Desarrollo de un banco de pruebas para caracterizar experimentalmente, en prácticas de laboratorio, el fenómeno de bombeo en una turbomáquina térmica generadora

David Echeverria[a], Alejandro Ramos[a], Vicente Henríquez[b], Jorge Valencia[a]

[a]Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
[b]Departamento de Ingeniería de Procesos
[a,b]Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas de Gran Canaria, España

RESUMEN

El bombeo es un fenómeno de inestabilidad presente en las turbomáquinas térmicas generadoras, como los compresores, que puede llegar a tener graves consecuencias sobre éste, y sobre la instalación de la que forma parte, llegando incluso al deterioro de los mismos. Este fenómeno es estudiado por alumnos de Ingeniería Mecánica, aunque únicamente de forma teórica en un aula de clase. En este trabajo se presenta el desarrollo de un banco de pruebas, en el que se ha utilizado un sistema embebido basado en *Arduino*, que permite a los estudiantes aprender el comportamiento de este fenómeno en las prácticas de laboratorio de la asignatura de máquinas térmicas. Como prueba de esto se tiene el Trabajo de Fin de Máster desarrollado en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por un estudiante del Máster Universitario en Tecnologías Industriales, que imparte la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles. El sistema se caracteriza por contar con herramientas de acceso libre y de código abierto; tanto los componentes y elementos físicos como las aplicaciones informáticas. Se muestran los resultados obtenidos y, para validarlos, se comparan con las mediciones de un osciloscopio. Con estos resultados se demuestra que el diseño planteado se puede utilizar para comprender y estudiar el comportamiento de la turbomáquina cuando entra en la zona de operación inestable.

Palabras clave: Innovación educativa, compresor, bombeo, inestabilidad, sistema embebido

1. INTRODUCCIÓN

En términos generales, la metodología empleada en las asignaturas que deben cursar los estudiantes de ingeniería durante su formación, consiste en bloques de clases teóricas; donde el docente desarrolla los contenidos, empleando para su explicación los recursos a su disposición (pizarra, proyector, libros, entre otros).[1] La limitación que existe radica en que algunos de los fenómenos estudiados en el aula de clase sólo se ven de forma teórica, dificultando en muchos casos la comprensión del mismo por parte del estudiante. Por lo que resulta interesante diseñar estrategias de aprendizaje, basadas en TIC, que ayuden a los estudiantes del área de ingeniería a aprender y entender las relaciones entre las variables y parámetros involucrados en los fenómenos estudiados. Dichas estrategias de aprendizaje podrían estar basadas en el uso de artefactos o diseños experimentales, de laboratorio, diseñados para el estudio y análisis de dichos fenómenos. Estas propuestas se basan en las teorías de aprendizaje psicológicas expuestas en diversos trabajos,[1–4] que refieren que los estudiantes refuerzan sus conocimientos a través del uso de adecuados ambientes de aprendizaje, y además a través de la construcción y uso de artefactos diseñados para tal menester. Ibáñez[5] comenta cómo la innovación educativa se refleja en acciones que producen una transformación en las propias prácticas educativas. En este sentido, en este trabajo se presenta un sistema embebido, basado en *Arduino* que permite la toma de datos en tiempo real y su almacenamiento, con lo que se puede observar «en frío» el fenómeno estudiado. Estos sistemas embebidos tuvieron un importante desarrollo desde la última década del siglo 20 en áreas de electrónica y ciencias de la computación, aumentando su presencia

Información adicional del autor:
E-mail: david.echeverria101@alu.ulpgc.es
Teléfono: +34 928451933

en el ámbito industrial,[3] lo que hace necesario que los estudiantes de ingeniería, sin importar la especialidad, se familiaricen con los mismos. Considerando esto, pueden emplearse los sistemas embebidos en el desarrollo de prototipos de bajo coste, permitiendo gran versatilidad en el diseño de experimentos, como se puede ver en algunos trabajos publicados.[2,3,6–8]

De especial consideración para los estudiantes de Ingeniería Mecánica son los fenómenos asociados a las máquinas térmicas. Uno de dichos fenómenos es el bombeo en las turbomáquinas térmicas generadoras, especialmente los compresores, tanto axiales como radiales, que se explica con detalle en la sección 2. El bombeo también se presenta en turbomáquinas con menor relación de compresión, como las soplantes (blowers). Debido a que los blowers pueden accionarse por medio de un motor eléctrico y que trabajan a regímenes de giro mucho menores que un turbocompresor; resultando, en consecuencia, en una operación más sencilla y segura, se decició realizar el banco de pruebas para estudiar el fenómeno de bombeo en una soplante.

La estación de trabajo desarrollada permite, además de la visualización del fenómeno en cuestión, el almacenamiento de los datos para su posterior tratamiento mediante herramientas de software matemático; lo que posibilita realizar, sobre dichos datos, el análisis en profundidad necesario para el estudio del fenómeno y de todos los parámetros afectados por el mismo. El almacenamiento es posible gracias a que los sensores empleados para medir las distintas variables (presión, temperatura, régimen de giro) se encuentran conectados a un sistema embebido basado en *Arduino*, conectado a un ordenador que, a través de una interfaz desarrollada en *Processing*, controla la operación del equipo.

Es importante destacar que el equipo presentado se empleó en la realización de un Trabajo de Fin de Máster por un estudiante del Máster Universitario en Ingenierías Industriales de la Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Este trabajo, además, ha derivado en publicaciones, como la de Echeverria et al.[9] y otras que se encuentran en desarrollo. Este equipo está sirviendo como base para el desarrollo de una Tesis Doctoral, y ha sido diseñado con un criterio orientado a la facilidad de manejo basada en la robustez de la instalación y en el empleo, como ya se mencionó, de herramientas de acceso libre y código abierto, facilitando no sólo el aprendizaje estrictamente académico, sino también el acercamiento de los estudiantes a la investigación y sus herramientas.

2. FENÓMENO DE BOMBEO

Al hablar de compresores, especialmente compresores radiales, uno de los ejemplos más comunes son los turbocompresores de sobrealimentación de motores de combustión interna alternativos (MCIA), para los que el *downsizing* se ha vuelto una práctica común para mejorar el rendimiento.[10] Esto conlleva una reducción en la cilindrada por lo que, para mantener la potencia desarrollada, es necesario la incorporación de sobrealimentación,[11] con lo que la tendencia es a que incremente la presencia de turbocompresores en los vehículos. En la actualidad, y gracias a los avances en el diseño de los MCIA y de los sistemas de sobrealimentación asociados, es posible decir que uno de los principales limitantes del pleno rendimiento de los primeros es el gasto másico mínimo que puede trasegar el circuito de sobrealimentación,[12] valor que determina el inicio del fenómeno de inestabilidad conocido como bombeo.

El bombeo es especialmente importante pues es un fenómeno de inestabilidad en el flujo que afecta de manera global al compresor y a la instalación donde se encuentra, causando grandes vibraciones que pueden conducir a la destrucción del equipo.[11] Una de las características del bombeo es el sonido que se produce cuando se presenta, similar a un zumbido, además de que se producen oscilaciones de gran amplitud de parámetros tales como la presión, la temperatura o el gasto másico trasegado,[13] esto debido a que durante parte del ciclo de bombeo se presenta una reversión total en el flujo.[14] Estas oscilaciones, causadas por la inestabilidad en el flujo, pueden conducir a una falla catastrófica del compresor debido a las altas cargas mecánicas y térmicas.[15,16]

En la Figura 1 se tiene una comparación entre el comportamiento estable (izquierda) y el bombeo (derecha) medido en la soplante ensayada en el banco de pruebas presentado en este trabajo. Se aprecia cómo la forma de las curvas descritas por las presiones a la salida de la máquina es completamente distinta para ambos casos, teniéndose una forma senoidal cuando se presenta el bombeo.

ISBN: 978-84-608-9007-2

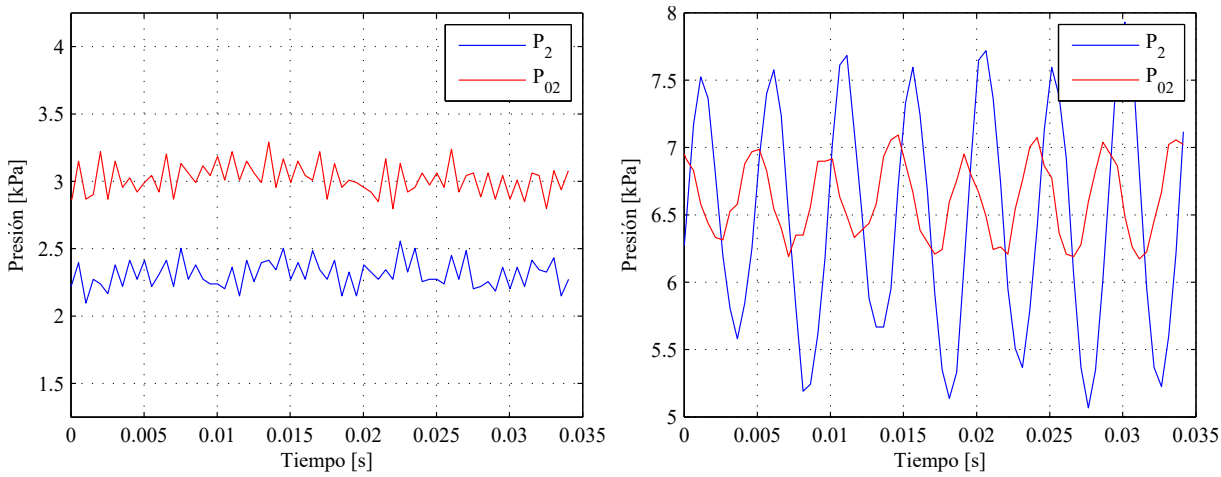

Figura 1. Representación gráfica de la evolución temporal de las presiones estática y total a la salida de la soplante (P_2 y P_{02}, respectivamente). A la **izquierda** se tiene la curva cuando la máquina opera dentro de la zona estable y a la **derecha** se observa la forma de la curva cuando se opera en bombeo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se da una breve explicación del banco de pruebas, empezando por la instalación donde se ubica la soplante para luego describir el sistema de adquisición de datos de la misma. Por último, se describirá el procedimiento experimental empleado en la caracterización de la máquina.

3.1 Instalación

Para el diseño del banco de pruebas se tomó como base la instalación típica empleada en la bibliografía para el estudio del fenómeno de bombeo, representada esquemáticamente en la Figura 2. De este esquema parten las instalaciones utilizadas por todos aquellos que, aún a día de hoy, investigan, desde distintos enfoques, el fenómeno. En la Figura 2 se puede observar claramente la posición del compresor. Aguas arriba de éste, se ubica un conducto de entrada al compresor que aspira de la atmósfera, mientras que aguas abajo se ubica un conducto de salida que se comunica con un depósito de remanso situado en el extremo del tubo. La resistencia que crea el circuito se establece por medio de una válvula situada aguas abajo del depósito, cuya función es modificar el punto de trabajo del compresor modificando el valor de caudal mediante el cambio de sección del área transversal.

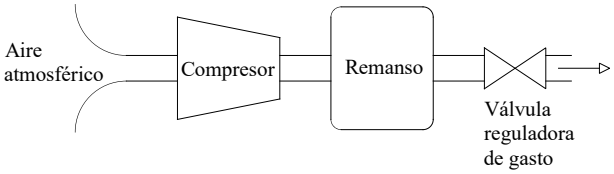

Figura 2. Esquema de la instalación generalmente empleada para estudio del fenómeno de bombeo en compresores.

La Figura 3 (izquierda) es una fotografía del banco de pruebas desarrollado. En ella destaca la soplante que se utiliza en el mismo y el recipiente que se observa al fondo de la fotografía, que hace las veces de depósito de remanso, tras el cual se encuentra la válvula de regulación de flujo. En las tuberías de aspiración y descarga se ubican, además, los sensores de presión y temperatura, y un tacómetro óptico (derecha en Figura 3) se ubica frente a la polea del blower para poder medir la velocidad de rotación del mismo. Este tacómetro emplea un transistor óptico a través del que se cuentan las vueltas que da la polea detectando un cambio de color, entre blanco y negro, sobre la superficie de ésta.

ISBN: 978-84-608-9007-2

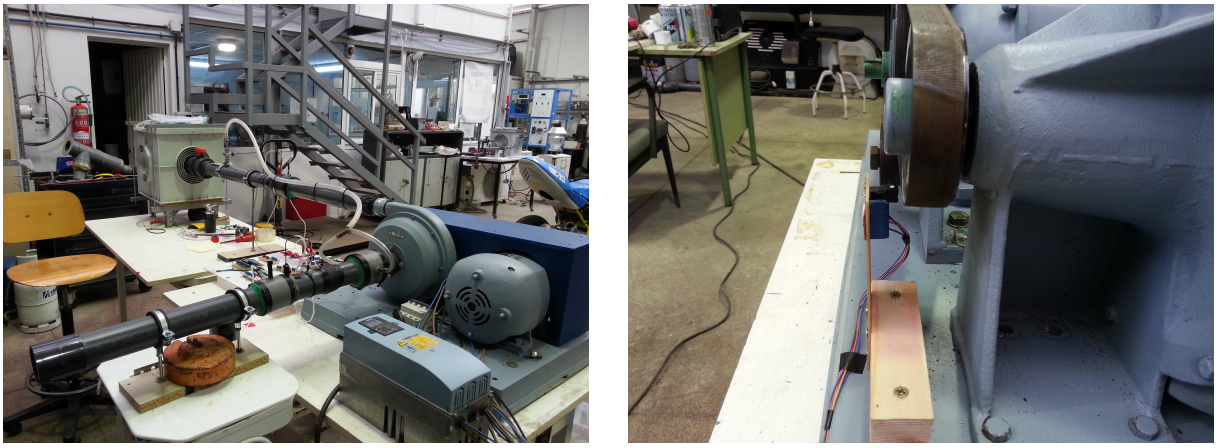

Figura 3. Fotografías del banco de pruebas desarrollado. **Izquierda**: Instalación, con los elementos indicados en el esquema. **Derecha**: Fotografía del tacómetro óptico desarrollado, ubicado frente a la polea de la soplante.

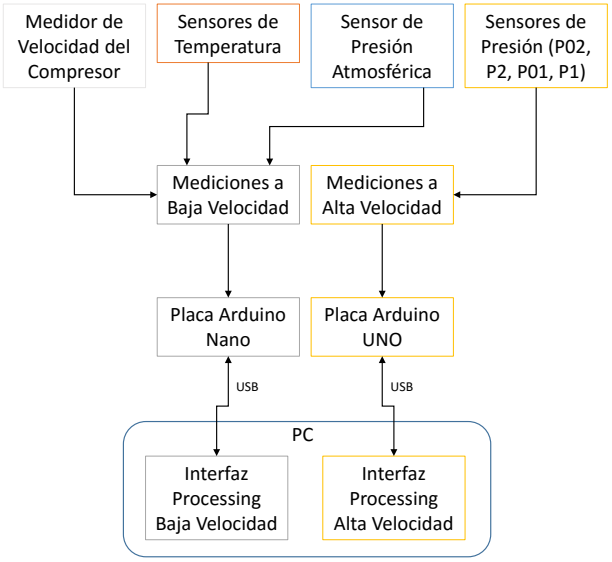

Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.

3.2 Sistema de Adquisición de Datos

Los datos tomados por los sensores son transmitidos al ordenador a través de dos placas *Arduino* y luego almacenados en éste gracias a la interfaz desarrollada en *Processing*, tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4. Este diagrama es una representación esquemática de la fotografía que se tiene en la Figura 5, donde se tienen los sensores de presión y las placas de los microcontroladores.

La soplante caracterizada es accionada por medio de un motor eléctrico trifásico, cuya velocidad es regulada gracias a un variador de frecuencia. Para medir la velocidad a la que gira el eje de la soplante se desarrolló un tacómetro óptico que, a través de una placa *Arduino* envía la información al ordenador y ésta se muestra a través de la interfaz desarrollada en *Processing*. En la Figura 6 se tiene una captura de pantalla de dicha interfaz.

Para poder medir las presiones a la entrada y salida de la soplante a alta velocidad se tomó la decisión de dividir en dos el sistema de adquisición de datos, por lo que una parte se encarga de estas mediciones, es decir, las presiones, mientras que la otra tiene como tarea la captura de los datos que no sufren grandes variaciones, como la temperatura y presión atmosférica, así como la medición de la velocidad de giro de la máquina. Es por esto que se designaron como mediciones a alta y a baja velocidad, estando cada una de éstas asociada a una placa *Arduino* distinta, como se observa en el diagrama de la Figura 4. Esta división no sólo afecta al sistema físico

ISBN: 978-84-608-9007-2

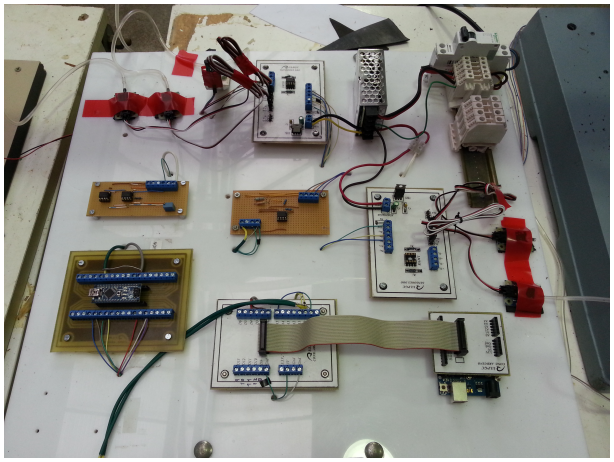

Figura 5. Fotografía de los sensores y demás elementos electrónicos del sistema para el registro de los datos.

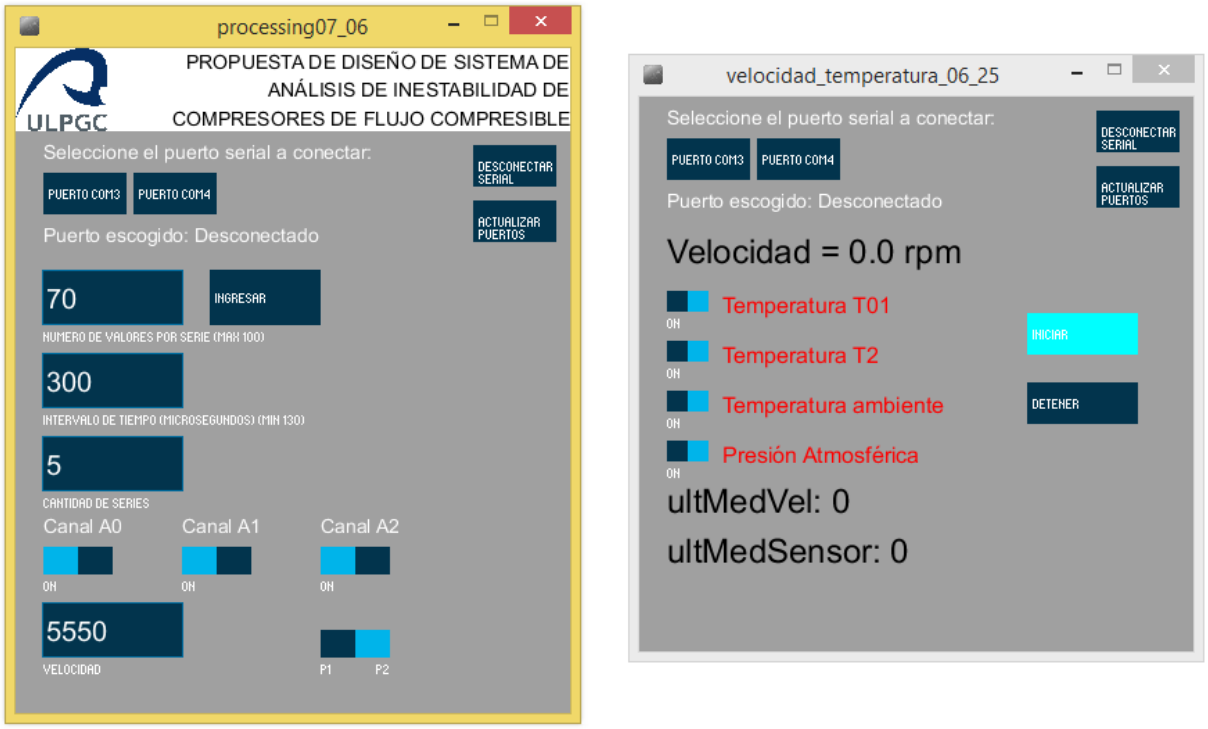

Figura 6. Interfaz creada en *Processing* para el control del sistema de adquisición de datos del banco de pruebas desarrollado. **Izquierda**: Interfaz para captura de datos a alta velocidad. **Derecha**: Interfaz para captura a baja velocidad.

(embebido), sino también a la interfaz en el ordenador, es decir, cada placa es controlada a través de una interfaz distinta.

Es a través de la interfaz de alta velocidad (izquierda en Figura 6) donde se establecen parámetros de medida cruciales para la toma de datos, como son: tiempo de muestreo, número de datos capturados, total de ráfagas de datos que se desea capturar, canales de la placa por los que se están tomando datos y, además, se le indica al ordenador a qué velocidad está girando actualmente la máquina. La interfaz de baja velocidad (derecha en Figura 6), como ya se ha mencionado, permite la captura de las temperaturas y la presión atmosférica, así como del régimen de giro.

El almacenamiento de los datos medidos sólo encontró una limitación: la memoria disponible en la placa *Arduino*

ISBN: 978-84-608-9007-2

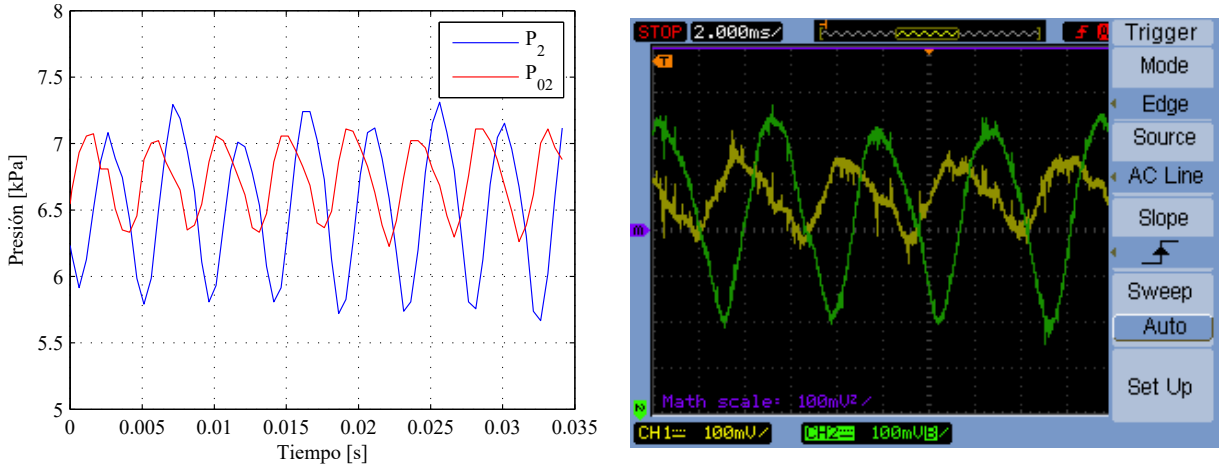

Figura 7. Validación de los resultados obtenidos. **Izquierda**: Datos registrados con 500 μs de tiempo de muestreo. **Derecha**: Señales registradas con el osciloscopio; la menor división horizontal corresponde a un tiempo de 2 ms.

sólo permite almacenar un número limitado de valores para enviar, vía serial, al ordenador. Por esta razón, la toma de datos se hace en ráfagas, cada una de ellas con un número de datos establecidos por el usuario a través de la interfaz en el ordenador. Además del número de datos, se especifica también cuántas ráfagas se tomarán. En consecuencia, para poder tener distintas ventanas de tiempo almacenadas, es posible establecer distintos tiempos de muestreo a la hora de tomar los datos.

3.3 Procedimiento Experimental

Para conseguir caracterizar el bombeo, la válvula fue cerrándose progresivamente, aumentando con esto el nivel de restricción de la instalación, hasta que se alcanzó un nivel de gasto másico tal que la inestabilidad se hizo notoria. Como se menciona en el apartado 3.2, la limitada memoria del microcontrolador obliga a tomar los datos en series de ráfagas de un tamaño establecido por el usuario. Para observar el fenómeno se decidió medir con cuatro tiempos de muestreo distinto para cada posición de la válvula de control de flujo, es decir, para cada nivel de restricción del sistema.

Para todas las mediciones se emplearon tiempos de muestreo de: 200, 300, 500 y 1000 μs (frecuencias de muestreo de 5, 3.33, 2 y 1 kHz, respectivamente). Cada ráfaga de datos almacenados contiene 70 valores y el total de ráfagas fue de 5. Una vez establecidos estos parámetros, se llevaba la soplante, por medio del variador de frecuencia, hasta el régimen de giro que se deseaba estudiar. La válvula se cerraba progresivamente tras tomar las 5 ráfagas de datos, para cada uno de los cuatro tiempos. Al aumentar la restricción, la velocidad variaba, y dicha variación se reflejaba en la interfaz del ordenador, procediendo entonces a regularla con el variador de frecuencia y llevarla de nuevo al valor deseado.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos, es decir, la representación gráfica de los datos capturados al llevar a la máquina hasta las condiciones de inestabilidad. Para comprobar que el sistema presentado era capaz de caracterizar el fenómeno de bombeo, era necesario comparar los resultados obtenidos por medio de éste con las señales captadas por un osciloscopio en las mismas condiciones de trabajo. Es por esto que, además de realizar la adquisición de datos con el ordenador, por medio de los microcontroladores y la interfaz, se conectaron los sensores de presión a un osciloscopio que permitía exportar como imagen las señales medidas. La comparación se tiene en la Figura 7, donde la gráfica de la izquierda corresponde a los datos registrados con un tiempo de muestreo de 500 μs, y la imagen de la derecha corresponde a las señales mostradas por el osciloscopio, tomando como menor división horizontal un tiempo de 2 ms.

Una vez comprobado que los datos registrados se correspondían con los medidos en el osciloscopio se continuó con la toma de datos, utilizando, para cada posición de la válvula, cuatro tiempos de muestreo distintos, como

ISBN: 978-84-608-9007-2

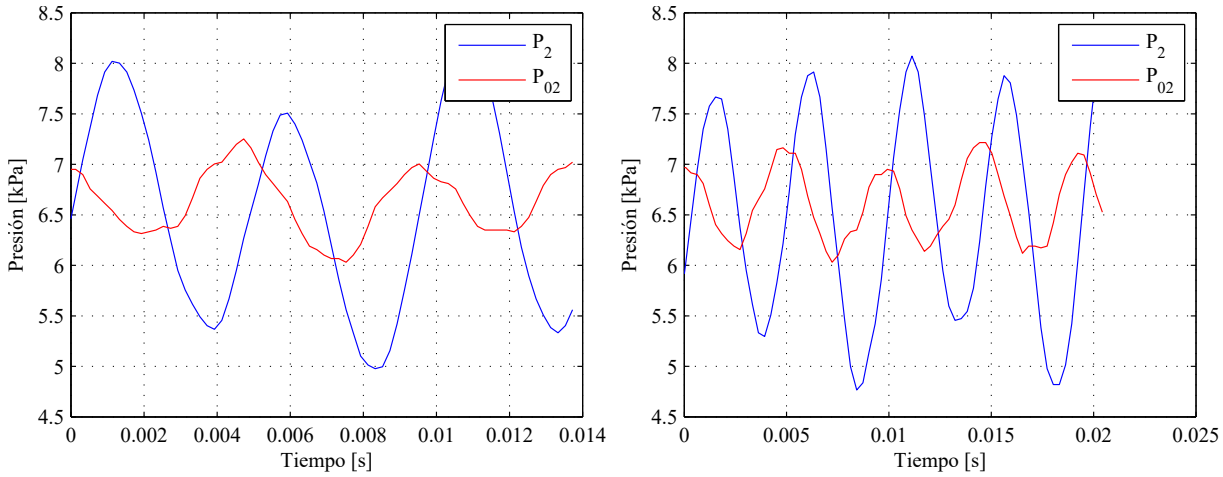

Figura 8. Comparación entre las señales registradas con dos tiempos de muestreo distintos. **Izquierda**: 200 μs. **Derecha**: 300 μs.

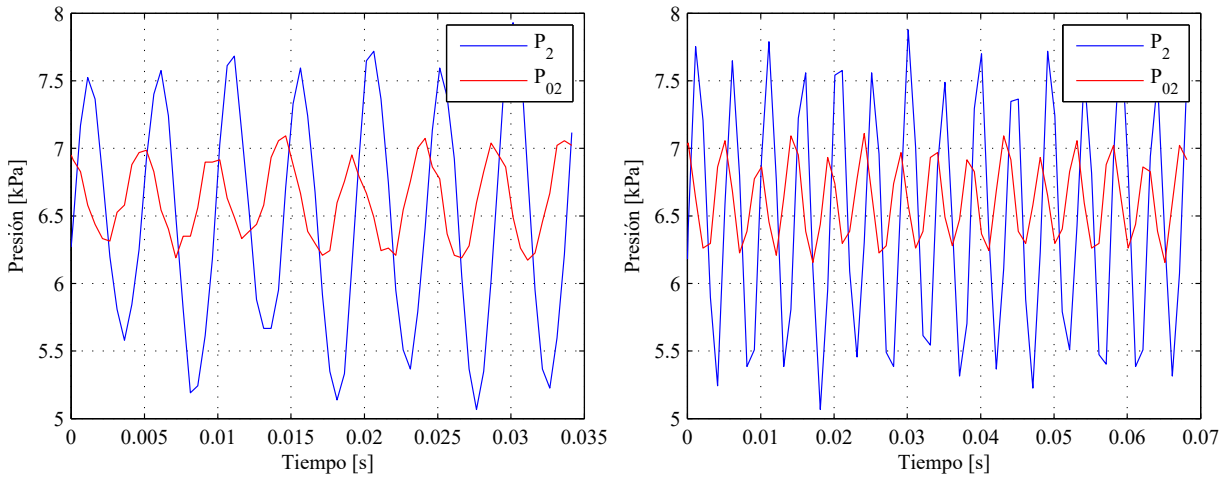

Figura 9. Comparación entre las señales registradas con dos tiempos de muestreo distintos. **Izquierda**: 500 μs. **Derecha**: 1000 μs.

se menciona en el apartado 3.3. El régimen de giro de la máquina correspondiente a los datos representados es de 6500 rpm.

Las gráficas mostradas, incluida la utilizada para la validación del sistema, comparándola con las señales del osciloscopio, corresponden a una sola de las ráfagas de datos almacenadas para un tiempo de muestreo específico. En el caso de la Figura 8, las señales representadas corresponden a tiempos de muestreo de 200 μs (izquierda) y 300 μs (derecha). Se observa cómo la forma de las curvas está mejor definida para 200 μs, teniendo como desventaja una menor ventana de tiempo. Lo mismo ocurre en el caso de la Figura 9, donde para 500 μs se tiene la forma de la curva mejor definida que para 1000 μs, pero en esta última se observa el fenómeno durante un tiempo mayor.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un banco de pruebas que sirve para la caracterización, en prácticas de laboratorio correspondientes a la asignatura de máquinas térmicas, del fenómeno de bombeo en una turbomáquina térmica generadora, específicamente una soplante. En la instalación presentada se ha empleado un sistema embebido basado en *Arduino* y se ha desarrollado una interfaz para su control desde el ordenador empleando la herramienta *Processing*, es decir, que está basado en la utilización de aplicaciones informáticas

ISBN: 978-84-608-9007-2

de código abierto, así como dispositivos de libre utilización y modificación. Se realizaron una serie de ensayos sobre la soplante que permitieron observar el comportamiento de las presiones a la salida de la misma cuando se presenta el fenómeno de bombeo, utilizando, para su validación, la comparación con la señal recibida por los sensores en un osciloscopio. De esta comparación se concluye que el banco de pruebas desarrollado es válido para el estudio de este fenómeno de inestabilidad, siendo de especial interés el poder almacenar los datos medidos, con el fin de estudiarlos posteriormente con detenimiento, permitiendo analizar con mayor profundidad el fenómeno en cuestión. Esto último ha sido el centro de un Trabajo de Fin de Máster, llevado a cabo por un estudiante del Máster Universitario en Tecnologías Industriales de la Universidad, que se imparte en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de Las Palmas de Gran Canaria. Trabajo que, además, ha derivado en publicaciones y el desarrollo de una Tesis Doctoral, demostrando que este tipo de equipos facilitan no sólo el aprendizaje estrictamente académico, sino también el acercamiento de los estudiantes a la investigación y sus herramientas.

REFERENCIAS

[1] Edis Mekic, Ivan Djokic, Sabina Zejnelagic, and Ana Matovic. Constructive approach in teaching of voip in line with good laboratory and manufacturing practice. *Computer Applications in Engineering Education*, 2015.

[2] I. A. Garcia and E. M. Cano. Designing and implementing a constructionist approach for improving the teaching–learning process in the embedded systems and wireless communications areas. *Computer Applications in Engineering Education*, 22(3):481–493, 2014.

[3] EM Cano, JG Ruiz, and IA Garcia. Integrating a learning constructionist environment and the instructional design approach into the definition of a basic course for embedded systems design. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(1):36–53, 2015.

[4] Keyur Sorathia and Rocco Servidio. Learning and experience: Teaching tangible interaction & edutainment. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 64:265–274, 2012.

[5] Jesús Salinas Ibañez. *Innovación educativa y uso de las TIC*. Universidad Internacional de Andalucía, 2008.

[6] J Martin, V Avila, F Deniz, JJ Quintana, and A Ramos. Inexpensive experimental design to learn energetic parameters of supercapacitors. *Electrical Engineering Electronic Journal*, 2016.

[7] S. Corbellini and A. Vallan. Arduino-based portable system for bioelectrical impedance measurement. In *Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1–5, June 2014.

[8] Miguel Gandra, Rui Seabra, and Fernando P Lima. A low-cost, versatile data logging system for ecological applications. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(3):115–126, 2015.

[9] D Echeverria, V Henríquez, A Ramos, EF Cabrera, and J Valencia. Methodological approach for estimation of surge line on turbocompressors used in turbocharged diesel groups in small and isolated electric power systems. *Electrical Engineering Electronic Journal*, 2016.

[10] J Valencia, V Henríquez, A Ramos, EF Cabrera, and D Echeverria. Characterization of surge phenomenon by the temperature tracking in power plants turbochargers. *Electrical Engineering Electronic Journal*, 2016.

[11] Bernhard Semlitsch and Mihai Mihăescu. Flow phenomena leading to surge in a centrifugal compressor. *Energy*, 103:572–587, 2016.

[12] Andrés Omar Tiseira. *Caracterización experimental y modelado de bombeo en compresores centrífugos de sobrealimentación*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2008.

[13] AX Liu and XQ Zheng. Methods of surge point judgment for compressor experiments. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51:204–213, 2013.

[14] David Alan Fink, Nicholas A Cumpsty, and Edward M Greitzer. Surge dynamics in a free-spool centrifugal compressor system. In *ASME 1991 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, pages V001T01A010–V001T01A010. American Society of Mechanical Engineers, 1991.

[15] Corine Meuleman, Frank Willems, Rick de Lange, and Bram de Jager. Surge in a low-speed radial compressor. In *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, pages V001T01A101–V001T01A101. American Society of Mechanical Engineers, 1998.

[16] G Liśkiewicz, L Horodko, Matthew Stickland, and W Kryłłowicz. Identification of phenomena preceding blower surge by means of pressure spectral maps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54:267–278, 2014.

 ISBN: 978-84-608-9007-2