

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar, optimizar, construir y validar numéricamente un separador ciclónico para aplicaciones académicas, destinado a servir como plataforma experimental para la enseñanza y la investigación en mecánica de fluidos y separación gas-sólido. Como punto de partida se adoptó la geometría Stairmand de alta eficiencia, a partir de la cual se desarrolló el modelo tridimensional mediante diseño asistido por computadora y se caracterizó experimentalmente el material particulado empleado en las simulaciones. El análisis fluidodinámico se realizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional utilizando ANSYS Fluent 2025 R2, empleando un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable, el Modelo de Fase Discreta para el seguimiento de partículas y un estudio de independencia de malla que garantizó la confiabilidad de los resultados. Posteriormente, se utilizó un Diseño de Experimentos factorial completo 3^2 y la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para obtener modelos predictivos de la eficiencia de separación y la caída de presión del separador ciclónico en función de la longitud del buscador de vórtices y el diámetro de la descarga inferior. Estos modelos obtenidos fueron utilizados en funciones objetivo en un proceso de optimización multiobjetivo mediante el algoritmo genético NSGA-II, permitiendo identificar configuraciones geométricas con un equilibrio gran eficiencia y baja pérdida de caída de presión. Finalmente, se construyó e instrumentó un prototipo físico del separador ciclónico, el cual fue sometido a pruebas experimentales para validar las predicciones numéricas realizadas. Los resultados obtenidos demostraron una alta concordancia entre las simulaciones CFD y el comportamiento real, registrándose una eficiencia de separación experimental de 93,53 % frente al 95,22 % predicho numéricamente, con un error relativo de 1,51 %, lo que confirma la validez de la metodología empleada y la utilidad del equipo como herramienta para aplicaciones académicas e investigaciones futuras.

Palabras clave: Optimización Multiobjetivo; Separador Ciclónico; RSM; NSGA-II; Prototipo, CFD.

Abstract

The objective of this study was to design, optimize, construct, and numerically validate a cyclone separator for academic applications, intended to serve as an experimental platform for teaching and research in fluid mechanics and gas-solid separation. The high-efficiency Stairmand geometry was adopted as a starting point, from which the three-dimensional model was developed using computer-aided design. The particulate material used in the simulations was then experimentally characterized. The fluid dynamic analysis was performed using Computational Fluid Dynamics with ANSYS Fluent 2025 R2, employing a realizable $k-\epsilon$ turbulence model, the Discrete Phase Model for particle tracking, and a mesh independence study that ensured the reliability of the results. Subsequently, a 3^2 full factorial Design of Experiments and Response Surface Methodology (RSM) were used to obtain predictive models of the separation efficiency and pressure drop of the cyclone separator as a function of the vortex finder length and the lower discharge diameter. These models were used as objective functions in a multi-objective optimization process using the NSGA-II genetic algorithm, allowing the identification of geometric configurations that balance high efficiency with low pressure drop. Finally, a physical prototype of the cyclone separator was built and instrumented, and subjected to experimental testing to validate the numerical predictions. The results showed a high degree of agreement between the CFD simulations and the actual performance, with an experimental separation efficiency of 93.53% compared to the numerically predicted 95.22%, and a relative error of 1.51%. This confirms the validity of the methodology used and the usefulness of the equipment as a tool for academic applications and future research.

Keywords: Optimización Multiobjetivo; Separador Ciclónico; RSM; NSGA-II; Prototipo, CFD