

## ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL CICLO DE ACTIVIDAD EN LA INYECCIÓN PULSADA DE AIRE

Echapresto Garay, Ibán<sup>a,b</sup>, García Saíenz, Mariano<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>UIDET LaCLyFA, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 1 y 47 (B1900TAG) La Plata, Argentina. <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar/iban.echapresto@ing.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>Becario de la Universidad Nacional de La Plata.

<sup>c</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

### INTRODUCCIÓN

Una cavidad expuesta a un flujo de aire produce varios fenómenos aerodinámicos dependiendo de 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.

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.

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 (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.

### Ciclo de actividad

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:

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

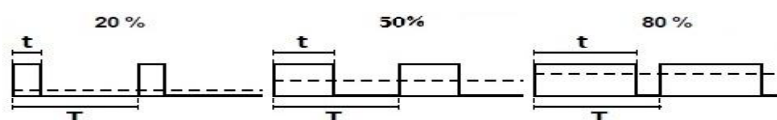


Figura 1: Ejemplos de ciclos de actividad en una onda cuadrada.

## PARTE EXPERIMENTAL

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.

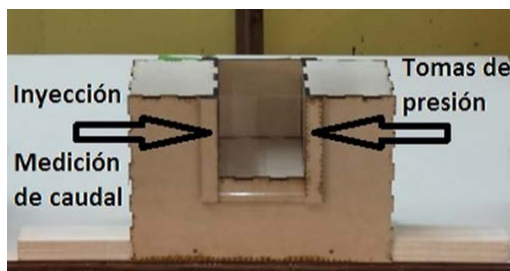


Figura 2: Modelo de cavidad.

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. Y en la pared intercambiable opuesta, tomas de presión de 1 mm de diámetro interno.

Se fijó la presión en 6 bares, el caudal en 4 litros por minuto. 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.

A continuación, se detallan los equipos e instrumentos utilizados en el ensayo y el esquema de conexiones en la Figura 3:

- 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  $\pm 10$  V, 100 kS/s, 4 canales, National Instruments, NI-9263.
- Chasis NI compact DAQ USB de 4 ranuras, National Instruments, NI-cDAQ-9174

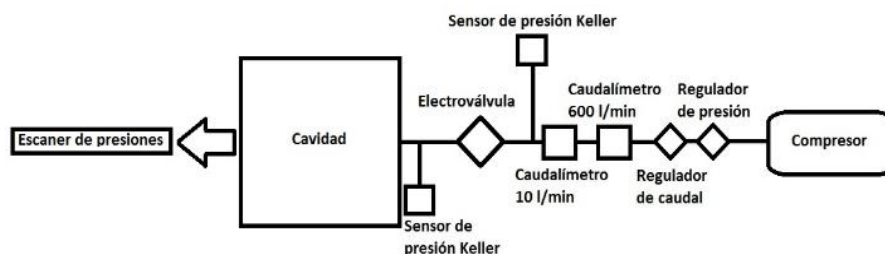


Figura 3: esquema de conexionado de equipos e instrumentos

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 desfasaje entre las señales obtenidas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 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 4 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 5 se observan los valores pico de presión de todos los casos ensayados.

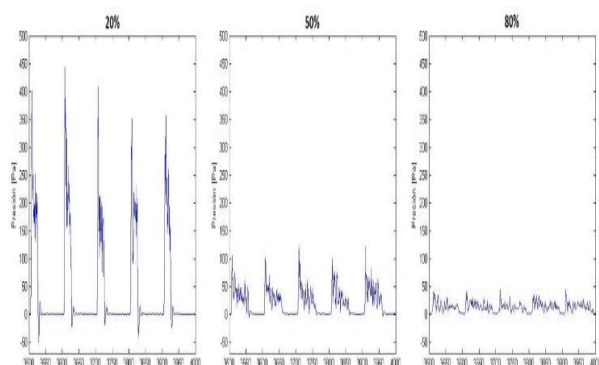


Figura 4: Presión vs. N° de muestra en la toma central.

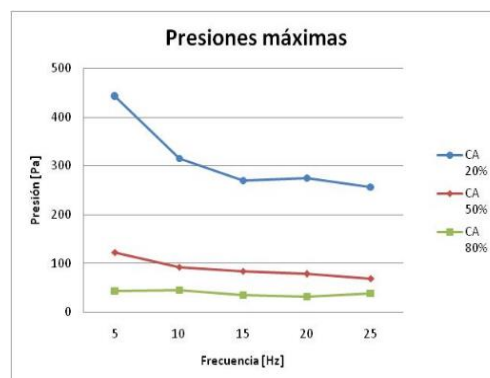


Figura 5: Valores máximos de presión.

### 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 6 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 7 se puede observar cómo evolucionan los valores máximos de caudal para las distintas frecuencias y ciclos de actividad.

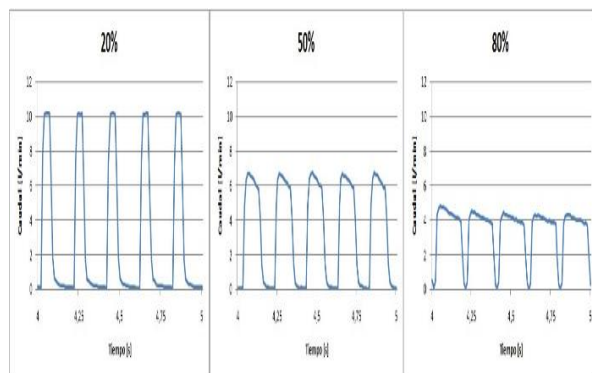


Figura 6: Caudal vs. tiempo.

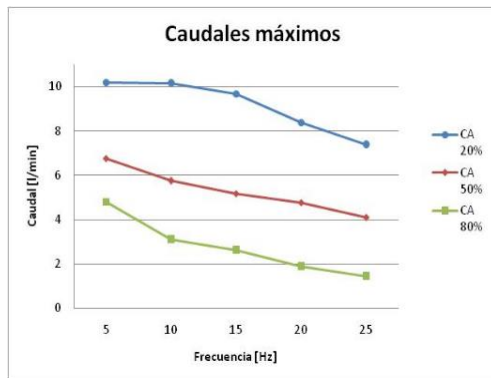


Figura 7: Valores máximos de caudal.

### 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.

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 2:

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

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.

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 3:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{estática})}{\rho}} \quad (3)$$

Dónde:

$P_{total} - P_{estática}$ : presión medida en la pared opuesta al chorro.

$v$ : velocidad en la toma de presión.

$\rho$ : densidad del aire (1,22 kg/m<sup>3</sup>).

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. 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.

Los valores obtenidos, junto con el error relativo, se escribieron en la tabla 1. 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 8 se muestra una forma de obtener el factor  $k_{pulsante}$ .

Tabla 1: Error relativo entre las velocidades.

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

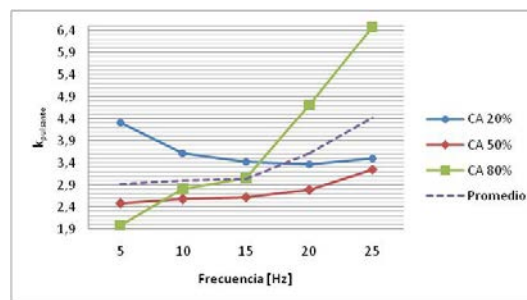


Figura 8: Gráfico para obtener el factor de corrección de velocidad para inyección pulsante.

### Cálculo del radio de dispersión

Un chorro de aire turbulento sumergido en aire en reposo adquiere la forma de un cono, donde 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 4:

$$r = \frac{x}{5} + \frac{D_0}{2} \tag{4}$$

Dónde:

- r: radio de dispersión a una distancia x.
- x: distancia entre el inicio del chorro y donde se quiere calcular el radio.
- D<sub>0</sub>: 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.

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 9 se observan las curvas de nivel para inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad. Se observa que el radio de dispersión no varía notablemente con el ciclo de actividad.

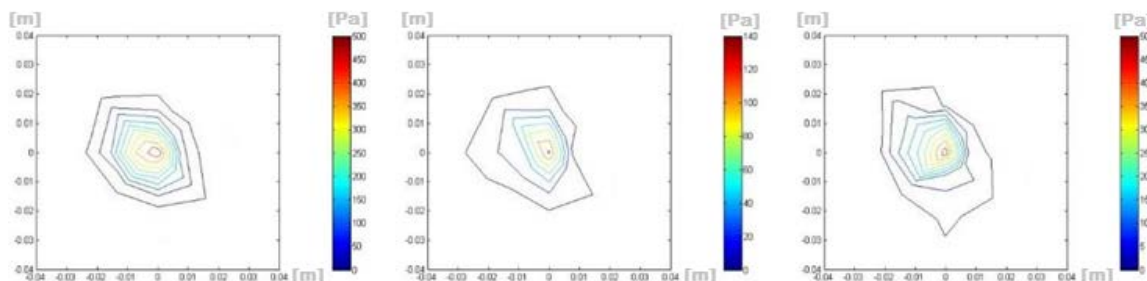


Figura 9: Curvas de nivel de presión para inyección de aire a 5 Hz.

Con el mismo tratamiento que se utilizó para las velocidades se presenta la tabla 2 con los radios estimados para todas las frecuencias y ciclos de actividad. Aquí también se obtuvo un factor de corrección, denominado “k<sub>radio</sub>”, para calcular el radio de dispersión de un chorro pulsante a partir de la teoría de chorro continuo, ver figura 10.

Tabla 2: Radios de dispersión estimados.

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

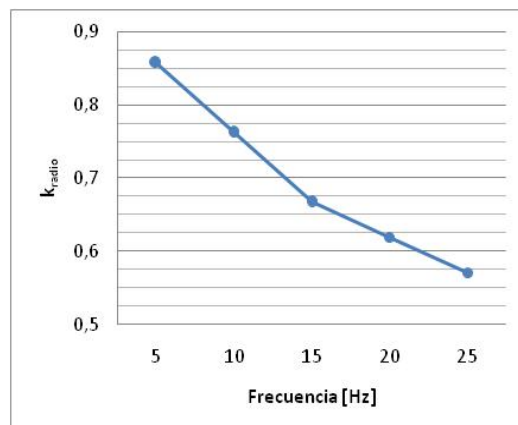


Figura 10: Gráfico para obtener el factor de corrección del radio de dispersión para inyección pulsante.

## 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 Saínz, M., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., 2013. "Caracterización de la inyección pulsante de aire para control de flujo". Terceras Jornadas de Investigación y Transferencia, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- [7] García Saínz, 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.