

Instalación Experimental de Chorros de Mezcla de Vapor y Gases Incondensables

Nombres Autores: Y. Córdova, D. Blanco, C. Berna, A. Escrivá, J. L. Muñoz-Cobo.
Empresa: Instituto de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València.
Dirección: Camino de Vera, S/N
Teléfono: 963 87 92 45
E-mail: yaicorc1@upvnet.upv.es

Resumen – La descarga de vapor en forma de chorro en piscinas con agua subenfriada es una forma muy eficiente de condensar vapor y se ha utilizado ampliamente en la industria ya que permite una rápida condensación del vapor al ofrecer una alta transferencia de calor y capacidad de intercambio de masa. Muchos experimentos de jet en piscina se han ido desarrollando desde hace décadas, aportando información de interés en el campo en que tratamos. Se sigue trabajando para obtener un rango de información más amplio, considerando mayor número de variables y parámetros, obteniendo correlaciones cada vez más precisas en las que se tiene en cuenta más diversidad de escenarios. Se ha desarrollado una instalación para llevar a cabo el estudio del jet horizontal en una piscina en la que se pueden realizar pruebas con una amplia variedad de situaciones, permitiendo el estudio del jet de aire, vapor y la mezcla de ambos gases, combinando distintas presiones, temperaturas y porcentaje de mezcla, entre otras variables de interés. Se realizan distintas pruebas obteniendo capturas de imágenes, con una cámara de alta velocidad, mediante las cuales se puede realizar un tratamiento de datos, pudiendo obtener trayectorias, longitud de penetración y distintos patrones que ayuden a entender la fenomenología que se produce en la descarga en la piscina. La instalación consta de una instrumentación adecuada para realizar las medidas oportunas en rangos de error asumibles, con la intención de obtener resultados con la máxima precisión posible.

1. INTRODUCCIÓN

Para la industria nuclear es de gran interés conocer y comprender la condensación del vapor en presencia de gases incondensables desde el punto de vista de seguridad del reactor nuclear debido a que cuando se produce un accidente severo y la fusión del núcleo, se generará gran cantidad de vapor, gases incondensables y productos de fisión. Algunos ejemplos donde se puede presenciar este fenómeno es en los sistemas de despresurización de las actuales centrales nucleares o en la rotura de tubos del generador de vapor. En el primer caso, se tiene una condensación por contacto directo (DCC), la cual permite una rápida condensación del vapor al ofrecer una gran área interfacial y una gran turbulencia.

Actualmente existen varios estudios experimentales sobre el comportamiento del flujo en las piscinas de supresión, pero la mayoría se han realizado con descargas de aire o vapor puros. Las descargas de mezclas de vapor y gases incondensables no se ha estudiado con tanta profundidad por su complejidad, debido a que la presencia de gases incondensables afecta considerablemente a la condensación de un chorro de vapor.

2. OBJETIVOS

Por estas razones el Instituto de Ingeniería Energética de la UPV decidió montar una instalación experimental en el Laboratorio de Termohidráulica que permita realizar una serie de experimentos utilizando distintas condiciones de descarga de mezclas de aire/vapor a través de una boquilla en una piscina con agua en reposo con el objetivo de obtener correlaciones experimentales que proporcionen las características más importantes de los chorros descargados al penetrar en

dichas piscinas, como son la longitud de penetración del chorro en la zona de momento y en la zona de flotabilidad en función de las características de la inyección como diámetro de la boquilla, flujo másico de la mezcla, presión en la boquilla, entre otros parámetros característicos.

Del mismo modo, se pretende obtener modelos predictivos de la trayectoria del chorro y su anchura en función de las condiciones de contorno como momento inicial del chorro, diámetro de la boquilla y profundidad de la inyección, que nos permitirá calcular la evolución de una descarga en una piscina, longitud de penetración y la curvatura que tiene la trayectoria.

Otros objetivos son estudiar las condiciones experimentales bajo las cuales tiene lugar el fenómeno de pinch-off en el cual el chorro se rompe, estudiar las oscilaciones que se producen en la interface líquido gas y como afectan al comportamiento del chorro y, por último, estudiar el arrastre de gotitas de líquido de la interface gas-líquido.

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

3.1. Instalación Experimental

La instalación realiza una inyección de mezcla de vapor y aire en una piscina de base rectangular con agua a temperatura ambiente (véase la Figura 1). El agua utilizada durante la ejecución de los experimentos está previamente purificada mediante un sistema de osmosis inversa, con el objetivo de eliminar las posibles impurezas y la cal disuelta. La piscina con dimensiones (longitud x ancho x altura) 1500 mm x 500 mm x 600 mm tiene todas sus paredes de vidrio para posibilitar las mediciones ópticas del flujo. Se mantiene un nivel de agua de 500 mm en los experimentos de chorro horizontal. Para la inyección se utilizan 4 boquillas intercambiables de acero inoxidable de diferentes diámetros interiores (2, 3, 4, 5 mm), con la misma longitud de 130 mm y se encuentran ubicadas a la altura de 400 mm por debajo del nivel del agua y a 100 mm del fondo de la piscina.

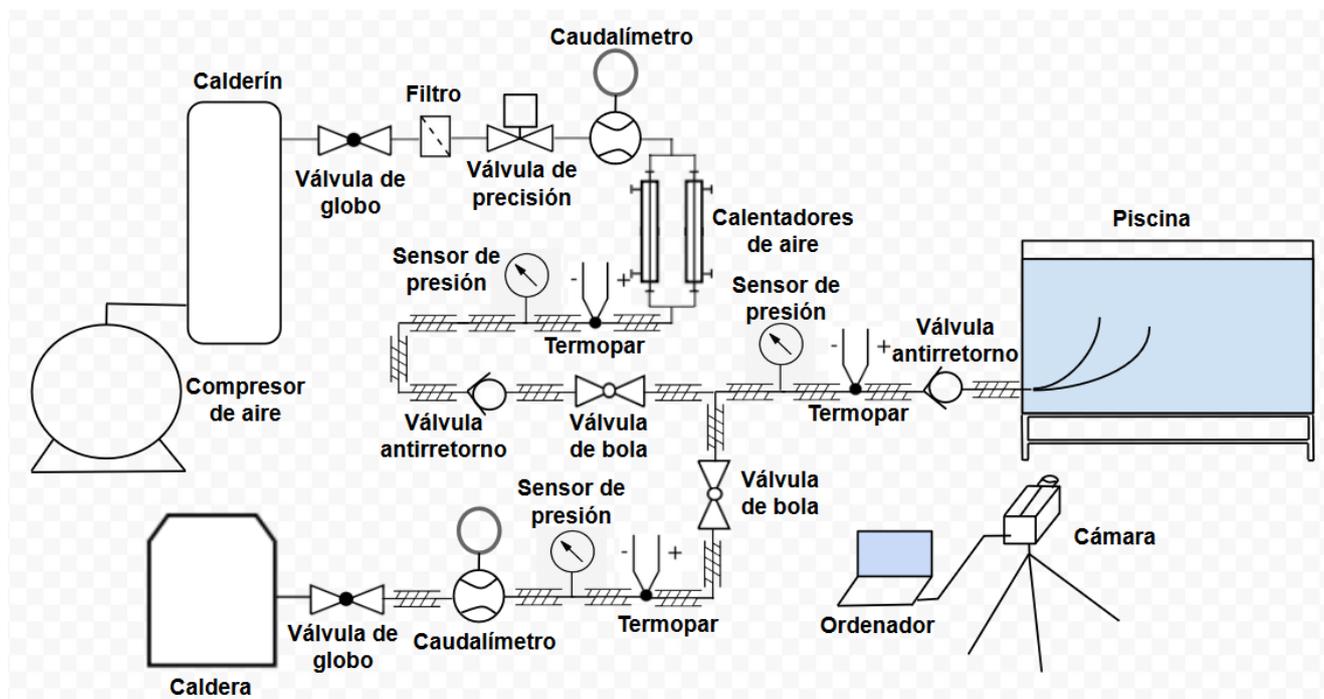


Figura 1. Diagrama Esquemático de la instalación experimental

La inyección del aire presurizado se consigue mediante un compresor de tornillo con un volumen de 500 L, cuya presión de operación máxima es de 11 bar. Tras el compresor se sitúa un tanque de gas (calderín) de 100 L con el objetivo de estabilizar las condiciones del aire previamente a la inyección. El flujo de aire se regula mediante una válvula de globo y una válvula de precisión, posteriormente se mide con un caudalímetro con rango de operación de 50 – 500 L/min y una presión máxima de 7.5 bar. Para que no exista condensación a la hora del mezclado de aire con el vapor es necesario calentar el aire, por lo que la instalación cuenta con dos calentadores de aire en paralelo FLUENT de 120 V y 500 W. El control de temperatura se realizará mediante un sistema de control PID de lazo cerrado y con un módulo de potencia DIN-a-mite que permite el control analógico de la potencia. Para medir la temperatura de salida del proceso se utiliza un termopar tipo “K” ($\pm 0.1^\circ\text{C}$ de precisión), el cual será el punto de consigna (véase la Figura 2).

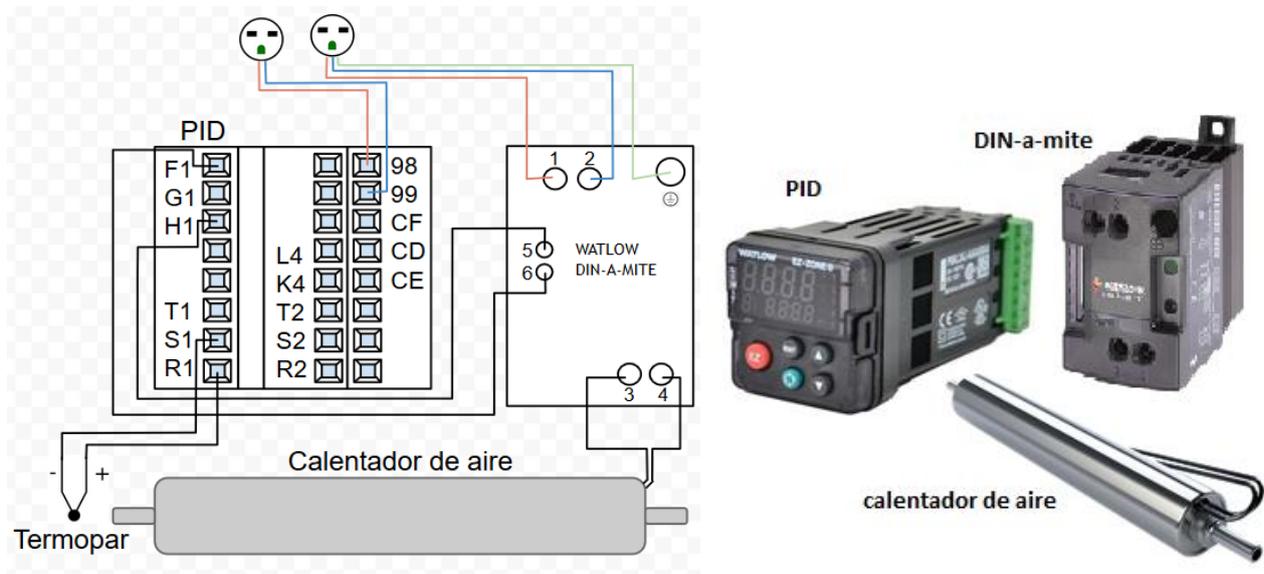


Figura 2. Diagrama Esquemático de conexión para el control de calentador de aire y dispositivos.

Una caldera de vapor eléctrica es utilizada para producir vapor saturado. Su presión de operación máxima es 6.5 bar. Un caudalímetro Krohne con un rango de operación de 0 – 500 L/min es el encargado de medir el flujo másico de vapor. Aguas abajo del caudalímetro se encuentra un sensor de presión y un termopar para monitorizar la presión y la temperatura con la que se produce la mezcla.

Tras la zona de mezclado, se encuentran ubicados un sensor de presión y uno de temperatura para conocer los parámetros de la mezcla en la salida de la boquilla. Las tuberías son de un material que soporta temperaturas de hasta 232°C y presión de 18 bar, las mismas están aisladas térmicamente para evitar pérdidas.

Todos los sensores son conectados a un sistema de adquisición de datos de National Instruments (Modelo 6259 de 16 bits) operado por el Software Labview para monitorizar y controlar la adquisición de datos.

Un panel de luz LED con dimensiones 1150 mm x 250 mm se coloca en la parte posterior de la piscina para utilizarlo como fondo de iluminación. El comportamiento del chorro es grabado por una cámara de alta velocidad de 10 bit (PCO.1200 hs), con un rango de tiempo de exposición de 50 ns a 5 s, una frecuencia de disparo de 636 fps a máxima resolución y 1280 x 1024 pixel. Se utilizó la boquilla como marco de referencia de longitud en el posterior tratamiento de imágenes (véase la Figura 3).



Figura 3. Fotografía que muestra la instalación experimental.

3.2. Metodología a utilizar en la fase de experimentación:

Esta fase trata de realizar una serie de experimentos de mezclas de aire/vapor que se descargan a través de una boquilla en una piscina con agua en reposo. Se variarán las siguientes magnitudes: flujo másico inyectado (kg/s) en la piscina, diámetro de la boquilla de inyección y presión a la cual tiene lugar la inyección. Se determinará la longitud de penetración del chorro en la zona dominada por el momento, la longitud de penetración en la zona dominada por la flotabilidad, y la variación de la semianchura en función de la distancia al punto de inyección. Además, se obtendrá del ángulo de expansión del chorro en la piscina, la trayectoria del chorro en la zona dominada por el momento, en la zona de transición y en la zona dominada por las fuerzas de flotabilidad. Se montarán termopares a distintas distancias y profundidades con el fin de determinar si se produce estratificación térmica en la piscina.

3.3. Metodología a utilizar para el tratamiento de datos de los experimentos y la obtención de correlaciones.

Se utilizará una cámara de alta velocidad (CMOX), mediante la cual, a través de las técnicas de visualización directa, se grabarán imágenes de la descarga del chorro en la piscina para determinar la interface entre el gas y el líquido. Para llevar a cabo el procesamiento de dichas imágenes, se implementará una rutina en MATLAB que constará de varios pasos. Primero, se realizará una corrección de fondo, restando los valores de iluminación de una imagen a la de una imagen de fondo. Luego, se convertirá la misma en una imagen binaria de 0:1 por medio de un método de valor de umbral y se aplicará un filtro mediano para suavizar cualquier irregularidad. La operación de ajuste (morfológica) se aplicará para eliminar pequeñas burbujas de la imagen. Por último, se tomará las coordenadas del perímetro para extraer los diferentes parámetros del chorro.

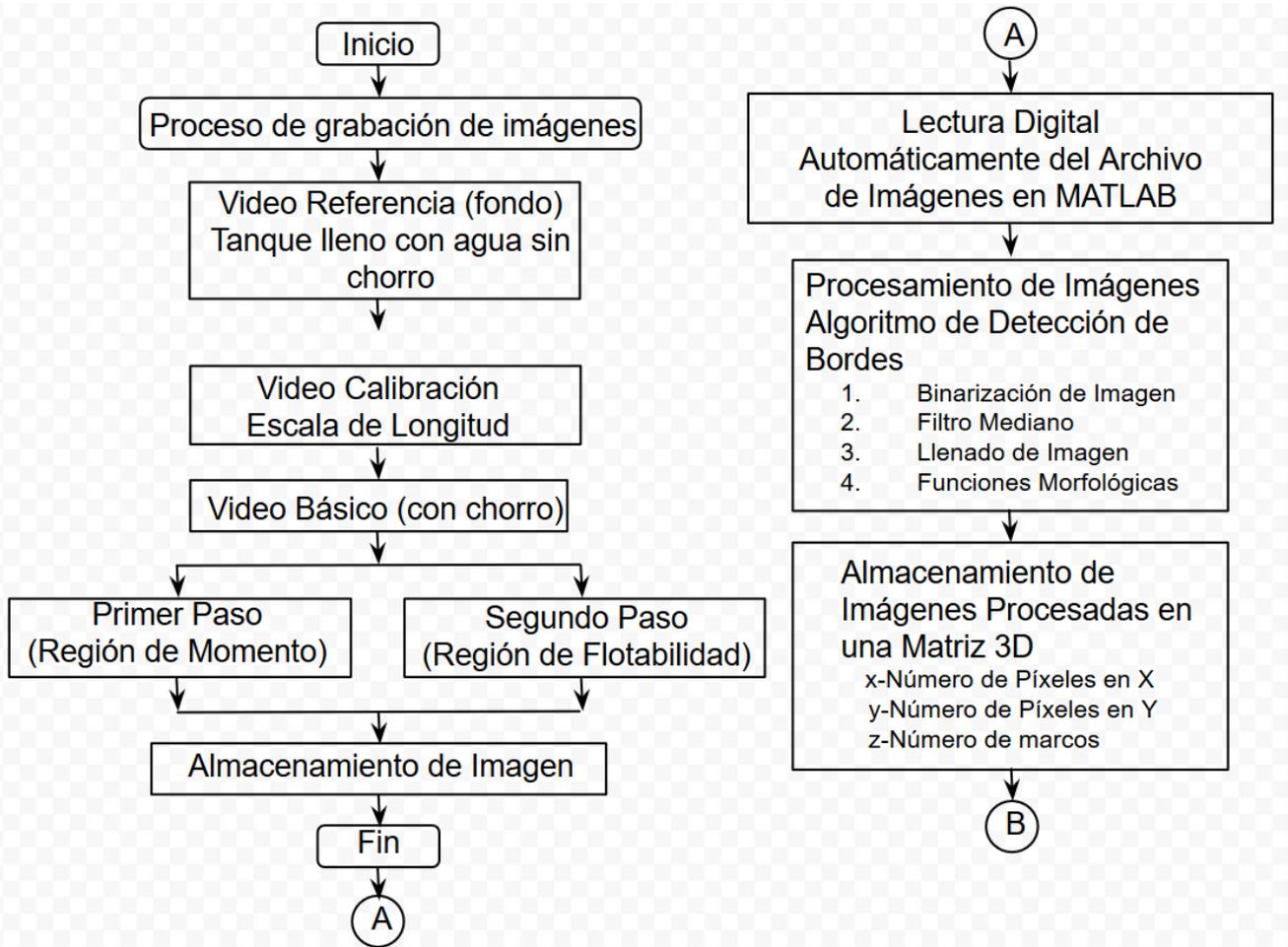


Figura 4. Diagrama de Flujo de: a) Grabación de Imágenes, calibración y pasos de almacenamiento y b) Procesamiento de imágenes y almacenamiento de datos en una matriz 3D.

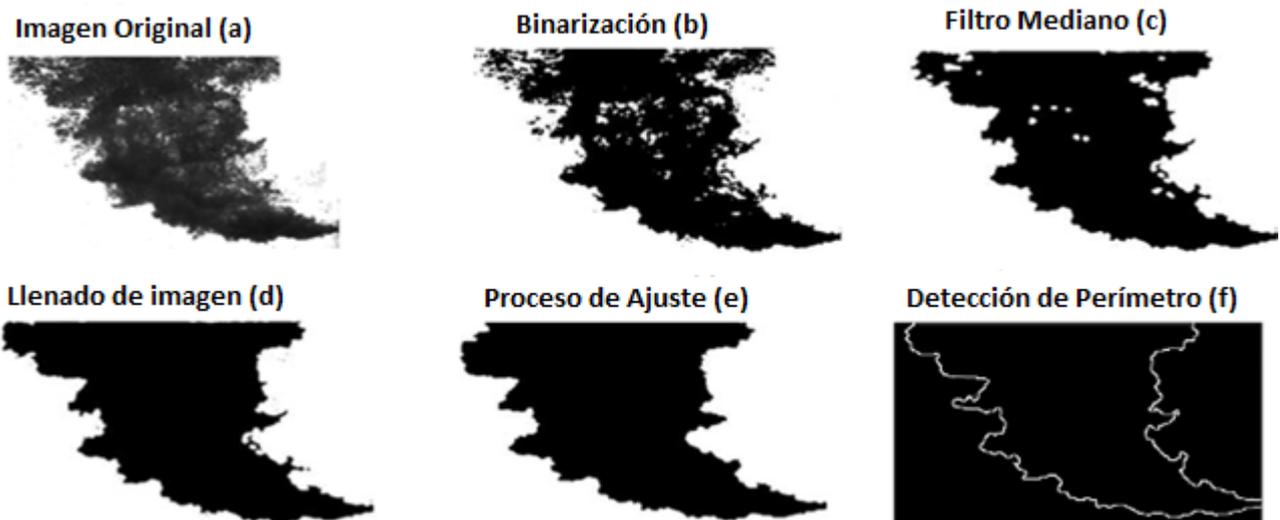


Figura 5. Pasos utilizados para la detección del contorno del chorro.

En cuanto a las correlaciones a determinar, se obtendrán correlaciones de las siguientes magnitudes, longitud de penetración adimensionalizada con el diámetro en la zona dominada por el momento, en función del número de Reynolds del gas y/o el número de Froude. Se obtendrá también una correlación para la semianchura adimensionalizada en función de la distancia, el número de Froude y/o el número de Reynolds del gas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales que se esperan obtener nos permitirán conocer los fenómenos asociados a las descargas de forma detallada y cuantitativa en un campo de gran relevancia y donde varios grupos de investigación se encuentran trabajando. Esto nos facilitará la caracterización de estos fenómenos, con lo que se pueden obtener modelos y correlaciones cada vez más exactos y detallados. Además, los experimentos que se realizarán nos permitirán ampliar la escasa base de datos existentes en las descargas de vapor con gases incondensables actualmente disponible.

La otra parte importante del proyecto se centraría en los códigos de simulación, los cuales se utilizan cada vez más a menudo para el cálculo y el diseño de instalaciones. Los códigos de sistema, como el TRACE o el SPARC son ampliamente utilizados por la industria nuclear. TRACE está siendo actualizado constantemente y una de las áreas pendientes de mejoras está relacionada con los modelos y correlaciones a emplear cuando hay presencia de gases incondensables. El código SPARC se utiliza para calcular los factores de descontaminación en las descargas de flujo en piscinas, y de los trabajos realizados recientemente que han dado lugar a una nueva versión del código, se ha visto que los modelos para el cálculo de la condensación en presencia de gases incondensables no eran adecuados y debiéndose realizar una actualización de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo desean agradecer la financiación recibida del programa Santiago Grisolia.

REFERENCIAS

K.-S. Liang, P. Griffit. Experimental and analytical study of direct contact condensation of steam in water. *Nuclear Engineering and Design* 147, 425-435. (1994).

R. Lindken W. Merzkirch. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids* 33, 814-825. (2002).

T.L. Norman, S.T. Revankar. Jet-plume condensation of steam-air mixtures in subcooled water, Part 1: Experiments. *Nuclear Engineering and Design* 240, 524-532. (2010).

K.H.M. Abd-Alaal. Experimental and Theoretical Study of the Characteristics of Submerged Horizontal Gas Jets and Vertical Plunging Water Jets in Water Ambient. PhD. Thesis. (2012).

I. Zadrazil, C.N. Markides. An experimental characterization of liquid films in downwards co-current gas-liquid annular flow by particle image and tracking velocimetry. *International Journal of Multiphase Flow* 67, 42-53. (2014).

W. Chen, Y. Wang, Q. Zhao, D. Chong, J. Yan. Experimental investigation on the second dominant frequency of supersonic steam jet condensation oscillation and its propagation characteristic. *Annals of Nuclear Energy* 97, 122-131. (2016).



W. Li, Z. Meng, Z. Sun, L. Sun, C. Wang. Investigations on the penetration length of steam-air mixture jets injected horizontally and vertically in quiescent water, *Int. J. Heat Mass Transf.* 122, 89–98. (2018).

W. Li, Z. Meng, J. Wang, Z. Sun. Effect of non-condensable gas on pressure oscillation of submerged steam jet condensation in condensation oscillation regime, *Int. J. Heat Mass Transf.* 124, 141-149. (2018).

W. Li, Z. Meng, J. Wang, J. Liu, Z. Sun. Experimental investigations on pressure oscillation induced by steam-air mixture gas sonic jets in subcooled water, *Int. J. Heat Mass Transf.* 128, 450-458. (2019).