

## **Estudio fluido dinámico de gases en chimenea de caldera**

**Ricardo J. Filace**, YPF S.A., Complejo Industrial La Plata ([ricardo.filace@ypf.com](mailto:ricardo.filace@ypf.com))

**Marcela Raviculé**, YPF S.A., Dirección de Tecnología ([mravicules@ypf.com](mailto:mravicules@ypf.com))

**Ana Scarabino**, UNLP Facultad de Ingeniería ([scarabino@ing.unlp.edu.ar](mailto:scarabino@ing.unlp.edu.ar))

**Federico Bacchi**, UNLP Facultad de Ingeniería ([fbacchi@ing.unlp.edu.ar](mailto:fbacchi@ing.unlp.edu.ar))

### **Sinopsis**

Se presenta un estudio fluido dinámico sobre los gases de escape en el interior de una chimenea de caldera. Problemas de distribución de flujo y flujo ciclónico de los gases producto de combustión son sospechados y parcialmente corroborados, por medios experimentales, en la chimenea de una caldera. Un modelo tridimensional de las secciones finales de la caldera, junto a un entorno atmosférico estanco es desarrollado y utilizado para realizar simulaciones CFD (computational fluid dynamics). Mediante el análisis de los resultados obtenidos, los problemas anteriormente mencionados son confirmados y sus potenciales causas, identificadas. En base a esto, se evalúan diversas alternativas de solución utilizando los mismos métodos numéricos. Tras el análisis de los resultados obtenidos se identifica una solución cuya implementación es factible, observándose su incidencia en la resolución de los problemas de distribución y helicidad del flujo, así como su impacto en la pérdida de carga.

### **Introducción**

Los efluentes gaseosos producto de la quema de combustibles fósiles han permanecido en el foco de discusiones ambientales durante gran parte de las últimas décadas. Ello ha motivado una constante evolución tanto en los aspectos legales y regulatorios por parte de los Estados; en los sistemas de medición, control y gestión por parte de las industrias; así como también en la cultura y conciencia de la población acerca de las problemáticas ambientales derivadas del vertido de efluentes gaseosos a la atmósfera.

A la vez que las técnicas para la determinación experimental de variables de interés ambiental en efluentes gaseosos fueron evolucionando, también fueron disminuyendo los límites permitidos para el vuelco de los mismos a la atmósfera. Como resultado de este proceso, muchas de las instalaciones industriales concebidas en otro marco regulatorio debieron ser modificadas a lo largo del tiempo para adecuarse a nuevos requerimientos legales, y dar así cumplimiento a objetivos medioambientales cada vez más estrictos.

En un polo petroquímico, los generadores de vapor son, típicamente, los equipos que poseen el mayor impacto sobre el vertido de gases a la atmósfera. Por razones prácticas, la medición de concentraciones de contaminantes en los gases de escape de estos equipos no se realiza en forma continua, sino en forma puntual a intervalos de tiempo variable. Aun así, una operación segura y eficiente, sumado a un monitoreo estricto de variables operativas, nos permiten estimar en tiempo real la calidad del conjunto de efluentes gaseosos aún cuando las variables individuales que la definen no se estén midiendo directamente.

Esto plantea entonces la necesidad de contar con mediciones confiables y precisas de todas las variables de nuestro interés. Para ello, es tan importante la selección adecuada del instrumento de medición como las instalaciones que se utilizan para alojar el mismo, ya sea tanto en medidores de tipo continuo o discontinuo.

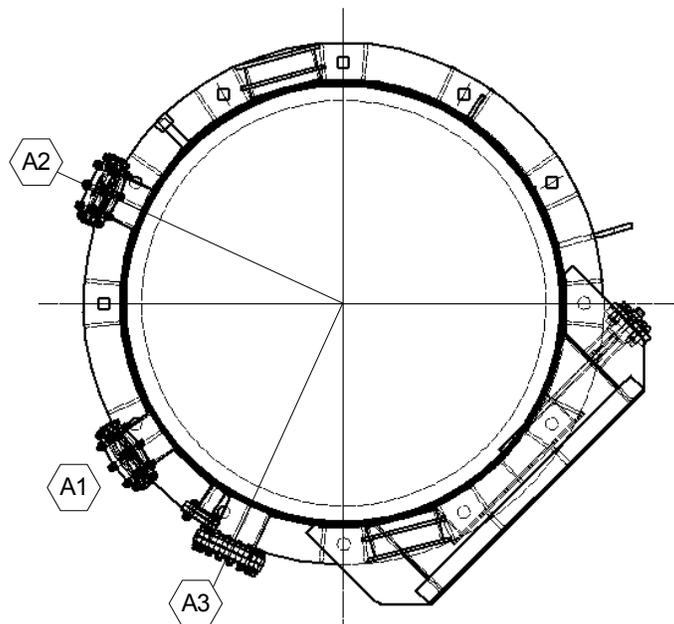
Si bien existen numerosas recomendaciones ([1], [2]) sobre la ubicación de puntos o planos de muestreo en ductos, muchas veces nos interesa conocer la aptitud de los puntos toma-muestras existentes, los cuales pueden no haber sido diseñados bajo las buenas prácticas vigentes o directamente no ser adecuados para la sensibilidad de los instrumentos actuales, si el campo de velocidades de flujo en ese plano no tiene una dirección y distribución relativamente uniformes.

El presente trabajo se encuadra entonces en esta última cuestión, abordando la problemática de analizar la aptitud de planos para muestreo de gases en la chimenea de una caldera a través de rigurosos cálculos fluido-dinámicos.

Las modernas herramientas de mecánica de fluidos computacional (CFD) permiten evaluar en forma numérica los efectos en el flujo de distintas modificaciones en sistemas de chimeneas, de forma relativamente rápida y económica. El estudio numérico de flujo en sistemas tipo chimenea, tanto con convección forzada como natural, ha sido validado en diversos casos ([3], [4], [5], [6]).

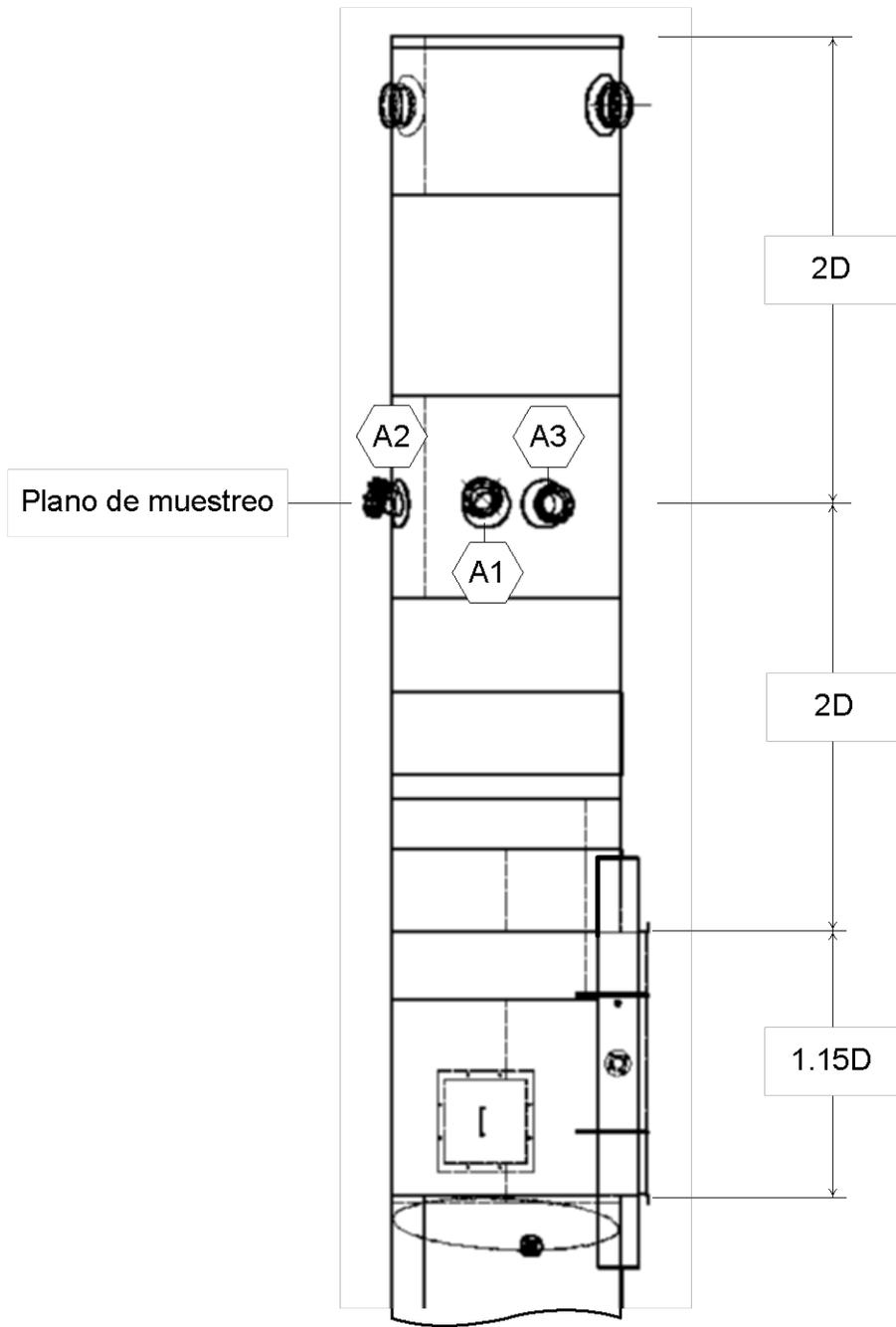
### Desarrollo

Diversas determinaciones de velocidades realizadas sobre la chimenea de una caldera permiten inferir una distribución de flujo de gases no uniforme en el interior de la misma. A raíz de ello, se pone en duda la aptitud del plano actual de medición y en particular, su ubicación respecto de las perturbaciones existentes. La figura 1 presenta gráficamente los toma-muestras disponibles en el plano de muestreo existente.



**Figura 1.** Ubicación de toma-muestras sobre plano de muestreo

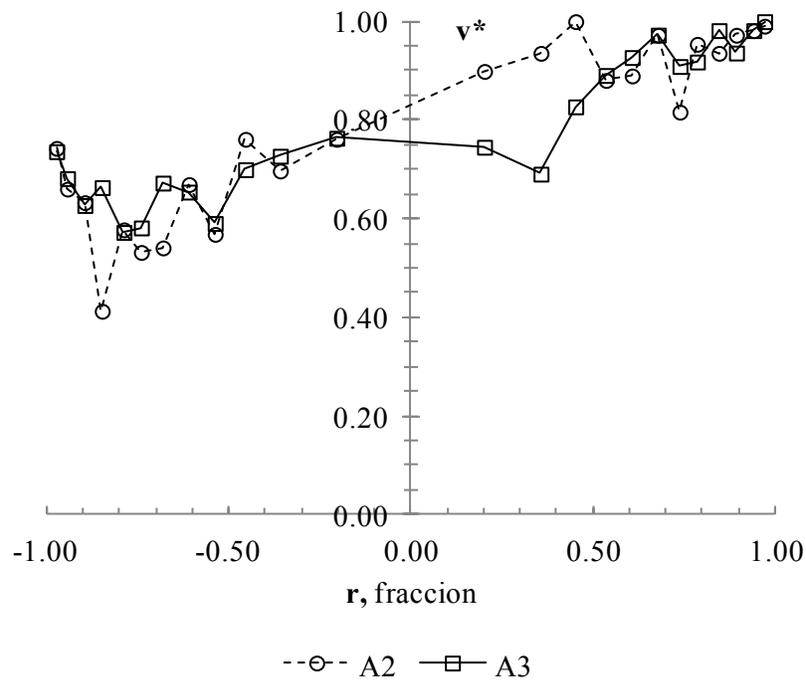
Los toma-muestras se indican como A1, A2 y A3, aunque solo son de nuestro interés A2 y A3 (distanciados 90° uno del otro). En la figura 2 se muestra la ubicación del plano de muestreo en la chimenea, y las principales medidas referidas al diámetro interno de la misma (D).



**Figura 2.** Ubicación de plano de muestreo sobre chimenea

Con el fin de evaluar la aptitud del plano de medición se diseña un ensayo para determinar con mayor exactitud el perfil de velocidades en cuestión, tomando como guía los procedimientos descritos en [1]. Los resultados arrojados por este test, si bien no son concluyentes, permiten corroborar una mala distribución de flujo en el

interior de la chimenea y, aunque no cuantificable, la probable existencia de flujo ciclónico. En la figura 3 se grafican las velocidades (adimensionalizadas) observadas a lo largo de cada toma-muestras.



**Figura 3.** Distribución de velocidades verticales de gases en chimenea

En esta última, las velocidades puntuales medidas entre  $-0.5r$  y  $0.5r$  presentan una incertidumbre elevada y sugieren una componente de velocidad radial de magnitud considerable.

Se plantea así la necesidad de adecuar las instalaciones existentes de manera de homogeneizar la distribución de flujo y minimizar el flujo ciclónico sobre el plano de muestreo. De manera de conocer en detalle el origen de tales perturbaciones, y en pos de ello, analizar posibles soluciones, se decide realizar un estudio fluido dinámico sobre esta sección de la caldera, aplicando herramientas de cálculo numérico mediante un software de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics).

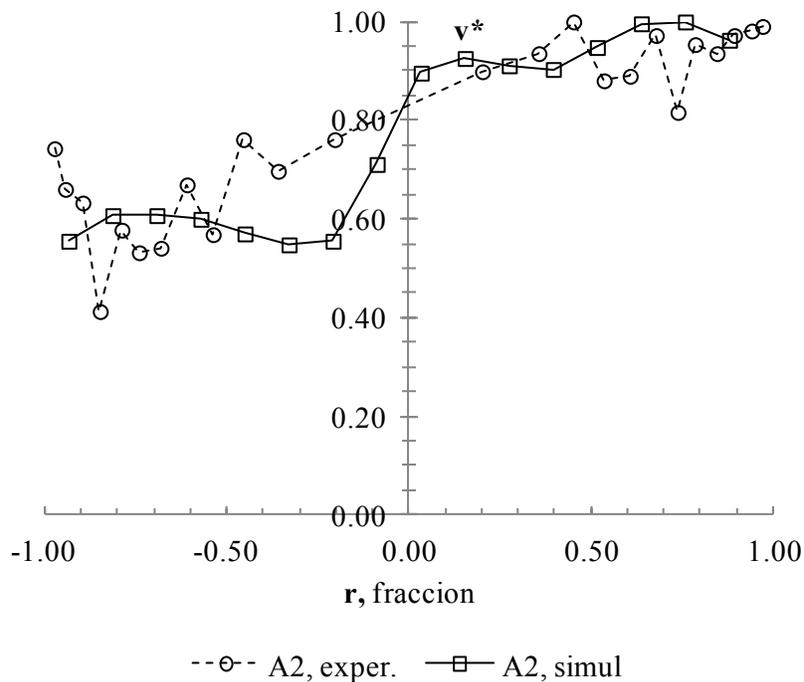
Esta metodología de simulación requiere modelar en CAD el conjunto chimenea, cámara de ingreso a la chimenea (cámara que colecta los humos calientes provenientes del pre-calentador de aire y los dirige a la chimenea) y entorno atmosférico, de manera de recrear apropiadamente el flujo de gases tanto en la entrada como en la salida de la chimenea y su descarga a la atmósfera. Para esto último se tuvo en cuenta un dominio cilíndrico centrado en la chimenea, de  $54D$  de diámetro y  $36D$  de altura, dominio lo suficientemente grande para no forzar condiciones de borde a la salida y permitir el desarrollo natural del flujo y la columna de humo.

Las condiciones de flujo de ingreso se remontaron a la sección de salida de los humos calientes luego del precalentador de aire de la caldera, sección donde el flujo se supone uniformemente distribuido a lo largo y ancho de un banco de 1500 tubos aproximadamente. Aún así, puesto que a lo largo de la vida útil de una caldera estos tubos van paulatinamente obturándose, las simulaciones contemplaron dos condiciones para un mismo flujo másico: 1) **caso ideal**: banco de tubos totalmente libre, y 2) **caso límite**: banco de tubos 50% obturado.

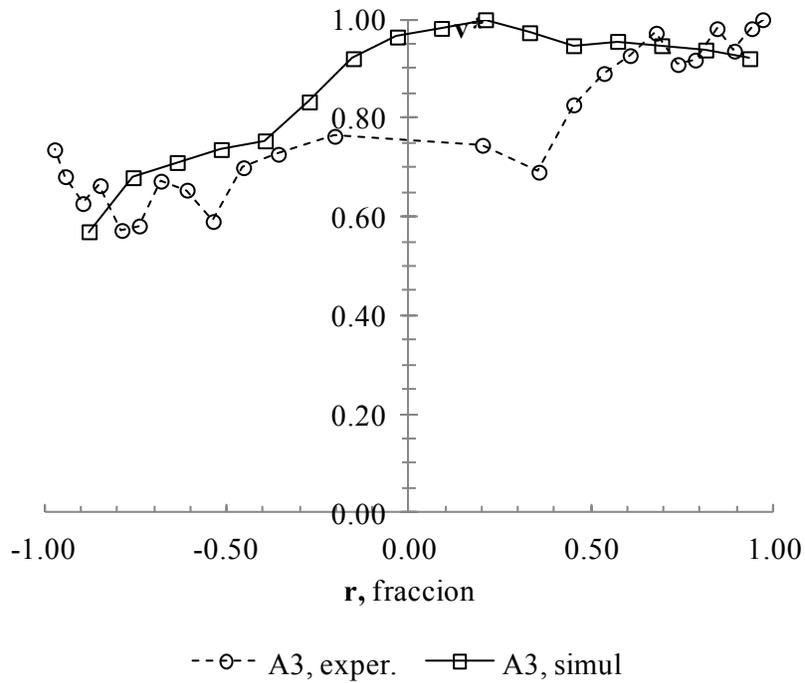
## Resultados

### 1. Validación y diagnóstico

Las simulaciones numéricas realizadas permitieron, en primera instancia, validar el modelo CFD utilizado e identificar el origen de la mala distribución de flujo observada experimentalmente. Puesto que las condiciones actuales del banco de tubos se asemejan a la condición límite, se contrastaron los resultados de esa alternativa versus los obtenidos experimentalmente. Se pudo observar una buena concordancia entre los valores experimentales y los simulados. Las principales desviaciones se manifiestan en la zona central de la chimenea, donde experimentalmente se notó una gran fluctuación en las determinaciones y, por lo tanto, una gran incertidumbre en las mismas. Las figura 4 y 5 presentan las velocidades verticales en cada toma-muestra.

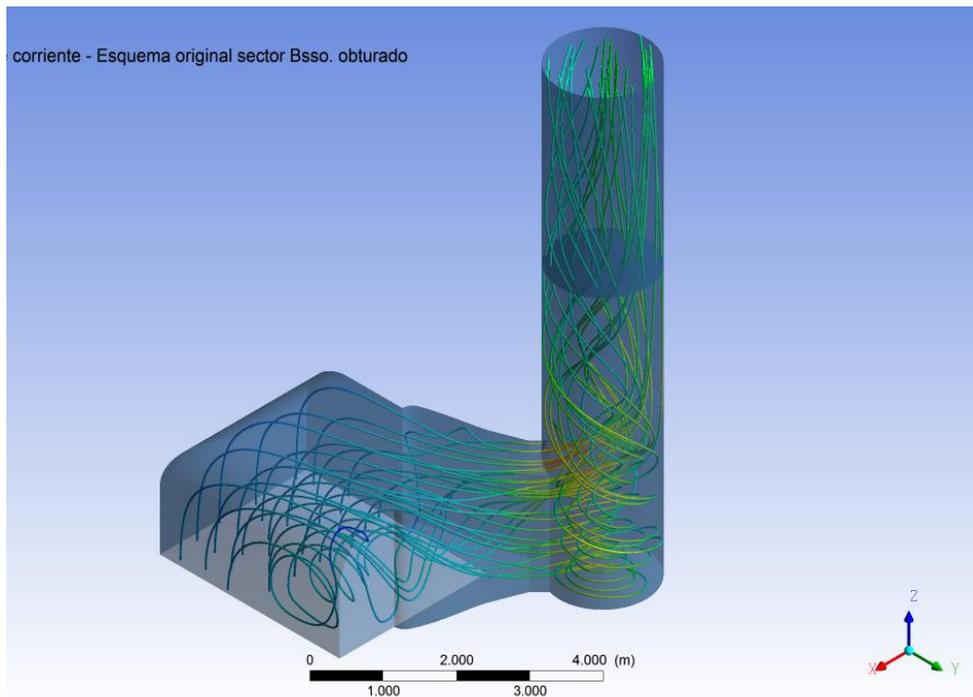


**Figura 4.** Velocidad vertical experimental y simulada en toma-muestras A2, caso base (validación)

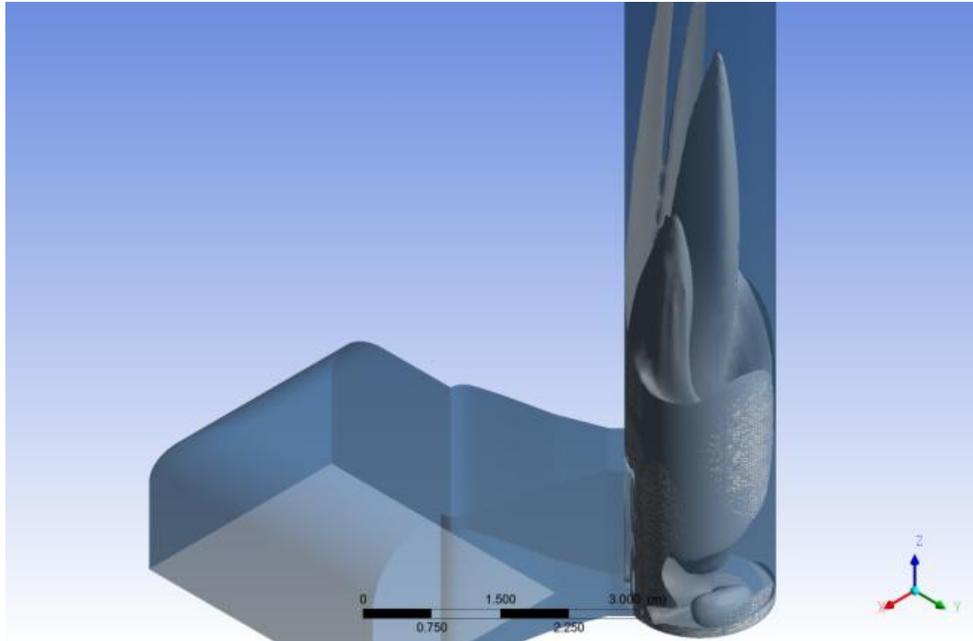


**Figura 5.** Velocidad vertical experimental y simulada en toma-muestras A3, caso base (validación)

En la figura 6 se grafican líneas de corriente para el caso de validación, y en la figura 7 se presentan superficies de helicidad constante (proyección de la vorticidad en la dirección de flujo) la cual es una medida del flujo ciclónico.



**Figura 6.** Líneas de corriente, simulación caso base (validación)



**Figura 7.** Superficies de helicidad constante, simulación caso base (validación)

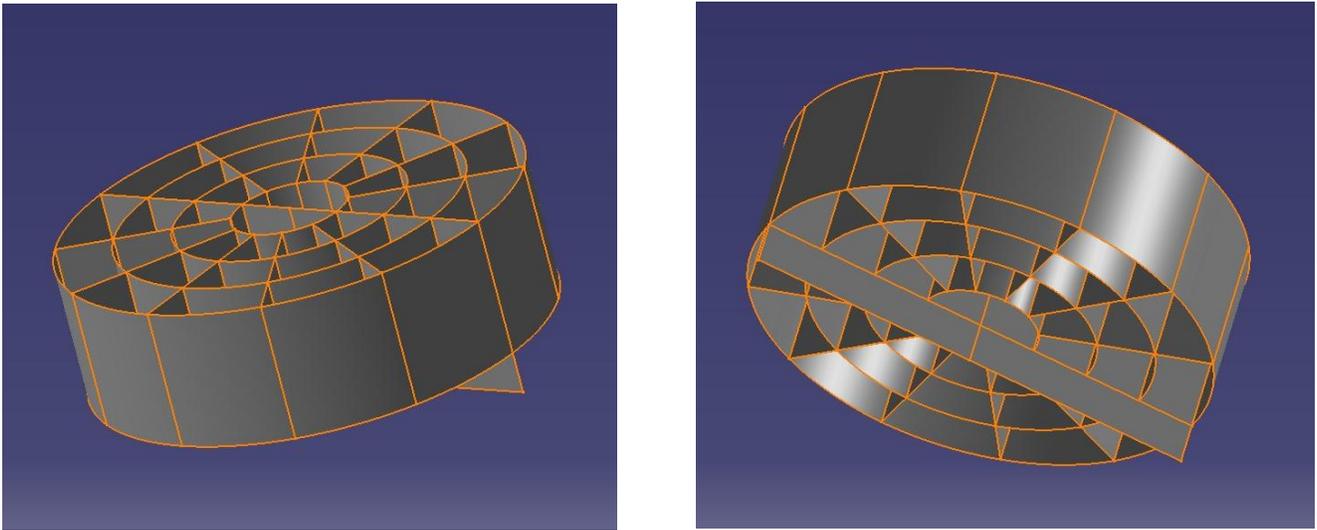
Se observa claramente en éstas la presencia de flujo ciclónico sobre el plano de muestreo, el cual se atribuye principalmente al diseño de la entrada de gases a la chimenea: un cambio repentino de dirección y geometría. La presencia de flujo ciclónico en la zona central de la chimenea permite también explicar la discrepancia entre las velocidades simuladas y las obtenidas experimentalmente.

Analizados los resultados obtenidos durante esta etapa, el estudio se focalizó en la búsqueda de alternativas que permitiesen minimizar el flujo ciclónico sobre el plano de muestreo con un mínimo impacto en las instalaciones existentes. Dentro de estas opciones se evaluó incrementar la longitud de la chimenea, instalar deflectores de flujo tipo persianas en el ingreso a la chimenea y diferentes tipos de encauzadores de flujo.

## ***2. Solución propuesta: encauzador de flujo***

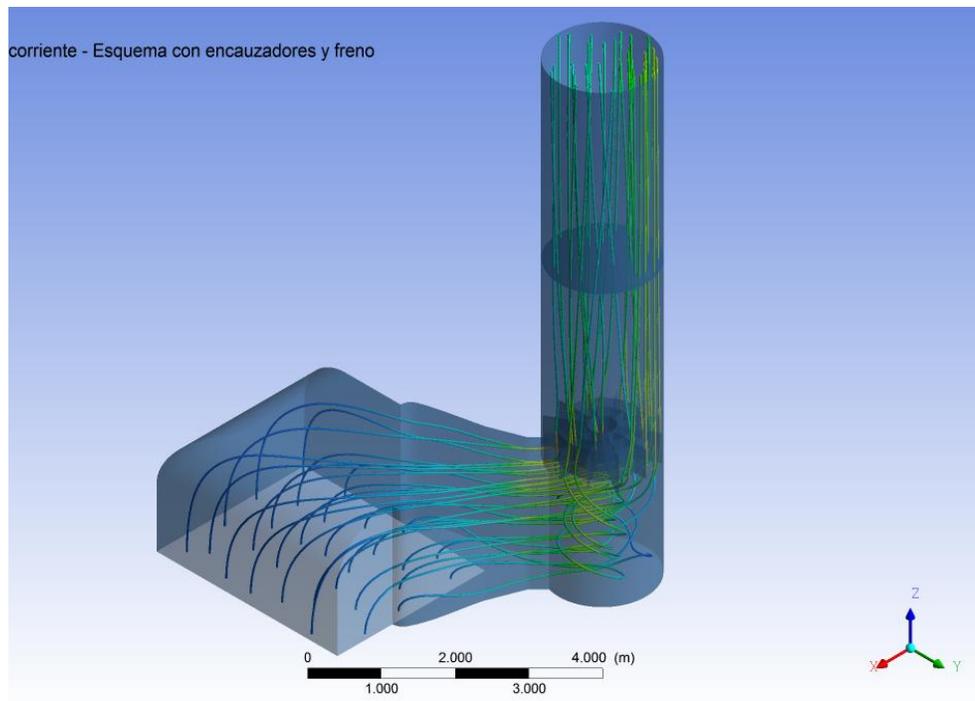
Si bien se realizaron varias simulaciones evaluando las modificaciones antes mencionadas, tanto para el caso ideal como para el caso límite, solo se presentan los resultados del caso adoptado como solución. En éste, se utiliza un encauzador de flujo ubicado inmediatamente luego del ingreso de los gases a la chimenea para limitar la formación de vórtices que asciendan con el flujo. Presenta un diseño sencillo y de fácil construcción e instalación, a la vez que no requiere modificaciones estructurales en el conjunto chimenea/caldera, permitiendo conservar los puntos de muestreo existentes. Los resultados se verifican tanto para el caso ideal como para el caso límite, aunque solo se presentan aquellos correspondientes al primero. Esto se debe a que, en el caso ideal, una distribución homogénea del flujo en el ingreso a la chimenea genera cierta condición de simetría en la misma, lo que se traslada en valores de velocidad radial levemente superiores a los observados en el caso límite.

A continuación, la figura 8 presenta vistas esquemáticas del dispositivo utilizado.

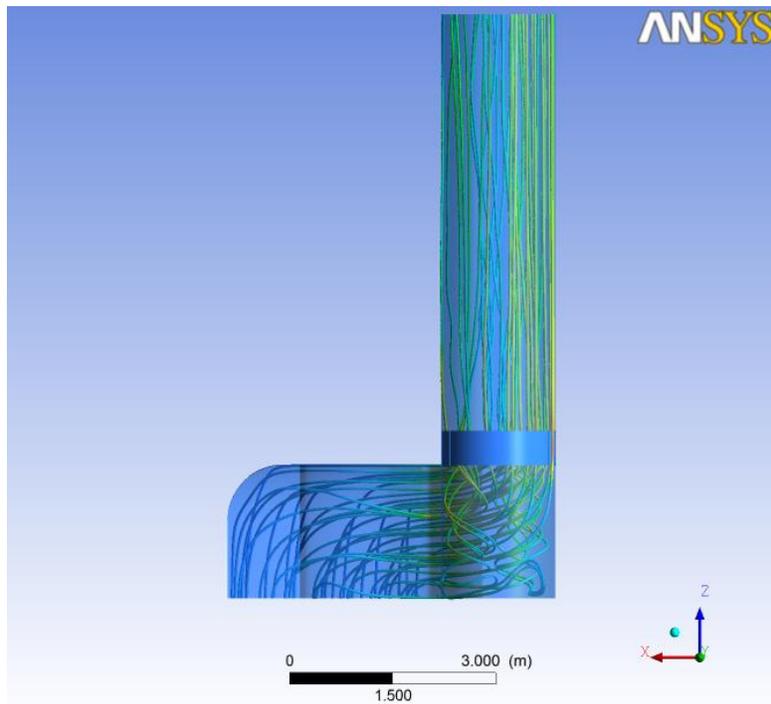


**Figura 8.** Vistas esquemáticas del encauzador de flujo utilizado

En las figuras 9 y 10 se pueden apreciar las líneas de corriente para el caso ideal y la ubicación del encauzador en la sección de la chimenea. Se observa una disminución notable en el flujo ciclónico sobre el plano de muestreo.

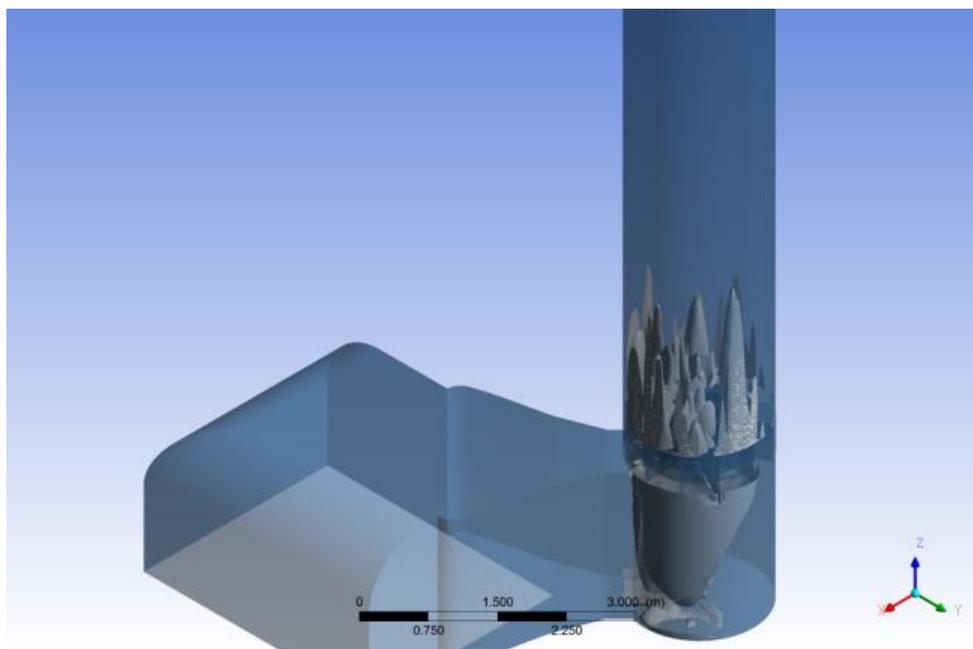


**Figura 9.** Líneas de corriente con encauzador, simulación caso ideal



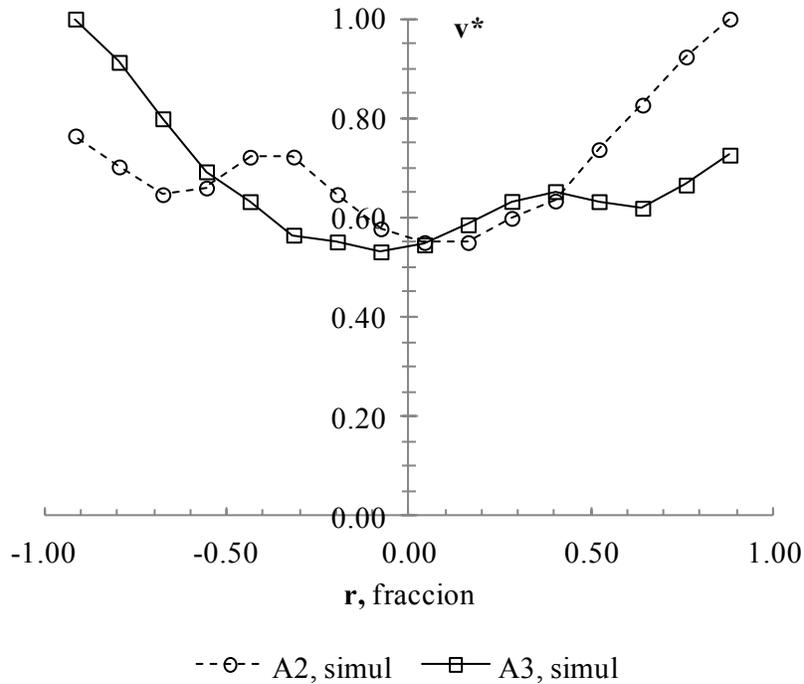
**Figura 10.** Líneas de corriente con encauzador, vista lateral, simulación caso ideal

La figura 11 presenta superficies de helicidad constante para el mismo caso. El encauzador de flujo distribuye la helicidad en núcleos pequeños, los que se disipan rápidamente antes de alcanzar el plano de medición.



**Figura 11.** Superficies de helicidad constante con encauzador, simulación caso ideal

En cuanto al perfil de velocidades, la figura 12 muestra los valores de la componente vertical de la misma sobre el plano de medición a través de cada línea de muestreo.



**Figura 12.** Velocidad vertical simulada en toma-muestras A2 y A3 con encauzador, simulación caso ideal

La minimización de la helicidad del flujo se produce a expensas de una distribución de velocidades no uniforme. No obstante ello, debido a que las componentes radial y tangencial del flujo son mínimas, la incertidumbre en las mediciones se reduce considerablemente. La selección de un adecuado número de mediciones puntuales a lo largo de cada línea de muestreo permitiría obtener de forma experimental, y con buena precisión, el perfil de velocidades en el plano en cuestión.

Por último, a fin de evaluar la caída de presión que introduce el encauzador en el sistema, se calcularon los coeficientes de pérdida de carga ( $K$ ) del tramo comprendido entre la entrada de gases a la chimenea y el plano de medición, para las diferentes configuraciones. Estos coeficientes se obtienen adimensionalizando la pérdida de carga total del tramo analizado frente a la presión dinámica en el plano de muestreo, según:

$$K = \frac{\Delta P}{0.5 \rho V^2}$$

Donde  $\Delta P$ : pérdida de carga del tramo analizado (Pa),  $\rho$ : densidad promedio en el plano de muestreo (kg/m<sup>3</sup>) y  $V$ : velocidad promedio en el plano de muestreo (m/s).

La tabla 1 a continuación presenta los coeficientes calculados en cada caso. Se observa que la configuración límite presenta un mayor coeficiente de pérdida de carga que lo que genera en el sistema la inclusión del encauzador. Esto se debe a que las condiciones fluido dinámicas en el ingreso a la chimenea producto del taponamiento de los tubos del pre-calentador poseen un mayor impacto en la pérdida de carga del tramo analizado que lo que genera la instalación del encauzador. Claro está, aunque fuera del alcance de este estudio, que la pérdida de carga total del sistema (esto es, la pérdida de carga del conjunto caldera, economizador, pre-calentador y chimenea) será mucho mayor bajo la condición límite, siendo despreciable en este caso la incidencia del encauzador en la misma.

	<i>K(tramo)</i>
<b>Caso ideal</b>	0.57
<b>Caso límite</b>	1.54
<b>Caso ideal con encauzador</b>	1.09

**Tabla 1.** Coeficientes de pérdida de carga

### Conclusiones

Considerando las incertidumbres inherentes a las mediciones y a los cálculos fluidodinámicos, se observó una correlación aceptable entre los valores de velocidad simulada y la observada en campo durante la etapa de validación, lo cual da cuenta de la validez de los métodos empleados para la resolución numérica y el modelo construido para tal fin. El grado de detalle alcanzado permitió obtener un muy buen diagnóstico del origen de los problemas observados experimentalmente.

El uso de encauzadores o enderezadores de flujo es algo habitual en la industria, principalmente cuando se trata de transferencia de custodia o donde se requiere una elevada precisión en las mediciones de caudal ([7], [8]). Sin embargo, su diseño y aplicación en chimeneas no ha sido del todo estudiado. El presente estudio, aunque solo aplicable a una caldera en particular, brinda una cuota analítica sobre la distribución de flujo de gases en una chimenea y emplea sus resultados para el diseño de un encauzador específico.

De esta manera, los problemas de flujo ciclónico sobre el plano de medición fueron minimizados al punto que su impacto en las determinaciones puntuales de velocidad debería ser despreciable. Próximos pasos en el marco de este estudio consistirán en evaluar experimentalmente la performance del encauzador una vez que sea instalado.

La sencillez de la solución adoptada contrasta con otras alternativas consideradas originalmente, como ser la construcción de una nueva chimenea. Por otra parte, la construcción e instalación de este dispositivo prácticamente no tienen impacto en la operación de la caldera en el sentido que el tiempo que se requiere para colocar el encauzador es mínimo.

## **Bibliografia**

1. US EPA, Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Part 60, Appendix A.
2. IRAM 29230-1 (2011)
3. A. Andreozzi, B. Buonomo, O. Manca, *Thermal and fluid dynamic behaviors of natural convection in symmetrical heated channel – chimney systems*. International Journal for Numerical Methods in Heat and Fluid Flow, vol. 20 (7), pp. 811-833, 2010.
4. N. Ninic, S. Nizetic, *Elementary theory of stationary vortex columns for solar chimney power plants*. Solar Energy, 83, pp. 462-476, 2009.
5. D. J. Harris, N. Helwig, *Solar chimney and building ventilation*. Applied Energy, 84, pp. 135-146, 2007.
6. R. Bassiouny, N. Koura, *An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation*. Energy and Buildings, 40, pp. 865-873, 2008.
7. API MPMS 14.3.2 (2011)
8. ISO 5167 (2003)