

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE ACUMULADORES ANTIPOGO

Autores: Lavirgen Juan D. y Mantelli Pablo M.

Calle 116 e/ 47 y 48 - La Plata (1900) - Buenos Aires - Argentina
juandiego.lavirgen@ing.unlp.edu.ar

1 Introducción

Los sistemas de transporte de fluidos en instalaciones a través de cañerías están presentes en la mayoría de las obras ingenieriles actuales. En general, el diseño de estos está destinado a proveer eficiencia en uno o más regímenes estacionarios. No obstante, es necesario verificar el diseño de los mismos para no sucumbir ante las sollicitaciones dinámicas que se puedan presentar cuando estos sistemas están expuestos a condiciones no estacionarias. En la industria aeroespacial, la necesidad de reducir el peso propio hace que las vibraciones estructurales generen apartamientos alrededor del equilibrio de los componentes estructurales e incluso de los conductos de fluidos. Por otro lado, la naturaleza vibratoria de los sistemas de propulsión es el mayor agente de excitación de los distintos componentes. Las máquinas rotantes son capaces de generar vibraciones estructurales de las cañerías y también ondas de presión en el líquido que transportan. La cercanía de las frecuencias naturales de los modos elásticos y de las ondas de presión que viajan por los conductos puede amplificar los apartamientos de los elementos y generar daños en la integridad global del vehículo. En particular el llamado fenómeno de POGO es el efecto dinámico que ocurre cuando en un lanzador satelital se solapa un modo de vibrar estructural con un modo de vibrar del fluido alojado en el piping de propulsión. Las oscilaciones de cualquiera de estos alimenta al motor o a la bomba de manera oscilatoria y alguno de estos últimos realimenta al sistema haciendo resonar al conjunto.

El análisis para evidenciar éste fenómeno fue presentado por Rubbin[1]. En el mismo, el autor separa los sistemas estructural y fluidodinámico. El primero se estudia considerando la masa del elemento y la masa del fluido contenido. Luego, el sistema de propulsión se analiza a partir de un modelo de segundo orden en el cual las variables de estado son la presión en puntos discretos y el desplazamiento de un volumen de fluido llamado caudal en peso. Para cada componente del sistema se establece una ecuación entrada vs salida en la cual se consideran los desplazamientos de las masas representadas en estado sólido y líquido. La finalidad de esta investigación es estudiar el acoplamiento de los modos elásticos y de fluidos en cada componente. En el presente documento se continúa con los trabajos de Logarzo[2] y Lavirgen[3], en los cuales se introdujo la problemática y se realizaron algunos ensayos, respectivamente. En particular, a continuación se presentan el análisis teórico, y el método experimental para validar la dinámica del acumulador. Este dispositivo oficia de amortiguador del flujo que lleva combustible de los tanques a la alimentación de las bombas presurizadoras de motores.

2 Experimentación

A lo largo del texto se encontrará la formulación teórica de la función de transferencia del acumulador sin entrar en detalle de la demostración de cada parámetro. Para entender el significado físico de los coeficientes temporalmente independientes, se recomienda recurrir al

texto de Rubbin [1]. Luego se presentará el método experimental utilizado para validar dichos coeficientes y el modelo mecánico análogo que facilita la comprensión del sistema. Por último se discutirá la comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

2.1 Elemento acumulador - Modelo numérico

Entre los dispositivos que componen al sistema de propulsión, el acumulador es el encargado de mitigar los cambios bruscos de presión en el mismo, es decir que actúa como un amortiguador de presiones y caudales. En este caso es el único elemento que posee una cantidad de gas definido adrede en conformidad con la dinámica que deba caracterizarlo. Ante la presencia de cambios de presión, este gas se comprime o expande, acumulando o proveyendo el volumen de fluido necesario para igualar la presión en la línea principal. Luego, el amortiguamiento del fenómeno queda definido por las características de la conexión del conducto con la línea principal y sus características de fricción.

En el modelo utilizado las variables de estado son las perturbaciones de presión en la línea principal y en el acumulador, p_i y p_j respectivamente, y el desplazamiento del peso que ingresa o egresa del acumulador $w_{ac}[N]$. El concepto de caudal en peso se introduce para poder establecer la masa desplazada que luego será comparada con la masa del modelo elástico del sistema estructural. La primera derivada de esta variable puede entenderse como la multiplicación del caudal volumétrico por la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad.

$$\dot{w}_{ac} = \text{caudal volumetrico} * \rho * g, \quad [N] \quad (1)$$

De esta manera, el desplazamiento en peso queda definido como un parámetro de desplazamiento de masa. Como tal, es posible también establecer la primera y la segunda derivada del mismo y asociar a ella coeficientes constantes correspondientes con la inercia (oposición al cambio) y a la resistencia (disipación).

$$p_i - p_j = R \cdot \dot{w}_{ac} + I \cdot \ddot{w}_{ac} \quad (2)$$

$$\text{Si } p_j = K \cdot w_{ac}$$

$$p_i = I \cdot \ddot{w}_{ac} + R \cdot \dot{w}_{ac} + K \cdot w_{ac} \quad (3)$$

Los términos de inercia y disipación están definidos como Inertancia I y Resistencia R respectivamente. El primero de ellos surge de integrar la inversa de la sección del conducto a lo largo del mismo y dividirlo entre g . El segundo está definido por Rubbin[1] como los mismos términos de pérdida de carga por accesorios y reducción de áreas que en un estudio convencional de mecánica de fluidos, teniendo en cuenta que en este caso la densidad está multiplicada por la aceleración de la gravedad.

$$I = \int_0^L \frac{dx}{A(x) \cdot g}, \quad \left[\frac{s^2}{m^2} \right] \quad (4)$$

$$R = \frac{\dot{w}_s^2}{2 \cdot \rho g} \left(\frac{1}{A_i^2} - \frac{1}{A_j^2} \right) + \Delta P_{friccion}, \quad \left[\frac{s}{m^2} \right] \quad (5)$$

$$K = \frac{\gamma P_{reg}^2}{\rho g P_{ac} V_{ac}} \frac{T_{ac}}{T_{reg}}, \quad \left[\frac{1}{m^2} \right] \quad (6)$$

El seteo de éste último parámetro se establece desde el diseño y armado del sistema de presurización. En la ecuación 6 se puede ver que tanto la presión de régimen en la línea, P_{reg} ,

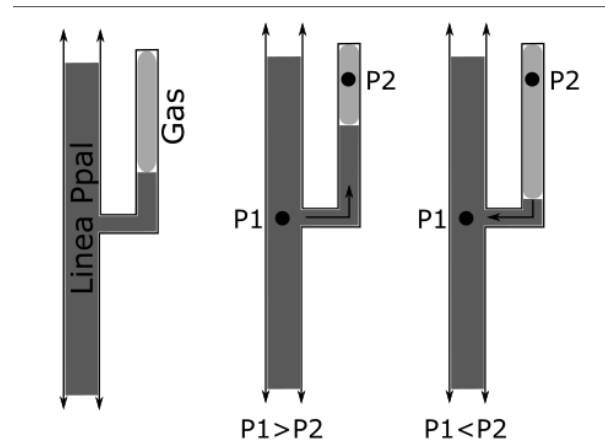


Figure 1: Esquema del acumulador y las presiones y caudales en peso actuantes.

la presurización del acumulador (previa a la conexión de éste con la línea principal) P_{ac} y el volumen del mismo (en esa situación) V_{ac} , son los encargados de definir la masa de gas en el recinto. Las temperaturas T_{ac} y T_{reg} corresponden a las del gas almacenado en las condiciones previa a la conexión y durante el régimen. Estas serán distintas en el caso de utilizar criogénicos por ejemplo.

Una vez definidos los parámetros, podemos ver, con ayuda de la ecuación 3 la relación entre las perturbaciones de presión de entrada p_i y el caudal en peso del acumulador w_{ac} . Aplicando la transformada de Laplace y despejando la relación $\frac{w_{ac}(s)}{p_i(s)}$ obtenemos la función de transferencia de la relación.

$$\frac{w_{ac}(s)}{p_i(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + R \cdot s + K} \quad (7)$$

2.2 Ensayo de validación

Las características dinámicas del acumulador están representadas por los parámetros inercia, disipación y rigidez. Como se introdujo previamente cada uno de ellos cuenta con una dependencia directa de los valores de prearmado de la línea. No obstante existen algunos valores que pueden o no modificarse según la influencia que tienen los elementos conectados con el acumulador. Con el fin de evaluar la influencia del conducto de conexión Línea-Acumulador, se realizará un ensayo del mismo trabajando en frecuencia y en estados no estacionarios. Los objetivos de estos ensayos son en particular:

- 1) Validar la frecuencia natural del sistema acumulador.
- 2) Determinar los conductos que más influencia tienen en la dinámica del acumulador.
- 3) Formalizar la secuencia de armado del sistema para setear la frecuencia natural.

2.2.1 Arreglo experimental

Se procedió a la construcción de un modelo experimental que permita variar en frecuencia la presión seteada en la entrada del sistema y de esta manera excitar la columna de agua confinada en el acumulador con el fin de caracterizar la dinámica de la misma. El esquema general del arreglo experimental se muestra en la figura 2.

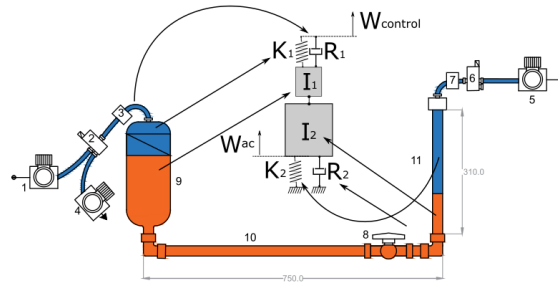


Figure 2: Modelo mecánico y arreglo experimental.

2.2.2 Metodología

La secuencia de armado del sistema consiste en la sintonización del acumulador y la corrida en frecuencia. Para sintonizar el acumulador se debe aislar el mismo a una presión determinada, usualmente la atmosférica. En esta situación la masa de gas alojado es igual a $m_{gas} = P_{ac}V_{ac}$. Luego, se aísla el acumulador de la fuente de presión de manera de que la masa de gas permanece constante. Posteriormente se presuriza el conducto principal hasta una presión P_{sup} . Cuando se abre la válvula de puerto 8, las presiones se igualan y el volumen de gas alojado en el acumulador es $V_1 = P_{ac}V_{ac}/P_{sup}$ y la columna de agua que ingresa es igual a $Long_1 = (V_{ac} - V_1)/A_{ac}$. El ensayo consiste en realizar un barrido en frecuencia del aumento y disminución de la presión de entrada. Esto se logra canmutando el conducto del reservorio entre presiones mayores y menores con el accionamiento de la electroválvula 2.

Para altos rangos de frecuencia, el Δt de cierre y apertura no es suficiente para que las secuencias de inflado y desinflado alcancen los niveles de P_{sup} y P_{inf} , en cambio la presión reinante, denominada presión de regimen P_{reg} se mantiene en un nivel cercano al promedio entre ambas. Este valor depende de la resistencia por fricción que posean los conductos de inflado y desinflado ya que la misma condiciona la forma de las señales de presión. Para esta situación, el volumen de gas del acumulador será:

$$V_{reg} = P_{ac}V_{ac}/P_{reg} \quad (8)$$

y la longitud de columna de agua:

$$L_{reg} = (V_{ac} - V_{reg})/A_{ac} \quad (9)$$

Por otro lado, la presión del gas en el acumulador seguirá la dinámica del mismo y es el dato que nos interesará obtener para validar el modelo. La analogía mecánica planteada propone que la dinámica del sistema será de segundo orden oscilatorio si R_2 es lo suficientemente pequeña. En el caso de que la misma aumente, ésta será de primer orden. El proceso de validación del modelo consiste en configurar el sistema definiéndole una frecuencia natural a partir de

$$w_n^2 = \frac{K_1 + K_2}{I_1 + I_2} \quad (10)$$

en donde cada parámetro surge de las ecuaciones 4, 5 y 6 aplicadas a las condiciones particulares:

$$I_1 = \frac{L_{rec}}{A_{rec} \cdot g} \quad I_2 = \frac{L_{reg}}{A_{ac} \cdot g}$$

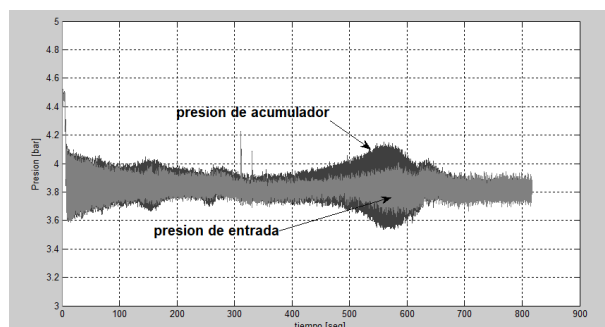


Figure 3: Señales adquiridas para $P_{ac} = 3$ y $P_{reg} = 3.8$.

$$K_1 = \frac{\gamma P_{reg}^2}{\rho g P_{sup} V_{sup}} \quad K_2 = \frac{\gamma P_{reg}^2}{\rho g P_{ac} V_{ac}}$$

Para las cuales, L_{rec} y A_{rec} son la columna de agua y el area transversal del recipiente mayor y V_{sup} es el volumen de gas presente en la parte superior de este reservorio cuando reina la presión de armado P_{sup} . Luego, cuando el sistema responde a diferentes frecuencias, la mayor amplificación de la relación presión de acumulador vs presión de entrada, delatará al punto de pulsación natural. Para realizar esta verificación, se realizan varias corridas en las que se aumenta la frecuencia de entrada a razón de 0.01 Hz por segundo y se adquieren las señales de presión de las cuales se evaluará el espectro.

3 Resultados y discusión

En el gráfico de la 3 se presenta la adquisición de presión de entrada y de acumulador para una corrida desde $0.5Hz$ a $10Hz$ aumentando la frecuencia a una tasa de $0.01Hz$ por segundo. En bajas frecuencias, ambas señales tienen un mayor valor pico-pico dado que el tiempo de conmutación de la válvula de control es menor y los niveles de presión se acercan más a P_{inf} y P_{sup} . Al aumentar la frecuencia el valor de la presión de entrada oscila alrededor de P_{reg} seteando al acumulador en niveles de I_2 y K_2 particulares. Nuestra primera conclusión, entonces, será que el sistema no está sintonizado de la misma manera según la frecuencia sea alta o baja. Existe de cierto modo, una amplificación de la relación de señales en baja frecuencia, durante el segundo minuto de ensayo y antes del tercero, que sugiere la aparición de un modo natural para esta configuración. La verificación del mismo no fue posible, quizás por el elevado nivel de amortiguamiento que presenta el caso durante éste régimen.

La presión de régimen de alta frecuencia se consideró en este caso de 3.8bar siendo la P_{sup} de 4.5 bar y la P_{inf} de 2 bar. En este caso, el análisis de amplificación de señales y de espectro de su relación evidenció una frecuencia de resonancia de $9.33Hz$ mientras que el cálculo teórico por la ecuación 10 resultó un valor de $9.05Hz$. A posteriori del pico resonante, la amplitud de la presión en el acumulador disminuye muy por debajo de la amplitud de la señal de entrada, verificando que ya no es posible acompañar esos niveles de cambio y la actuación del acumulador como filtro pasa bajos.

Para verificar la repetitividad de la coincidencia entre frecuencias teóricas y experimentales se realizaron un total de 6 corridas en diferentes configuraciones. Con éste análisis se evidenció que la longitud de fluido utilizada para determinar I_2 en la ecuación 10 debe incluir la longitud del conducto 10 de la figura 2, ya que su sección es igual a la del acumulador y no se podría definir un comienzo y un final, matemáticamente hablando, de este elemento. Es evidente entonces que en este caso la longitud de éste conducto fijará el orden de magnitud de la inercia del sistema

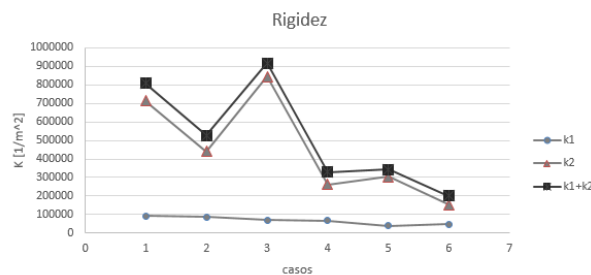


Figure 4: Valores de rigidez para los casos ensayados.

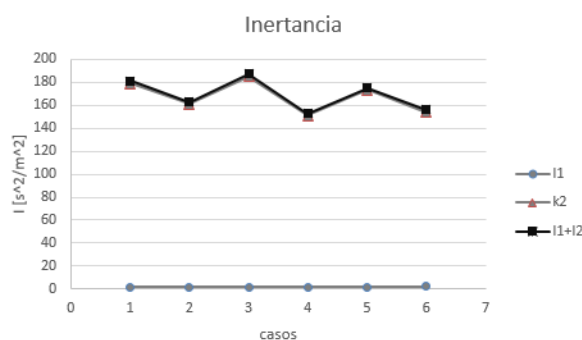


Figure 5: Valores de inercia para los casos ensayados.

ya que por sí solo, aporta una inercia de $150[\frac{s^2}{m^2}]$ mientras que el acumulador no sumará más de $35[\frac{s^2}{m^2}]$. Por otro lado, los valores de inercia I_1 son constantes debido a que el área del reservorio 9 es mucho mayor que el área del acumulador.

Los valores de K e I del arreglo están en las figuras 4 y 5. En estas gráficas es evidente que el reservorio no aporta valores de inercia considerables a la hora de realizar una primera estimación del primer modo del sistema. No obstante, los valores de rigidez, si bien se diferencian de los del acumulador, están en el mismo orden de magnitud si la relación P_{ac}/P_{sup} es mayor al 60%. Observar que estas dos magnitudes son las que definen las elasticidades K_1 y K_2 en conjunto con la misma presión de régimen P_{reg} en la ecuación 6. La figura 6 presenta los valores de frecuencia medidos experimentalmente y sus pares teóricos. A excepción de los casos 3 y 6, todos los pares guardan una coincidencia con error menor al 10%, mientras que el universo presenta la misma tendencia general: las frecuencias tienden a bajar con la disminución de la rigidez. Este hecho está íntimamente conectado con el aumento de relación P_{ac}/P_{reg} , puesto que se permite menor columna de agua en acumulador, y más volumen de gas.

A partir de estos ensayos se logró verificar, en primera instancia, que los métodos de cálculo de inercia y rigidez propuestos por son válidos en geometrías simples y en frecuencias de hasta 14 Hz.

4 Conclusiones

La dinámica del elemento acumulador puede linealizarse en un sistema de segundo orden. Los parámetros de la ecuación característica de éste son dependientes del estado de régimen del sistema en general. Durante el régimen estacionario del sistema, se logró validar el cálculo de

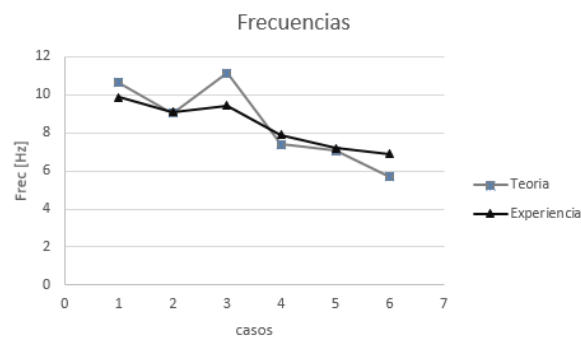


Figure 6: Comparacion de frecuencias adquiridas y calculadas para los casos ensayados.

Inertancia y Rigidez propuesto por Rubbin [1]. Además se identificó que las longitudes a tenerse en cuenta en estos cálculos están definidas por los cambios de área de la sección, ya que éste parámetro juega un rol importante en los coeficientes. En segundo lugar, hemos verificado que el orden de magnitud de la rigidez está definido por la presión de régimen P_{reg} y que los valores de P_{ac} y V_{ac} ajustan el valor fino de la misma. Las últimas dos conclusiones intuyen que la sintonización del acumulador está más ligada a los niveles de presión que se utilicen en el sistema y a la diferencia de áreas entre acumulador y conducto principal.

A partir de los ensayos realizados se entiende que la secuencia de armado y sintonización del acumulador puede llevarse a cabo en dos etapas: pre-presurización del acumulador P_{ac} , obtenido a partir de los cálculos de frecuencia. Y apertura de la válvula de puerto 8 de la 2. La seguridad del elemento depende de las variaciones de presión que se presenten en la línea principal. Por lo general, no se espera que existan sobresaltos de presión descendentes en la misma, que lleven a la condición $p_j > p_i$ con el posterior traspaso de gas a la línea principal. Durante los ensayos, se pudo observar que durante la resonancia, el batido del fluido dentro del acumulador genera pequeñas nucleaciones de gas en el fluido. No se detectó que estas pequeñas burbujas alcancen al conducto principal. De ser esto factible, se recomienda utilizar una membrana que aisle gas y fluido. En caso de utilizar esta solución, será necesario tener en cuenta la masa, rigidez y amortiguamiento de la misma en los cálculos de frecuencia.

References

- [1] S. Rubin and B. Oppenheim. Advanced Pogo Stability Analysis of Liquid Rockets. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1993.
- [2] Logarzo and Scarabino. Analisis de Pogo en un cohete de combustible líquido. *2do Congreso de Ingeniería Aeronáutica*, 2012.
- [3] Lavirgen and Scarabino. Estudio experimental de sistemas acumuladores antipogo. *4to Congreso de Ingeniería Aeronáutica*, 2016.