



ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL CICLO DE ACTIVIDAD EN LA INYECCION PULSADA DE AIRE COMO ELEMENTO DE CONTROL DE FLUJO

I. Echapresto Garay^{a, b}, M. García Saíenz^a

^aUIDET LaCLyFA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47 (B1900TAG) La Plata, Argentina. <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar/>

^bBecario de la Universidad Nacional de La Plata.

Palabras claves: Inyección pulsada, ciclo de actividad, control.

Resumen

En este trabajo se realizaron ensayos de inyección pulsada de aire en una cavidad cúbica de 10 cm de lado para intentar determinar experimentalmente el efecto del ciclo de actividad de la onda cuadrada que gobierna la señal de inyección sobre las presiones medidas en la pared opuesta al chorro de aire y el caudal de inyección.

El aire se inyectó a través de un orificio centrado en una cara de la cavidad enfrentada a la pared donde se ubicaron las tomas de presión. Se establecieron las condiciones del flujo en 6 bares de presión, 4 litros por minuto de caudal, 5 valores de frecuencia (5, 10, 15, 20 y 25 Hz) y 3 ciclos de actividad (20, 50 y 80%) para cada frecuencia.

Se encontró que el ciclo de actividad afecta inversamente a los valores pico de presión medidos en la pared opuesta a la descarga y a los valores de caudales de inyección, ya que, a menor ciclo de actividad, estos fueron mayores.

Estos resultados indican el potencial de la variación del ciclo de actividad en la utilización de sistemas de control activo con inyección de aire, ya que se obtienen mejores características y son menos costosos que aquellos de frecuencias mayores.

Luego a partir de las mediciones realizadas se calcularon valores de velocidad y radio de dispersión para comparar la teoría de chorro continuo con los datos experimentales de chorro pulsante.

Para las velocidades se observaron discrepancias entre los resultados del ensayo y los valores analíticos, pero se atribuyen a la naturaleza de la inyección, ya que ésta es pulsante y la teoría utiliza inyección continua. De esta manera se puede asumir que las velocidades calculadas a partir de inyección pulsante son aproximadamente 3 veces mayores que las velocidades obtenidas a partir de inyección continua de aire.

Por último, cuando se trata del radio de dispersión sucede algo similar a lo ocurrido con las velocidades ya que también se utilizó la teoría de chorro de aire turbulento, para ambos casos se obtuvo un factor de corrección para poder utilizar las ecuaciones planteadas para chorro continuo en el caso de que se utilice chorro pulsante.

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de los esfuerzos de los diseñadores de aviones tienden a reducir la resistencia debido a que de esta manera se logra un menor consumo de combustible y/o se puede incrementar la carga paga. Los mecanismos para lograrlo son varios, algunos de ellos se concentran en suavizar las formas externas de las aeronaves. Esto no es una tarea fácil y con algunos elementos del avión, como por ejemplo el tren de aterrizaje, se torna muy complejo. Entonces se presenta otra solución que es ocultarlos. En velocidad de crucero y a gran altura esto presenta muchos beneficios reduciendo la resistencia, pero en el despegue y en la aproximación, no hay otra alternativa que desplegar el tren de aterrizaje, lo que provoca un doble problema, por un lado, el tren mismo es una fuente grande de resistencia y por el otro, la cavidad que oculta el tren retraído ahora está expuesta a la corriente externa.

Una cavidad expuesta a un flujo de aire produce varios fenómenos aerodinámicos dependiendo de varios factores, como las dimensiones, la velocidad de la corriente libre, la interacción con el resto del fuselaje, etc. Pero se pueden agrupar en dos efectos para su estudio; uno es el aumento de la resistencia y el otro, es el efecto aeroacústico. Este último no solo genera molestias a los pasajeros y a los alrededores de los aeropuertos, sino que también puede afectar la estructura con fenómenos de resonancia.

La comprensión de los efectos aerodinámicos antes mencionados permite definir los procesos que los componen y determinar de qué manera revertirlos o utilizarlos en beneficio propio. Este último caso es el más aplicable, ya que resulta muy complejo revertir los fenómenos aerodinámicos y además las cavidades son indispensables, de esta manera los últimos esfuerzos de los investigadores se perfilan hacia el control del flujo en cavidades.

Los primeros trabajos sobre el estudio de cavidades se remontan a la década del 50, donde se empezaron a obtener mediciones de presión en las paredes para distintas relaciones de profundidad y largo [1], también se observó el fenómeno acústico [2]. Pero fue en el trabajo de Rossiter [3] en 1964 en donde se plantea un método para la medición de la frecuencia de los tonos producidos por el flujo de aire en cavidades abiertas, denominándose tonos de Rossiter o modos de Rossiter.

En 1990 un trabajo de la NASA recoge mucha información para aumentar la base de datos con mediciones de presión y velocidad [4], observándose entre otras cosas que existe menos inestabilidad en cavidades profundas para bajos números de Reynolds que en cavidades poco profundas.

En las últimas décadas los avances se dieron en las formas de control del flujo en cavidades. Según Cattafesta [5], se pueden clasificar las técnicas de eliminación de oscilaciones en cavidades en control pasivo y activo, luego el activo se divide entre lazo abierto y lazo cerrado, y este último puede ser estático o dinámico.

Trabajos con inyección pulsada de aire indican que se consiguen mejores resultados que cuando se utiliza inyección continua, Shaw [8, 9] sugiere que la magnitud de la disminución de los decibeles del efecto aeroacústico es función del caudal y de la frecuencia de pulsación. También muestra que se logra satisfactoriamente el control cuando se utilizan frecuencias de excitación un orden de magnitud mayor o un orden de magnitud menor a la del fenómeno.

Una de las líneas de investigación de la UIDET LaCLyFA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (con trabajos [6, 7], donde se estudia el efecto de la inyección de aire en cavidades), compone la fuente de experiencia directa para la realización del presente trabajo.

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos de inyección pulsada de aire en una cavidad cúbica de 10 cm de lado para intentar determinar experimentalmente el efecto del ciclo de actividad (de la onda cuadrada que gobierna la señal de inyección) sobre las presiones medidas en la pared opuesta al chorro de aire y el caudal inyectado.

1.1. Ciclo de actividad

Para definir el ciclo de actividad nos valemos de una onda cuadrada ya que nos permite explicarlo de manera más sencilla, pero puede ser aplicado a cualquier tipo de señal periódica.

Sea una onda cuadrada de periodo T y una duración t en la que está activa, ver [figura 1](#). Entonces se define el ciclo de actividad con la ecuación 1:

$$CA = \frac{t}{T} 100\% \quad (1)$$

Donde CA significa “ciclo de actividad”.

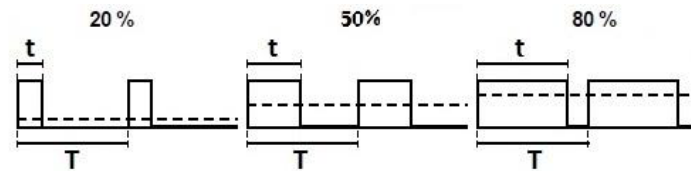


Figura 1: Ejemplos de ciclos de actividad en una onda cuadrada.

2. METODOLOGÍA

Se utilizó un modelo de cavidad de 5 paredes cuadradas de 10 centímetros de lado formando un cubo, es decir, una cavidad cúbica abierta en una cara. Dos de sus paredes son intercambiables de manera de realizar ensayos con distintos puntos de inyección de aire y distinta disposición de las tomas de presión; y una de las paredes es transparente para permitir la observación de los fenómenos fluido-dinámicos con algún método de visualización pertinente, como se aprecia en la [figura 2](#).

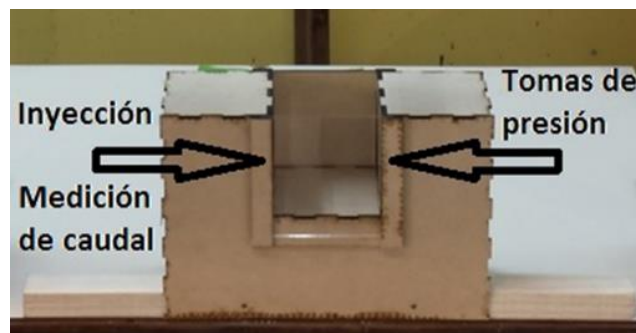


Figura 2: Modelo de cavidad.

Para el ensayo propuesto se utilizó una de las paredes intercambiables con un inyector de aire de 2 mm de diámetro interno centrado en la cara, como se ve en la [figura 3](#), y la otra pared intercambiable con tomas de presión de 1 mm de diámetro interno, como indica la [figura 4](#).

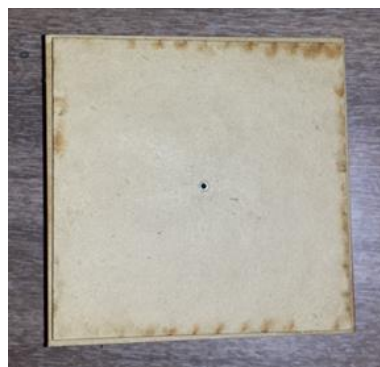


Figura 3: Pared intercambiable con inyector de aire centrado.

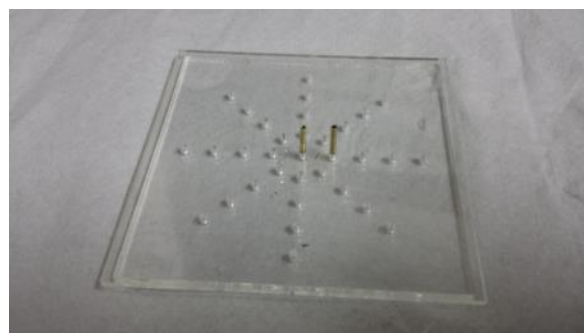


Figura 4: Pared intercambiable con orificios para las tomas de presión.

La distribución de las tomas de presión responde a la experiencia adquirida en investigaciones precedentes y también a la naturaleza del fenómeno que se intenta describir. Una distribución radial centrada en la pared de la cavidad permite obtener fácilmente parámetros del chorro de aire inyectado.

Los escáneres de presión se configuraron para adquirir a 500 Hz de frecuencia de muestreo durante 15 segundos, lo cual nos dio una cantidad de 7500 muestras y nos permitió ver fenómenos de hasta 250 Hz de frecuencia, con lo que se cubrió todo el rango de la electroválvula.

2.1. Resonancia en las mangueras de las tomas de presión

Para evitar el fenómeno de resonancia que puede ocurrir en las mangueras de las tomas de presión cuando se trata de una medición de presiones dinámicas se procedió a calcular la longitud de ellas utilizando la ecuación 2 [11, 12].

$$\cot\left(\frac{vL}{\alpha_0}\right) = \gamma \frac{V_v}{V_t} \left(\sigma + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{vL}{\alpha_0}\right) \quad (2)$$

Dónde:

v : frecuencia.

L : longitud de la manguera.

α_0 : velocidad del sonido media. $\alpha_0 = \sqrt{\gamma \frac{P_s}{\rho_s}}$

γ : coeficiente de dilatación adiabática del aire. $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

V_v : volumen del transductor de presión.

V_t : volumen de la manguera. $\pi r^2 L$

σ : factor adimensional del incremento de volumen del transductor de presión debido a la deflexión del diafragma.

k : constante politrópica de los volúmenes.

Cuando se cumple la igualdad expresada en la ecuación anterior existe resonancia en las mangueras y los datos obtenidos con el escáner de presiones presentan una atenuación en magnitud de los valores medidos y un desfase en tiempo respecto a la excitación, que afecta la interpretación del fenómeno físico en estudio.

De esta manera se procedió a calcular la longitud de resonancia (L) de las mangueras para un rango de frecuencias de 5 a 100 Hz y con distintos ciclos de actividad. Se observó que L no varía sustancialmente en función del ciclo de actividad, por esto en la [tabla 1](#) sólo se muestran los resultados obtenidos para un ciclo de actividad del 50%.

| Ciclo de actividad 50% | |
|------------------------|---|
| Frecuencia [Hz] | Longitud de resonancia de la manguera [m] |
| 5 | 108 |
| 10 | 54 |
| 15 | 36 |
| 20 | 27 |
| 100 | 27 |

Tabla 1: Longitud de resonancia de las mangueras de las tomas de presión.

Con esta información se definió la longitud de las mangueras que unen las tomas de presión de la cavidad con el escáner de presiones en 1 metro, ya que se encuentra un orden de magnitud debajo de la longitud mínima de resonancia y resulta suficiente para la evitar la incomodidad en la mesa de ensayo.

2.2. Equipamiento e instrumentación

A continuación, se detallan los equipos e instrumentos utilizados en el ensayo y el esquema de conexiones en la [figura 5](#):

- Electroválvula Festo, MHE3-MS1H-3/2G-1/8, rango: 0 – 250 Hz.

- Caudalímetro Festo, SFAB-10U-HQ6-2SA-M12, rango: 0,1 - 10 l/min.
- Caudalímetro Festo, SFAB-600U-HQ10-2SA-M12, rango: 6 - 600 l/min.
- Dispositivo DAQ multifunción de 14 bits, 48 kS/s, National Instruments, NI-USB-6009.
- Osciloscopio Tektronix, TBS1052B.
- Escáner de presiones Scanivalve Corp., DSA 3217 16Px, de 16 tomas de presión simultáneas.
- Sensor de presión Keller, PA-21Y /25bar/ 81554.33, rango 0 – 25 bar.
- Módulo de salida analógica de ± 10 V, 100 kS/s, 4 canales, National Instruments, NI-9263.
- Chasis NI compact DAQ USB de 4 ranuras, National Instruments, NI-cDAQ-9174

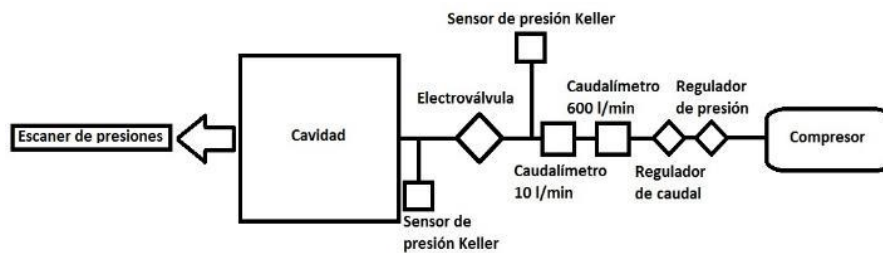


Figura 5: esquema de conexionado de equipos e instrumentos

2.3. Ensayos

El sistema de inyección de aire consistió de un compresor, un regulador de presión, una válvula manual, un regulador de caudal, dos caudalímetros (uno con un rango de 0,1 a 10 litros por minuto y el otro de 6 a 600 litros por minuto), una electroválvula y el inyector, todos conectados en serie, ver [figura 6](#) (aquí solo se muestra el caudalímetro de mayor rango) y [figura 7](#). Se fijó la presión en 6 bares, el caudal en 4 litros por minuto y se comparó la respuesta de los caudalímetros a distintas frecuencias de apertura de la válvula y a distintos ciclos de actividad.



Figura 6: Tablero de control de parámetros del flujo inyectado.

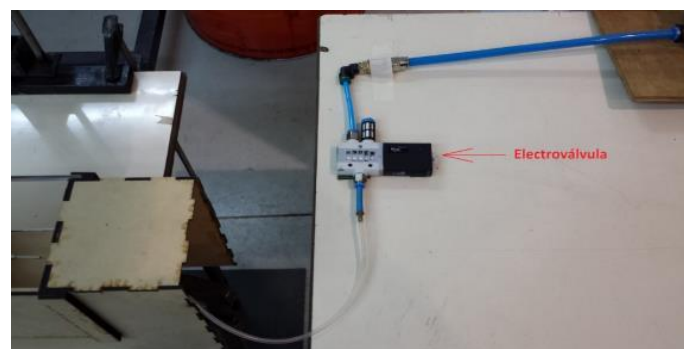


Figura 7: Electroválvula y manguera de inyección de aire conectada a la cavidad.

Resultados preliminares nos permitieron establecer el rango de frecuencias de inyección entre 5 y 25 Hz, ya que, para frecuencias mayores, las presiones observadas en la cara opuesta al inyector no indican una variación correspondiente con el modo de inyección, si no que se acercan a la respuesta que se observa con inyección continua.

Se puso especial atención en la sincronización de todos los equipos e instrumentos para lograr lecturas simultáneas y así descubrir si existía desfase entre las señales obtenidas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de presiones

Pudimos observar en un primer análisis que los valores pico de presión dependen del ciclo de actividad para una frecuencia fija, en la figura 8 se muestra el caso de inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad.

Comparando todos los casos analizados descubrimos que se obtienen valores pico mayores siempre a menor ciclo de actividad y también que para los casos de 50 y 80 % dichos valores se mantienen suficientemente constantes indicando que el fenómeno no depende de la frecuencia cuando el ciclo de actividad es alto. Esto se debe a la compresibilidad que tiene el aire y a que, a menor frecuencia y menor ciclo de actividad, el tiempo neto que la electroválvula permanece cerrada es mayor, lográndose mayor compresión. Este resultado es alentador, ya que indica que la aplicación de un sistema de control con estas características no resultará muy costosa en el sentido de complejidad mecánica y mantenimiento debido a las bajas frecuencias que logran mayores picos de presión. En la figura 9 se observan los valores pico de presión de todos los casos ensayados.

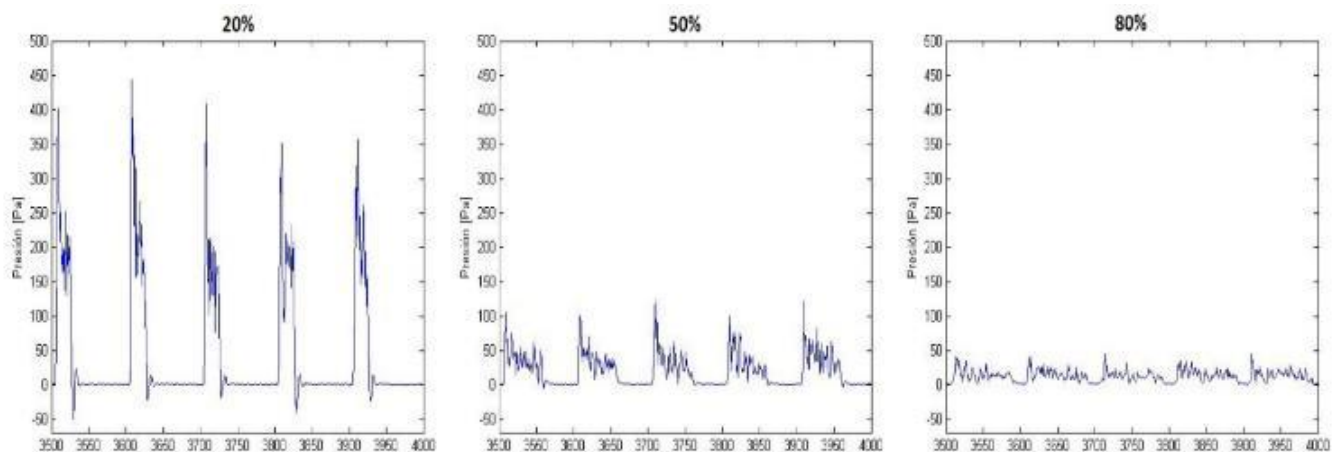


Figura 8: Presión vs. N° de muestra en la toma central.

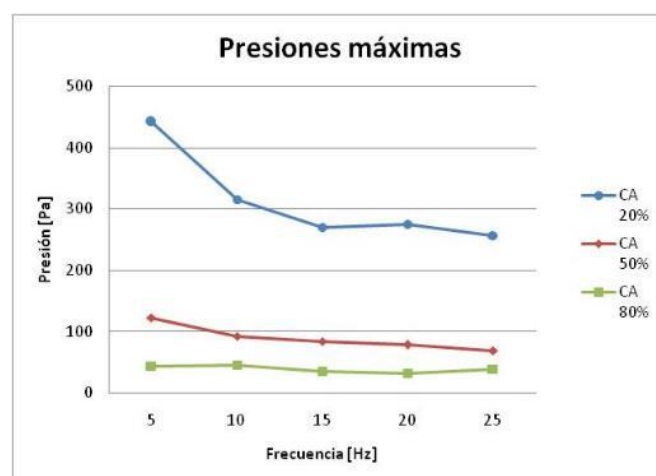


Figura 9: Valores máximos de presión.

3.2. Análisis de caudales

Los caudales medidos en la línea de inyección tienen un comportamiento análogo a las presiones de la cara opuesta al chorro, ya que responde a la forma de la excitación de la electroválvula. La [figura 10](#) muestra el caso de inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad.

Sin embargo, existe variación para todos los ciclos de actividad y todas las frecuencias, indicando que dichas dos variables son influyentes en el resultado final del valor del caudal. Aquí también se observa la influencia de la compresibilidad del aire aumentando los caudales para los casos de menor frecuencia y menor ciclo de actividad. En la [figura 11](#) se puede observar cómo evolucionan los valores máximos de caudal para las distintas frecuencias y ciclos de actividad.

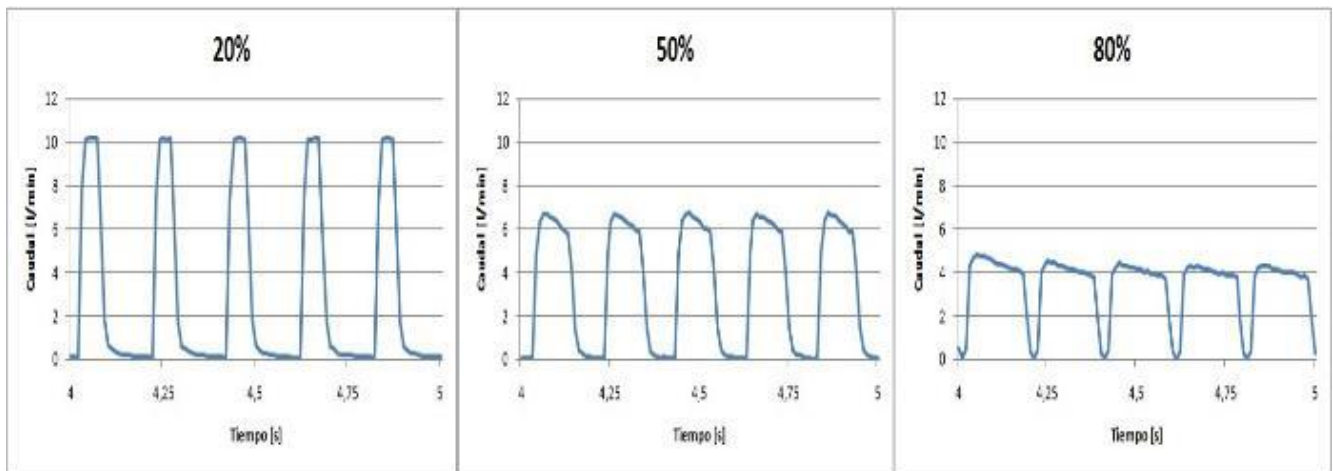


Figura 10: Caudal vs. tiempo.

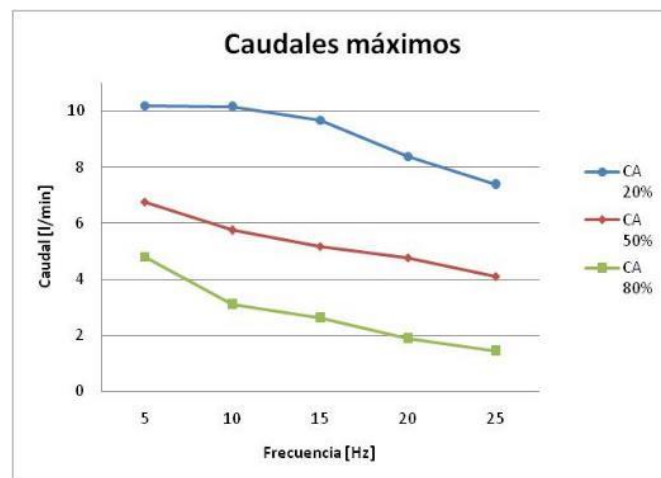


Figura 11: Valores máximos de caudal.

3.3. Análisis espectral

Con el método “FFT” (por sus siglas en inglés: *Fast Fourier Transform*, que se traduce como: transformada rápida de Fourier) se obtuvieron los espectros de las señales de los instrumentos utilizados para determinar si las frecuencias de las lecturas de los mismos se asemejaban a las de excitación. En las [figuras 12](#) y [13](#) se presentan dos ejemplos de espectro para el caso de inyección a 5 Hz y 20% de ciclo de actividad, el primer ejemplo es de la señal del caudalímetro y el segundo es de la señal de la toma 1 de la pared de presiones. En ellas se evidencia que los instrumentos utilizados respondieron a la excitación de la electroválvula ya que el pico de magnitud corresponde a la frecuencia utilizada para ese caso.

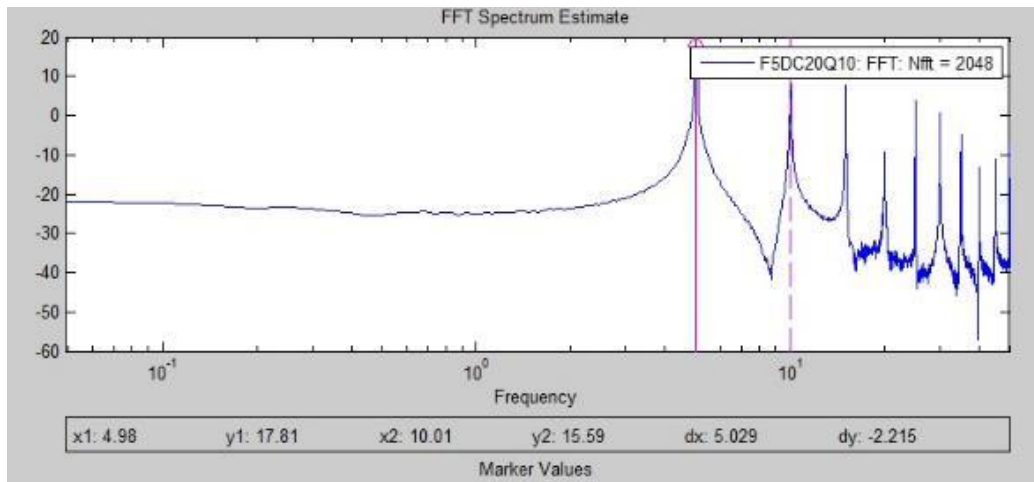


Figura 12: Espectro de la señal del caudalímetro de menor rango.

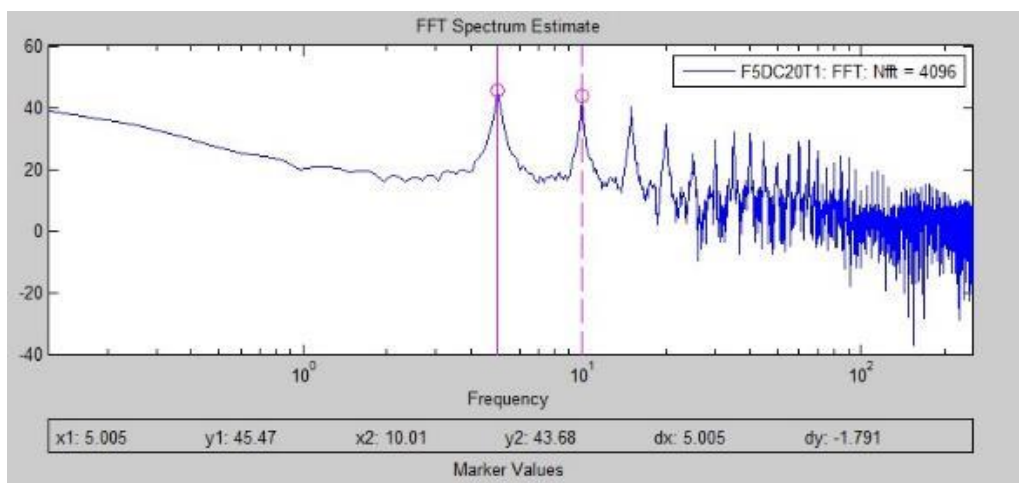


Figura 13: Espectro de la señal de la toma central.

En la [tabla 2](#) se muestran los valores obtenidos para todos los casos de frecuencia y ciclo de actividad.

| Electroválvula | | Caudalímetro | | Toma 1 del escáner de presiones | |
|-----------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| Frecuencia [Hz] | Ciclo de actividad [%] | Frecuencia [Hz] | Magnitud [dB] | Frecuencia [Hz] | Magnitud [dB] |
| 5 | 20 | 4,98 | 17,81 | 5,01 | 45,47 |
| | 50 | 4,98 | 12,87 | 5,01 | 37,35 |
| | 80 | 4,98 | 1,28 | 5,01 | 26,72 |
| 10 | 20 | 9,96 | 13,48 | 10,01 | 43,21 |
| | 50 | 9,96 | 10,84 | 10,01 | 36,55 |
| | 80 | 9,96 | 0,76 | 10,01 | 24,73 |
| 15 | 20 | 14,94 | 9,54 | 15,01 | 41,16 |
| | 50 | 14,94 | 5,66 | 15,01 | 35,00 |
| | 80 | 14,94 | 4,47 | 15,01 | 23,51 |
| 20 | 20 | 20,02 | 13,80 | 20,02 | 40,27 |
| | 50 | 20,02 | 9,60 | 20,02 | 34,59 |
| | 80 | 20,02 | 1,79 | 20,02 | 23,25 |
| 25 | 20 | 25,05 | 15,61 | 25,02 | 39,43 |
| | 50 | 25,05 | 8,60 | 25,02 | 33,52 |
| | 80 | 25,05 | 1,17 | 25,02 | 24,45 |

Tabla 2: Valores de frecuencia y magnitud del análisis espectral.

En la [figura 14](#) se graficaron los valores de la [tabla 2](#) para visualizar el aporte de energía que resulta en función de la frecuencia y el ciclo de actividad. Se puede observar que a menor frecuencia y ciclo de actividad las presiones y los caudales muestran un mayor aporte de energía como sugieren los resultados antes presentados.

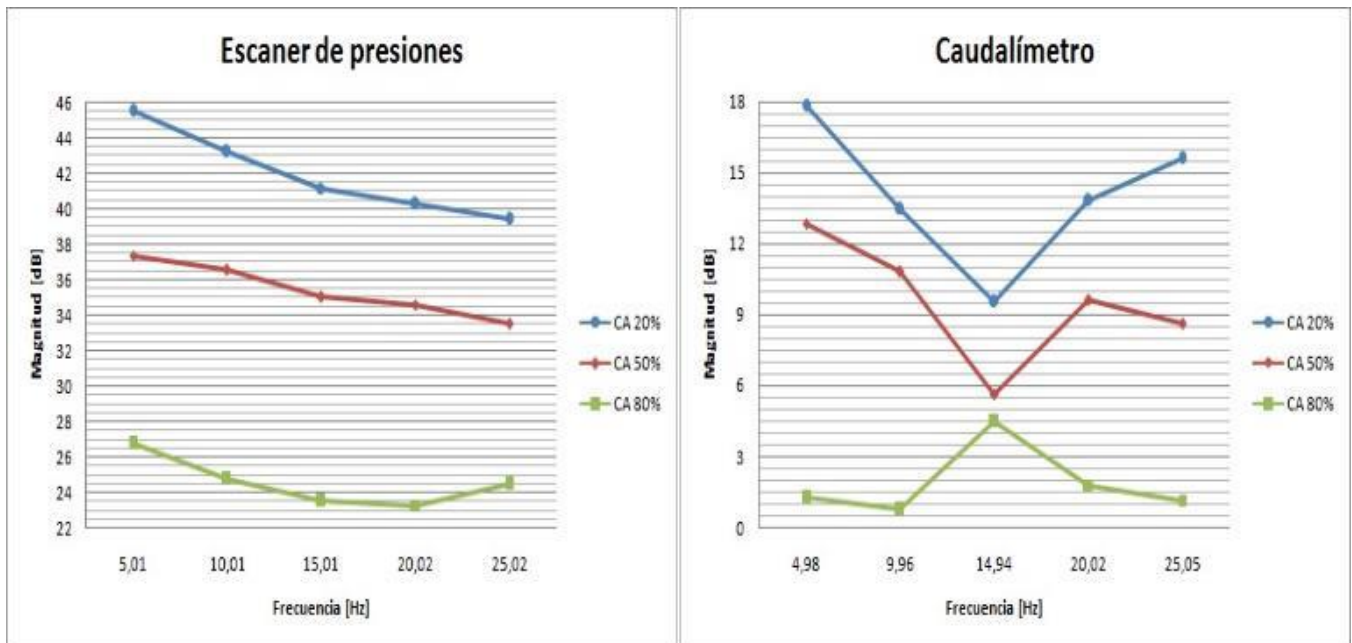


Figura 14: Magnitud del aporte de energía.

3.4. Cálculo de velocidades

Utilizando los promedios de los valores de caudal medidos en la línea de inyección y conociendo el área del inyector se obtuvieron las velocidades medias de descarga para todas las condiciones de frecuencia y ciclo de actividad, presentados en la [figura 15](#).

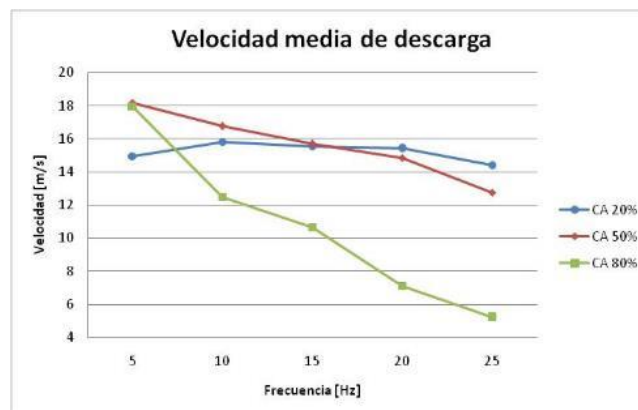


Figura 15: Velocidad media de descarga vs. frecuencia.

Con la teoría de chorros de aire turbulento [10] y las velocidades medias de descarga, se calcularon las velocidades a 10 cm de distancia con la ecuación 3:

$$u = 6,2 \frac{D_0}{x} u_0 \quad (3)$$

Dónde:

- u: velocidad en la línea central a una distancia x.
- D_0 : diámetro inicial del chorro.
- x: distancia entre el inicio del chorro y donde se quiere calcular la velocidad.
- u_0 : velocidad inicial del chorro.

En la [figura 16](#) se muestra un esquema de un chorro sumergido en aire en reposo y en la [figura 17](#) el mismo chorro representado con la escala de la cavidad.

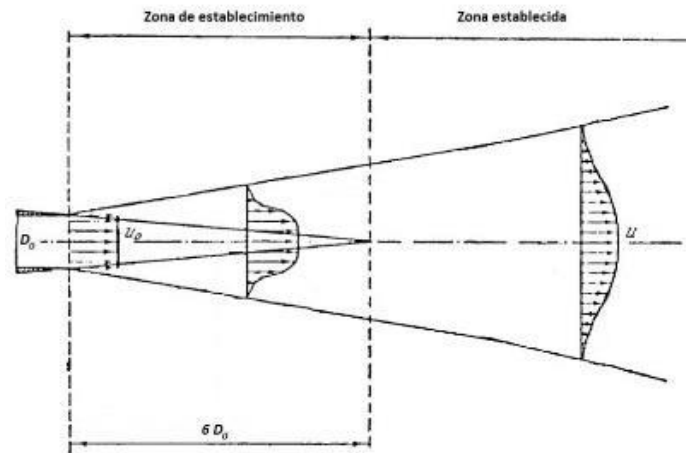


Figura 16: Esquema de un chorro ideal sumergido en aire en reposo.

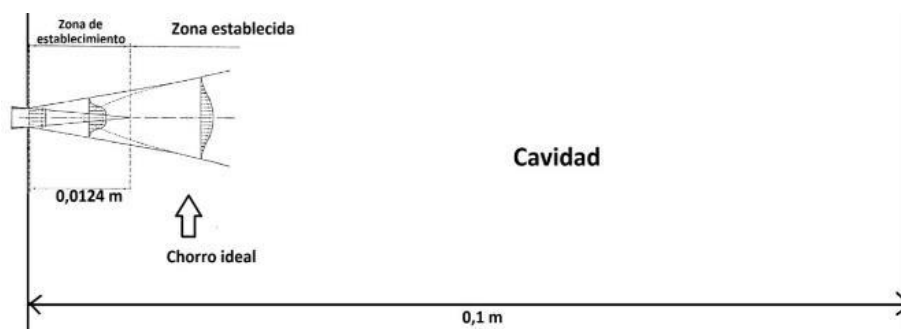


Figura 17: Esquema de un chorro ideal representado en la escala de la cavidad.

Luego, teniendo en cuenta que las presiones medidas en la pared opuesta al chorro son presiones totales manométricas, se promediaron dichas presiones para calcular velocidades medias en la pared a 10 cm del inyector utilizando la ecuación 4:

$$P_{total} - P_{estática} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4)$$

Despejando v se obtiene la ecuación 5:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{estática})}{\rho}} \quad (5)$$

Dónde:

- $P_{total} - P_{estática}$: presión medida en la pared opuesta al chorro.
- v : velocidad en la toma de presión.
- ρ : densidad del aire ($1,22 \text{ kg/m}^3$).

Se utilizaron los valores medios de caudal y de presión para poder compararlos con los calculados a través de la teoría, ya que la misma está establecida para situaciones con inyección de aire constante.

Las velocidades medias calculadas a partir de los valores de caudal promediados se utilizaron para obtener la velocidad a 10 cm a través de la teoría de chorro ideal, luego éstas se compararon con las velocidades medias calculadas a partir de los valores de presión promediados, obteniéndose que estas últimas son aproximadamente 3 veces mayores que las obtenidas con la teoría, ver [figura 18](#). Esto se debe a que, por un lado, la teoría utiliza inyección de aire constante, y por el otro, se varía el ciclo de actividad con la intención de lograr mayores picos de presión.

Por el contrario, teniendo en cuenta el papel de la cavidad, el aumento puede deberse a un efecto resonador originado en la inyección pulsante; y el hecho de que exista una pared que detiene el flujo, provoca una presión de remanso que podría aumentar también los valores picos de presión.

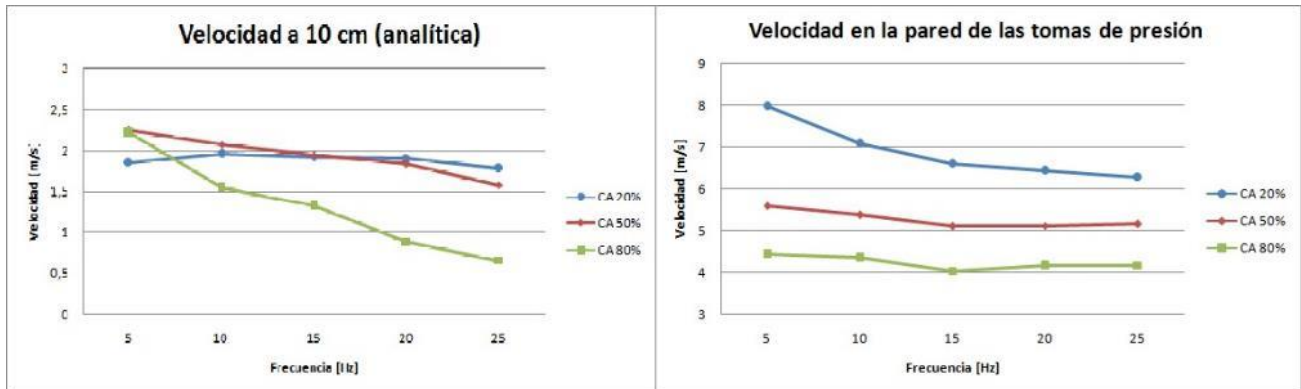


Figura 18: Comparación entre los resultados analíticos (izquierda) y empíricos (derecha).

Los valores graficados en las figuras 15 y 18, junto con el error relativo, se escribieron en la tabla 3.

| Frecuencia [Hz] | Ciclo de actividad [%] | Velocidad de descarga [m/s] | Velocidad a 10 cm [m/s] (analítica) | Velocidad a 10 cm [m/s] (experimental) | Error relativo entre las velocidades experimentales y analíticas [%] |
|-----------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|--|
| 5 | 20 | 14,94 | 1,85 | 7,98 | 77 |
| | 50 | 18,18 | 2,25 | 5,59 | 60 |
| | 80 | 17,95 | 2,23 | 4,43 | 50 |
| 10 | 20 | 15,81 | 1,96 | 7,09 | 72 |
| | 50 | 16,76 | 2,08 | 5,37 | 61 |
| | 80 | 12,50 | 1,55 | 4,35 | 64 |
| 15 | 20 | 15,51 | 1,92 | 6,59 | 71 |
| | 50 | 15,67 | 1,94 | 5,11 | 62 |
| | 80 | 10,64 | 1,32 | 4,04 | 67 |
| 20 | 20 | 15,42 | 1,91 | 6,44 | 70 |
| | 50 | 14,84 | 1,84 | 5,12 | 64 |
| | 80 | 7,11 | 0,88 | 4,16 | 79 |
| 25 | 20 | 14,41 | 1,79 | 6,27 | 72 |
| | 50 | 12,76 | 1,58 | 5,16 | 69 |
| | 80 | 5,20 | 0,64 | 4,17 | 85 |

Tabla 3: Error relativo entre las velocidades.

De esta tabla se infiere que utilizar la teoría de chorro continuo para calcular parámetros del chorro pulsante conlleva un error del 70% aproximadamente. Esto se podría corregir multiplicando por un factor “ $k_{pulsante}$ ” que depende de la frecuencia y del ciclo de actividad. En la figura 19 se muestra una forma de obtener el factor $k_{pulsante}$.

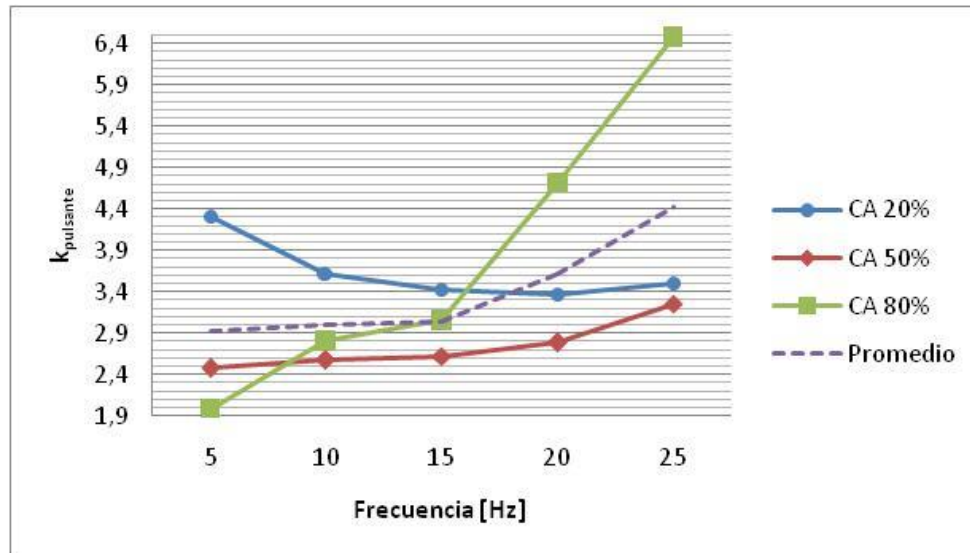


Figura 19: Gráfico para obtener el factor de corrección de velocidad para inyección pulsante.

3.5. Cálculo del radio de dispersión

Un chorro de aire turbulento sumergido en aire en reposo adquiere la forma de un cono como se observa en la [figura 20](#).

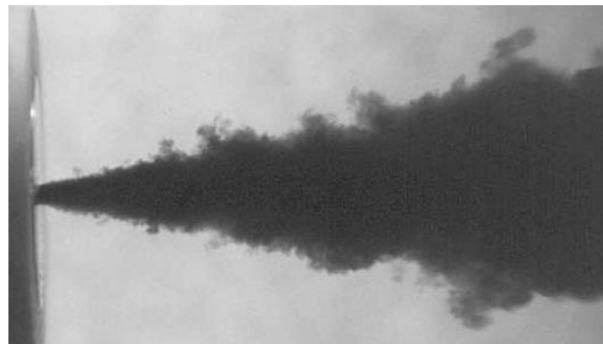


Figura 20: Chorro de humo inyectado en aire en reposo.

Para este caso, la teoría indica que el radio de dicho cono a una distancia dada, es proporcional a dicha distancia y se puede calcular con la ecuación 6:

$$r = \frac{x}{5} + \frac{D_0}{2} \quad (6)$$

Dónde:

- r: radio de dispersión a una distancia x.
- x: distancia entre el inicio del chorro y donde se quiere calcular el radio.
- D_0 : diámetro inicial del chorro.

De esta manera, para una distancia de 10 cm se tiene $r = 0,021$ m. Pero este resultado supone un chorro continuo y libre, es decir, sin obstáculos.

Para el caso de chorro de aire pulsado intentamos obtener una estimación del radio de dispersión a través de los valores de presión medidos en la cara opuesta al chorro, ya que la presión total manométrica adquirida es proporcional a la velocidad del mismo. Considerando que la teoría calcula el radio a partir de los límites del cono donde la velocidad es igual a cero, se graficaron curvas de nivel para observar a qué distancia del centro la presión se hacía cero.

Sabiendo que existe un obstáculo (la pared con tomas de presión) se contempla que la velocidad podría ser distinta de cero para los límites del cono (ubicándonos a una distancia r de la línea media del chorro), entonces se

graficaron las curvas de nivel para los picos de presión de la toma central, asumiendo que este sería el caso más similar a la teoría de chorro libre, donde se encuentran presiones cercanas a cero a una distancia r del centro.

En la [figura 21](#) se observa un esquema de las dimensiones que tiene la cara de las tomas de presión, como referencia de la escala utilizada para las curvas de nivel.

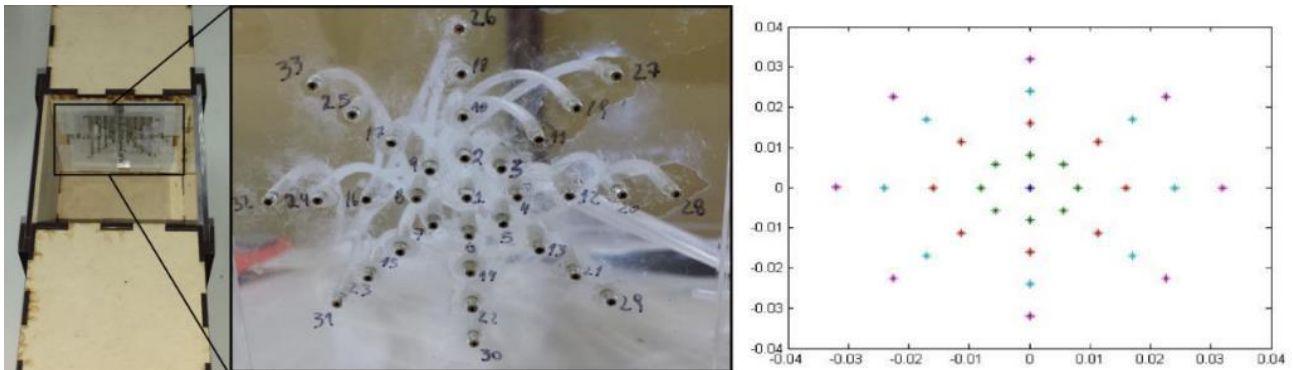


Figura 21: Tomas de presión en la cara opuesta al chorro.

En las [figuras 22](#) y [23](#) se observan las curvas de nivel para inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad; y 25 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad. Las curvas exteriores son las de presión igual cero. Se observa que el radio de dispersión no varía notablemente con el ciclo de actividad, pero sí disminuye con la frecuencia.

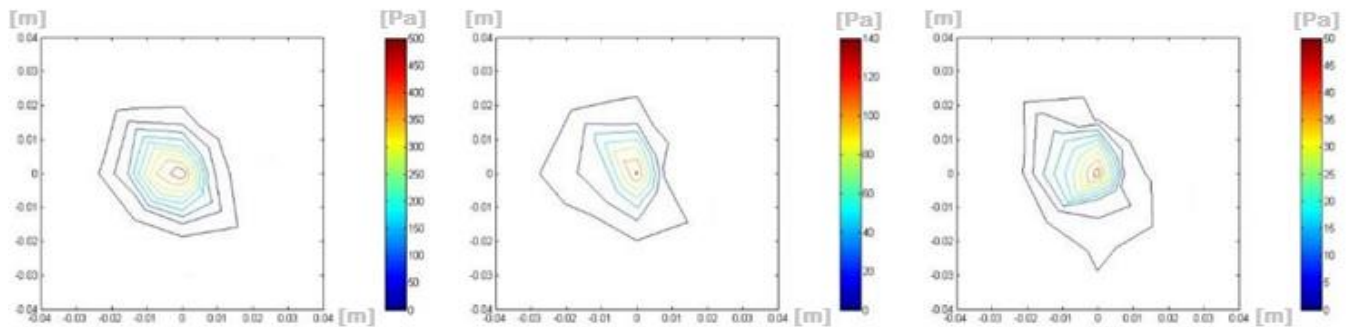


Figura 22: Curvas de nivel de presión para inyección de aire a 5 Hz.

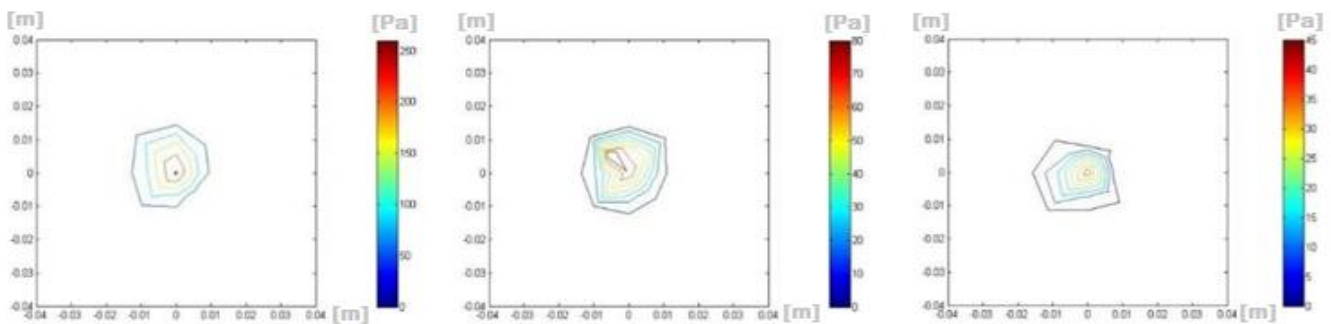


Figura 23: Curvas de nivel de presión para inyección de aire a 25 Hz.

Con el mismo tratamiento que se utilizó para las velocidades se presenta la [tabla 4](#) con los radios estimados para todas las frecuencias y ciclos de actividad.

| Frecuencia [Hz] | Ciclo de actividad [%] | Radio de dispersión del chorro continuo y libre a 10 cm [m] | Radio de dispersión del chorro pulsante y obstaculizado [m] | Error relativo entre los radios [%] |
|-----------------|------------------------|---|---|-------------------------------------|
| 5 | 20 | 0,021 | 0,018 | 17 |
| | 50 | 0,021 | 0,018 | 17 |
| | 80 | 0,021 | 0,018 | 17 |
| 10 | 20 | 0,021 | 0,016 | 31 |
| | 50 | 0,021 | 0,016 | 31 |
| | 80 | 0,021 | 0,016 | 31 |
| 15 | 20 | 0,021 | 0,014 | 50 |
| | 50 | 0,021 | 0,014 | 50 |
| | 80 | 0,021 | 0,014 | 50 |
| 20 | 20 | 0,021 | 0,013 | 62 |
| | 50 | 0,021 | 0,013 | 62 |
| | 80 | 0,021 | 0,013 | 62 |
| 25 | 20 | 0,021 | 0,012 | 75 |
| | 50 | 0,021 | 0,012 | 75 |
| | 80 | 0,021 | 0,012 | 75 |

Tabla 4: Radios de dispersión estimados.

Aquí también se obtuvo un factor de corrección, denominado “ k_{radio} ”, para calcular el radio de dispersión de un chorro pulsante a partir de la teoría de chorro continuo, ver [figura 24](#).

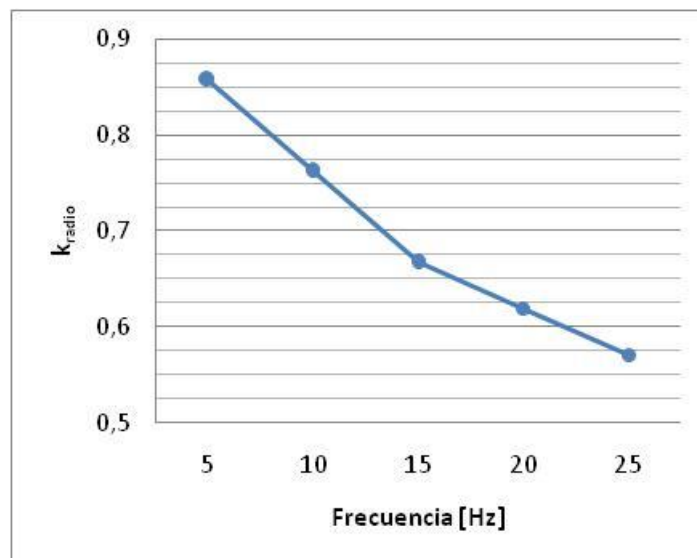


Figura 24: Gráfico para obtener el factor de corrección del radio de dispersión para inyección pulsante.

4. CONCLUSIONES

Con respecto a las presiones, se puede concluir que el ciclo de actividad afecta los valores pico que se observaron en la pared opuesta a la descarga, ya que, a menor frecuencia y ciclo de actividad, estos fueron mayores. Una posible explicación de este fenómeno es atribuirlo a la compresibilidad del aire, un menor ciclo de actividad mantiene la electroválvula cerrada por más tiempo y esto posibilita una mayor compresión.

Los caudales instantáneos medidos tienen una respuesta similar a las presiones, estos aumentaron en los casos de menor frecuencia y menor ciclo de actividad. Este resultado junto con el de las presiones, indica el potencial de la variación del ciclo de actividad en la utilización de sistemas de control activo con inyección de aire, ya que se obtienen mejores resultados y son menos costosos que aquellos de frecuencias mayores.

Del análisis espectral se puede concluir que la respuesta en frecuencia utilizada en los instrumentos fue adecuada para detectar el fenómeno en estudio, ya que los mismos respondieron satisfactoriamente. Los ensayos auxiliares permitieron asegurar el sincronismo entre las señales de entrada (control de electroválvulas) y las de salida (sensores).

Para las velocidades se observaron discrepancias entre los resultados del ensayo y los valores analíticos, pero se atribuyen a la naturaleza de la inyección, ya que ésta es pulsante y la teoría utiliza inyección continua. De esta manera se puede asumir que las velocidades calculadas a partir de inyección pulsante son aproximadamente 3 veces mayores que las velocidades obtenidas a partir de inyección continua de aire.

Por último, cuando se trata del radio de dispersión sucede algo similar a lo ocurrido con las velocidades ya que también se utilizó la teoría de chorro de aire turbulento, para ambos casos se obtuvo un factor de corrección para poder utilizar las ecuaciones planteadas para chorro continuo en el caso de que se utilice chorro pulsante.

REFERENCIAS

- [1] Roshko, A., 1955. "Some measurements of flow in a rectangular cutout". NACA technical note 3488.
- [2] Krishnamurty, K., 1955. "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces". NACA technical note 3487.
- [3] Rossiter, J. E., 1964. "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds". Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, No. 3438.
- [4] Plentovich, E. B., 1990. "Three-dimensional cavity flow fields at subsonic and transonic speeds". NASA technical memorandum 4209.
- [5] Cattafesta, L. N., III, Williams, D. R., Rowley, C. W., Alvi, F. S., 2003. "Review of active control of flow-induced cavity resonance". AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.
- [6] García Sainz, M., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., 2013. "Caracterización de la inyección pulsante de aire para control de flujo".
- [7] García Sainz, M. O., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Colman, J., Algozino, S., 2013. "Control de flujo activo sobre una cavidad a bajo número de Reynolds". Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- [8] Shaw, L., 1998. "Active control for cavity acoustics". AIAA 98-2347.
- [9] Shaw, L., Northcraft, S., 1999. "Closed loop active control for cavity acoustics". AIAA 99-1902.
- [10] Abramovich, G. N., 1963. "General properties of turbulent jets" MIT press.
- [11] Bergh, H., Tigdeman, H., 1965. "Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems" National Aero- and Astronautical Research Institute Amsterdam. NLR-TR F.238.
- [12] Pemberton, R., 2010. "An overview of dynamic pressure measurement considerations" Scanivalve Corp.