

# Propuesta para la caracterización del fenómeno de bombeo en sistemas de sobrealimentación de plantas de generación eléctrica

J. Valencia<sup>a</sup>, V. Henríquez<sup>b</sup>, A. Ramos<sup>a</sup>, F. Romero<sup>b</sup>, D. Echeverría<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería de Procesos

<sup>a,b</sup>Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España

## RESUMEN

Por medio de la utilización de dispositivos de adquisición de datos de bajo coste, se propone un método para la detección y monitorización de la temperatura en conductos de admisión de motores de combustión interna sobrealimentados, empleando un sistema embebido (*Arduino Uno*). A través de esta técnica, es posible predecir la inestabilidad teniendo en consideración los gradientes de temperatura que se manifiestan aguas arriba del compresor. Esto tiene como objetivo la asistencia en tareas de aprendizaje y comprensión del fenómeno de bombeo a estudiantes del área de la ingeniería industrial. Además, la propuesta es versátil en lo que respecta a la simulación de diferentes situaciones y por el uso de herramientas libres y de código abierto; tanto en lo referente a las aplicaciones informáticas, como en los componentes y elementos utilizados. Con lo cual, conociendo y empleando procedimientos adecuados es posible anticiparse a este régimen de operación inusual, por lo que pueden evitar graves daños a la máquina y a terceros, además de las repercusiones económicas que pueden originarse.

**Palabras clave:** Arduino, Bombeo, Compresor, Inestabilidad, Innovación educativa, Sobrealimentación, Sistemas embebidos

## 1. INTRODUCCIÓN

La tendencia en la sobrealimentación de motores diesel es seguir incrementando el grado de sobrealimentación hasta el límite mecánico y térmico. Para reducir las presiones máximas y las emisiones de óxidos de nitrógeno, la tendencia es reducir la relación de compresión y retrasar el inicio de la inyección, llegando incluso a producirse éste, después del punto muerto superior. En automoción, el diseño de los motores diesel en los últimos años consiste en aumentar la potencia específica de los motores. De esta manera, se consiguen reducciones de la cilindrada necesaria para alcanzar una determinada potencia. Así, se logran una serie de ventajas en consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Uno de los casos a tener en cuenta es que el diseño del compresor no ha sufrido cambios que permitan ampliar su rango de operación en los últimos años. Todos los datos apuntan a que una vez generalizado el uso de las turbinas de geometría variable y la tendencia en la disminución de su tamaño, es el compresor el elemento limitante en el proceso de "downsizing"<sup>4</sup>. Efectivamente, en el sistema de admisión del motor no se puede instalar un sistema de "by pass" como se hace en el escape ya que, es necesario comprimir el aire. Por el compresor ha de pasar todo el aire admitido por el motor y teniendo en cuenta la elevada potencia específica la tendencia no es, desde luego, a reducir el gasto másico máximo del compresor. Por otra parte, debido al menor tamaño de la turbina la potencia que ésta puede suministrar al compresor a bajo número de vueltas hace que la relación de compresión suministrada por el compresor a bajas vueltas de motor aumente de manera notable. Esto requiere un incremento del rango operativo del compresor para gastos másicos reducidos. De esta manera, todo lo anterior se traduce en aumentar el margen de bombeo de los compresores. En este escenario de maximización de la potencia específica de los motores diesel es cuando el bombeo, que hasta ahora no era un problema mayor en el diseño del sistema de sobrealimentación está apareciendo de forma generalizada.

---

Información adicional de los autores:

**E-mail:** jorge.valencia101@alu.ulpgc.es, vicente.henriquez@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es, francisco.romero108@alu.ulpgc.es, david.echeverri101a@alu.ulpgc.es

La ventaja de conocer el funcionamiento de una turbomáquina en régimen de bombeo reside en realizar diseños más eficientes de los equipos, ajustando mejor los márgenes de operatividad permitiendo así un mayor rendimiento. Esto, a su vez, propone una forma eficaz de anticiparse a la inestabilidad de la máquina y realizar paradas de mantenimiento puntuales que no pongan en riesgo la producción de forma tan drástica como se pueden generar tras la destrucción de un componente del compresor. Por ejemplo, en el sector de la generación eléctrica, las centrales de base o centrales principales son las que están destinadas a suministrar la mayor parte de energía eléctrica. Su función es suministrar energía eléctrica de forma permanente; la instalación suele estar en marcha durante largos períodos de tiempo y no debe sufrir interrupciones de la instalación. Por tanto, disponer de turbomáquinas más eficientes y tener pleno conocimiento de los márgenes de operación, favorecen a entornos tan delicados como es la generación eléctrica.

La importancia de lograr un control del bombeo estriba en que las fluctuaciones del aire provocadas por el bombeo tienen una incidencia destructiva sobre el compresor. La amplitud de varios parámetros termodinámicos o aerodinámicos, tales como la presión, la temperatura, el ruido, oscilan drásticamente cuando el bombeo ocurre, lo que puede afectar la seguridad, durabilidad y fiabilidad de la turbomáquina e incluso el sistema de potencia <sup>11</sup>. De esta forma, y teniendo en cuenta una de las formas más comunes de detectar el bombeo -mediante la monitorización de la temperatura a la entrada del compresor- se propone la variante en base a la medición de la temperatura estática para su estudio y comprensión <sup>12</sup>.

Por ende, junto con el objetivo de estudiar el problema del mal comportamiento de los motores sobrealimentados para generación eléctrica, se establece una estrategia de aprendizaje que favorezcan a los estudiantes a conocer y entender los regímenes de inestabilidad de las turbomáquinas. Estos métodos podrían fundamentarse en el uso de dispositivos o diseños experimentales, de laboratorio, desarrollados para el estudio y análisis de las turbomáquinas. De esta manera, conforme a las teorías de aprendizaje psicológicas expuestas en diversos trabajos, <sup>13-14</sup> los estudiantes refuerzan sus conocimientos a través del uso de estas herramientas, así como por medio de la construcción y empleo de artefactos diseñados, para este cometido.

## 2. EL FENÓMENO DE BOMBEO

El fenómeno de bombeo en las turbomáquinas se presenta cada vez con más asiduidad. Uno de los motivos más relevantes -la industria más afectada es la del automovilismo- es debido al desarrollo de motores más pequeños y con mayores prestaciones en cuanto a potencia se refiere. Esto genera una denotada problemática en las etapas de compresión del fluido, exigiendo que los equipos operen en zonas próximas al margen de bombeo, pudiendo incluso llegar a rebasarlas acarreado los pertinentes inconvenientes. El bombeo es un suceso en el que en el compresor, por cuestiones de diseño u operación, se reduce el gasto másico a medida que se incrementa la velocidad de giro del rodete. De esta manera, se produce una mayor presión en la etapa de salida que genera recirculaciones hacia la admisión de la máquina. Esto crea una serie de oscilaciones cíclicas que, en casos puede llegar a la avería del equipo con consecuencias catastróficas. El interés de esta inestabilidad va desde los pequeños compresores centrífugos de los automóviles hasta los grandes compresores centrífugos de los motores marinos. De igual forma sucede con los compresores axiales tanto en motores de aviación como en las turbinas de gas para generación eléctrica. La actuación del compresor y por tanto el pleno rendimiento del motor están limitados por el gasto mínimo que puede trasegar el primero <sup>10</sup>. Este nivel de gasto está determinado por la línea (o límite) de inestabilidad o bombeo. Ésta indica la zona del mapa del compresor en la cual éste abandona el comportamiento estable, apareciendo oscilaciones de caudal, presión y temperatura.

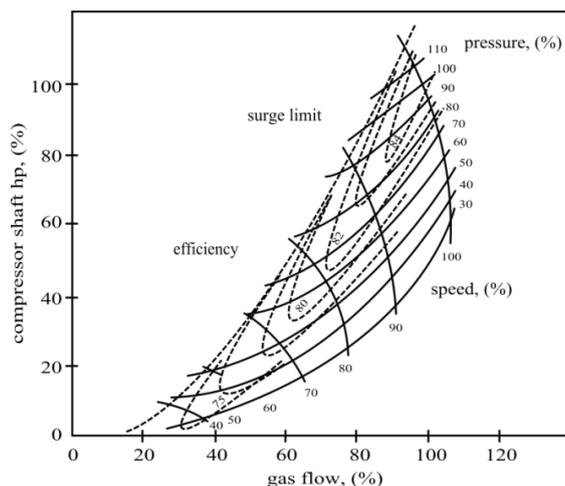


Figura 1: Mapa característico de funcionamiento de un compresor <sup>2</sup>.

El flujo reverso que se produce cuando se dan las inestabilidades, provoca un fuerte impacto sobre la topología del flujo de entrada al inductor. Kämmer et al. <sup>5</sup> detectaron tales efectos y cómo generan una pre-rotación del fluido de manera que se favorece la evolución hacia el bombeo.

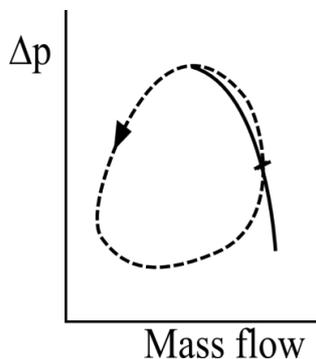


Figura 2: Fenómeno de bombeo <sup>3</sup>.

Una de las primeras y más comunes formas de detectar el bombeo ha sido mediante la monitorización de la temperatura a la entrada del compresor. Pampreen <sup>8</sup> cita los trabajos realizados por Kämmer et al. <sup>5</sup> al respecto en el año 1986 donde se podía ver cómo la temperatura se incrementa a medida que las inestabilidades son más pronunciadas. Una investigación más reciente sobre el mismo método de detección de los desprendimientos y el flujo reverso fue llevada a cabo por Andersen et al. <sup>1</sup>. En este trabajo se colocan cinco sensores de temperatura a cinco diferentes distancias en dirección axial desde el rotor del compresor, de manera que se tiene la distribución de temperaturas del fluido a la entrada del compresor. Encontraron que los gradientes de temperatura comienzan a aparecer mucho antes que se dé el bombeo, y que su magnitud depende del tamaño del compresor, entre otras cosas, lo cual dificulta el poder establecer un criterio común. Sin embargo, concluyen que la medición de la temperatura de entrada del fluido en las proximidades del inductor es un buen método de detección del bombeo. Además, también dicen que el gradiente de temperatura tiene una importante correlación con el nivel del ruido asociado a las inestabilidades, y que es apto para ser usado tanto en flujo continuo como pulsante.

Uno de los campos de actuación de mayor relevancia de las turbomáquinas es en la generación eléctrica. El sector de la energía aporta el 3,6% del PIB en y el 1,4% del empleo y es de importancia estratégica para el funcionamiento de todo el sistema productivo español. Dentro de él está incluido el de la energía eléctrica, donde participan diversos actores: los que se encargan de producirla, los que la transportan, los que la distribuyen y finalmente, los que la consumimos. Los datos de Red Eléctrica Española (REE) indican que en 2013 la potencia instalada en España era de 101.615 MW <sup>9</sup>. En

cambio, datos del año 2000 nos indican que la potencia instalada en aquel año era de 55.563 MW, prácticamente la mitad. Todo esto pone de manifiesto que las exigencias de la sociedad son cada vez mayores en términos energéticos. Por tanto, disponer de equipos de generación que ofrezcan un mayor rendimiento -lo que se traduce en unos estándares de producción más elevados- con el mismo o menor consumo de combustible es indispensable en el sector de la energía.

### 3. EXPERIMENTO

Con el fin de ensayar la técnica desarrollada y recopilar los datos necesarios para el aprendizaje y la posterior implementación en un sistema real, se construye un banco de pruebas, el cual presenta una distribución como la de la figura 4.

Se genera una corriente de aire a partir de un ventilador controlado por un *Arduino Micro*. Unas *resistencias NTC* distribuidas en el interior del tubo de admisión captan los cambios de temperatura y estos gradientes son interpretados por un *Arduino Uno*. Asimismo, empleando el entorno *Processing*, se gestiona la recogida de datos procedentes del microcontrolador. Estos parámetros se corresponden a las señales de los tres sensores de temperatura instalados. El sensor  $T_{amb}$  se encuentra fuera del conducto y mide la temperatura ambiente. El *NTC*  $T_{ext}$  se coloca en el interior del conducto, lo más cercano a la cara interna de éste. En última instancia, el termistor  $T_{int}$  se sitúa en el eje de revolución del tubo, favoreciendo el estancamiento del aire.

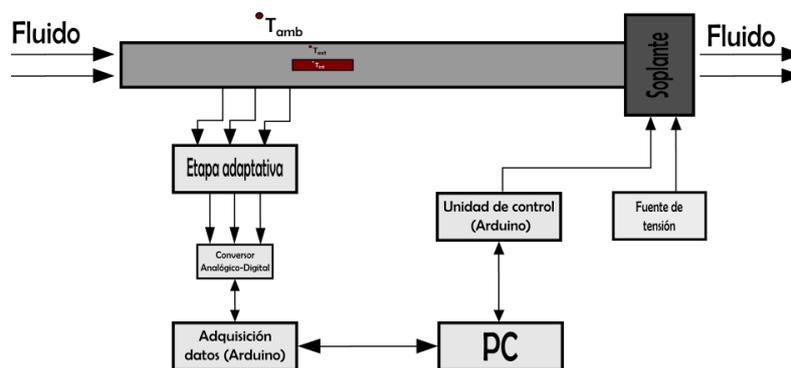


Figura 3: Diagrama básico del diseño experimental.

El sistema consiste en los siguientes elementos:

1. Resistencias NTC.
2. Una etapa de adaptación de la señal con un circuito acondicionador (divisor de tensión).
3. Dos convertidores analógico/digital **ADS1115** (*Texas Instruments*).
4. Un microcontrolador **ATmega32U4** (*Atmel*) implementado en un sistema embebido, llamado **Arduino Uno** (*Arduino*).



Figura 4: Arduino Uno

5. Un microcontrolador **ATmega32U4** (*Atmel*) implementado en un sistema embebido, llamado **Arduino Micro** (*Arduino*).

6. Un PC, que se encarga de controlar y configurar los microcontroladores y almacenar los datos suministrados por estos.

A continuación, se muestra una fotografía del sistema propuesto:



Figura 5: Montaje de los equipos

Por último, cabe mencionar que sucesivos estudios hacen referencia a la detección del bombeo incipiente por medio de la lectura de temperatura de estancamiento <sup>7</sup> -en el diagrama  $h_{01}$  y  $h_{02}$ -. No obstante, esto no infiere en el estado energético del fluido ya que, el término que se adecúa a tal efecto es el que apunta a la temperatura estática -en el diagrama  $h_1$  y  $h_2$ -. Con lo cual, nuestro método pretende tomar como puntos de referencia los niveles 1 y 2, que son los que nos proporcionan la información de la inestabilidad emergente. Esto permitirá a los estudiantes contrastar y corroborar la condición de inestabilidad incipiente en la máquina.

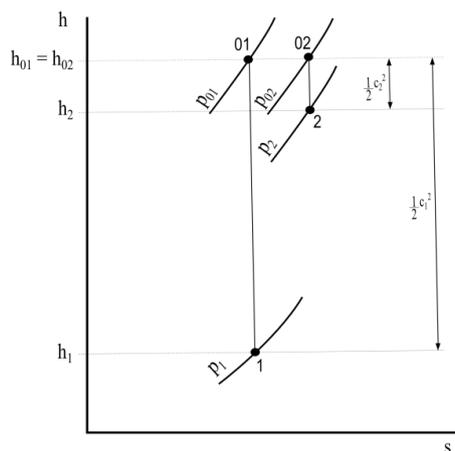


Figura 6: Diagrama h-s

#### 4. CONCLUSIONES

Por medio de este trabajo se pretende aportar al alumno una visión comprensiva del fenómeno del bombeo. De esta manera, conociendo las condiciones de operación y los parámetros que conducen a la inestabilidad de la máquina, se generan una serie de conceptos e ideas para lograr evadir dichas inestabilidades o, al menos, retrasar el fenómeno lo

máximo posible. Lo que, si trasladamos esta teoría al mapa característico del compresor significa mover la línea de bombeo conformada por los puntos de cada régimen de giro hacia la izquierda del mapa, consiguiendo así, a bajos valores de caudal másico consumido por el compresor, una estabilización y un valor de relación de compresión más alto o igual al que se tenía sin modificar el punto de bombeo original. Por consiguiente, esto se traduce a su vez en un mayor rango de operación del compresor al disminuir el margen necesario para evitar la entrada en bombeo del compresor a cualquier régimen de giro y proporcionar una mejora en la capacidad de funcionamiento del motor, sobre todo, a bajo número de revoluciones. Con lo cual, el estudiante podrá variar y apreciar las variaciones por medio de un sistema embebido basado en Arduino, el cual irá acompañado con una interfaz para su control desde un ordenador. Asimismo, será capaz de interpretar la importancia de disponer de un sistema de generación eléctrica estable con el fin de evitar fluctuaciones o interrupciones en el suministro eléctrico

Los ensayos experimentales en bombeo se pueden clasificar como ensayos destructivos sobre la turbomáquina; de ahí la importancia de obtener un método que permita anticiparse al ciclo de oscilación. Además, se ha planteado el diseño basándose en la utilización de aplicaciones informáticas de código abierto, así como por dispositivos de libre utilización y modificación. Todas estas características hacen que los estudiantes puedan modificar fácilmente el diseño presentado, facilitando su comprensión sobre el fenómeno de inestabilidad en turbomáquinas.

## REFERENCIAS

- [1] Andersen, J., Lindström F. and Westin, F., "Surge definitions for radial compressors in automotive turbochargers", SAE paper 2008-01-0296 (2008).
- [2] Boyce, M.P., "Gas turbine Engineering Handbook", Third Edition, Gulf Professional Publishing, United Kingdom, pp. 139-176 (2006).
- [3] Cumpsty, N.A., "Compressor Aerodynamics", Longman Scientific & Technical, United Kingdom, pp. 359-409 (1989).
- [4] Galindo, J., Tiseira, A., Arnau, F.J. and Lang, R., "On-Engine Measurement of Turbocharger Surge Limit. Experimental Techniques". 37:47-54 (2013).
- [5] Kämmer, N. and Rautenberg, M., "A distinction between different types of stall in a centrifugal compressor stage". ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines y Power. Vol. 108, pp. 83-92 (1986).
- [6] Lang, R., "Contribución a la Mejora del Margen de Bombeo en Compresores Centrífugos de Sobrealimentación", Universidad Politécnica de Valencia (2011).
- [7] Liu, A. X. and Zheng, X. Q. Zheng, "Methods of surge point judgment for compressor experiments", Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 51, p. 204-213 (2013).
- [8] Pampreen, R. "Compressor Surge and Stall". Concepts ETI, Inc. Norwich, Vermont, USA (1993).
- [9] R. E. d. España, "Red Eléctrica de España", 09 Mayo 2016, <http://www.ree.es> (09 Mayo 2016).
- [10] Tiseira, A. O., "Caracterización Experimental y Modelado de Bombeo en Compresores Centrífugos de Sobrealimentación", Universidad Politécnica de Valencia (2008).
- [11] Valencia, J., Henríquez, V., Ramos, A., Cabrera, E. and Echeverría, D., "Characterization of surge phenomenon by the temperature tracking in power plants turbochargers", Electrical Engineering Electronic Journal (2016).
- [12] Echeverría, D., Henríquez, V., Ramos, A., Cabrera, E. and Valencia, J., "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).
- [13] Mekic, E., Djokic, I., Zejnelagic, S., and Matovic, A., "Constructive approach in teaching of void in line with good laboratory and manufacturing practice", Computer Applications in Engineering Education (2015).
- [14] Sorathia, K. and Servidio, R., "Learning and experience: Teaching tangible interaction and edutainment", Procedia - Social and Behavioral Sciences 64, 265 – 274 (2012).