que se establece en la tubería rígida y definida en la normativa. Sus dimensiones.

Dimensiones	
x_1	0.10 m \pm 1%
x_2	0.43 m \pm 1%
x_3	0.90 m \pm 1%
l	al menos 1.00 m

Tabla 6.2. Dimensiones de la tubería rígida y posición de los transductores

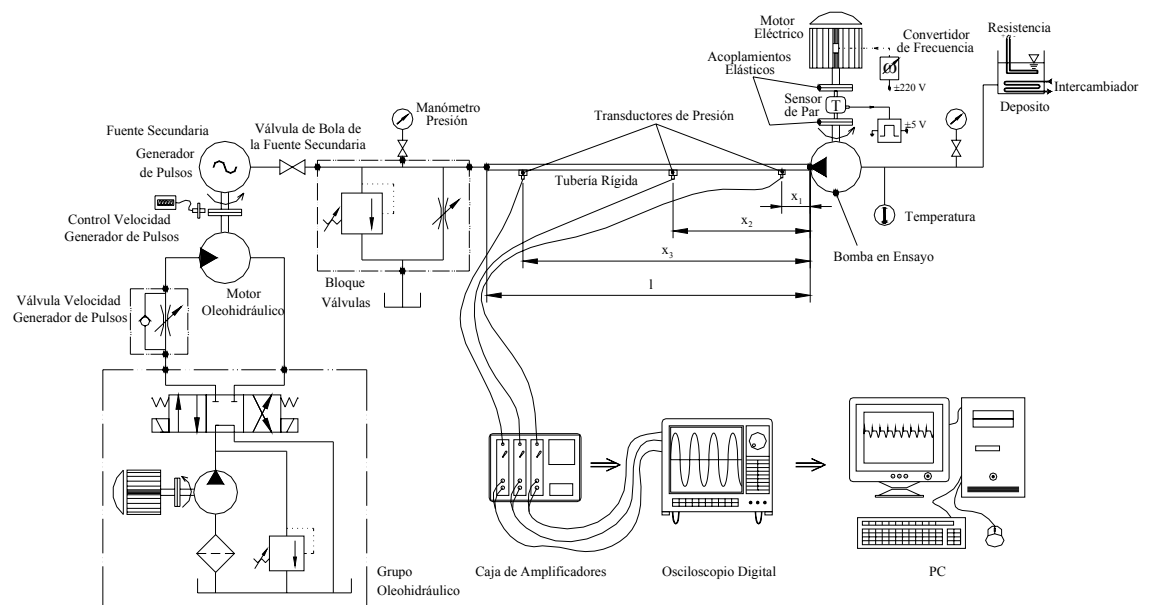


Figura 6.8. Esquema del circuito oleohidráulico para el cálculo de la pulsación de caudal

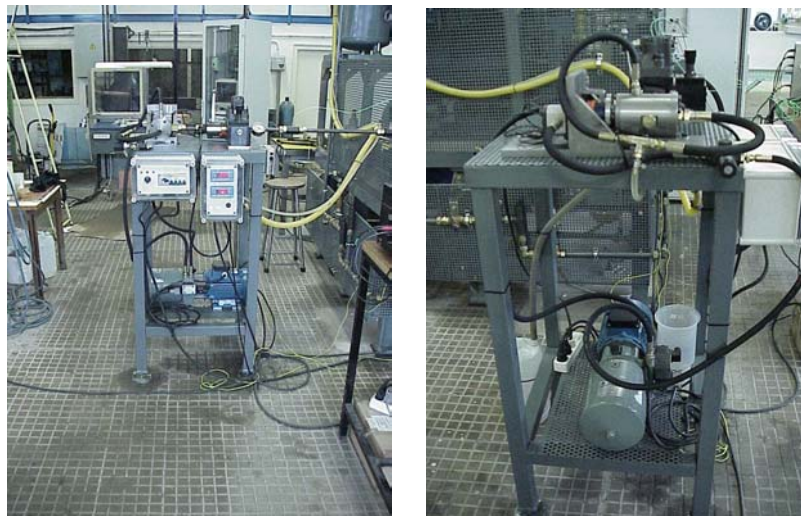
La dimensión del diámetro interior de la tubería rígida se selecciona entre el 80% al 120% del diámetro de la brida de impulsión de la bomba en ensayo. Es importantísimo asegurar que no haya obstaculización del flujo, ramificaciones o espacios libres que puedan afectar a los resultados, en particular en la unión bomba-tubería. También se debe tener especial cuidado para evitar formación de bolsas de aire atrapado a lo largo de la longitud de la tubería y en los

diafragmas de los transductores. Para evitarlo, se pueden instalar los transductores en la parte inferior de la tubería, quedando el diafragma de estos hacia arriba en el interior de la tubería rígida.



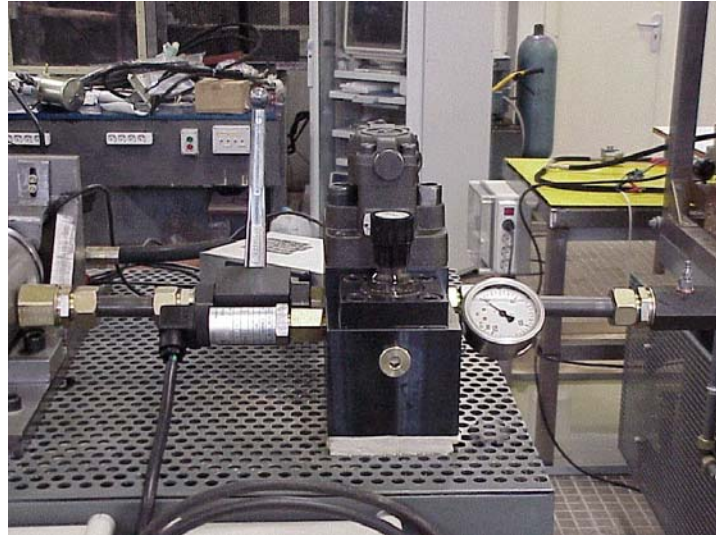
Fotografía 6.2. Detalle de la tubería rígida y posición de los transductores

El circuito de carga y el de la fuente secundaria se conectan al otro extremo de la tubería rígida. La estructura mostrada en la Fotografía 6.3 muestra donde se instalan todos los componentes.



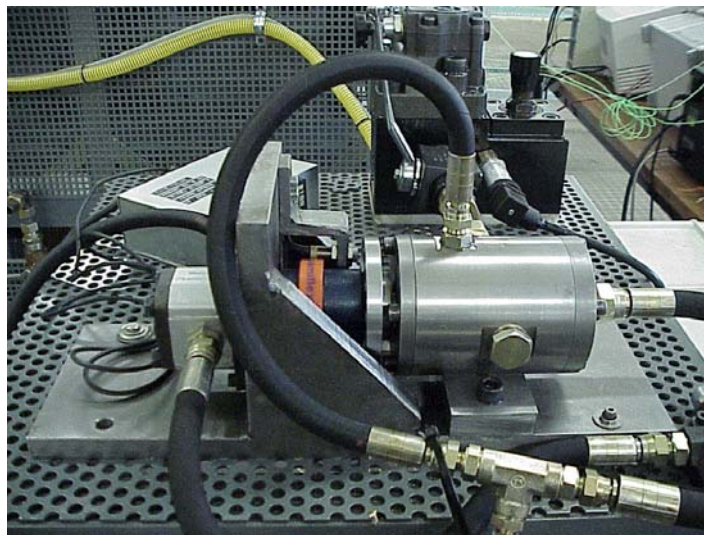
Fotografía 6.3. Vista frontal y perfil de la estructura de instalación de los componentes del circuito de carga y el de la fuente secundaria.

Un bloque de válvulas se instala entre la fuente secundaria y el extremo de la tubería rígida (Fotografía 6.4). El bloque de válvulas está formado por una válvula reguladora de caudal, una válvula limitadora de presión un manómetro y un transductor de presión. La carga es generada mediante la válvula reguladora en paralelo con la zona de medición y la válvula limitadora de presión tiene la función de protección y seguridad y cuya presión de taraje se sitúa algo por encima de la presión de trabajo. Entre la fuente secundaria y el bloque de válvulas se instala una válvula de bola de la fuente secundaria cuya función simplemente es cerrar o abrir el paso desde la zona de medición a la fuente secundaria.



Fotografía 6.4. Detalle del bloque de válvulas

Finalmente, se encuentra la fuente secundaria expuesta en la Fotografía 6.5. Como fuente secundaria se ha elegido una válvula giratoria o generador de pulsos para determinar la impedancia de la bomba en ensayo.



Fotografía 6.5. Generador de pulsos de la fuente secundaria

La estructura básica del generador de pulsos consiste en un eje (marca 15 en el esquema de la Figura 6.9) que gira libremente en el interior de una carcasa (marca 11). El eje es conducido por un motor oleohidráulico (marca 2) el cual es alimentado el un grupo oleohidráulico. La velocidad de rotación del eje del generador de pulsos es controlada mediante el caudal introducido en el motor oleohidráulico mediante una válvula reguladora de caudal unidireccional.

El bloque que constituye la carcasa consta de dos aberturas principales: la abertura de alta presión y la de baja presión. La abertura de alta presión conecta el generador de pulsos con la tubería rígida a través del bloque de válvulas y la válvula de bola. La abertura de baja presión conduce el fluido de trabajo atrapado en cada revolución del generador hacia depósito.

El fluido de trabajo desde la tubería rígida procedente de la bomba en ensayo entra en el interior del generador de pulsos a través de la abertura de alta presión. Para poder completar el recorrido en el interior del generador de pulsos hacia la abertura de baja presión se han practicado dos orificios en el eje. Un orificio es perpendicular a su eje, y coincide en cada revolución con el

orificio correspondiente a la abertura de alta presión. Es en el momento en el que coinciden los dos orificios cuando parte del fluido de trabajo procedente de la tubería rígida entra en el eje. Gracias al otro orificio, el fluido de trabajo alcanzará la abertura de baja presión a través del interior del eje.

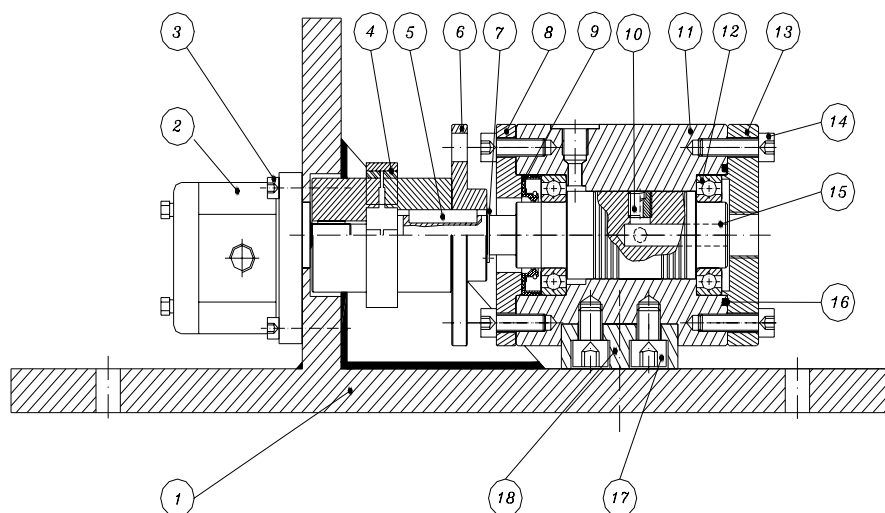


Figura 6.9. Esquema del generador de pulsos

De esta manera se crea una línea de desagüe del fluido de trabajo que proviene del circuito, para que a través del eje, que gira a una velocidad constante, se cree un pulso de flujo periódico, de duración corta, una vez por revolución.

La abertura de baja presión consiste en un orificio pasante realizado en una de las tapas (marca 13) quedando alineado con el orificio interior del eje. La tapa ajusta perfectamente en la carcasa mediante una junta de estanqueidad (marca 16) y está fijada a ésta mediante cuatro tornillos (marca 14).

Las ranuras diametrales que se han realizado en el eje tienen la función de igualar la presión a su alrededor para reducir así cualquier fuerza lateral. Estas ranuras crean cojín de fluido que favorece el centraje del eje respecto de la carcasa. Las ranuras también permiten crear una pérdida de carga para el fluido de fuga que existe entre eje y carcasa. El flujo de fuga existente a partir de las ranuras asegura la formación de una película continua de fluido alrededor del eje, que proporciona una lubricación hidrodinámica.

La conexión entre el eje del generador de pulsos y el eje del motor oleohidráulico se realiza mediante un acoplamiento elástico (marca 4). Para poder determinar las revoluciones de giro del generador de pulsos se ha ajustado en su eje un disco con doce agujeros pasantes (marca 6). La lectura de la velocidad de giro se efectúa mediante un interruptor de proximidad del fabricante OMRON, modelo TL-X4ME1-E1. Un display digital permite visualizar el valor de la velocidad de giro, fabricante KOSMOS y modelo MICRA-F.

Información más detallada del generador de pulsos puede ser obtenida en el proyecto final de carrera referido en la bibliografía (Buendía, 2001).

6.4.3 Instrumentación

A continuación se pasa a describir la instrumentación utilizada en los ensayos que se han llevado a cabo. Teniendo presente el esquema del circuito oleohidráulico para el cálculo de la pulsación de caudal de la Figura 6.8, se observa en el esquema el recorrido de la señal y que se ha resumido en el diagrama de flujo de la Figura 6.10.

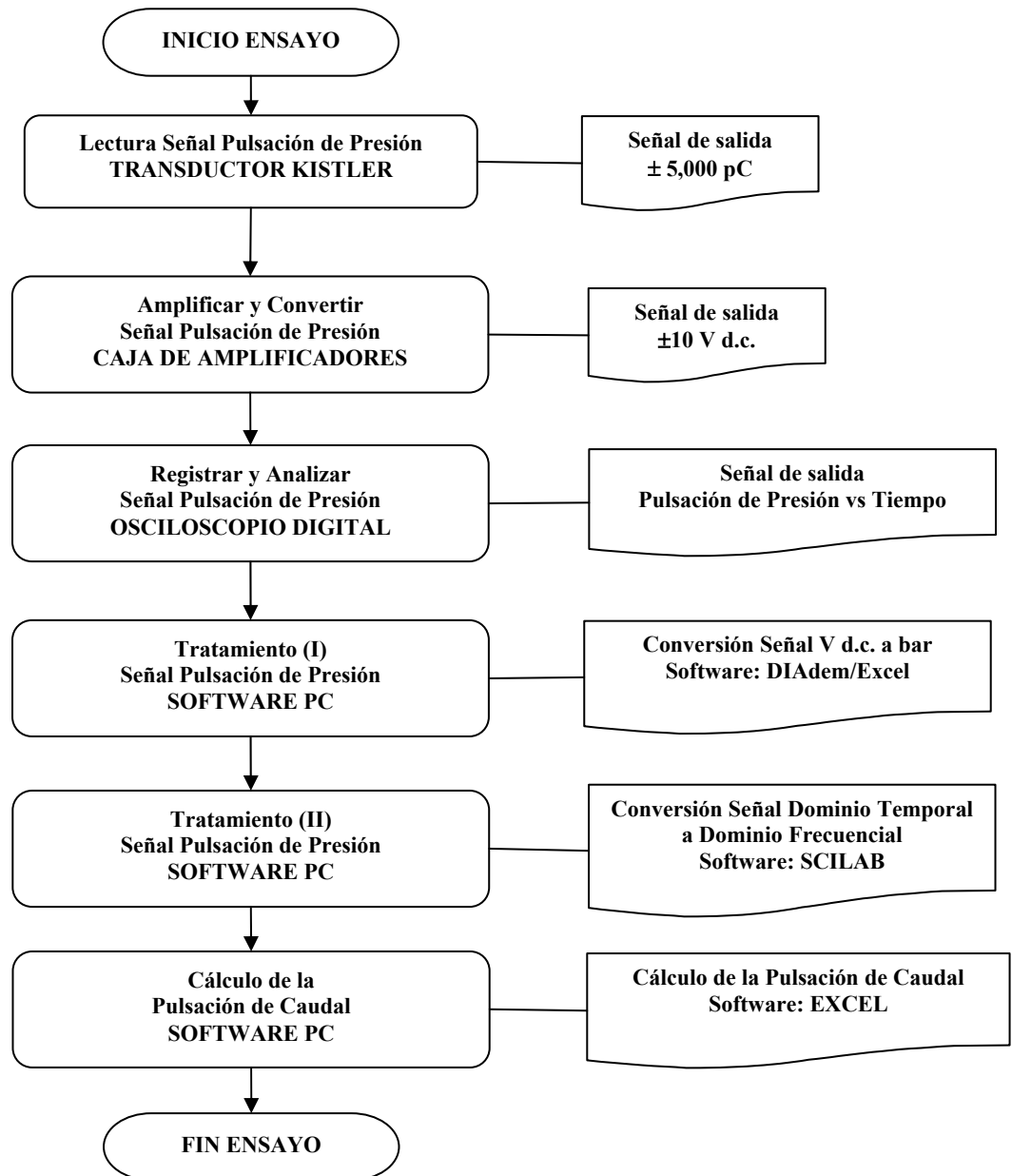


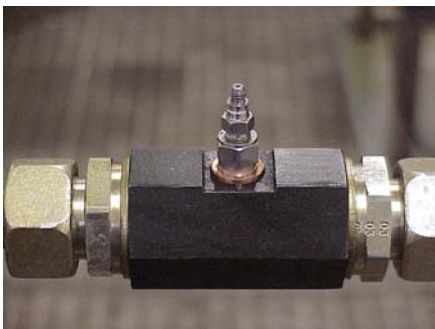
Figura 6.10. Diagrama de flujo de recorrido de la señal

La instrumentación utilizada se comenta a continuación.

Transductores de Presión

Los transductores de presión son de cuarzo y utilizan la técnica de medida piezoeléctrica. Su función es la medición de presión dinámica desde el vacío a 1,000 bar. Sus dimensiones son

muy reducidas y alta frecuencia natural. La colocación de los transductores de presión en la tubería rígida se realiza a través de un soporte (Fotografía 6.6) que mediante uniones tipo racor va montado en la tubería rígida y permite crear una continuidad en ésta y así evitar cualquier cambio de sección en el recorrido del fluido de trabajo.



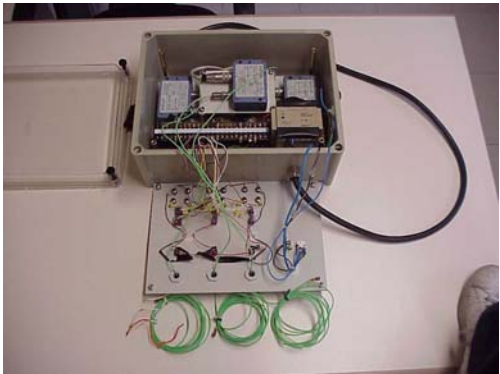
Fotografía 6.6. Transductor de presión de cuarzo

Transductor de Presión	
Fabricante	KISTLER
Modelo	601A
Rango de Medida	0 – 250 bar
Sensibilidad aprox ¹ .	15 pC/bar

Tabla 6.3. Características básicas del transductor de presión

Caja de Amplificadores de Carga

La señal de medida de los transductores de presión KISTLER es amplificada y convertida a una señal de $\pm 10\text{ V}$ de corriente continua. Los tres amplificadores de carga y su conexionado eléctrico se han llevado a cabo en un caja estanca como se muestra en la Fotografía 6.7.



Fotografía 6.7. Caja de amplificadores

Amplificador de Carga	
Fabricante	KISTLER
Modelo	5039A112
Señal max. salida	$\pm 10\text{ V d.c.}$

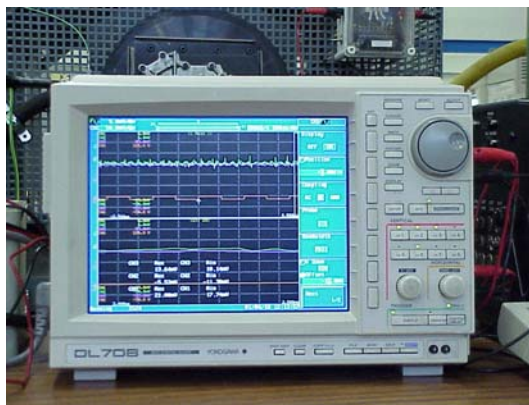
Tabla 6.4. Características básicas del transductor de presión

Los transductores y amplificadores de carga han sido convenientemente calibrados por la empresa ARIES Ingeniería y Sistemas S.A. Así también, todos la instrumentación ha sido periódicamente testados en los períodos programados en el laboratorio de LABSON.

¹ Cada transductor de presión tiene una sensibilidad diferente y debe ser obtenida mediante su calibración, la cual es realizada por el fabricante. Sin embargo, puede tomarse como valor aproximado de los tres transductores el valor de 15 pC/bar

Osciloscopio Digital

El osciloscopio digital utilizado para analizar las pulsaciones de presión ha sido un osciloscopio del fabricante YOKOGAWA modelo DL 708, mostrado en la Fotografía 6.8.



Fotografía 6.8. Osciloscopio digital

El osciloscopio permite analizar y representar en el dominio temporal y frecuencial de la señal de pulsación de presión obtenida en los ensayos por los transductores de presión. Dispone de ocho canales de entrada. Estos resultados son registrados por el osciloscopio y se pueden exportar en formato ASCII.

PC y Software

En el cálculo de la pulsación de caudal se ha utilizado un ordenador personal de características convencionales. El software empleado ha sido:

- *SCILAB*. Scilab es un paquete de software científico para computaciones numéricas para ingeniería y aplicaciones científicas. Ha sido desarrollado desde 1990 por investigadores de INRIA y ENPC. Es software libre y distribuido vía Internet.
- *DIAdem*. National Instruments DIAdem es una herramienta interactiva para análisis de datos y matemática y generación de informes. DIAdem es capaz de trabajar con archivos de datos que contengan 100 billones de valores.
- *EXCEL*. Es ampliamente conocido y forma parte de la familia de Microsoft Office.

6.4.4 Protocolo de Ensayos

A continuación se pasa a describir el protocolo de ensayos que se han llevado a cabo. Teniendo presente el esquema del circuito oleohidráulico para el cálculo de la pulsación de caudal de la Figura 6.8 el protocolo de pruebas se desarrolla a continuación.

1. Verificar toda la instalación
2. Controlar la puesta en marcha de la resistencia eléctrica e intercambiador de calor del depósito en caso de ensayos a temperatura
3. Abrir las válvulas del circuito oleohidráulico con especial atención a las válvulas limitadoras de presión
4. Hacer la lectura de temperatura
5. Establecer la presión de ensayo mediante la válvula de carga del bloque de válvulas

6. Abrir la válvula de bola de la fuente secundaria para el ensayo que permite *el cálculo de la impedancia de la fuente o generador de pulsación de caudal*
7. Poner en marcha el grupo oleohidráulico que alimenta el motor oleohidráulico
8. Seleccionar la velocidad de giro del generador de pulsos mediante la válvula de velocidad del generador de pulsos
9. Realizar el reset de los amplificadores de carga en la caja de amplificadores
10. Registrar la señal de pulsación de presión del generador de pulsos de los tres transductores de presión mediante la caja de amplificadores y el osciloscopio digital
11. Hacer la lectura de temperatura
12. Apagar el grupo oleohidráulico que alimenta el motor oleohidráulico
13. Cerrar la válvula de bola de la fuente secundaria para el ensayo que permite *el cálculo de la pulsación de caudal de la fuente o generador de pulsación de caudal*
14. Poner en marcha el convertidor de frecuencia y seleccionar una velocidad de giro de ensayo
15. Registrar el par mediante el sensor de par
16. Realizar el reset de los amplificadores de carga en la caja de amplificadores
17. Registrar la señal de pulsación de presión de la bomba en ensayo de los tres transductores de presión mediante la caja de amplificadores y el osciloscopio digital
18. Hacer la lectura de temperatura
19. Apagar el convertidor de frecuencia
20. Cerrar las válvulas del circuito oleohidráulico
21. Verificar toda la instalación

6.5 BANCO DE ENSAYOS PARA LA MEDICIÓN DE LA PULSACIÓN DE CAUDAL EN EL ‘CENTRE FOR POWER TRANSMISSION AND MOTION CONTROL’ DE LA ‘UNIVERSITY OF BATH’

El autor de la presente tesis realizó una estancia de tres meses en el *Centre for Power Transmission and Motion Control (Fluid Power Centre)* de la *University of Bath* del Reino Unido bajo la supervisión del Dr. D.N. Johnston mientras elaboraba su tesis, fruto de la beca predoctoral que ha disfrutado.

El Fluid Power Centre es un centro de excelencia en la investigación de la potencia oleohidráulica de reconocido prestigio en Europa y a nivel mundial. Se puede considerar dentro de los tres mejores centros de investigación mundiales.

Sus investigadores son de los primeros en llevar a cabo investigaciones sobre el ruido flúidico y el caudal instantáneo en bombas oleohidráulicas. Sus estudios han llegado a consolidar el método de la fuente secundaria, y han sido plasmados en numerosas publicaciones técnicas, llegando a derivarse en la normativa ISO CD 10767-1 92/84247.

El objetivo de la estancia surge de la necesidad de:

- Contrastar la metodología de la fuente secundaria
- Contrastar el banco de ensayos para la medición mediante la metodología de la fuente secundaria

- Realizar trabajos experimentales en el banco de ensayos del Fluid Power Centre con una bomba gerotor

El banco de ensayos utilizado en el Fluid Power Centre se puede ver en la Figura 6.11.

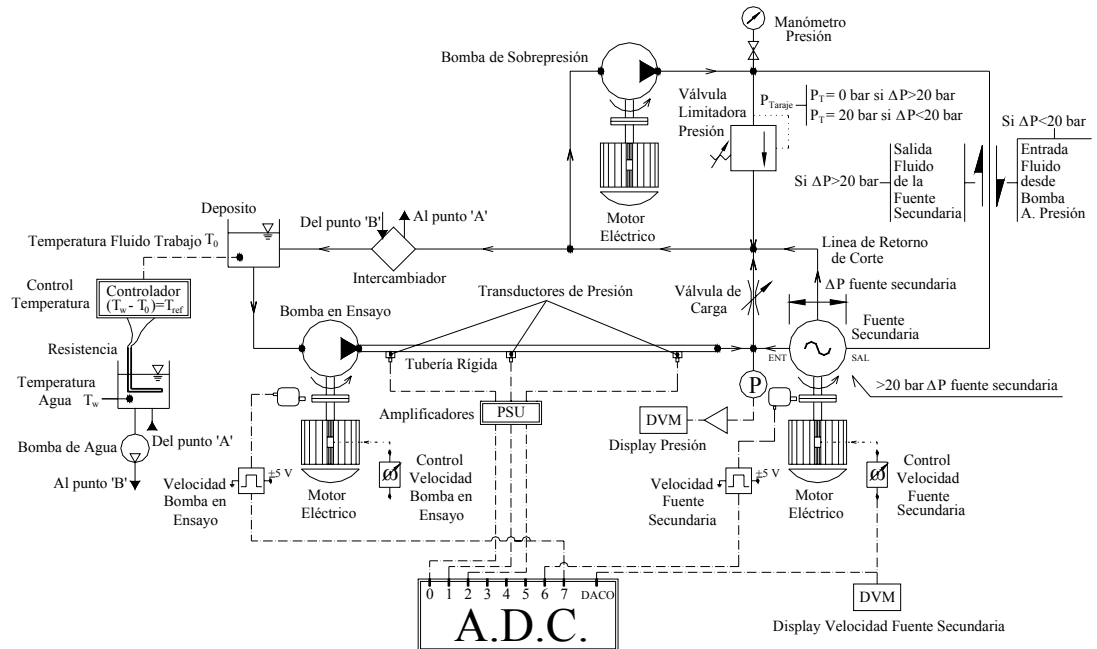
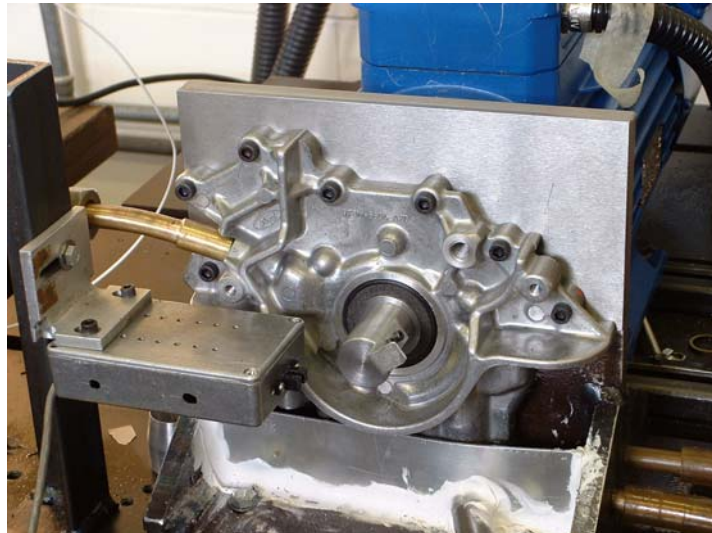


Figura 6.11. Esquema del banco de ensayos del Fluid Power Centre de la University of Bath

En la Fotografía 6.9 y Fotografía 6.10 se muestran la bomba gerotor en ensayo y el generador de pulsos de la fuente secundaria en el banco de ensayos del Fluid Power Centre.



Fotografía 6.9. Bomba gerotor en ensayo en el banco de ensayos del Fluid Power Centre

Como diferencia significativa con el banco de ensayos del laboratorio del LABSON cabe mencionar la incorporación de un circuito secundario de sobrepresión. El circuito secundario aporta presión a la entrada del generador de pulsos que trabaja como fuente secundaria. La bomba de de sobrepresión entra en funcionamiento en los ensayos donde la presión de ensayo se sitúa por debajo de 2 MPa (20 bar). Si la presión de ensayo se sitúa por encima de 2 MPa, la bomba de sobrepresión se encuentra desconectada.



Fotografía 6.10. Generador de pulsos de la fuente secundaria en el banco de ensayos del Fluid Power Centre

PARTE C

6.6 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA BOMBA GEROTOR

El objetivo fundamental de este apartado es la determinación experimental de las pulsaciones de caudal generadas por una bomba gerotor.

La unidad de bomba gerotor utilizada para llevar a cabo este estudio es una bomba que se utiliza en el circuito de lubricación del motor de combustión interna *Zetec* de FORD. Esta unidad ha sido facilitada por la empresa Aleaciones de Metales Sinterizados, S.A. (AMES). La unidad fue presentada anteriormente en la Fotografía 1.1. Los parámetros básicos que definen el engranaje de perfil trocoidal de la bomba gerotor se describieron en el Capítulo 3 y sus valores se resumen en la Tabla 6.5.

Parámetros Básicos del Engranaje de Perfil Trocoidal	
Z	9
e	2.85 mm
S	10.85 mm
G	35.8 mm
D_{ei}	65.45 mm
H	9.25 mm

Tabla 6.5. Parámetro básicos del engranaje de perfil trocoidal de la bomba gerotor (Ver Capítulo 3)

Esta unidad de bomba gerotor ha sido ensayada en los dos bancos de ensayos descritos del Fluid Power Centre y el laboratorio de LABSON.

Debido a que la bomba gerotor en estudio trabaja a presiones inferiores a 0.6 MPa (6 bar), el Dr. D.N. Johnston aconsejó la utilización del circuito secundario de sobrepresión. Los ensayos con el circuito secundario de sobrepresión sólo fueron posibles en el Fluid Power Centre.

Los resultados experimentales obtenidos han sido tratados con los algoritmos propios de cada centro. A modo de ejemplo se presenta la amplitud y fase de la pulsación de caudal la Figura 6.12 que ha sido obtenido mediante el software *FBN2* desarrollado en el Fluid Power Centre por el Dr. D.N. Johnston un software que recoge toda la metodología del cálculo y que lleva a cabo

toda la adquisición de datos necesaria, el análisis frecuencial y el manejo de datos. En la Figura 6.13 se presenta la amplitud y fase de la pulsación de caudal obtenida en el laboratorio del LABSON.

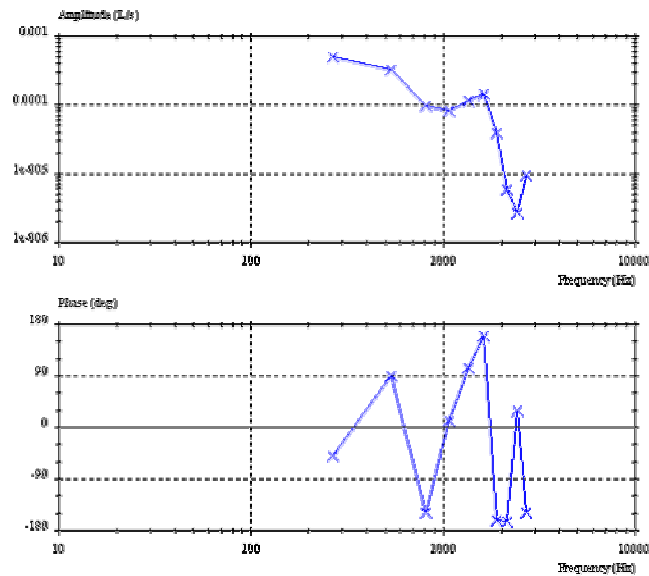


Figura 6.12. Ejemplo de amplitud y fase de la pulsación de presión para velocidad de rotación en ensayo de 2016 rpm y presión de ensayo 5 bar del banco de ensayos del Fluid Power Centre

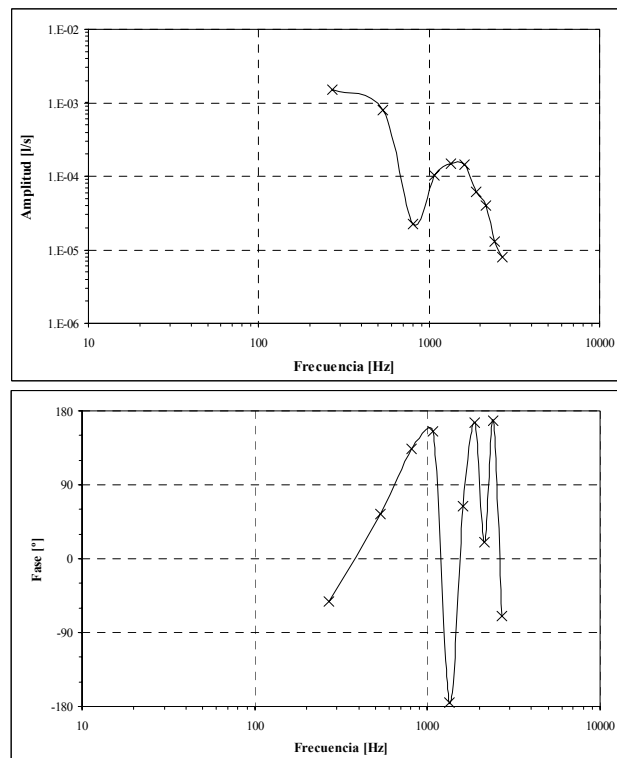


Figura 6.13. Ejemplo de amplitud y fase de la pulsación de presión para velocidad de rotación en ensayo de 2016 rpm y presión de ensayo 5 bar del banco de ensayos del laboratorio LABSON

De las distintas series de ensayos realizados independientemente en los dos centros, en la Tabla 6.6 se resumen aquellos ensayos que satisfacen las mismas condiciones de ensayo y que por tanto serán comparables a todos los efectos.

Condiciones de Ensayo			
Banco de Ensayos	Velocidad de Rotación [rpm]	Presión de Ensayo [bar]	Circuito Secundario de Sobrepresión
Fluid Power Centre	823	3	SI
Laboratorio LABSON			NO
Fluid Power Centre	1,667	4.5	SI
Laboratorio LABSON			NO
Fluid Power Centre	2,016	5	SI
Laboratorio LABSON			NO

Tabla 6.6. Condiciones de ensayo

En la Figura 6.14, Figura 6.15 y Figura 6.16 se muestran los resultados obtenidos.

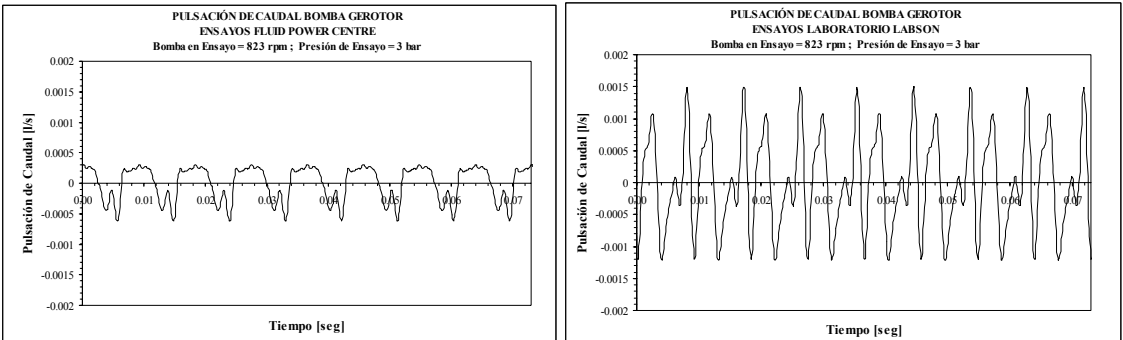


Figura 6.14. Resultados de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre y el laboratorio del LABSON para velocidad de rotación en ensayo de 823 rpm y presión de ensayo 3 bar

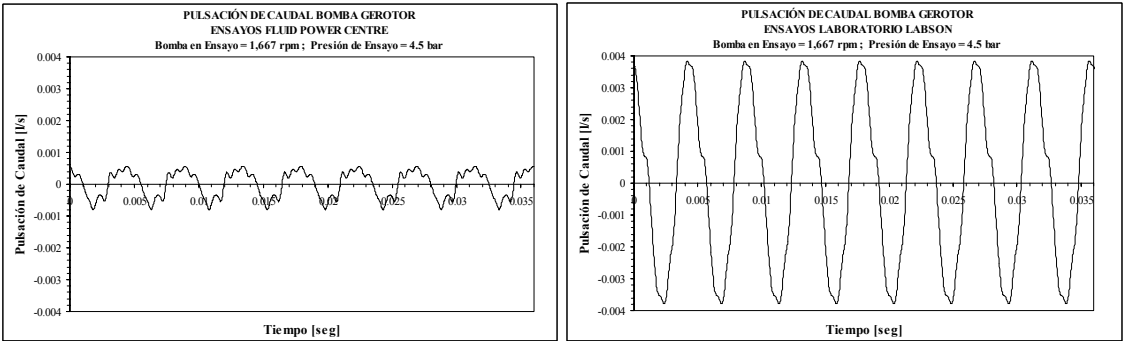


Figura 6.15. Resultados de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre y el laboratorio del LABSON para velocidad de rotación en ensayo de 1,667 rpm y presión de ensayo 4.5 bar

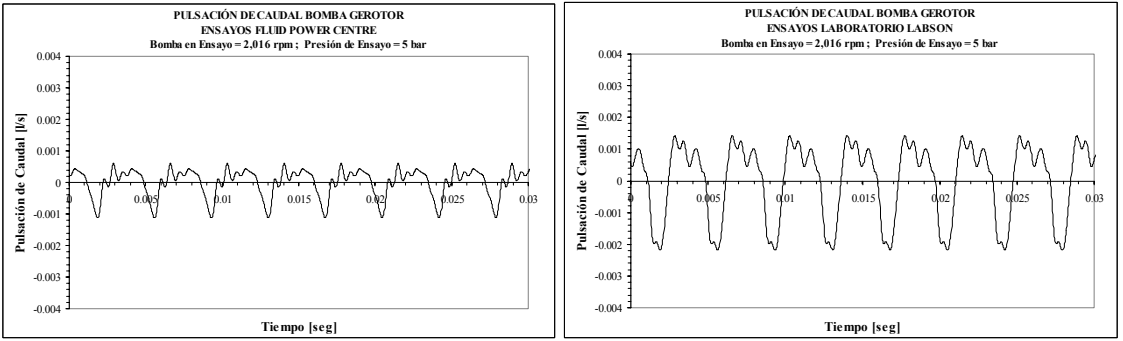


Figura 6.16. Resultados de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre y el laboratorio del LABSON para velocidad de rotación en ensayo de 2,016 rpm y presión de ensayo 5 bar

A la vista de los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos llevados a cabo en el Fluid Power Centre y el laboratorio de LABSON, en general se observa:

- Las amplitudes (pico a pico) de las pulsaciones de caudal obtenidas en el Fluid Power Centre son inferiores a las amplitudes obtenidas en el laboratorio del LABSON. La diferencia en porcentaje se sitúa en el intervalo $15\% \leq \frac{A_{\text{FluidPowerCentre}}}{A_{\text{LaboratorioLABSON}}} \leq 45\%$.
- La forma geométrica de las pulsaciones de caudal obtenidas en el Fluid Power Centre son más regulares que las obtenidas en el laboratorio del LABSON. Los resultados obtenidos en el laboratorio de 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 pueden ser debidas a:

1. La bomba gerotor es una bomba cuyo nivel de presión en impulsión es inferior a 0.6 MPa. En el banco de ensayos del laboratorio del LABSON la precisión alcanzada en la medición de la presión instantánea (señal temporal) estaba limitada por la presencia de un “ruido eléctrico” (generado por nuestro sistema de medición).
2. La incorporación de un circuito secundario de sobrepresión, tal como se dispone en el Fluid Power Centre, permite un proceso de filtrado de la señal más eficaz, en particular, cuando la bomba gerotor gira a bajas revoluciones.
3. Diferencias en el acoplamiento de la tubería rígida con la brida de impulsión de la bomba en ensayo en los bancos de ensayo. En particular, la conexión a la salida de impulsión a la tubería instrumentada con los transductores de presión difieren considerablemente (véase Fotografía 6.2 y Fotografía 6.9).
4. Diferencias en el tratamiento numérico de las señales temporales. Las señales de los transductores de presión están sometidas a un tratamiento numérico complicado. El proceso a seguir es:
 - a. Lectura de la señal de pulsación de presión mediante los transductores de presión en [pC] en dominio temporal
 - b. Amplificación de la señal de pulsación de presión mediante los amplificadores de carga y transformación a [V d.c.] en dominio temporal
 - c. Adquisición de la señal de pulsación de presión mediante el osciloscopio digital en [V d.c.] en dominio temporal
 - d. Transformación de la señal de presión del dominio temporal al dominio frecuencial
 - e. Tratamiento matemático complejo de la señal de presión en dominio frecuencial para el cálculo de la impedancia de la fuente y la pulsación de caudal de la fuente

Así, la señal temporal registrada requiere de un filtraje para llegar a identificar los armónicos fundamentales. Se considera que la metodología desarrollada en el Fluid Power Centre está más perfeccionada y ésta podría ser también una de las razones que justifican, en cierta medida, la discrepancia de resultados.

PARTE D

6.7 ANÁLISIS COMPARATIVO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos fundamentales de este apartado es validar el modelo de simulación desarrollado en el Capítulo 5 mediante un estudio comparativo entre los resultados obtenidos de la explotación numérica del modelo de simulación y los resultados experimentales obtenidos en el Fluido Power Centre y el laboratorio del LABSON.

La metodología de simulación expuesta en el Capítulo 5 utilizando los valores de los parámetros básicos del engranaje de perfil trocoidal de la bomba gerotor ensayada (Tabla 6.5), han permitido obtener los resultados que se muestran a continuación.

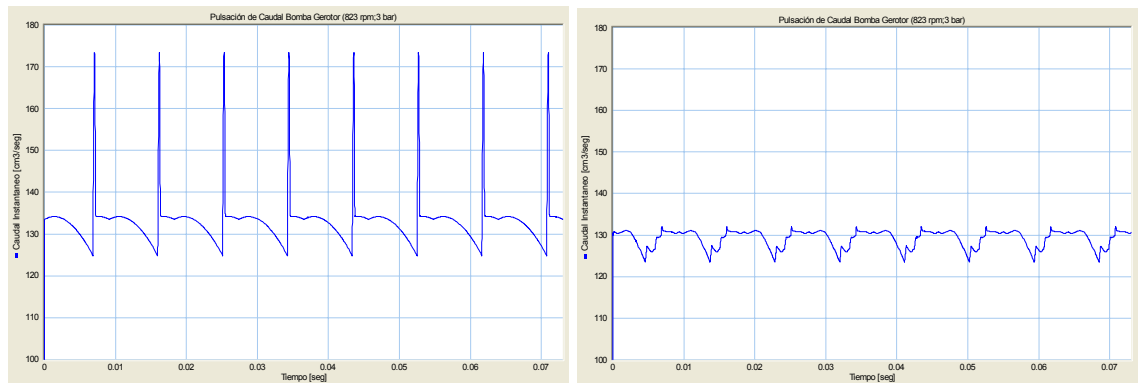


Figura 6.17. Resultados de la pulsación de caudal 'ideal' (izquierda) y la pulsación de caudal con $Q_{f,total}$ (derecha). Velocidad de rotación en ensayo de 823 rpm y presión de ensayo 3 bar

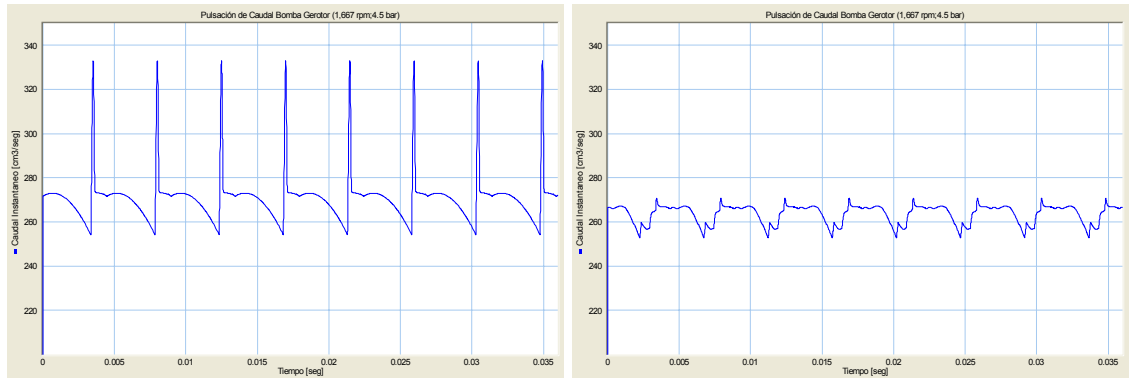


Figura 6.18. Resultados de la pulsación de caudal 'ideal' (izquierda) y la pulsación de caudal con $Q_{f,total}$ (derecha). Velocidad de rotación en ensayo de 1,667 rpm y presión de ensayo 4.5 bar

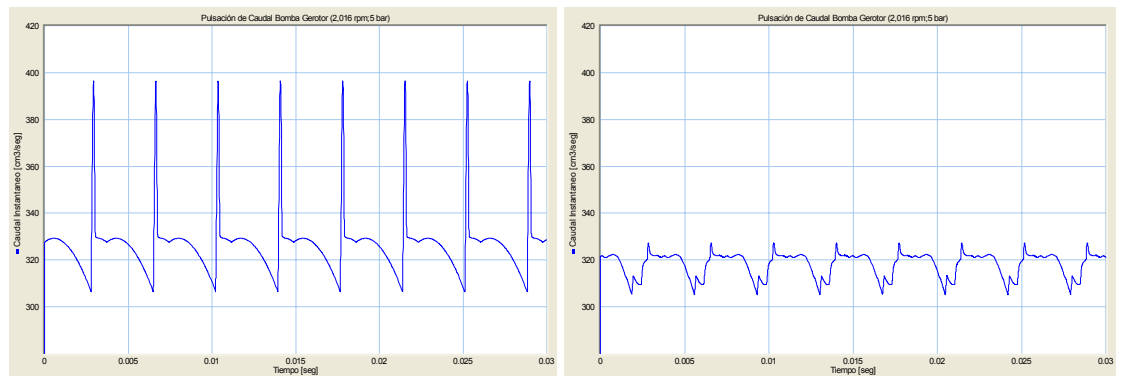


Figura 6.19. Resultado de la pulsación de caudal 'ideal' (izquierda) y la pulsación de caudal con $Q_{f,total}$ (derecha). Velocidad de rotación en ensayo de 2,016 rpm y presión de ensayo 5 bar

En Figura 6.17, 6.18 y 6.19 izquierda se muestran las pulsaciones de caudal obtenidas mediante simulación para una bomba gerotor considerada ideal (sin fugas) funcionando de acuerdo con los requisitos indicados en la Tabla 6.6. La capacidad volumétrica teórica de la bomba gerotor ‘ideal’ es de $9.8 \text{ cm}^3/\text{rev}$.

En Figura 6.17, 6.18 y 6.19 derecha se muestran los resultados numéricos obtenidos con el modelo de simulación completo, bajo las mismas condiciones operativas.

En la Tabla 6.7 se resumen algunos de los parámetros más significativos.

Velocidad de Ensayo [rpm]	Presión de Ensayo [bar]	Caudal Medio Impulsado [cm^3/seg]	Caudal Máximo [cm^3/seg]	Caudal Mínimo [cm^3/seg]	Irregularidad del Caudal [%]	Capacidad Volumétrica Media [cm^3/rev]
823	3	128.75	131.94	123.47	6.57	9.386
1,667	4.5	263.93	270.71	252.74	6.81	9.499
2,016	5	317.88	327.31	305.27	6.93	9.461

Tabla 6.7. Parámetros más significativos de los resultados de la simulación

Para validar cualquier resultado, experimental o numérico, es necesario disponer de un patrón de medida como referencia. En muchas situaciones, se toma como patrón de referencia, la medida experimental directa de una magnitud, información que se complementa con la precisión de la misma.

En el caso que se presenta en esta tesis, se ha encontrado que no se dispone del patrón de referencia, habida cuenta que la pulsación de caudal medida experimentalmente se obtiene por vía indirecta. Se ha descrito que la pulsación de caudal se obtiene a partir de las medidas de la presión instantánea en tres puntos a lo largo de una tubería y por la posterior aplicación de un algoritmo de cálculo que implica una extrapolación de resultados en base a un determinado ajuste (lineal o no lineal, en función del comportamiento dinámico asumido).

Por otra parte, la modelización teórica desarrollada en esta tesis para una bomba gerotor contempla una serie de simplificaciones que se apartan del prototipo de bomba en su funcionamiento real. 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 (tolerancias de montaje y funcionamiento).

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 consecuencia, cabe esperar que la pulsación de caudal obtenida por simulación resulte ser ligeramente diferente en forma y con una amplitud superior a la que tendría una bomba prototipo real.

A pesar de todo ello, a continuación se muestra un análisis comparativo entre los resultados de la simulación y los obtenidos por vía experimental tomando en consideración dos aspectos cualitativos: el aspecto geométrico o forma de la onda de la pulsación de caudal y la amplitud máxima pico a pico de la onda. En la Figura 6.20, Figura 6.21 y Figura 6.22 se muestran superpuestos los resultados obtenidos. Para destacar y poder comparar con mayor detalle la componente pulsante del caudal instantáneo generado por la bomba gerotor, sólo se han representado las variaciones del caudal instantáneo respecto al valor medio.

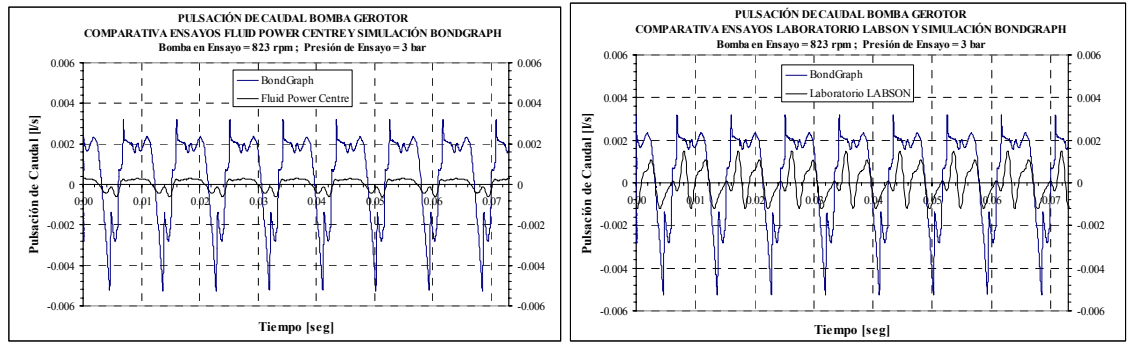


Figura 6.20. Comparativa de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre, laboratorio del LABSON y simulación mediante BondGraph a velocidad de rotación en ensayo de 823 rpm y presión de ensayo 3 bar

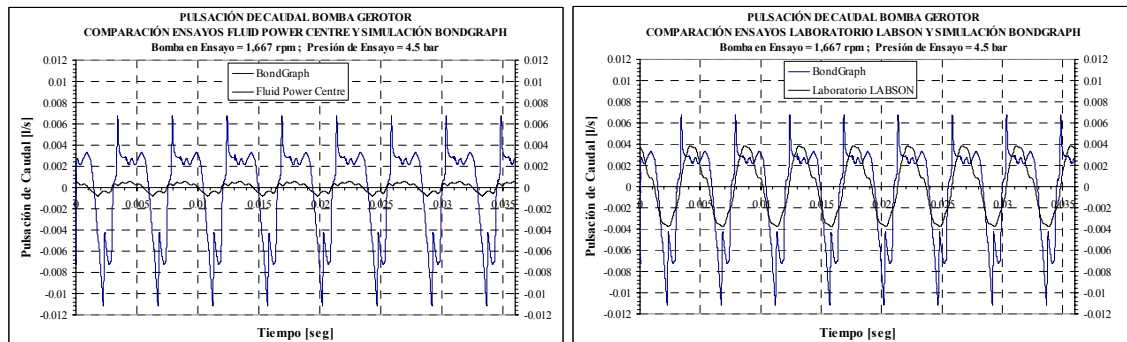


Figura 6.21. Comparativa de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre, laboratorio del LABSON y simulación mediante BondGraph a velocidad de rotación en ensayo de 1,667 rpm y presión de ensayo 4.5 bar

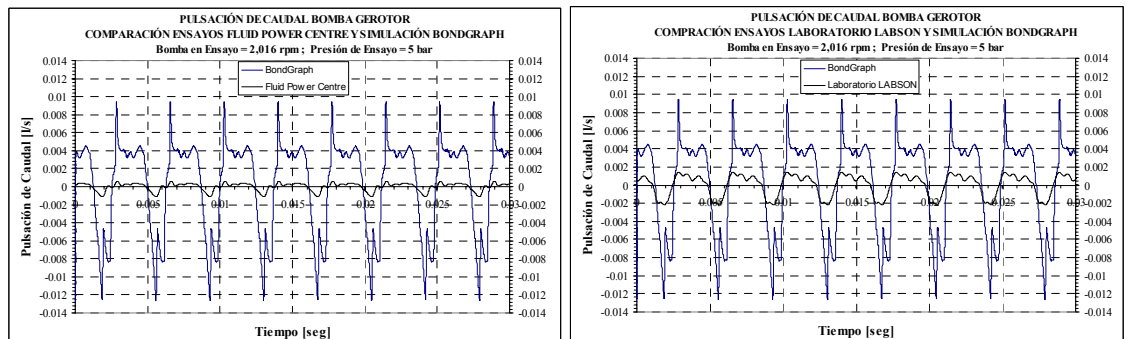


Figura 6.22. Comparativa de pulsación de caudal mediante el método de la fuente secundaria en el Fluid Power Centre, laboratorio del LABSON y simulación mediante BondGraph a velocidad de rotación en ensayo de 2,016 rpm y presión de ensayo 5 bar

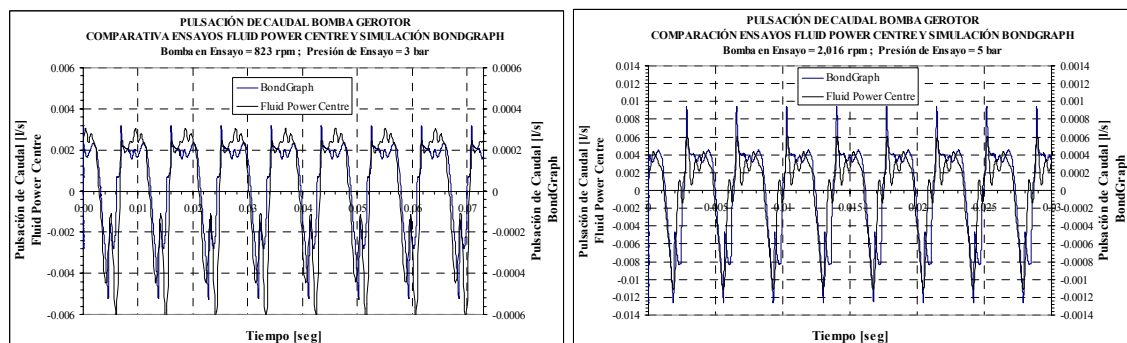


Figura 6.23. Comparativa de la pulsación de caudal entre los resultados del Fluid Power Centre y la simulación mediante BondGraph

En la Figura 6.23 se muestran ampliadas a diferente escala las pulsaciones de caudal correspondientes a los resultados obtenidos para la bomba gerotor, tanto experimentales (Fluid Power Centre escalado [± 0.006 y ± 0.014]) como numéricos (simulación BondGraph escalado [± 0.0006 y ± 0.0014]) y para altas y bajas velocidades de accionamiento.

La coincidencia en el aspecto geométrico de las curvas es evidente. En la Figura 6.24 se muestran las amplitudes (pico a pico) en función de la velocidad de accionamiento y de la presión de ensayo de los resultados correspondientes a las pulsaciones de caudal para las mismas condiciones de funcionamiento.

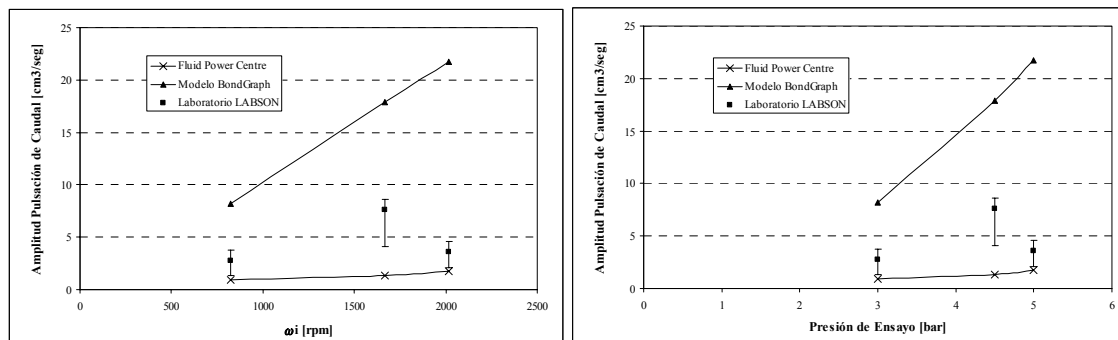


Figura 6.24. Amplitudes pico a pico de la pulsación de caudal en función de la velocidad de accionamiento y de la presión de ensayo

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.

Los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo de simulación con relación a la presencia de las ranuras de descompresión, permite estimar reducciones de amplitud superior al 50%. La contrastación definitiva de esta estimación es un reto a alcanzar a corto plazo.

A la vista de estos resultados cabe concluir:

- 1º. El modelo desarrollado en base al método de BondGraph tiene un enorme potencial cuando se desea evaluar al comportamiento dinámico de una bomba gerotor, incluidas las pulsaciones de caudal.
- 2º. 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. Se entiende que en el montaje del laboratorio del LABSON caben realizar ciertas mejoras y pulir 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) correspondientes a 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.