

# Simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) de cámaras de filtros para turbina de gas de centrales eléctricas: evaluación de diferencias entre modelos 2D y 3D

*CFD simulations of filter houses for power plant gas turbine: evaluation of differences between 2D and 3D models*



Vincenzo Castorani, Daniele Landi,  
Marco Mandolini y Michele Germani  
Università Politecnica delle Marche (Italia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8901>

## 1. INTRODUCCIÓN

Las turbinas de gas son turbo-máquinas utilizadas ampliamente en diversos sectores industriales. Fundamentalmente se emplean en las plantas de generación eléctrica. Las turbinas de gas consumen un gran volumen de aire ambiente durante una condición de servicio. Por esta razón, la calidad del aire entrante es esencial para el rendimiento general y durabilidad de la turbina de gas [1]. Los mecanismos de filtración se emplean habitualmente con el fin de regular la calidad del aire ambiente al eliminar los contaminantes. Un sistema de filtración inadecuado puede provocar caídas de la presión de entrada, así como reducciones de la potencia de salida y la eficiencia global de GT.

Para turbinas de gran potencia, el sistema de filtración consta de cientos de filtros. Por lo tanto, para lograr el mejor rendimiento, es necesario diseñarlo cuidadosamente. Concretamente, es esencial para mantener las condiciones de flujo a una mínima pérdida de presión adoptando la mejor solución para el entorno operacional. La utilización óptima de los filtros puede reducir significativamente sus costes y mantenimiento, mientras se mantiene la potencia de salida deseada y una duración aceptable. Los estudios han demostrado que, para las grandes plantas generadoras de energía, ligeras mejoras en el sistema de filtración incrementan sensiblemente el rendimiento [2]. Sin embargo, un correcto dimensionamiento de las casas de filtrado es a menudo complejo. Sus grandes dimensiones y elevados costes de fabricación provocan

que el diseño y las pruebas experimentales resulten extremadamente difíciles. Los importantes avances en las tecnologías informáticas y algoritmos propiciaron que las herramientas de modelado numérico se hicieran imprescindibles para la investigación y la comprensión de la conducta real de los productos, desempeñando un papel crucial en las fases de diseño y optimización [3,4]. Las herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics) constituyen las soluciones más rentables para el análisis de sistemas de admisión de flujo con medios filtrantes. Numerosos estudios han investigado el patrón de flujo y pérdida de presión de casas de filtros utilizando modelos de CFD tridimensionales. Por ejemplo, Khorsand et. al [5] analizaron el sistema de admisión de aire de una turbina de gas de 160 MW a través de un modelo de simulación tridimensional con el fin de reducir las pérdidas de presión. Del mismo modo, Abam et al. [6] evaluaron la distribución del flujo y pérdida de presión en un sistema de filtración de tres etapas. Otras aplicaciones de CFD 3D son las aportadas por Narayan y Bhalgat [7], que determinaron la pérdida de presión en los componentes típicos de las casas de filtros. Sin embargo, una de las más importantes causas de la adopción de modelos CFD 3D es el elevado coste computacional requerido para caracterizar un completo flujo de aire de una casa de filtros.

En la literatura se han propuesto varios métodos para reducir los recursos computacionales y acelerar el proceso de simulación. La hipótesis de flujo bidimensional representa una de las estrategias más utilizadas en diferentes casos industriales. Sin embargo, a pesar de que a menudo las simulaciones 2D pueden recoger la evolución cualitativa de un fenómeno, en ciertos casos no son capaces de proporcionar resultados exactos desde un punto de vista cuantitativo.

Una parte considerable de la investigación en los últimos años se ha centrado en establecer comparaciones en los resultados entre problemas 2D y 3D. A modo de ejemplo, Clegg y Kreft [8] estudiaron las discrepancias entre los resultados de los modelos 3D y 2D de los biofilms microbianos, encontrando diferencias cuantitativas pero no cualitativas entre ambos enfoques. Pashchenko [9], representó una micro-cámara de combustión cilíndrica con mallas de plano 2D, 2D axisimétrico y 3D, obteniendo distinción cuantitativa para el campo de temperatura pero casi ninguna desviación de la presión. Li et al. [10] evaluaron la disimilitud entre los dos enfoques en el caso de elevadores de lecho fluidizado circulante, recomendando las simulaciones 2D sólo para consideraciones cualitativas y 3D para simulaciones predictivas. Pelegrín García ha demostrado la posibilidad de utilizar un modelo numérico 2D para simular el comportamiento de un compresor axial [11]. Sin embargo, un reducido número de investigadores han evaluado la capacidad de simulaciones 2D para casas de filtros.

El objetivo de este estudio es proponer un método para diseñar y optimizar las casas de filtros [12], integrando en un marco único herramientas de simulación 2D y 3D. Las simulaciones 2D son empleadas para acelerar el proceso de diseño, reduciendo el tiempo y los recursos computacionales. La precisión de los modelos 2D ha sido evaluada mediante la comparación con simulaciones 3D. En la literatura científica es posible encontrar numerosas publicaciones acerca de simulaciones 3D [13,14,15]. Estos trabajos constituyen el fundamento para la creación de modelos de simulación 3D capaces de replicar el comportamiento de las casas de filtros. Estos últimos fueron utilizados como punto de partida para otros estudios.

Este documento está estructurado de la siguiente manera. La sección 2 proporciona una descripción general del método propuesto. La sección 3 describe el estudio de caso utilizado para demostrar la validez de los resultados procedentes de una simulación 2D. En la sección 4 se indica el modelo numérico desarrollado para simular el comportamiento de una casa de filtros. En la sección 5, los resultados de los modelos 2D son evaluados y discuti-

dos. Por último, el artículo indica las principales conclusiones de este estudio de investigación y propone oportunidades para futuros trabajos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se ha descrito anteriormente, la casa de filtros juega un papel importante en el funcionamiento adecuado de las turbinas de gas. Por lo tanto, un diseño adecuado es fundamental. Un correcto dimensionamiento de filtros, enfriadores, y conductos podría no ser una operación sencilla para los diseñadores. El uso de las herramientas de creación de prototipos virtuales puede apoyar a los ingenieros durante todas las fases de diseño y reducir, incluso eliminar, la elaboración de prototipos físicos [16,17]. La elaboración y la simulación de los modelos 3D pueden ser muy complicados. En este contexto, el presente estudio propone un enfoque 3D - 2D para simplificar la fase de simulación, Fig. 1.

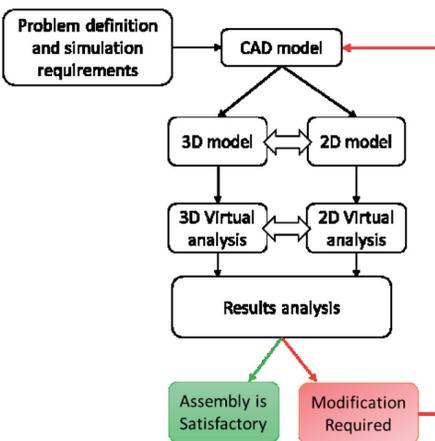


Fig. 1: Enfoque propuesto 3D - 2D

La Fig. 1 muestra el planteamiento propuesto. El punto de partida es la fase de "definición de los problemas y necesidades de simulación", que identifica el tipo de simulación (fluido-dinámica, estructural, modal, etc.) y las condiciones de contorno. Entonces, es posible proceder a la definición de modelos CAD 3D y 2D. En general, mediante el uso de modelos 3D es posible reproducir el comportamiento real de cualquier producto.

Sin embargo, las considerables dimensiones geométricas y la complejidad del modelo requieren realizar simulaciones numéricas muy exigentes (altos recursos computacionales y largo tiempo de simulación). El uso de modelos 2D puede simplificar la simulación, reduciendo los recursos y el tiempo de cálculo. No obstante, a menudo un modelo 2D no es

capaz de simular correctamente el comportamiento dinámico de la totalidad del fluido térmico de una casa de filtros. Este límite se puede superar mediante la integración de 2D con modelos 3D.

El enfoque propuesto utiliza la salida de datos de la simulación 2D como entrada de datos de la simulación 3D. De esta manera, es posible simular correctamente las secciones bidimensionales de la casa del filtro usando herramientas 2D. A través de modelos 2D es posible llevar a cabo numerosas simulaciones con recursos informáticos limitados y tiempo. Es posible estudiar los campos de presión, temperatura, velocidad local y aplicar técnicas de optimización multi-objetivo sin utilizar superordenadores.

## 3. ESTUDIO DE CASO DE LA CASA DE FILTROS

Las turbinas de gas operan exitosamente bajo diversas condiciones ambientales: zonas rurales, zonas industriales, regiones polares, desiertos, off-shore, etc. Para acomodar las máquinas a esta diversidad de entornos, una casa de filtros contiene diferentes componentes. La casa de filtros analizada en este documento consta de los componentes indicados en la Fig. 2. En la entrada, una cubierta de protección contra las inclemencias meteorológicas (1) equipada con recolectores de gotas (2), evita la entrada de agua en el interior del sistema de filtración. Una malla protectora de pájaros (3) está presente para evitar la entrada de aves e insectos. Después de éstas, las etapas de filtración (4-5) de tamaño de poro disminuyendo gradualmente están equipadas. Estas etapas son seguidas de un sistema de refrigeración del aire de admisión (6) para aumentar la potencia de salida de la turbina de gas. Por último, una sección de transición (8) está montada según el diseño geométrico y limitaciones. En la entrada de la transición hay un separador de humedad del aire (7).

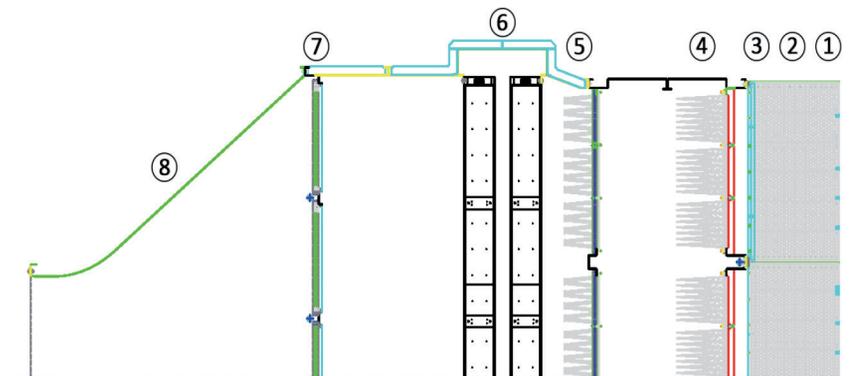


Fig. 2: Componentes principales de la casa de filtros analizada

El objetivo de la fase de diseño de una casa de filtros es la optimización de la geometría del sistema para minimizar la pérdida de presión del aire. Es extremadamente importante investigar las características del flujo de aire, así como la presión estática, la temperatura y la velocidad ya que tienen una influencia directa sobre el rendimiento de la turbina de gas. Sin embargo, este tipo de análisis no es una tarea trivial debido a la gran complejidad del flujo en el sistema de admisión de aire. Las pérdidas de presión son causadas por flujo de fluido a través de los componentes de la casa de filtros que influyen en la dirección del flujo. Es extremadamente difícil y a veces imposible predecir los efectos en el campo de flujo provocados por una modificación geométrica. El uso de simulaciones numéricas permite este tipo de investigación e información para que los ingenieros puedan proponer cambios de diseño que mejoren la distribución del flujo.

El coste es otro factor importante en el diseño de estos sistemas, y está directamente relacionado con el tamaño y la eficiencia del sistema. Sin embargo, en este estudio no han sido contabilizadas las consideraciones relativas a los costes.

## 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Como herramienta de simulación CFD para el análisis de la casa de filtros se utilizó el software Ansys Fluent®. El sistema considerado en este estudio se encuentra instalado en la India, con una temperatura ambiente de 35 °C. La turbina de gas investigada, en condiciones de diseño ISO, tiene una potencia de 32 kW, un caudal de aire de 417000 m<sup>3</sup>/h y un caudal de aire de ventilación de 71500 m<sup>3</sup>/h.

La geometría del sistema de tratamiento de aire fue creada con SolidWorks®. Para el modelo 3D, debido a la simetría que presenta la casa de filtros, la geometría fue simplificada considerando sólo la mitad (la Fig. 3 muestra la totalidad de la

geometría). En cambio, para el modelo 2D se analizaron la sección lateral (sección A, Fig. 3) y la sección superior (sección B, Fig. 3) que atraviesan los planos medios.

Los componentes considerados en este estudio son: conductos, 120 filtros M6, filtros, 110 filtros F9, 2 etapas de enfriadores (cada etapa hecha de 3 bobinas en 3 pisos), 12 captadores de gotas, 15 separadores de humedad y 12 mallas anti-pájaros. El M6 y F9, los filtros se encuentran, respectivamente, en la primera y segunda etapa del sistema de filtración. Los filtros M6 y F9 se encuentran, respectivamente, en la primera y segunda etapa del sistema de filtrado. El filtro M6 atrapa las partículas más gruesas, y el F9 las finas. El calor absorbido por la primera y la segunda etapas de enfriado es de 1127 kW y 923 kW respectivamente.

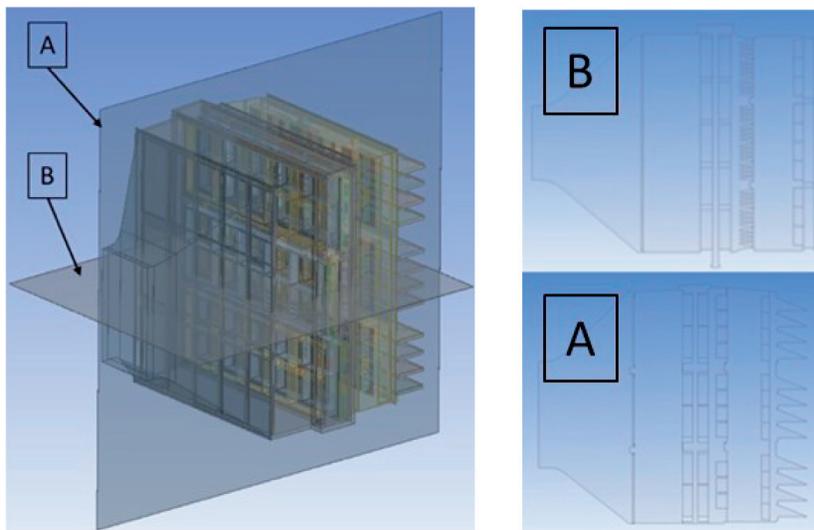


Fig. 3: Modelo 3D de la casa de filtros (izquierda), sección superior 2D (parte superior derecha), sección lateral 2D (parte inferior derecha)

Para la elaboración de la malla se empleó el software Ansys Meshing®. Se utilizaron elementos poliédricos para la discretización de la geometría 3D, mientras que las geometrías 2D fueron mallas con elementos triangulares. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de malla tanto en el caso bidimensional como en el tridimensional, verificando que los resultados obtenidos no cambian al incrementar la cantidad de elementos por encima de 12000000 para la geometría 3D y 200000 para las geometrías 2D.

#### 4.1. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno consideradas para los análisis 3D y 2D se indican a continuación:

- Presión estática a la entrada = 0 Pa (presión ambiente),

- Temperatura del aire a la entrada = 35 °C,
- Presión estática a la salida = -440 Pa,
- Presión estática a la salida de ventilación = -270 Pa,
- Intensidad de turbulencia = 5%,
- Pérdida de presión en los filtros modelada como medio poroso,
- Intercambio de calor en las bobinas de enfriamiento modelado como sumidero de calor,
- Todas las paredes de la casa de filtros fueron tratadas como adiabáticas.

El fluido de trabajo fue modelado como aire saturado según Cengel [18].

#### 4.2. PÉRDIDA DE PRESIÓN EN LOS FILTROS

La pérdida de presión a través de las etapas de filtrado se modeló como medio poroso en ANSYS FLUENT®. Este tipo de formulación generalmente ofrece una adecuada representación de la pérdida de presión a través de un componente poroso. Los medios porosos fueron tratados añadiendo un término fuente en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento dada por:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es la permeabilidad,  $C_2$  es el factor de resistencia inercial,  $\rho$  la densidad,  $v$  la velocidad y  $\mu$  la viscosidad dinámica.

#### 4.3 ENFOQUE NUMÉRICO

Se asumió estado estacionario y flujo turbulento. Las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía fueron:

$$\text{Ecuación de continuidad:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Ecuación de conservación de cantidad de movimiento:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (3)$$

$$\text{Ecuación de conservación de energía:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (4)$$

Sección	Pave_real [Pa]	Pave_virtual [Pa]	Perror [%]	Tave_real [°C]	Tave_virtual [°C]	Terror [%]	Vave_real [m/s]	Vave_virtual [m/s]	Verror [%]
In	0,00	0,00	0,00	35,00	35,00	0,00	1,46	1,49	1,98
I	0,00	0,00	0,00	35,00	35,00	0,00	2,35	2,39	1,54
II	-96,72	-94,89	-1,89	35,00	35,00	0,00	2,47	2,41	-2,35
III	-134,26	-137,71	2,57	33,89	34,08	0,56	2,26	2,30	1,89
IV	-233,16	-229,24	-1,68	26,42	26,95	1,99	1,90	1,94	2,34
V	-340,45	-332,11	-2,45	20,00	20,41	-2,05	1,79	1,81	0,97
VI	-374,88	-364,35	-2,81	20,00	20,29	-1,45	4,81	4,76	-0,99
Out	-440,00	-440,00	0,00	20,00	19,48	2,60	11,30	11,63	2,89

Tabla 2: Comparación entre los datos reales y virtuales

Donde  $u$  es la velocidad,  $x$  la dirección,  $\rho$  la densidad,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $p$  la presión,  $T$  la temperatura,  $C_p$  el calor específico a presión constante y  $k$  la conductividad térmica del fluido  $k$ .

El modelo SST  $k-\omega$  [19] fue adoptado para modelar la turbulencia. Las ecuaciones de transporte para el modelo SST  $k-\omega$  son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

Donde  $\tilde{G}_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes de la velocidad media,  $G_\omega$  la generación de  $\omega$ ,  $\Gamma_k$ ,  $\Gamma_\omega$  y la difusividad efectiva de  $k$  y  $\omega$ ,  $Y_k$  y  $Y_\omega$  la disipación de  $k$  y  $\omega$  debido a la turbulencia y  $S_k$ ,  $S_\omega$  términos fuente definidos por el usuario.

Las ecuaciones gobernantes fueron resueltas mediante el algoritmo COUPLED. Para la discretización de los términos convectivos se eligió el esquema upwind de segundo orden y un enfoque pseudo-transitorio para la simulación 3D. El tipo de inicialización fue híbrido. El criterio de convergencia para el modelo 2D y el 3D se fijó en una tolerancia de  $10^{-4}$  para conservación de la cantidad de movimiento y  $10^{-6}$  para la conservación de la energía.

La validez de los resultados proporcionados por estos modelos numéricos ha sido evaluada mediante pruebas utilizando el modelo 3D. Se llevaron a cabo ensayos experimentales por los autores del presente estudio mediante el siguiente sondeo:

- Sensor Dantec 55P95 para velocidad;
- Termómetro Siemens SITRANS TS 100 para temperatura;
- Transmisor de presión Emerson Rosemount 3051 para presión estática.

La velocidad, presión y temperatura se midieron en experimentos separados. Para verificar la repetibilidad de los resultados, se realizaron tres pruebas diferentes (una para cada cantidad analizada).

La comparación muestra una buena concordancia entre los resultados numérico, experimental y los cálculos analíticos. Los campos de presión, velocidad y temperatura fueron satisfactoriamente reproducidos, obteniendo un error máximo inferior al 3%. En la *Tabla 2* se indica la comparación entre los resultados experimentales y numéricos del modelo 3D. Esta comparación se llevó a cabo frente midiendo la de presión,

temperatura y velocidad en 8 secciones diferentes. El promedio de los valores de los datos experimentales se calculó teniendo en cuenta los 18 puntos de muestreo distribuidos equitativamente para cada sección. Las secciones consideradas son la entrada, salida y planos intermedios. En la *Fig. 4* se indican las posiciones de las secciones y de los puntos de muestreo.

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se compararon diferentes estrategias de modelado para investigar sus efectos en el comportamiento del fluido: temperatura, presión y velocidad. Los modelos 2D modelaron las dos secciones medias (secciones A y B) indicadas en la *Fig. 3*. Analizando los resultados, es posible observar las siguientes consideraciones.

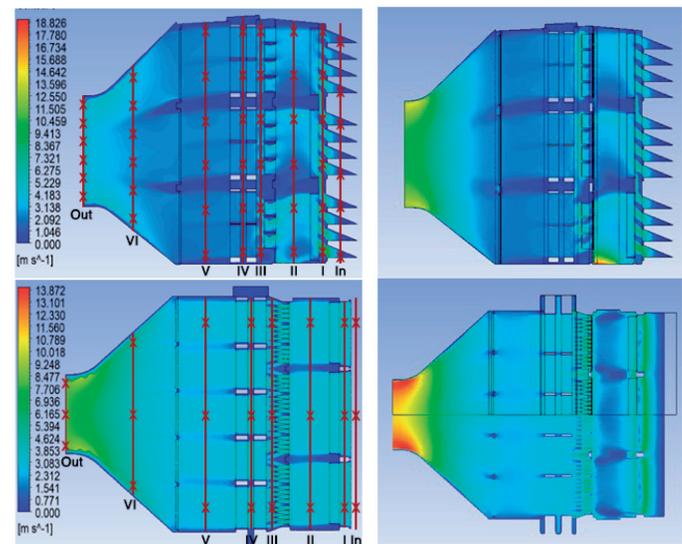
En la *Tabla 1* se muestran los resultados de velocidad (*Fig. 4*), es posible observar que el modelo 2D puede reproducir correctamente el campo de velocidad en ambos planos. Los campos de velocidad entre el paso de diferentes etapas de filtración, sistema de refrigeración de aire y separador de humedad son los mismos.

Las principales discrepancias pueden observarse en la zona de transición. Aquí, el modelo 2D no es capaz de reproducir correctamente el campo de velocidad, debido a la doble variación de sección en los dos planos considerados. El error promedio en la sección de salida es de

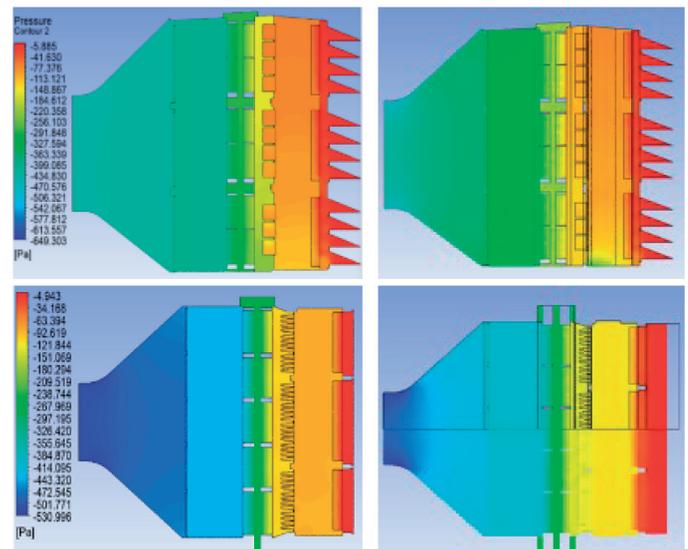
alrededor de 25%, pero el error promedio considerando la totalidad del modelo es de alrededor del 5%.

Analizando *Fig. 5*, es posible verificar que el campo de presión entre los modelos 2D y 3D es similar, ya que el campo de flujo está bien reconstruido. El valor medio de la presión se reproduce correctamente en términos de tendencia del campo y el valor, el error promedio es de 3%.

La comparación de las temperaturas entre los modelos 2D y 3D muestra un campo similar entre las dos estrategias de modelado (*Fig. 6*). En ambos modelos se observa la misma variación de temperatura entre dos enfriadores. Esto fue simulado como salto poroso, donde se fijó la pérdida de presión y la potencia térmica. En esta aplicación, los enfriadores tienen la función de disminuir la temperatura del aire entrante, por lo tanto, el valor de potencia térmica es negativo. A diferencia



*Fig. 4:* Velocidad en las secciones A (figuras de arriba) y B (figuras de abajo). (Modelo 2D en las figuras de la izquierda y modelo 3D en las figuras de la derecha), las líneas rojas y X indican las secciones de muestreo y puntos



*Fig. 5:* Campo de presión en la sección A (figuras de arriba) y B (figuras de abajo). (Modelo 2D en las figuras de la izquierda y modelo 3D en las figuras de la derecha)

de los campos de velocidad y presión, el campo de temperatura parece ser coherente para ambos modelos, también en la zona de transición. En la sección de salida, la temperatura media presenta una diferencia superior al 5 % y el error promedio en la totalidad del modelo es del 3 %.

A través de este enfoque, también ha sido posible simular áreas específicas o zonas del modelo sin cualquier simplificación. En la casa de filtros analizada, debido a las altas dimensiones geométricas y complejidad de los detalles, la geometría de los filtros de M6 se ha simplificado como un paralelepípedo en el modelo 3D, localmente perdiendo sus características geométricas. Con modelos 2D se consideró la geometría real, simulando con exactitud el paso de fluido. El recuento de las celdas y el tiempo de cálculo, llevando en consideración la geometría real de los filtros, se incrementó del 25 % al 36 % respectivamente. La Fig. 7 muestra el campo de velocidad considerando la geometría real del filtro M6. Comparando la Fig. 4 con la Fig. 7 es posible ver que el flujo está influenciado por la geometría del filtro. Considerando el flujo a través del filtro real, el aire alcanza una mayor velocidad media: +8 %. La geometría simplificada conduce a un error promedio del 5

% en los campos de presión, velocidad y temperatura.

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó la dinámica de fluidos y el comportamiento térmico de una casa de filtros utilizando un modelado CFD 2D y 3D. El objetivo de este estudio es evaluar la aplicabilidad de un modelo de simulación 2D para estudiar el comportamiento fluido en una casa de filtros. Se utilizó como referencia una validación del modelo 3D. El modelo geométrico, que incluye diferentes etapas de filtros, enfriadores y separadores de humedad fue creado a través de herramientas CAD 2D y 3D. Utilizando una herramienta de CFD comercial, el comportamiento del fluido ha sido simulado. Tal como se describe en la sección principal, el modelo de simulación 3D fue utilizado para desarrollar el 2D. Se presentaron los campos de velocidad, presión y temperatura de la sección de la parte superior y lateral. Cada sección 2D ha sido comparada con la correspondiente sección 3D.

Los resultados muestran una buena correspondencia entre los modelos, con una desviación inferior al 5% para cada sección.

El tiempo de pre-procesado utilizando el modelo 3D fue el doble comparado con el modelo 2D. En efecto, para tener una caracterización completa del sistema, es necesario simular dos secciones diferentes de la cámara de filtro y, a continuación, realizar el doble de operaciones de ajuste del modelo (pre-tratamiento). Por el contrario, el uso de modelos 2D permite reducir el tiempo de cálculo en un 90 %.

Para mejorar la precisión de los modelos 2D, los trabajos futuros tendrán por objetivo mejorar los modelos de simulación de filtros y enfriadores.

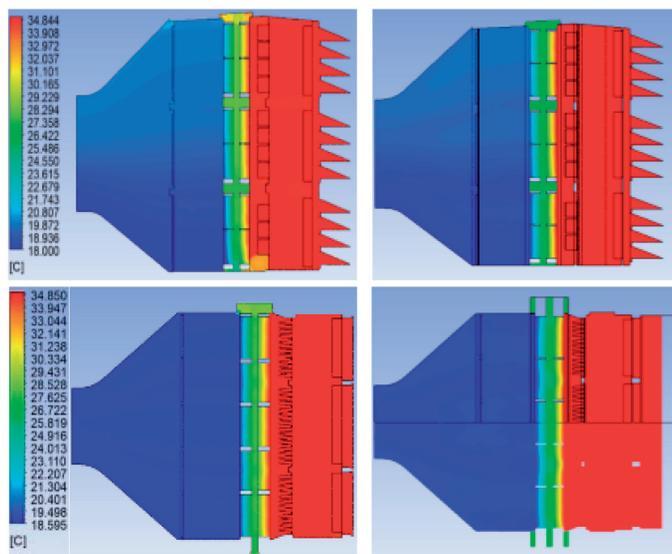


Fig. 6: Campo de temperatura en la sección A (figuras de arriba) y B (figuras de abajo.) (Modelo 2D en las figuras de la izquierda y modelo 3D en las figuras de la derecha)

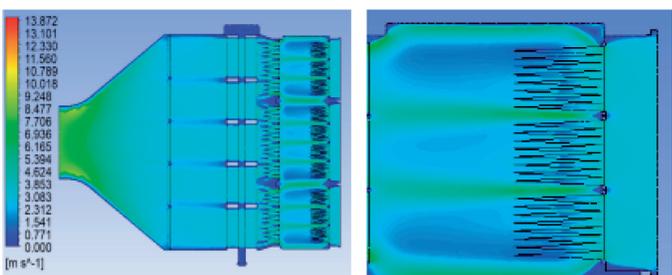


Fig. 7: Campo de velocidad en la sección B considerando la geometría real del M6

## REFERENCIAS

- [1] Farzaneh Gord M., Deymi-Dashtebayaz M. "Effect of various inlet air cooling methods on gas turbine performance". Energy. Vol.36. Issue 2. February 2011. p.1196-1205
- [2] Coltri C. "Innovative Technologies for Gas Turbine Air Filtration". Vokes Air. 2013
- [3] Castorani, V., Landi, D., Germani, M. "Determination of the Optimal Configuration of Energy Recovery Ventilator through Virtual Prototyping and DoE Techniques". Procedia CIRP. Vol. 50. 2016. P.52-57
- [4] Cicconi, P., Landi, D., Germani, M., Russo, A. C. "A support approach for the conceptual design of energy-efficient cooker hoods". Applied Energy. Vol.206, 2017. p.222-239
- [5] Varmaziar, M., Sarjami, S. "Investigation of Flow Pattern and Pressure Loss of A V94. 2.5 Gas Turbine Air Intake System Using 3D Numerical Modeling". Continuum mechanics, fluids, heat. 2010. P.273-278
- [6] Abam, F.I., Effiom, S.O., Ohunakin, O.S. "CFD evaluation of pressure drop across a 3-D filter housing for industrial gas turbine plants". Frontiers in Energy. Vol.10. Issue 2. 2016. p.192-202
- [7] Narayan, S., Bhalgat, D. "Geometry Optimization of Filter House Components Fitted at Compressor Entry". International Journal of Science and Research. Vol.3. 2014. p.905-909
- [8] Clegg, R.J., Kreft, J.U. "Reducing discrepancies between 3D and 2D simulations due to cell packing density". Journal of theoretical biology. vol.423. 2017. p.26-30
- [9] Pashchenko, D. "Comparative analysis of hydrogen/air combustion CFD-modeling for 3D and 2D computational domain of micro-cylindrical combustor". International Journal of Hydrogen Energy. Vol.42, 2017. p.29545-29556
- [10] Li, T., Pannala, S., Shahnam, M. "CFD simulations of circulating fluidized bed risers, part II, evaluation of differences between 2D and 3D simulations". Powder Technology Vol.254. 2014, p.115-124
- [11] Pelegrín-García, J.D. "A new numerical model of an axial compressor trough 2D simulation". Dyna (Spain) Vol.91, Issue 2, March-April 2016. p.180-187
- [12] Irwin M.Hutten, Chapter 8 - Air Filter Applications. Handbook of Nonwoven Filter Media (Second Edition). 2016, p. 451-519
- [13] Chopade M. R., Valavade A.P., Barhatte S. H. "Performance enhancement of air filter by design optimization", International Journal of Advanced Engineering Technology. Vol.3. Issue 1. 2012. p.68-70
- [14] Wei-BiaoYe. "Design method and modeling verification for the uniform air flow distribution in the duct ventilation" Applied Thermal Engineering. Vol. 110. Issue 5, 2017. p.573-583
- [15] Effiom Samuel O., Abam Fidelis I., Ohunakin Olayinka S. "Performance modeling of industrial gas turbines with inlet air filtration system". Case Studies in Thermal Engineering. Vol.5. 2015. p.160-16715
- [16] Cicconi, P., Germani, M., Landi, D., Russo, A. C. "A design methodology to predict the product energy efficiency through a configuration tool". Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing. 2017. p.1095-1105
- [17] Cicconi, P., Castorani, V., Germani, M., Mandolini, M., Vita, A. "A Multi-Objective and Multi-Level Design Optimization Method for Oil & Gas Ducts". ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Vol. 2B, 2017.
- [18] Çengel, Y. A. "Introduction To Thermodynamics And Heat Transfer". New York: McGraw-Hill, 1997.
- [19] Devolder, D., Troch, P., Rauwoens, P. "Performance of a buoyancy-modified k- $\omega$  and k- $\omega$  SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM". Coastal Engineering. Vol.138, 2018. p.49-65