

Análisis del comportamiento de la gasodinámica en chimeneas industriales

Analysis of the behavior of gas dynamic in industrial chimneys

Oscar Julio Álvarez Velázquez^I; José Rodríguez Bertran^I *; Roberto Vizcón Toledo^{II}; J. E. Arango González^{III}; Alberto E. Calvo González^{IV}

^IInsTEC, UH. La Habana. Cuba

^{II}Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Matanzas, Cuba

^{III}Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Bogotá, Colombia

^{IV}Universidad Tecnológica de la Habana, “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba

*Autor de la correspondencia: rodriguezto0349@gmail.com

Recibido: 15 de noviembre de 2025

Aprobado: 24 de febrero de 2026

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen/ Abstract

Este estudio analizó el comportamiento de la gasodinámica interna en una chimenea industrial de dos flujos de entrada, así como su influencia en la acumulación de hollín en chimeneas industriales y su impacto en la seguridad y eficiencia operacional. El objetivo fue identificar zonas críticas de depósito y proponer mejoras en el diseño y la operación para reducirlas. Se realizaron simulaciones computacionales de dinámica de fluidos, bajo diferentes condiciones de flujo másico, temperatura y geometría. Los resultados mostraron que cambios geométricos bruscos promueven la creación de zonas de turbulencia propiciando la deposición de partículas y que configuraciones asimétricas de flujo superiores al 50% de diferencia, generaron zonas de recirculación propicias para la acumulación de hollín. La conclusión más importante establece que operar con una potencia conjunta superior a 300 MW, distribuida equilibradamente, permite alcanzar las velocidades de escape recomendadas y reducir riesgos.

Palabras clave: chimeneas industriales; acumulación de hollín; simulación computacional; gasodinámica; eficiencia operacional.

This study analyzed the behavior of internal gas dynamics in an industrial chimney with two inflows, as well as its influence on the accumulation of soot in industrial chimneys and its impact on safety and operational efficiency. The objective was to identify critical storage areas and propose improvements in design and operation to reduce them. To perform under different conditions of mass flow, temperature and geometry computational simulations of fluid dynamics were used. The results showed that abrupt geometric changes promote the creation of turbulence zones, promoting the deposition of particles and that asymmetric flow configurations greater than 50% difference generated recirculation zones conducive to the accumulation of soot. The most important conclusion establishes that operating with a combined power of more than 300 MW, distributed in a balanced way, allows achieving the recommended exhaust speeds and reducing risks.

Keywords: industrial chimneys; soot accumulation; computational simulation; gas dynamics; operational efficiency.

INTRODUCCIÓN

Los entornos industriales están expuestos a riesgos constantes que, sin una gestión adecuada, pueden desencadenar accidentes con consecuencias catastróficas. En sectores como el petrolero y gasístico, las explosiones, derrames y fallas en oleoductos son incidentes comunes, mientras que, en la industria automotriz, las fallas en líneas de ensamblaje, sistemas eléctricos o componentes de almacenamiento representan amenazas significativas [1]. Entre estos riesgos, la acumulación de hollín en chimeneas industriales emerge como un problema recurrente y subestimado.

Cómo citar este artículo:

Oscar Julio Álvarez Velázquez y otros. Análisis del comportamiento de la gasodinámica en chimeneas industriales. Ingeniería Energética. Vol. 47(2026): publicación continua. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Sedov, Belov [2], advierten que estas acumulaciones no solo obstruyen el flujo de gases, sino que pueden desencadenar reacciones de pirólisis y oxidación incompleta, liberando gases combustibles e iniciando incendios. Además, este residuo corroe los materiales estructurales al combinarse con la humedad y formar ácidos, comprometiendo la integridad física de las instalaciones, como evidenció el colapso de una chimenea en una central termoeléctrica en nuestro país en el 2023, resultando en víctimas mortales ese lamentable accidente.

La problemática se agrava al considerar que el hollín reduce la eficiencia operativa al actuar como aislante térmico, aumentando el consumo energético y las emisiones contaminantes [3]. Si bien se han propuesto soluciones tecnológicas avanzadas, como el uso de catalizadores para mejorar la oxidación del hollín [4-6], estas resultan costosas y de difícil acceso para países en desarrollo. Por ello, es necesario explorar alternativas basadas en la mejora del diseño y la operación de las chimeneas, mediante el estudio de su comportamiento gasodinámico interno, un aspecto que ha recibido escasa atención en la literatura técnica previa.

El presente trabajo tiene como objetivo modelar computacionalmente la gasodinámica en el interior de una chimenea industrial de doble entrada, para identificar zonas críticas de acumulación de hollín y proponer estrategias de mitigación basadas en la modificación de parámetros operativos y geométricos. Para ello, se emplea un software para realizar simulaciones computacionales de la dinámica de fluidos (CFD), validando el modelo con datos experimentales disponibles. El resultado más importante identifica la asimetría en los flujos de entrada como el factor clave que genera turbulencias y zonas de acumulación, y establece una potencia conjunta mínima de operación de 300 MW para cumplir con velocidades de evacuación de los humos recomendadas por Cruz Yépez, Domínguez Gómez [7]. La principal limitación del estudio radica en la no inclusión de un modelo dinámico de deposición de partículas, centrándose en la identificación de zonas propensas más no en la cuantificación de las tasas de crecimiento de los depósitos.

Una revisión de los trabajos publicados sobre chimeneas aparece en 2016 un estudio bibliográfico [8] y a la vez un estudio teórico para caracterizar las condiciones de flujo en chimeneas de calderas de viviendas unifamiliares. Pero en los últimos cinco años se encontró en [9], lo siguiente: para describir el flujo de gases de combustión en el espacio de trabajo del conducto de escape de una chimenea industrial se propone un modelo matemático tridimensional basado en las ecuaciones completas de Navier-Stokes promediadas por Favre, cerradas por k- ϵ : un modelo de turbulencia que utiliza funciones de pared mejoradas. De este modo, es posible obtener una imagen física detallada del proceso en estudio y establecer la presencia de una parte significativa del volumen interno del conducto de flujos secundarios intensos.

En [10,11], se analizan las emisiones en la industria azucarera y en cocinas. elevan los costos de mantenimiento y limitan la disponibilidad de estas instalaciones. Las averías en las calderas de las termoeléctricas que usan combustible de alto contenido de azufre, asfaltenos y otros constituyentes son estudiadas en [11, 12]. La revisión que se hace [13], exploró y evaluó los diversos procesos y tecnologías de separación para el tratamiento de gases de combustión industriales y el control de los contaminantes atmosféricos asociados. El estudio [14], investiga el efecto de temperatura de los gases de escape resultantes de la combustión en el diseño de la chimenea. Para este propósito, se utilizó un algoritmo, que evaluó características térmicas, las de resistencia, el análisis de elementos finitos, y los cálculos de flujo de gases en la chimenea. El algoritmo desarrollado, como innovación, considera los movimientos axiales y momentos desechados debidos cambios de temperatura además de las fuerzas estáticas. El estudio que se hace en [15], examina la influencia de diversas composiciones de gases de combustión en los parámetros operativos y la eficiencia de las celdas de combustible de carbonato fundido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se centró en el análisis de la acumulación de hollín en chimeneas industriales, un problema recurrente que afecta la seguridad, la eficiencia energética y el cumplimiento normativo. Se partió de la necesidad de modelar el comportamiento de los gases de combustión en el interior de una chimenea con múltiples entradas, considerando variables termodinámicas y dinámicas del fluido. El diseño consistió en una simulación computacional de la dinámica fluidos (CFD) mediante el software, validado previamente en estudios similares. Las limitaciones incluyeron la falta de mediciones directas de caudal másico en campo, lo que requirió el uso de ecuaciones termodinámicas para estimar los flujos, lo cual debido a las constantes fluctuaciones propias del proceso, no afecta los resultados. En las acciones de validación, que se presentan durante la discusión de los resultados se mostrará la veracidad de lo planteado.

El software empleado permite el modelado geométrico, su mallado, además de tener facilidades para el posterior procesamiento. Se utilizó una estación de trabajo con procesador Intel Core i7 v Pro, 8th Gen y 16 GB de RAM. Los datos de entrada suministrados al software fueron los parámetros operativos de una central termoeléctrica: potencia eléctrica (P_{el} : 50–330 MW), temperatura de gases (140–170 °C), relación aire-combustible ($\lambda = 16,9 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb}}$) [16], eficiencia global ($\eta_g = 0,34$), capacidad calórica del combustible ($C = 41\ 868 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), empleándose para validar el modelo los datos tabulados de Barreno López [17]. Para esto se procedió en 5 etapas, estas son.

Etapa 1

Se diseñó la geometría 3D de la chimenea, simplificando elementos irrelevantes para el objetivo del estudio (soportes, ménsulas).

Etapa 2

Se generó una malla no estructurada con refinamiento local en zonas críticas (entradas, cambios de sección) El tamaño de elemento varió entre 0,01 y 0,05 m, con un factor de crecimiento de 1,2.

Etapa 3

Posteriormente se configuró la simulación a similitud a lo realizado en anteriormente. Fue necesario la creación de nuevos materiales, las características de los cuales se obtuvieron de Meneses-Ruiz, Roig-Rassi [18], posteriormente se seleccionó el modelo de turbulencia a emplear, utilizándose el modelo k-ε estándar para transferencia de calor y flujo turbulento y se definieron las restricciones y las condiciones denominadas como:

- *Inlet*: Flujo másico ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) y temperatura (K).
- *Outlet*: Presión atmosférica (0 Pa).
- *Wall*: Condición de no deslizamiento y rugosidad estándar.

Etapa 4

Solución de las ecuaciones de Navier-Stokes con un esquema de volúmenes finitos, usando un solver acoplado y criterios de convergencia de 10^{-5} para residuos.

Etapa 5

Se compararon los resultados de velocidad con datos experimentales de Barreno López [16], calculando error relativo porcentual (E_{rp}) y desviación estándar (σ). Para el procesamiento de los datos de la chimenea de estudio es necesario el flujo másico total de gases el cual se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

Energía térmica total generada por la combustión (Q):

$$Q = \frac{P_{el}}{\eta_g} \quad (1)$$

Flujo másico de combustible (\dot{m}_{comb}):

$$\dot{m}_{comb} = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

el flujo másico de aire (\dot{m}_{aire}):

$$\dot{m}_{aire} = \lambda \cdot \dot{m}_{comb} \quad (3)$$

el flujo másico total de gases (\dot{m}_{total}):

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb} \quad (4)$$

Se definieron parámetros de salida como velocidad promedio (VelAveOUT), velocidad mínima (VelMinOUT) y fracción de flujo (FractionMassF). El análisis incluyó 28 simulaciones para evaluar geometría, distribución de flujos y cumplimiento de velocidades de escape de los gases recomendadas ($15\text{--}25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) [17]. El universo de estudio correspondió a chimeneas industriales de centrales termoeléctricas de dos flujos de entrada y de altura 150 m que operan con combustóleo. La muestra se basó en una chimenea específica con dos entradas, representativa por su diseño común en instalaciones de países en desarrollo y su historial de incidentes por acumulación de hollín. El software empleado tiene capacidad para manejar mallados no estructurados, su validación en estudios previos y su precisión en la resolución de flujos turbulentos. Las ecuaciones termodinámicas permitieron estimar flujos másicos de manera confiable ante la imposibilidad de mediciones directas. El modelo k-ε fue elegido por su equilibrio entre precisión y coste computacional en flujos industriales.

RESULTADOS

Validación del modelo computacional

El modelo fue validado comparando los valores de velocidad calculados con datos experimentales reportados en la literatura. La desviación estándar obtenida fue de $\pm 0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y el error relativo porcentual promedio fue de 9.4%, lo que demostró la confiabilidad del modelo para predecir el campo de velocidades (tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la validación del modelo computacional

Sección	Altura desde la base [m]	Velocidad Real [m·s ⁻¹]	Velocidad calculada [m·s ⁻¹]	Desviación estándar	Error relativo [%]
1	0,00	0,99	0,60	0,15	39
2	4,60	1,16	1,48	0,11	28
3	9,20	1,38	1,36	0,00	1
4	13,81	1,66	1,61	0,00	3
5	18,41	2,04	1,96	0,01	4
6	23,01	2,58	2,47	0,01	4
7	27,61	3,35	3,22	0,02	4
8	32,22	4,54	4,36	0,03	4
9	36,82	6,48	6,25	0,06	4
10	41,42	10,00	9,67	0,11	3

Obtención de los parámetros requeridos para el cálculo

Empleando las ecuaciones (1-4), se calcularon los flujos máscicos para potencias entre 50- 330 MW (ver tabla 2).

Tabla 2. Flujos máscicos calculados para distintas potencias

Potencia eléctrica generada (P_{el})	Valor de la energía térmica generada (Q)	Valor del flujo máscico de combustible (\dot{m}_{comb})	Valor del flujo máscico de aire (\dot{m}_{aire})	Valor del flujo máscico total de gases (\dot{m}_{total})
50 MW	147,06 MJ·s ⁻¹	3,51 kg·s ⁻¹	59,36 kg·s ⁻¹	62,87 kg·s ⁻¹
82 MW	241,18 MJ·s ⁻¹	5,76 kg·s ⁻¹	97,35 kg·s ⁻¹	103,11 kg·s ⁻¹
110 MW	323,53 MJ·s ⁻¹	7,73 kg·s ⁻¹	130,59 kg·s ⁻¹	138,32 kg·s ⁻¹
165 MW	485,29 MJ·s ⁻¹	11,59 kg·s ⁻¹	195,89 kg·s ⁻¹	207,48 kg·s ⁻¹
220 MW	647,06 MJ·s ⁻¹	15,45 kg·s ⁻¹	261,19 kg·s ⁻¹	276,64 kg·s ⁻¹
280 MW	823,53 MJ·s ⁻¹	19,67 kg·s ⁻¹	332,42 kg·s ⁻¹	352,09 kg·s ⁻¹
297 MW	873,53 MJ·s ⁻¹	20,86 kg·s ⁻¹	352,60 kg·s ⁻¹	373,46 kg·s ⁻¹
330 MW	970,59 MJ·s ⁻¹	23,18 kg·s ⁻¹	391,78 kg·s ⁻¹	414,96 kg·s ⁻¹

Resultados obtenidos para la chimenea del caso de estudio

Se simuló el comportamiento gasodinámico en el interior de una chimenea industrial de doble entrada bajo diversas condiciones operativas. Los resultados se organizaron en tres escenarios principales.

Escenario 1: Influencia de la geometría

Se evaluó el efecto de un muro interno divisor de flujos. Las simulaciones mostraron que la presencia de este muro, al operar con un único flujo de entrada, generaba una zona de turbulencia localizada en el lado opuesto al impacto del flujo figuras 1-3. Esta zona se identificó como una zona de turbulencia y por ende de pérdidas de energía en el fluido y punto crítico para la acumulación de hollín. La eliminación del muro eliminó por completo esta turbulencia, homogenizando el flujo en todos los casos estudiados (ver figuras 1-3).

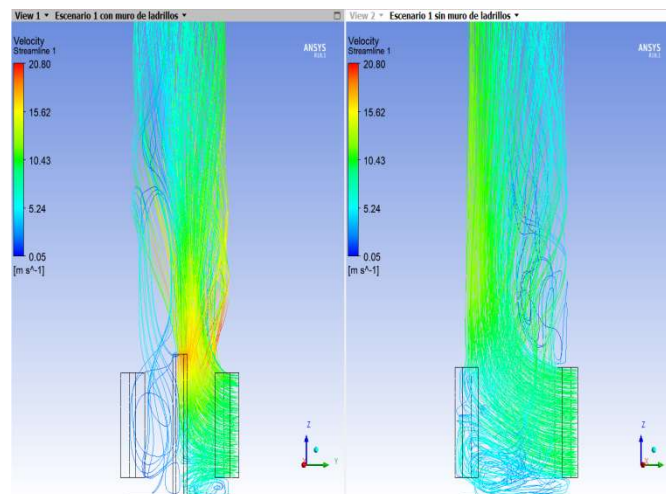


Fig. 1. Simulación de la gasodinámica a 330 MW de potencia variando la geometría.
Fuente: Elaboración propia

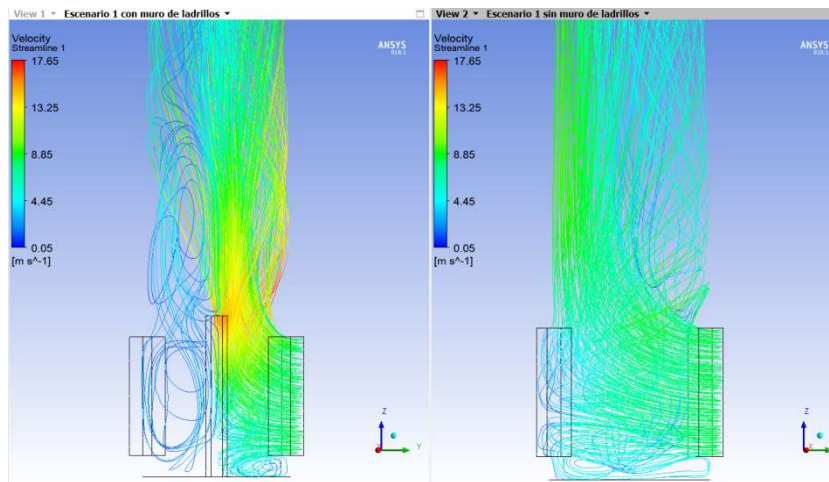


Fig. 2. Simulación de la gasodinámica a 280 MW de potencia variando la geometría.
Fuente: Elaboración propia

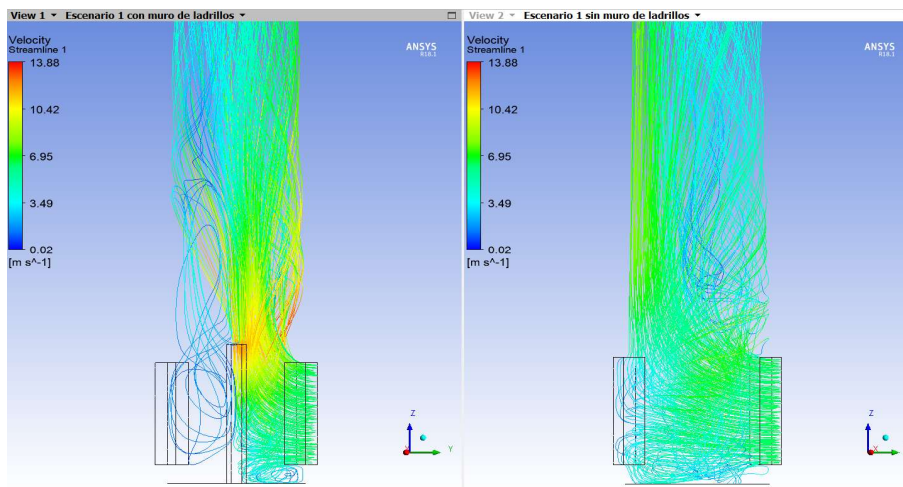
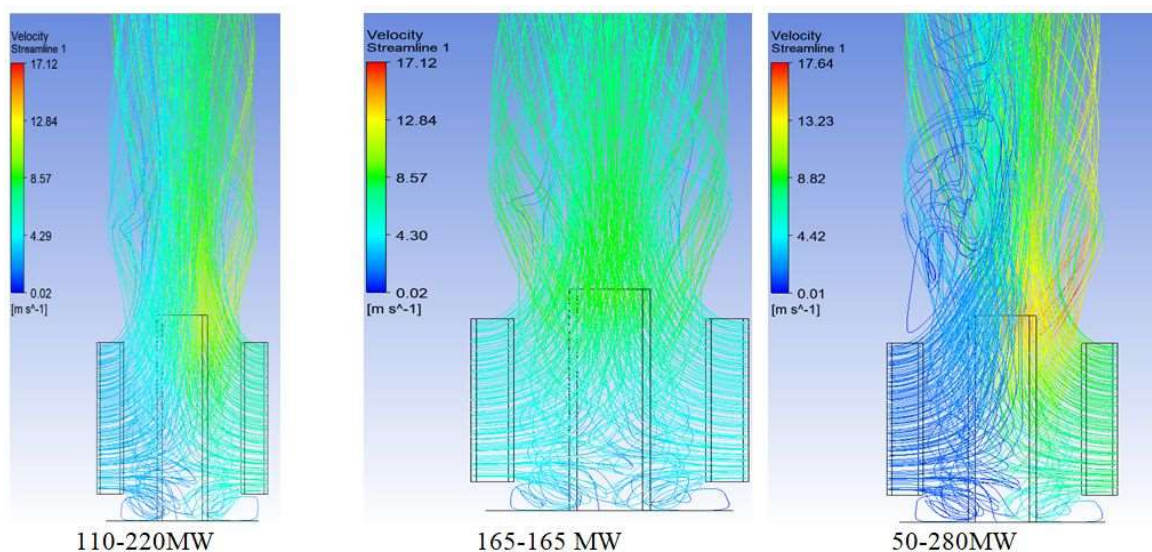


Fig. 3. Simulación de la gasodinámica a 220 MW de potencia variando la geometría.
Fuente: Elaboración propia

Escenario 2: Distribución de flujos y temperatura

Se analizaron configuraciones asimétricas de flujo másico y temperatura.

Configuraciones con diferencias de potencia >50% (ej. 50-280 MW) generaron torbellinos y zonas de recirculación en el interior de la chimenea figura 4. En contraste, la configuración balanceada (165-165 MW) produjo un flujo estable y ascendente sin turbulencias significativas.



110-220MW

165-165 MW

50-280MW

Fig. 4. Simulación de la gasodinámica para flujos de igual temperatura y distinta potencia.
Fuente: Elaboración propia

La diferencia de temperatura entre los flujos de entrada (ej. 155-140 °C) provocó una marcada estratificación térmica (ver figura 5), dificultando la mezcla de los gases. Sin embargo, su influencia en la velocidad de salida fue mínima, con variaciones de solo 2-3% por una diferencia de 15 °C.

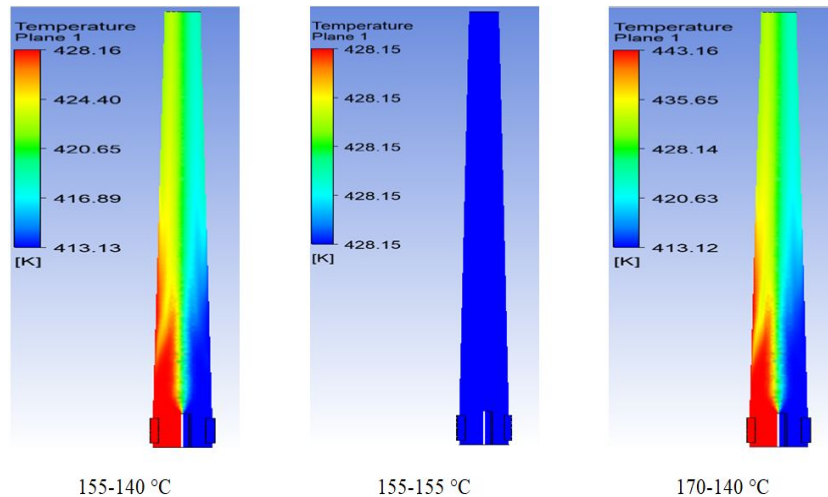


Fig. 5. Simulación de la estratificación térmica para flujos de igual caudal y distinta temperatura.
Fuente: Elaboración propia

Escenario 3: Cumplimiento de velocidades de escape

Se determinó la potencia mínima requerida para alcanzar velocidades de salida entre 15 y 25 m·s⁻¹, recomendadas para una adecuada dispersión de contaminantes por Cruz Yépez, Domínguez Gómez [18]. Los resultados indicaron que una potencia conjunta superior a 300 MW, distribuida de manera equilibrada entre ambas entradas, es necesaria para cumplir consistentemente con este rango de velocidades. En todos los escenarios, el parámetro de mayor influencia en la velocidad de salida fue el flujo másico, confirmando la dependencia directa entre ambas variables.

DISCUSIÓN

El presente estudio logró modelar con éxito la gasodinámica interna de una chimenea industrial de doble entrada, identificando los factores críticos, con respecto a la geometría y gasodinámica, que influyen en la acumulación de hollín y proponiendo mejoras operativas y de diseño. A continuación, se analizan e interpretan los resultados obtenidos.

Análisis e interpretación de resultados

La validación del modelo computacional mostró un error relativo promedio del 9.4%, considerado aceptable para aplicaciones de ingeniería en dinámica de fluidos computacional (CFD), donde errores inferiores al 10% son frecuentemente reportados en la literatura para flujos turbulentos complejos. Las mayores discrepancias se observaron en las secciones inferiores de la chimenea, lo que puede atribuirse a la mayor complejidad del flujo en zonas cercanas a la entrada, donde los efectos de la turbulencia son más significativos y difíciles de modelar con precisión.

La identificación de zonas de turbulencia generadas por el muro interno divisor confirma que cambios geométricos bruscos promueven la creación de zonas de deposición de partículas. Se encontró que la eliminación de este muro, para condiciones de operación con una sola entrada en chimeneas diseñadas con dos entradas, es una solución efectiva y de bajo costo para mitigar este riesgo, siendo un hallazgo con un alto potencial de aplicación práctica inmediata en instalaciones existentes. Los resultados sobre la influencia de la asimetría en los flujos (>50% de diferencia) son consistentes con los principios de la mecánica de fluidos, donde flujos con momentos significativamente diferentes generan interfaces de cizallamiento que derivan en inestabilidades y patrones de recirculación. Este fenómeno explica la formación de zonas de estancamiento donde el hollín puede acumularse progresivamente y las correspondientes pérdidas energéticas.

La mínima influencia de la temperatura (2-3% de variación en velocidad por $\Delta 15^\circ\text{C}$) contrasta con su efecto significativo en la estratificación térmica. Esto sugiere que, mientras el impacto en la velocidad de escape es modesto, el efecto en la distribución de temperaturas dentro de la chimenea es crucial para evitar la condensación de ácidos, tal como advierten Wang, Ge [19]. El principal aporte de este trabajo radica en cuantificar numéricamente el umbral de asimetría de flujos (50%) que desencadena turbulencias peligrosas, un dato de gran utilidad para los operadores de plantas termoeléctricas. Además, se proporciona por primera vez una recomendación de potencia conjunta mínima (300 MW) para chimeneas con estas características, basada en simulaciones CFD para cumplir con velocidades de escape recomendadas (8), ofreciendo una guía clara para la operación segura y conforme a normativas de algunos países.

Las aplicaciones prácticas directas incluyen:

1. Modificación de chimeneas existentes mediante la remoción de muros divisores innecesarios.
2. Establecimiento de protocolos operativos que prioricen la distribución equilibrada de carga entre unidades generadoras.
3. Definición de un punto de operación mínimo (300 MW) para garantizar el cumplimiento ambiental.

El estudio presentó limitaciones inherentes a la modelación CFD, como la suposición de paredes lisas y la no inclusión de un modelo dinámico de deposición y desprendimiento de partículas de hollín. El modelo calculó zonas propensas a la acumulación, pero no cuantificó la tasa de crecimiento de los depósitos, siendo esto aún objeto de estudio en proceso.

Quedan como aspectos no resueltos para futuras investigaciones:

- El desarrollo de un modelo acoplado que incluya la termodinámica de la condensación ácida y su efecto corrosivo.
- La validación experimental de las zonas de acumulación de hollín predichas por el modelo.
- El estudio del efecto de diferentes geometrías de entrada y salida en el patrón de flujo interno.

Nuestros hallazgos sobre la estratificación térmica coinciden con los de Ma, Zhao [20], quienes destacaron la importancia de la homogenización térmica. Sin embargo, este estudio va más allá al cuantificar el impacto operativo de la asimetría y proporcionar soluciones de ingeniería específicas, a diferencia de trabajos previos que se centraron principalmente en soluciones catalíticas costosas (5, 7), de difícil implementación en países en desarrollo.

CONCLUSIONES

1. El modelo computacional desarrollado demostró ser una herramienta confiable para simular la gasodinámica en chimeneas industriales, con un error relativo promedio del 9.4%, validando su uso para el análisis y la optimización de estos sistemas.
2. La variable operativa de mayor impacto en la velocidad de escape de los gases es el flujo másico, determinando mayoritariamente el cumplimiento de los rangos de velocidad recomendados para una dispersión efectiva de contaminantes.
3. Para el caso de chimeneas de dos entradas usadas con una sola entrada la presencia de un muro divisor interno genera zonas de turbulencia y recirculación que actúan como puntos críticos para la acumulación de hollín. Su eliminación constituye una medida de mitigación efectiva y de bajo coste.
4. Las configuraciones asimétricas de flujo, con diferencias superiores al 50% generan inestabilidades y patrones de recirculación dentro de la chimenea, creando condiciones favorables para la deposición de hollín, por lo que debe priorizarse la operación balanceada.
5. La diferencia de temperatura entre los flujos de entrada induce una estratificación térmica que perjudica la mezcla de los gases, aunque su influencia cuantitativa en la velocidad de salida es mínima.
6. Se estableció que la potencia conjunta mínima requerida para operar dentro del marco normativo y garantizar velocidades de escape entre $15\text{-}25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ es de 300 MW, distribuida de manera equilibrada entre las dos entradas de la chimenea.

REFERENCIAS

- [1]. Cvetković, M., *et al.* “Industrial Disasters and Hazards: From Causes to Consequences—A Holistic Approach to Resilience”. *International Journal of Disaster Risk Management*. 2024, vol. 6, n. 2, p. 149-68. ISSN 2620-2786. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/387468804_Industrial_Disasters_and_Hazards_From_Causes_to_Consequences_-_a_Holistic_Approach_to_Resilience
- [2]. Sedov, D., *et al.* “Investigation of soot as a cause of a fire hazard during operation of a coal-fired boiler”. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2024, vol. 2, n. 33, p. 177-83. ISSN 2500-4026. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/381974971_Investigation_of_soot_as_a_cause_of_a_fire_hazard_during_operation_of_a_coal-fired_boiler
- [3]. Tong, Y., *et al.* “Experimental investigation on the DPF high-temperature filtration performance under different particle loadings and particle deposition distributions”. *Processes*. 2021, vol. 9, n. 8. ISSN 2227-9717. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/8/1465>
- [4]. Mekki, I., *et al.* “Nanostructured Pr-Rich CexPr1-xO2-δ mixed oxides for diesel soot combustion: importance of oxygen lability”. *Nanomaterials*. 2024, vol. 14, n. 6. ISSN 2079-4991. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/6/483>
- [5]. Di, S., *et al.* “Synergy between ceria and metals (Ag or Cu) in catalytic diesel particulate filters: Effect of the metal content and of the preparation method on the regeneration performance”. *Topics in Catalysis*. 2021, vol. 64, n. 3, p. 256-69. ISSN 1572-9028. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/345998593_Synergy_Between_Ceria_and_Metals_Ag_or_Cu_in_Catalytic_Diesel_Partuculate_Filters_Effect_of_the_Metal_Content_and_of_the_Preparation_Method_on_the_Regeneration_Performance

- [6]. Huang, J., *et al.* “A Review of the Application of Soot Catalysts: Focus on the Soot Oxidation-Induced Fragmentation Process”. *Energy & Fuels*. 2024, vol. 38, n. 21, p. 20057-20083. ISSN 0887-0624. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.4c03152>
- [7]. Cruz, R., *et al.* “Modelado de contaminantes atmosféricos de la Central Termoeléctrica en la zona urbana de Salamanca”. *XXVII Verano De la Ciencia*. 2022, vol. 16. ISSN 2395-9797. Disponible en: <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/7069/1/3516-Texto%20del%20art%C3%ADculo-11667-1-10-20220822.pdf>
- [8]. Paavilainen, J. “Characterization of Chimney Flue Gas Flows”. *SERC*. 2016. ISSN 1401-7555. Disponible en: <https://du.diva-portal.org/smash/get/diva2:1050310/FULLTEXT01.pdf>
- [9]. Volodin, Y., *et al.* “The study of gas flow in the industrial smoke pipe”. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 890. ISSN 1361-6501. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/890/1/012160/pdf>
- [10]. Marrero, Y., *et al.* “Emisiones atmosféricas provenientes de centrales azucareros de Holguín, Cuba: Una herramienta de gestión pública local”. *Revista Cubana de Meteorología*. 2020, vol. 26, n. 2. ISSN 2664-0880. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802020000200006
- [11]. ElSharkawy, M. and Ibrahim, O. “Impact of the Restaurant Chimney Emissions on the Outdoor Air Quality”. *Atmosphere*. 2022, vol. 13, n. 2. ISSN 2073-4433. Disponible en: https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/261#Conflicts_of_Interest
- [12]. Rodríguez, D., y Rosabal, B. “Aspectos esenciales para lograr el uso eficiente del combustible nacional, en las centrales termoeléctricas cubanas”. *Revista Universidad y Sociedad*. 2023, vol. 15, n. 4. ISSN 2218-3620. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000400065
- [13]. Elehinafe, F., *et al.* “Separation processes for the treatment of industrial flue gases – Effective methods for global industrial air pollution control”. *Heylon*. 2024, vol, 10. ISSN 2405-8440. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Francis-Elehinafe/publication/381201663_SEPARATION_PROCESSES_FOR_THE_TREATMENT_OF_INDUSTRIAL_FLUE_GASES_EFFECTIVE_METHODS_FOR_GLOBAL_INDUSTRIAL_AIR_POLLUTION_CONTROL/links/6661c915a54c5f0b944edc5c/Separation-processes-for-the-treatment-of-industrial-flue-gases-Effective-methods-for-global-industrial-air-pollution-control.pdf?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- [14]. Kursat, T. “Investigation of flue gas temperature effects in natural gas fueled Systems: Experimental thermal performance and structural optimization”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2024, vol. 107. ISSN 0142-727X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X2400153X>
- [15]. Szczesniak, A., *et al.* “Analysis of Industrial Flue Gas Compositions and Their Impact on Molten Carbonate Fuel Cell Performance for CO₂ Separation”. *Sustainability*. 2025, vol. 17, n. 24. ISSN 2071-1050. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/24/11234>
- [16]. Moring, V. “Thermodynamics”. *Editorial Hispano Americana*. México. 2025, ed. 6. ISBN 9781-4467-1006-7. Disponible en: <https://scispace.com/pdf/thermodynamics-an-engineering-approach-6th-edition-1inw4qbjir.pdf>
- [17]. Barreno, R. “Diseño de chimeneas industriales en concreto reforzado, con base en el código ACI 307”. *Tesis de Grado*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2025. Disponible en: http://www.repositorio.usac.edu.gt/753/1/08_3674_C.pdf
- [18]. Meneses, E., *et al.* “Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba”. *Revista Cubana de Meteorología*. 2018, vol. 24, n. 1, p. 1-9. ISSN 0864-151X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/335750051_Articulo_Original_Factores_de_emision_de_CO_CO2_NOx_y_SO2_para_instalaciones_generadoras_de_electricidad_en_Cuba_Factors_of_emission_of_CO_CO2_NOx_AND_SO2_for_electricity_generating_plants_in_Cuba
- [19]. Wang, H., *et al.* “The effects of ash inside a platinum-based catalyst diesel particulate filter on particle emissions, gaseous emissions, and unregulated emissions”. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, vol. 25, p. 33736-33744. ISSN 0944-1344. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30276695/>
- [20]. Ma, L., *et al.* “Soot elimination and heat recovery of industrial flue gas by heterogeneous condensation”. *Scientific reports*. 2020, vol. 10, n. 1. ISSN 2045-2322. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339385239_Soot_elimination_and_heat_recovery_of_industrial_flue_gas_by_heterogeneous_condensation

CONFLICTO DE INTERESES.

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Oscar Julio Álvarez Velázquez: <https://orcid.org/0009-0008-8285-9826>

Recolección de los datos, implementación de los modelos, empleo de software, análisis de los resultados, simulación para la validación de resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

José Rodríguez Bertran: <https://orcid.org/0000-0002-4006-4135>

Diseño de la investigación, análisis previo el proceso físico, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Roberto Vizcón Toledo: <https://orcid.org/0000-0002-5406-5390>

Análisis previo del proceso físico, revisión del estado del arte, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

JE Arango González: <https://orcid.org/0000-0001-9704-6088>

Revisión del estado del arte, implementación de los modelos, empleo de software, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Alberto E. Calvo González: <https://orcid.org/0000-0001-9385-6884>

Análisis previo del proceso físico, revisión del estado del arte, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final