



**ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BOMBAS
DE CHORRO DE AIRE-SÓLIDO UTILIZADAS EN EL TRANSPORTE
NEUMÁTICO DE PARTÍCULAS DE ALTA DENSIDAD.**

NALLELY ATEHORTUA OCHOA

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS.
MEDELLÍN
2024**

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BOMBAS
DE CHORRO DE AIRE-SÓLIDO UTILIZADAS EN EL TRANSPORTE
NEUMÁTICO DE PARTÍCULAS DE ALTA DENSIDAD.**

NALLELY ATEHORTUA OCHOA

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Sistemas Electromecánicos

Asesores

William Orozco Murillo

Magister en Gestión Energética Industrial

José Alfredo Palacio Fernández

PhD en Ingeniería en Ingeniería Ambiental

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS.
MEDELLÍN
2024**

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2.1 Descripción	4
2.2 Formulación	5
3. JUSTIFICACIÓN.....	6
3.1 Modificación de la geometría de las becas para la mejora del transporte de partículas sólidas	6
3.2 Beneficios de la Optimización Geométrica	7
4. OBJETIVOS.....	9
4.1 Objetivo general.....	9
4.2 Objetivos específicos	9
5. REFERENTES TEÓRICOS.....	10
5.1 Definiciones bombas a chorro	10
5.2 Clasificación de las Bombas a Chorro	11
5.3 Partes Principales de la Bomba a Chorro.....	12
5.4 Investigaciones Acerca de las Bombas a Chorro	12
5.5 Investigaciones Acerca Del Software ANSYS (CFX).....	13
6. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO.....	15
6.1 Optimización Geométrica	15
7. METODOLOGÍA.....	16
8. RESULTADOS DE LA PROPUESTA.....	21
8.1 Conjunto de pruebas experimentales con material particulado	18
Prueba a presión de 2 psi	21
Prueba a presión de 4 psi	21
Prueba a presión de 6 psi	22

8.2 Simulación en el software de simulación para análisis de rendimiento de bombas de chorro	22
8.3 Ponencia en la Semana de Parque Tech sobre la Optimización del Rendimiento de la Bomba Chorro	25
8.4 Comparación simulación y pruebas experimentales.....	26
Análisis para 6 psi	26
Análisis para 4 psi	28
Análisis para 2 psi	29
9. CONCLUSIONES.....	31
10. RECOMENDACIONES	33
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento de la bomba chorro. Fuente: Dessouky et al. (2002)	8
Figura 2. Partes de la bomba chorro Fuente: Chen et al, (2017).....	12
Figura 3. Montaje experimental para el transporte de material particulado mediante bomba a chorro.....	18
Figura 4. Resultados de las simulaciones unificados	23
Figura 5 Resultado de vació unificado	25
Figura 6. Poster ponencia en la Semana de Parque Tech sobre la Optimización del Rendimiento de la Bomba Chorro.....	26

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades de la investigación	17
Tabla 2. Presión a 2PSI	21
Tabla 3. Presión a 4PSI	21
Tabla 4. Presión a 6PSI	22

1. INTRODUCCIÓN

La bomba de chorro presenta una forma sencilla, confiable, económica y de bajo costo de producir vacío, especialmente en sistemas neumáticos donde se dispone de un fluido primario o motor, que puede ser un gas a alta presión (Liu, W & Pochiraju, K, 2018). En la bomba de chorro, el gas a alta presión fluye a través de una boquilla para aspirar un flujo secundario que puede ser gas, líquido o partículas sólidas (Besagni, G et al., 2016). La mezcla gas- fluido o gassólido pasa desde la cámara de mezcla a través del difusor donde se recupera la presión (Thongtip, T & Aphornratana, S, 2017).

Las (BCAS) son dispositivos ampliamente utilizados en diversas industrias debido a su capacidad para generar un flujo de líquido a alta presión utilizando un flujo de líquido de alta velocidad (Yu et al., 2006). Su importancia radica en varias áreas: Limpieza industria, Demolición y corte, Desincrustación y desatascamiento, Extinción de incendios, Aplicaciones industriales especializadas (Aly et. Al., 1999).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción

La optimización del rendimiento de las bombas de chorro de aire-sólido (BCAS) se presenta como un problema no resuelto que requiere atención urgente. Este hecho tiene implicaciones significativas tanto teóricas como prácticas, lo que justifica la necesidad de este proyecto.

Identificación del Problema

Las BCAS son ampliamente utilizadas en diversas industrias debido a su capacidad para transportar partículas sólidas sin partes móviles. Sin embargo, su rendimiento no siempre alcanza niveles óptimos debido a interacciones subóptimas entre el flujo de aire y las partículas (Gamisans et al., 2004). Esta ineficiencia se traduce en:

Alto Consumo Energético: La operación ineficiente de las bombas resulta en un mayor consumo de energía, lo que incrementa los costos operativos y afecta la sostenibilidad (Aly et al., 1999).

Costos de Mantenimiento Elevados: Un rendimiento deficiente puede llevar a un desgaste acelerado de los componentes, aumentando la frecuencia y el costo del mantenimiento (Ouzzane & Aidoun, 2003).

Variabilidad en la Calidad del Producto: La inconsistencia en el flujo de materiales puede comprometer la calidad del producto final, afectando la competitividad en el mercado (Varga et al., 2009).

Cumplimiento Normativo: Las regulaciones ambientales y de seguridad exigen que los equipos operen eficientemente. Un rendimiento inadecuado puede resultar en sanciones y problemas legales (Huang et al., 1999).

Impacto Ambiental: La ineficiencia puede conducir a derrames y fugas, generando contaminación y afectando negativamente el medio ambiente (García Del Valle et al., 2012).

2.2 Formulación

¿Cómo afecta la modificación de la geometría de las bombas de chorro de aire-sólido (BCAS) al transporte eficiente de partículas sólidas, considerando diferentes tamaños y tipos de partículas en el contexto de aplicaciones industriales, y evaluando la eficiencia energética, la relación de caudal másico y la recuperación de presión como medidas de rendimiento?

3. JUSTIFICACIÓN

3.1 Modificación de la geometría de las becas para la mejora del transporte de partículas sólidas

Modificar la geometría de las Bombas Chorro de Agua y Sólidos (BCAS), incluyendo la boquilla, la cámara de mezcla y el difusor, puede mejorar significativamente el transporte de partículas sólidas (Fahmy et al., 2002). A continuación, se detallan los componentes clave y cómo sus modificaciones influyen en el rendimiento de las bombas:

Boquilla

Diseño y Forma Una boquilla bien diseñada optimiza la velocidad y presión del chorro inicial, mejorando la eficiencia de succión y transporte de partículas sólidas. Boquillas cónicas o de perfil aerodinámico reducen pérdidas de energía y aumentan la velocidad del flujo.

Tamaño y Materiales

Ajustar el diámetro de la boquilla permite controlar el caudal y la presión, adaptándose a diferentes tipos de sólidos y condiciones operativas. Además, el uso de materiales resistentes a la abrasión y corrosión prolonga la vida útil de la boquilla, manteniendo un rendimiento óptimo en condiciones adversas.

Cámara de Mezcla

Configuración y Forma La geometría de la cámara de mezcla influye en la eficiencia del mezclado entre el líquido y las partículas sólidas. Formas adecuadas, como cónicas o cilíndricas, mejoran la homogeneidad de la mezcla y reducen las zonas de baja velocidad donde podrían acumularse partículas.

Longitud y Entradas/Salidas

Una cámara más larga proporciona más tiempo para la mezcla, mejorando la incorporación de partículas al flujo. Además, el diseño de las entradas y salidas afecta la trayectoria y velocidad del flujo, optimizando el transporte de partículas.

Difusor

Ángulo, Longitud y Superficie Interna El difusor desacelera el flujo y convierte la energía cinética en presión estática. Modificar el ángulo y la longitud del difusor puede mejorar esta conversión y reducir la pérdida de energía. Además, una superficie interna lisa minimiza la fricción y las pérdidas de carga.

3.2 Beneficios de la Optimización Geométrica

Mayor Eficiencia de Transporte: Mejora la capacidad de la bomba para transportar partículas sólidas de manera eficiente, reduciendo obstrucciones y desgaste.

Reducción de Costos Operativos: Optimización energética y menor desgaste disminuyen los costos de operación y mantenimiento.

Mayor Flexibilidad y Vida Útil: Adaptar la geometría permite manejar una variedad más amplia de materiales y condiciones, prolongando la vida útil de los componentes de la bomba.

Mejora de la Dispersión y Transporte Uniforme: Distribución uniforme de partículas reduce aglomeraciones y asegura un transporte estable, incrementando la capacidad de carga y minimizando pérdidas (Chen et al., 2017; Thongtip & Aphornratana, 2017).

Aplicaciones Industriales

Las bombas chorro, ver Figura 1, son esenciales en diversas industrias para tareas como limpieza industrial, demolición y corte, desincrustación de tuberías, y extinción de incendios (Chunnanond et al., 2004; Wang et al., 2020; Sheha et al., 2018). Su capacidad para generar flujos de alta presión las hace versátiles y eficientes en múltiples aplicaciones especializadas (Alexis et al., 2003; Desevaux, 201).

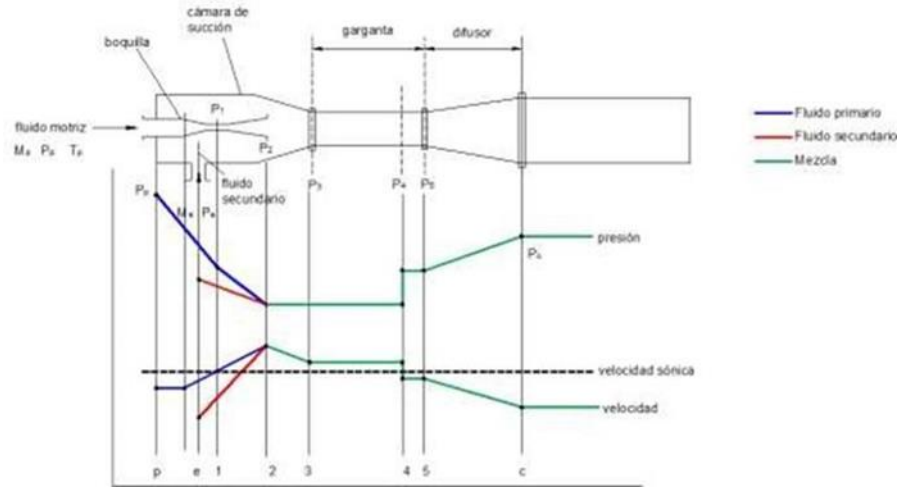


Figura 1. Funcionamiento de la bomba chorro. Fuente: Dessouky et al. (2002)

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar los parámetros de optimización del rendimiento de bombas de chorro de aire-sólido utilizadas en el transporte neumático de partículas de alta densidad.

4.2 Objetivos específicos

- Utilizar simulaciones en ANSYS CFX para modelar el flujo de aire y la dispersión de partículas en diferentes geometrías de BCAS, considerando variaciones en tamaño de grano y tipo de partícula.
- Realizar pruebas experimentales para validar los resultados de las simulaciones, especialmente en relación con la distribución del flujo de aire y la dispersión de partículas.
- Comparar los datos experimentales con las simulaciones para ajustar los modelos y mejorar la precisión de las predicciones del transporte de partículas.

5. REFERENTES TEÓRICOS

5.1 Definiciones bombas a chorro

Las bombas chorro son dispositivos ampliamente utilizados en diversas industrias, como la química, petrolera y minera, con aplicaciones destacadas en condensadores, sistemas de evaporación y secado al vacío, así como en torres de destilación al vacío (Huang, B et al., 1999).

Su papel principal radica en funcionar como bombas generadoras de vacío (Liu, W & Pochiraju, K, 2018). Se han centrado numerosas investigaciones en optimizar su rendimiento, especialmente en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, siendo países como Polonia, Canadá, Kuwait, Portugal, Alemania, Grecia, España, Egipto, Taiwán y China, donde se han llevado a cabo estudios para determinar las dimensiones, geometría y características de los fluidos motriz y secundario que maximicen su eficiencia (Sheha, F et al, 2018).

La ventaja clave de las bombas chorro sobre sus competidores, como las bombas de vacío, radica según Besagni, G et al., (2016) en su diseño sin partes móviles, facilidad de construcción, tamaño compacto, instalación sencilla y costos de adquisición y mantenimiento reducidos. Sin embargo, su óptimo funcionamiento requiere ajustes experimentales, lo que limita su versatilidad en comparación con las bombas de vacío (Thongtip, T & Aphornratana, S, 2017).

En Colombia, la falta de comprensión de los principios de funcionamiento de las bombas chorro ha generado una dependencia tecnológica para su diseño (Yu et al., 2006). Muchos usuarios como menciona las perciben como dispositivos misteriosos que simplemente producen vacío a partir del suministro de un fluido, lo que ha llevado a la idea errónea de que son difíciles de entender y manejar (Gamisans, X et al., 2004).

El principio de funcionamiento de las bombas chorro se basa como afirma Aly et. al. (1999) en el comportamiento de los fluidos al pasar por una tobera convergente-divergente, donde un fluido motriz de alta presión y baja velocidad se acelera significativamente al pasar por la garganta de la tobera, generando una presión baja que permite succionar otro fluido (secundario) y mezclarlos para obtener un fluido final a una presión mayor.

5.2 Clasificación de las Bombas a Chorro

Eyector

Cubre todos los tipos de bombas chorro que descargan a una presión entre las presiones motriz y de succión Liu, W & Pochiraju, K, (2018).

Inyector

Utiliza un gas condensable para introducir o aspirar un líquido y descargarlo contra una presión mayor que cualquiera de las de succión o motriz. Actualmente se usa principalmente en los alimentadores de calderas de vapor Aly et. Al., (1999).

Sifón

Es una bomba chorro para líquido que utiliza vapor como fluido motriz.

Aductor

Bomba chorro para líquido que utiliza otro líquido como fluido motor.

Extractor

Bomba chorro para gas que utiliza un líquido o un gas como fluido motriz.

Soplador de chorro

Bomba chorro para gas que bombea gases contra presiones diferenciales muy bajas.

Compresor de chorro

Bomba chorro para gas usada para aumentar la presión de gases.

Lavador de gas

Se utiliza para bombear aire y gases contra presiones diferenciales muy bajas usando un líquido como fluido motor. También conocido como "lavador de vapor", "aspirador de humos" o "absorbedor de vapores", se emplea para limpiar gases, así como vapores y emanaciones molestas.

Termocompresor

Se utiliza para comprimir vapor utilizando vapor como fluido motriz.

5.3 Partes Principales de la Bomba a Chorro

Las bombas chorro están compuestas principalmente por cinco partes esenciales, combinando una tobera con un difusor en un solo equipo, como se representa en la Figura 2. (Desevaux, P, 2001). La boquilla o tobera facilita la expansión del fluido motriz (también conocido como primario o actuante) hasta alcanzar una alta velocidad (El-Dessouky et al., 2002).

La cámara de succión incluye la sección de entrada del fluido eyectado (también llamado secundario), donde este último es arrastrado por el fluido motriz (Ouzzane, M & Aidoun, Z, 2003). La cámara de mezcla permite una íntima combinación entre los fluidos motriz y succionado. En el difusor, se produce la desaceleración de la mezcla, lo que resulta en un aumento de presión. Finalmente, la descarga de la bomba chorro completa el conjunto. El circuito correspondiente se muestra en la Figura 2 (Desevaux, P, 2001).

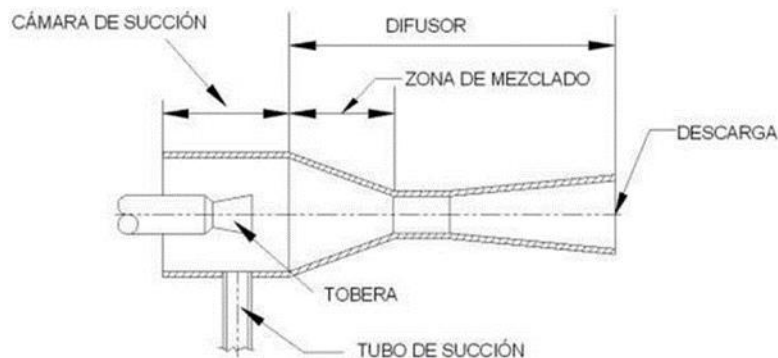


Figura 2. Partes de la bomba chorro Fuente: Chen et al, (2017)

5.4 Investigaciones Acerca de las Bombas a Chorro

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones experimentales para explorar el impacto de la geometría del eyector en su rendimiento (Chen, W et al., 2017). Estudios como han abordado aspectos como la posición de salida de la boquilla, la relación entre el área de la cámara de mezcla y el área de la boquilla, el diseño de la boquilla y el efecto del fluido motriz (Liu, W & Pochiraju, K, 2018). Estos estudios han revelado la posibilidad de mejorar el rendimiento de las bombas chorro, especialmente en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, donde la simplicidad en la construcción, alta fiabilidad y bajo costo son atractivos (Liu, W & Pochiraju, K, 2018).

Investigadores como (García Del Valle et al., 2012) han contribuido al estudio de la posición de salida de la boquilla, la relación entre el área de la cámara de mezcla y el área de la boquilla, así como el efecto del fluido motriz en el rendimiento de las bombas chorro.

Se ha investigado el uso de bombas chorro en sistemas de refrigeración, destacando un estudio de El-Dessouky et al., (2002) & Alexis et al., (2003) sobre un refrigerador con chorro de vapor. Además, se ha explorado el rendimiento óptimo mediante el uso de bombas chorro de geometría variable, como demostraron estudios de Aly et al., (1999) desarrollaron un modelo de simulación por computadora para eyectores de chorro de vapor, aplicando ecuaciones de continuidad, momentum y energía. Este modelo tuvo en cuenta el efecto de la presión del vapor motriz, la temperatura del evaporador y la relación de flujo entre el fluido motriz y el fluido secundario.

Los estudios experimentales de Desevaux (2001) utilizaron un método óptico para visualizar cualitativamente los fenómenos de mezcla en las bombas chorro. Además, Varga et al., (2009) utilizaron el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para comprender mejor los efectos de la geometría en el rendimiento de las bombas chorro, identificando puntos óptimos de funcionamiento para diferentes condiciones de operación y diseño geométrico.

5.5 Investigaciones Acerca Del Software ANSYS (CFX)

Los estudios teóricos relacionados con el software ANSYS abarcan una variedad de campos de la ingeniería y la ciencia aplicada. Según Huang, B et al., (1999) incluyen:

Mecánica de Fluidos Computacional (CFD). La teoría detrás de los métodos numéricos utilizados en ANSYS CFD se basa en principios fundamentales de la mecánica de fluidos, como las ecuaciones de Navier-Stokes y la conservación de masa, momentum y energía. Estos métodos permiten simular y analizar el comportamiento de los fluidos en una amplia gama de aplicaciones, desde flujos internos en tuberías hasta aerodinámica de vehículos.

Análisis Estructural. En el análisis estructural, ANSYS utiliza métodos de elementos finitos (FEM) para modelar y simular el comportamiento de estructuras bajo cargas mecánicas. La teoría subyacente se basa en conceptos de mecánica de sólidos, como la teoría de la elasticidad y la resistencia de materiales, para calcular tensiones, deformaciones y deflexiones en componentes y estructuras complejas.

Electromagnetismo (EMAG). Para el análisis electromagnético, ANSYS utiliza métodos numéricos como el método de los elementos finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell. Esto permite simular el comportamiento de campos electromagnéticos en dispositivos y sistemas, como motores eléctricos, antenas y dispositivos electrónicos.

Transferencia de Calor. ANSYS también permite analizar la transferencia de calor en sistemas y componentes utilizando métodos numéricos basados en las ecuaciones de conservación de energía y los principios de la termodinámica. Esto es crucial en aplicaciones como el diseño de intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración y procesos de fabricación. Descripción Técnica Del Proyecto.

6. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

6.1 Optimización Geométrica

La optimización geométrica de los tres componentes principales (boquilla, cámara de mezcla y difusor) ofrece los siguientes beneficios:

Mayor eficiencia de transporte: Mejora la capacidad de transportar partículas sin obstrucciones.

Reducción de costos operativos: El menor desgaste y una mayor eficiencia energética resultan en menores costos de operación (Wang et al., 2020).

Mayor capacidad de carga: Las bombas pueden transportar una mayor cantidad de partículas de forma estable.

Prolongación de la vida útil: Las modificaciones geométricas reducen el desgaste en los componentes clave (Fahmy et al., 2002).

7. METODOLOGÍA

Este proyecto se basa en el uso de simulaciones computacionales utilizando el software ANSYS (CFX) para evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones geométricas de las BCAS. Los resultados de las simulaciones serán validados experimentalmente en un banco de pruebas. Las simulaciones se centrarán en modelar el comportamiento del flujo de aire y la dispersión de partículas de alta densidad, mientras que los experimentos proporcionarán datos precisos sobre la distribución del flujo y el transporte de partículas (Chen et al., 2017).

El desarrollo de estrategias de optimización geométrica para las BCAS tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia del transporte de partículas sólidas, reducir los costos operativos y aumentar la capacidad de carga, permitiendo que las bombas sean más versátiles y confiables en diversas aplicaciones industriales. Las actividades relacionadas con la presente metodología se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Actividades de la investigación

Etapa	Actividades	Resultados
1. Elaboración Estado del arte	1.1 Revisión del estado del arte	Consideraciones generales y principios básicos de funcionamiento de las bombas de chorro.
	1.2 Definir características y parámetros	Consideraciones básicas de diseño y variables de interés para bombas de chorro de gas-sólido.
	1.3 Identificar modelos matemáticos y computacionales	Información sobre los modelos matemáticos y computacionales más utilizados para el análisis de bombas de chorro.
2. Modelado en software de simulación de los sistemas dinámicos	2.1 Selección de modelos computacionales	Modelos computacionales más pertinentes para el análisis dinámico de bombas de chorro.
	2.2 Definir parámetros	Parámetros específicos para el modelo dinámico de bombas de chorro.
	2.3 Elaborar modelo en software de simulación	Simulación del comportamiento de las bombas de chorro utilizando ANSYS CFX.
3. Realización de pruebas experimentales	3.1 Diseño del banco de pruebas	Configuración del banco de pruebas para validar los modelos simulados.
	3.2 Ejecución de pruebas experimentales	Datos experimentales sobre la distribución del flujo de aire y la dispersión de partículas.
	3.3. Comparación de datos experimentales y simulaciones	Ajuste y validación de los modelos computacionales.

Conjunto de pruebas experimentales con material particulado

El montaje experimental que se implementó para la medición del flujo de material particulado, se indica en la figura 3. En este se tiene el compresor como fuente de aire para el fluido primario, arene en contenedor plástico para el fluido secundario. La medición del flujo se realizó en un recipiente graduado en ml a la salida de la bomba a chorro.

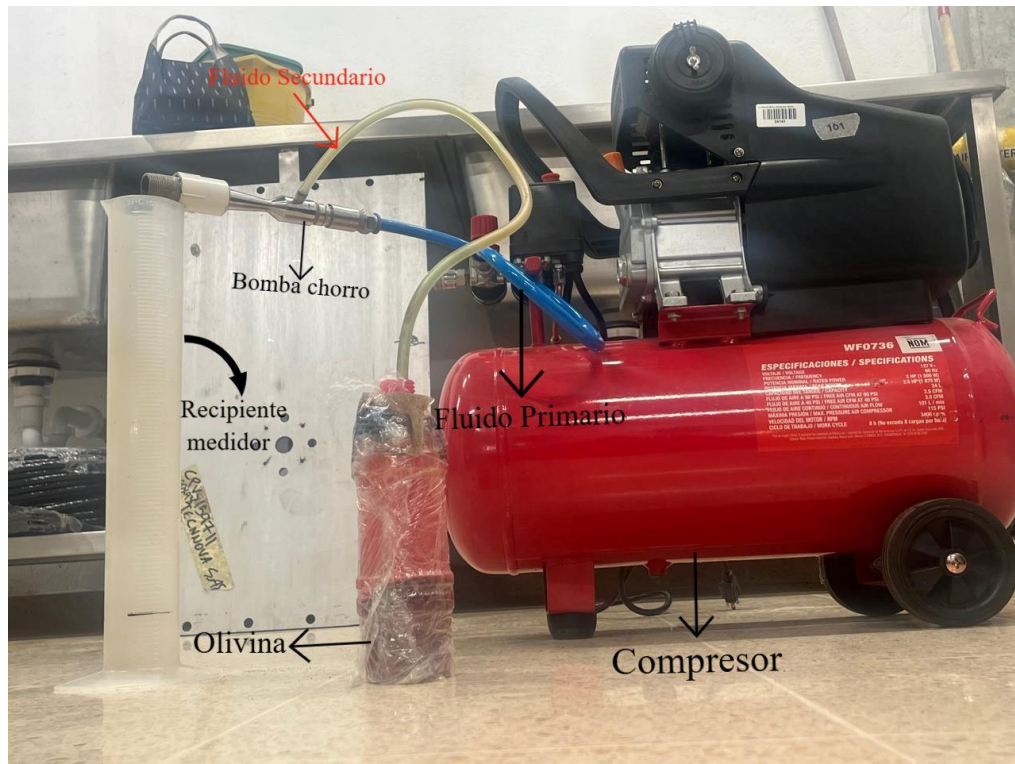


Figura 3. Montaje experimental para el transporte de material particulado mediante bomba a chorro. Fuente propia

Compresor

El compresor suministra aire a presión, que sirve como la fuerza impulsora para mover el material particulado a través de la bomba a chorro. Este aire comprimido es el "fluido primario" que ingresa al sistema y genera el vacío necesario para succionar el "fluido secundario".

Bomba a chorro

La bomba a chorro es el dispositivo central del sistema. Funciona al inyectar el aire comprimido (fluido primario) en una boquilla dentro de la bomba. La velocidad alta del aire crea una región de

baja presión, lo que permite la succión del "fluido secundario" que contiene el material particulado, en este caso, olivina.

Fluido Secundario

Este fluido es una mezcla de aire y material particulado (Olivina) que se encuentra en el recipiente inferior. Cuando la bomba crea un vacío, succiona esta mezcla, transportándola a través del sistema.

Olivina

Es el material particulado utilizado en las pruebas. La Olivina se encuentra en el recipiente de abajo y es succionada a través de la bomba a chorro debido a la presión diferencial creada.

Recipiente Medidor

El recipiente medidor recoge el material particulado transportado y este graduado en ml. Los cuales se registran en un tiempo definido.

Conexiones y Mangueras

Estas son necesarias para conducir tanto el fluido primario (aire comprimido desde el compresor) como el fluido secundario (mezcla de aire y Olivina) hasta la bomba a chorro y luego hacia el recipiente medidor.

Proceso completo:

1. El compresor se enciende y genera aire comprimido.
2. Este aire comprimido se envía a la bomba a chorro como fluido primario.
3. La alta velocidad del fluido primario en la boquilla de la bomba reduce la presión y permite succionar el fluido secundario.
4. El fluido secundario, compuesto por Olivina, es transportado desde el recipiente de abajo hasta el recipiente medidor.
5. En el recipiente medidor, se cuantifica el volumen o la masa de material transportado, permitiendo evaluar el rendimiento de la bomba a diferentes presiones.

Este proceso se repite variando la presión del fluido primario (2 psi, 4 psi, y 6 psi) y utilizando diferentes configuraciones de boquilla ("IN" o "OUT") para evaluar el efecto de estos factores en la eficiencia de transporte del material particulado.

Los resultados de las pruebas experimentales que muestras reflejan el comportamiento de una bomba a chorro al transportar material particulado con diferentes presiones: 2 psi, 4 psi y 6 psi.

Además de las variaciones en presión (2 psi, 4 psi y 6 psi), las pruebas experimentales también incluyeron el uso de diferentes configuraciones de la boquilla, tanto en la posición **IN** como en la **OUT**. Esto permitió evaluar cómo la dirección de la boquilla afecta el flujo y el desempeño del transporte de material particulado:

1. **Boquilla en posición IN:** Al utilizar la boquilla en esta configuración, se observa que el flujo Q tiende a ser menor en comparación con la posición OUT. Esta orientación podría estar diseñada para facilitar la succión o entrada de material en la bomba, proporcionando un control más preciso sobre el caudal y siendo útil en aplicaciones donde es necesario manejar el material con mayor cuidado.
2. **Boquilla en posición OUT:** En la configuración OUT, los valores de Q generalmente son mayores, lo que indica que esta posición permite un flujo más rápido y eficiente del material. Esta orientación es adecuada para maximizar la salida de material particulado, siendo ideal para aplicaciones en las que se requiere una descarga rápida o transporte a largas distancias. Sin embargo, también puede resultar en una mayor dispersión de partículas y un mayor desgaste de la boquilla.

En resumen, las pruebas con boquilla en posición IN y OUT brindan información importante sobre la adaptabilidad de la bomba a chorro para distintas aplicaciones. La configuración IN es útil para un control más preciso del flujo, mientras que la configuración OUT maximiza el caudal, siendo adecuada para aplicaciones que requieren eficiencia en el transporte de material particulado a alta velocidad.

8. RESULTADOS DE LA PROPUESTA

Prueba a presión de 2 psi

A esta presión, la bomba a chorro muestra un flujo más bajo (Q), como se observa en la Tabla 2 los valores de Q en la tabla correspondiente. Esto podría ser adecuado para aplicaciones donde se requiere un transporte de partículas lento y controlado, minimizando el desgaste en el sistema y evitando la dispersión excesiva del material particulado. Sin embargo, la baja presión también implica que la eficiencia de transporte es menor y puede no ser suficiente para distancias largas o materiales más pesados.

Tabla 2. Presión a 2PSI

Prueba	OLIVINA 70-100					Prueba	OLIVINA 70-100				
	Volumen [mL]	Tiempo [Seg]	Presión [Kg/Cm2]	Boquilla [OUT-IN]	Q [mL/Seg]		Volumen [mL]	Tiempo [Seg]	Presión [Kg/Cm2]	Boquilla [OUT-IN]	Q [mL/Seg]
1	100	20	2	IN	5	1	110	20,1	2	OUT	5,472636816
2	70	20,36	2	IN	3,438113949	2	100	20,47	2	OUT	4,885197851
3	68	20,5	2	IN	3,317073171	3	90	20,36	2	OUT	4,42043222
4	100	20,6	2	IN	4,854368932	4	120	20,44	2	OUT	5,870841487
5	100	20,6	2	IN	4,854368932	5	80	20,62	2	OUT	3,879728419
	95	20			4,75		90	20,2			4,455445545

Fuente propia

Prueba a presión de 4 psi

Con un aumento a 4 psi, se observa en la Tabla 3 un incremento en el flujo Q, lo que indica que el transporte de material particulado es más eficiente en comparación con la presión de 2 psi. Esta presión puede representar un punto medio, ideal para aplicaciones donde se necesita un equilibrio entre eficiencia y control en el transporte de partículas. El aumento en la presión permite cubrir distancias más largas y mejorar el caudal sin incrementar excesivamente el desgaste en el sistema de bombeo.

Tabla 3. Presión a 4PSI

Prueba	Olivina 70-100					Prueba	Olivina 70-100				
	Volumen [mL]	Tiempo [Seg]	Presión [PSI]	Boquilla [OUT-IN]	Q [mL/Seg]		Volumen [mL]	Tiempo [Seg]	Presión [PSI]	Boquilla [OUT-IN]	Q [mL/Seg]
1	190	20,6	4	IN	9,223300971	1	210	20,96	4	OUT	10,01908397
2	170	20,88	4	IN	8,141762452	2	200	20,45	4	OUT	9,7799511
3	150	20,4	4	IN	7,352941176	3	190	20,7	4	OUT	9,178743961
4	200	20,99	4	IN	9,528346832	4	220	20,55	4	OUT	10,70559611
5	190	20,25	4	IN	9,382716049	5	180	20,34	4	OUT	8,849557522
	150	20,4			7,352941176		200	20,43			9,789525208

Fuente propia

Prueba a presión de 6 psi

Al aplicar 6 psi, se maximiza el caudal Q , mostrando en la Tabla 4 un transporte de partículas mucho más rápido y eficiente. Esta presión es adecuada para situaciones en las que se requiere un flujo alto, como en aplicaciones industriales de alta demanda. No obstante, el uso de una presión elevada podría llevar a un mayor desgaste de los componentes de la bomba y podría causar una dispersión excesiva del material si no se controla adecuadamente.

Tabla 4. Presión a 6PSI

Prueba	Olivina 70-100					Prueba	Olivina 70-100				
	Volumen	Tiempo	Presión	Boquilla	Q		Volumen	Tiempo	Presión	Boquilla	Q
1	250	20,24	6	IN	12,35177866	1	330	20,84	6	OUT	15,83493282
2	300	20,76	6	IN	14,45086709	2	300	20,86	6	OUT	14,38159156
3	270	20,02	6	IN	13,48651349	3	310	20,02	6	OUT	15,48451548
4	310	20,54	6	IN	15,09250243	4	320	20,74	6	OUT	15,42912247
5	300	20,99	6	IN	14,29252029	5	324	20,85	6	OUT	15,53956835
1	280	20,19			13,86825161	1	310	20,99			14,76893759

Fuente propia

8.1 Simulación en el software de simulación para análisis de rendimiento de bombas de chorro

El análisis de simulación realizado en ANSYS Fluent permitió evaluar la interacción de los parámetros operativos y de diseño en la bomba chorro. En el gráfico de residuales se observa la convergencia de variables críticas como continuidad, velocidad en los ejes x, y, z, energía, k (turbulencia cinética) y ϵ (disipación de turbulencia), cada una de las cuales refleja el desempeño y la estabilidad de la simulación.

La estabilidad en la continuidad es esencial, ya que garantiza que la cantidad de flujo se mantenga a través del sistema sin acumulaciones o pérdidas significativas. Las fluctuaciones iniciales que se observan en las curvas de velocidad se estabilizan a medida que avanzan las iteraciones, lo cual indica que el flujo dentro de la bomba se adapta de manera efectiva a las condiciones de contorno impuestas en el modelo.

El parámetro de energía muestra una convergencia significativa, lo que sugiere que la simulación ha alcanzado un balance térmico, crítico en aplicaciones de alta velocidad donde el calor generado puede afectar el rendimiento. Las curvas de K y ϵ son indicadores de la turbulencia, y su estabilización es fundamental para garantizar una representación precisa de la mezcla y de los

efectos de arrastre del flujo, que son clave para mejorar la eficiencia de la bomba chorro en su aplicación de transporte de partículas.

Estos resultados proporcionan la base para realizar ajustes adicionales en el diseño, como optimizar la geometría interna de la bomba y las condiciones de entrada del flujo, con el fin de lograr una mayor eficiencia en el transporte de partículas de alta densidad. La convergencia de estos parámetros asegura que el modelo es robusto y permite una implementación confiable de las modificaciones propuestas en el diseño de la bomba chorro.

El gráfico de residuales obtenido en ANSYS Fluent ofrece un análisis detallado de la convergencia de los parámetros clave a lo largo de las iteraciones, proporcionando una visión más profunda sobre el comportamiento del flujo en la bomba chorro. La Figura 4 muestra cómo cada parámetro – continuidad, velocidades en los ejes x, y, z, energía, k (energía cinética de la turbulencia) y ϵ (disipación de turbulencia) – evoluciona durante el proceso de simulación y sugiere el grado de estabilidad alcanzado.

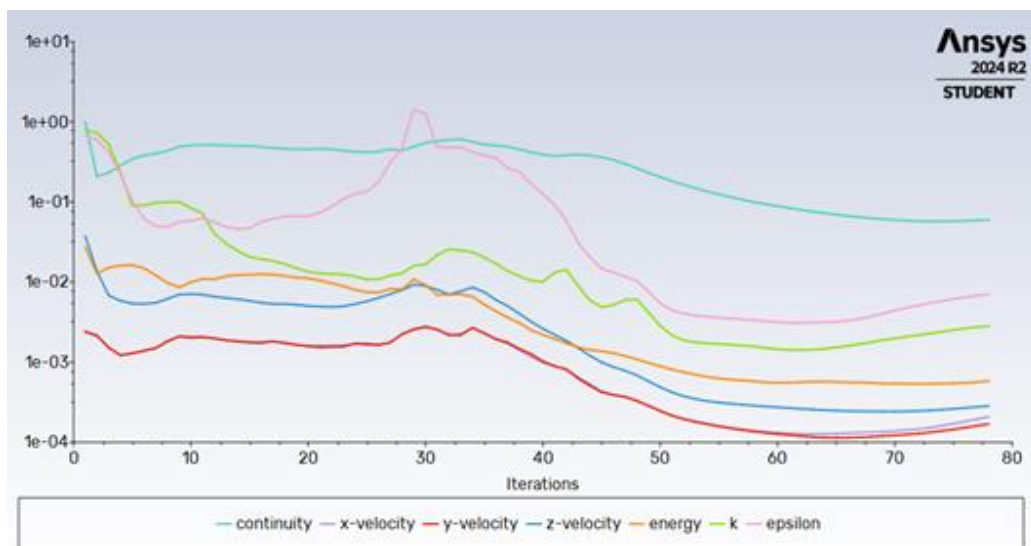


Figura 4. Resultados de las simulaciones unificados. Fuente propia

1. **Continuidad:** La curva de continuidad comienza con valores relativamente altos y se reduce de forma gradual, acercándose a una estabilidad cercana al valor de 10^{-1} a lo largo de las iteraciones. Esta reducción indica que el modelo se está ajustando correctamente para mantener un

flujo constante sin pérdidas ni acumulación significativa en la bomba, lo cual es crítico para garantizar una operación eficiente en aplicaciones de transporte de partículas.

2. **Velocidades en los Ejes x, y z:** Las residuales de las velocidades muestran patrones de estabilización hacia valores bajos, lo que significa que la distribución del flujo en cada dirección ha alcanzado un estado equilibrado. En particular, el eje x, que probablemente corresponde al flujo principal dentro de la bomba, converge hacia 10^{-3} , reflejando un flujo axial estable y bien controlado. Esta estabilidad es importante, ya que asegura que las partículas en el flujo sean transportadas de manera uniforme, minimizando posibles desvíos que afectarían la eficiencia del proceso.

3. **Energía:** La residual de energía muestra una convergencia progresiva hacia valores menores, lo cual es relevante para aplicaciones donde el calor generado puede afectar el rendimiento del equipo. La convergencia en este parámetro indica que la transferencia de energía dentro de la bomba es estable, lo que reduce el riesgo de fluctuaciones térmicas que podrían dañar componentes o alterar el comportamiento del flujo.

4. **Parámetros de Turbulencia (k y ϵ):** Las curvas de k (energía cinética de la turbulencia) y ϵ (disipación de turbulencia) muestran una reducción constante en sus residuales, lo cual refleja una estabilización en el modelo de turbulencia aplicado. Esto es especialmente importante en el diseño de bombas de chorro, ya que un control adecuado de la turbulencia permite maximizar el arrastre y la mezcla de partículas en el flujo, contribuyendo directamente a la eficiencia en el transporte de partículas de alta densidad.

La estabilización de k y ϵ es indicativa de que el flujo turbulento en la bomba está bien representado como lo muestra la Figura 5 y no presenta fluctuaciones no deseadas.

En conjunto, este análisis gráfico de los residuales confirma que el modelo de simulación ha alcanzado un estado de convergencia óptimo, validando así la precisión de las condiciones de contorno y la geometría evaluada. La estabilidad alcanzada en los parámetros críticos sugiere que la configuración propuesta para la bomba chorro es robusta y eficiente para aplicaciones industriales, proporcionando una base sólida para realizar ajustes adicionales que maximicen su rendimiento y optimicen el transporte de partículas densas en distintos entornos.

La Figura 5, muestra el resultado de la simulación del modelo de vacío unificado.

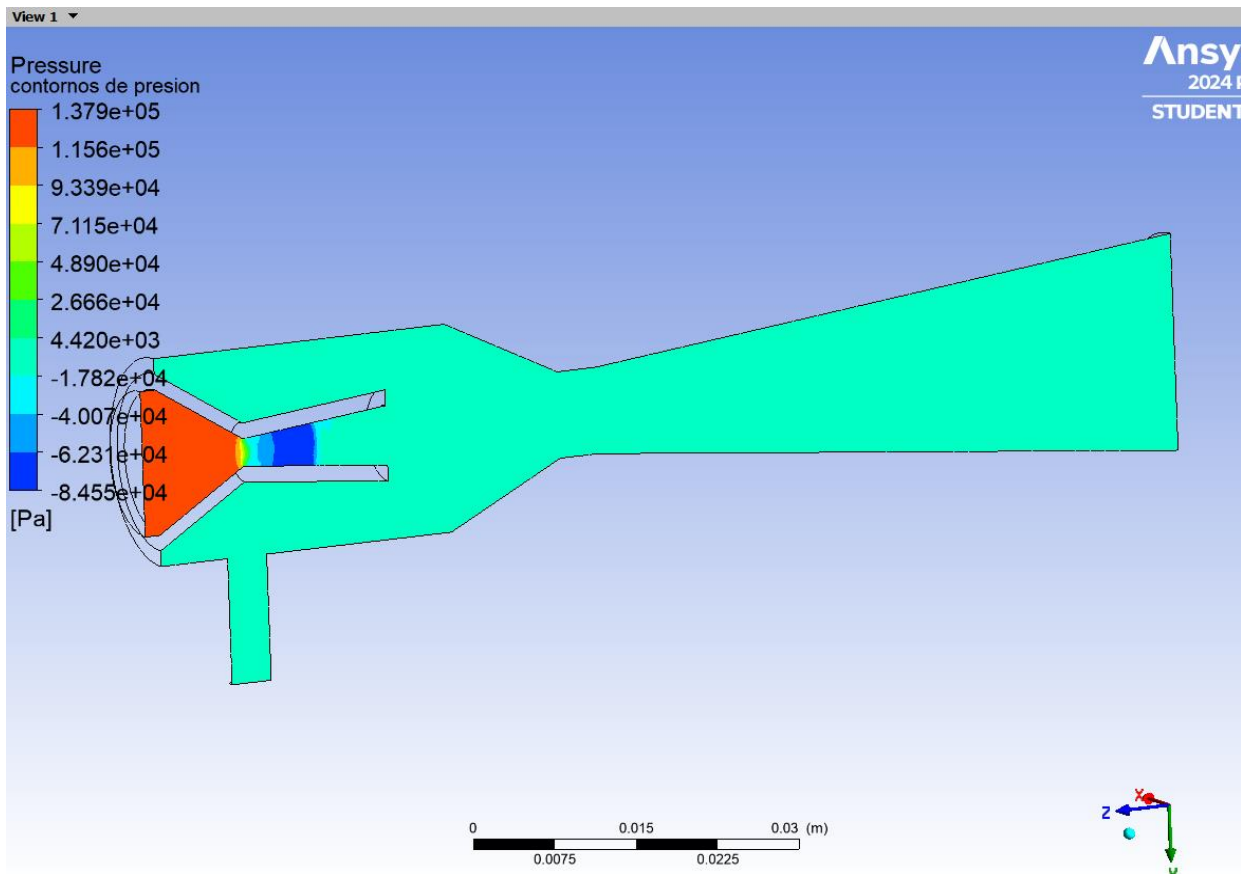


Figura 5 Resultado de vacío unificado. Fuente propia

8.2 Ponencia en la Semana de Parque Tech sobre la Optimización del Rendimiento de la Bomba Chorro

En la Semana de Parque Tech, se presentó el proyecto de optimización del rendimiento de la bomba chorro, desarrollado en la Institución Universitaria Pascual Bravo. Esta ponencia se centra en mejorar la eficiencia de la bomba chorro mediante simulaciones avanzadas y experimentación. La bomba chorro es un dispositivo que utiliza la energía de un fluido de alta velocidad para mover un segundo fluido, lo que la convierte en una herramienta útil para el transporte de partículas densas en diferentes aplicaciones industriales.

La ponencia planteó como objetivo general identificar los parámetros geométricos y operacionales que afectan la eficiencia de la bomba chorro. Durante la ponencia, se expuso cómo

el equipo utilizó herramientas de simulación en ANSYS Fluent para evaluar los diferentes escenarios de diseño y sus respectivos impactos en el flujo y la presión del sistema como se muestra en Figura 6. También se discutió la metodología de optimización, la cual incluyó análisis multifactoriales para mejorar el desempeño y reducir el consumo de energía.

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
Acreditados en Alta Calidad

Líderes en **TECNOLOGÍA**
Desde 1938

Optimización del rendimiento de la bomba chorro

William Orozco Murillo, Iván D Patiño Arcila, José A Palacio Fernández, Nallely Atehortúa Ochoa.
Institución Universitaria Pascual Bravo

INTRODUCCIÓN

La bomba chorro presenta una forma sencilla, confiable, económica y de bajo costo de producción, especialmente en sistemas neumáticos donde se dispone de un fluido primario o motor, que puede ser un gas a alta presión (Liu, W. Kamp, Pochiraju, X, 2018). En la bomba chorro, el gas a alta presión fluye a través de una boquilla para aspirar un flujo secundario que puede ser gas, líquido o partículas sólidas (Besagni, G et al., 2016). La mezcla gas-fluido o gas-sólido pasa desde la cámara de mezcla a través del difusor donde se recupera la presión (Thongtip, T. Kamp, Aphornratana, S, 2017).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo afecta la modificación de la geometría de las bombas chorro de aire-sólido (BCAS) el transporte eficiente de partículas sólidas, considerando diferentes tamaños y tipos de partículas en el contexto de aplicaciones industriales, y evaluando la eficiencia energética, la relación de caudal másico y la recuperación de presión como medidas de rendimiento?

OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

Analizar los parámetros de optimización del rendimiento de bombas de chorro de aire-sólido utilizadas en el transporte neumático de partículas de alta densidad.

Utilizar simulaciones en ANSYS CFD para modelar el flujo de aire y la dispersión de partículas en diferentes geometrías de BCAS, considerando variaciones en tamaño de grano o tipo de partícula.	Realizar pruebas experimentales para validar los resultados de las simulaciones, especialmente en relación con la distribución del flujo de aire y la dispersión de partículas.	Comparar los datos experimentales con las simulaciones para ajustar los modelos y mejorar la precisión de las predicciones del transporte de partículas.
---	---	--

METODOLÓGIA

RESULTADOS

DISCUSIONES / CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizan cinco parámetros dimensionales que definen la geometría de una bomba de chorro aire sólido (L, Rd, X, Llg, AR) se optimizaron para maximizar tres parámetros de rendimiento, a saber, la relación de caudal másico (\dot{q}), la relación de recuperación de presión (PR) y la eficiencia energética (η), así como para llevar a cabo una optimización multiobjetivo ponderada de estos parámetros. Considerando los resultados computacionales de un Diseño Computacional de Experimentos (CCD-DOE), que a su vez se obtuvieron resolviendo el Modelo de Fase Directa Densa correlaciones paramétricas y luego se aplicaron algoritmos genéticos para optimización de objetivo único (GSA) y multiobjetivo (MOGA) para lograr los mejores puntos candidatos.

Para la geometría que maximiza la relación de recuperación de presión (PR), los parámetros Rd, X y AR casi se encuentran en sus valores mínimos, y solo existe una correlación positiva muy fuerte para la garganta de la boquilla siempre favorece la recuperación de presión de la bomba de chorro, sin importar los valores de los parámetros restantes.

El análisis de correlación y sensibilidad local permite inferir que, a diferencia de la relación de caudal másico (\dot{q}), la relación de recuperación de presión (PR) no se ve influenciada de manera importante por el parámetro X. Según contornos de presión estática, la succión en el puerto secundario es el mejor para esta geometría, provocando una mayor aceleración de las partículas absorbidas que para la geometría que maximiza \dot{q} ; sin embargo, la corta distancia entre la salida de la boquilla y la garganta del difusor potencia las colisiones partícula-partícula y partícula-pared, afectando de esta manera la uniformidad del arrastre de las partículas hacia la salida de la bomba de chorro. La onda de choque oblicua que se produce al final de la parte recta del difusor no tiene una influencia relevante sobre las velocidades y trayectorias de las partículas.

BIBLIOGRAFÍA

- L. ren Liu, Z. de Shan, F. Liu, and D. lan, "High-quality manufacturing method of complicated castings based on multi-material hybrid moulding process," China Foundry, vol. 15, no. 5, pp. 343-350, 2018.
- D. Genc, B. Timurkurtul, and S. Toros, "Performance evaluation of ejector with different secondary flow directions and geometric properties for solid oxide fuel cell applications," J. Power Sources, vol. 421, no. March, pp. 76-90, 2015.
- W. D. Murillo, I. D. P. Arcila, and J. A. Palacio-Fernández, "Geometric Optimization of Jet Pump Used in Vacuum Distillation Applications under Different Operating Conditions using Genetic Algorithm Methods," Appl. Comput. Mech., vol. 8, no. 1, pp. 340-358, 2022.

Tradición - Transformación - Innovación

Alcalda de Medellín
Centro de Ciencia, Tecnología e Innovación

Figura 6. Poster ponencia en la Semana de Parque Tech sobre la Optimización del Rendimiento de la Bomba Chorro. Fuente propia

8.3 Comparación simulación y pruebas experimentales.

Análisis para 6 psi

Para realizar un análisis comparativo entre los resultados experimentales y las simulaciones en ANSYS, es necesario considerar tanto el comportamiento del flujo de la bomba a chorro en las

pruebas experimentales como la convergencia de las variables en la simulación. A continuación, se hace un análisis en profundidad de ambas.

Resultados experimentales para 6 psi

En los experimentos, se probaron tres presiones diferentes (2 psi, 4 psi y 6 psi) con configuraciones de boquilla en las posiciones IN y OUT. Los valores obtenidos para el flujo Q reflejando cómo el caudal varía con la presión y la posición de la boquilla:

- **Presión de 6 psi (Mayor caudal):** Como era de esperarse, a mayor presión, el flujo de salida Q es mayor, lo que indica un aumento en la eficiencia de transporte de material particulado.
- **Comparación de boquillas:** La configuración de la boquilla en posición OUT genera un caudal mayor Q en comparación con la posición IN, lo que sugiere que la dirección de la boquilla es crucial para maximizar el caudal en aplicaciones de descarga rápida.

Este patrón es consistente en todas las pruebas, mostrando que la presión y la posición de la boquilla son factores clave en el rendimiento de la bomba.

Resultados de la Simulación en ANSYS para 6 psi

La gráfica de ANSYS muestra los residuos escalados para diferentes variables como continuidad, velocidad en los ejes (x, y, z), energía, α (energía cinética turbulenta) (disipación de energía), a través de iteraciones en la simulación.

- **Convergencia de la Simulación:** La gráfica indica que la mayoría de las variables alcanzan una convergencia estable después de un número considerable de iteraciones. Sin embargo, algunas variables como la continuidad Y0 muestran fluctuaciones más grandes, lo que sugiere que puede haber inestabilidad en el modelo o que se requiere un mayor refinamiento de la malla o ajustes en las condiciones de frontera para obtener resultados más precisos.
- **Interpretación de Continuidad y Velocidades:** Los residuos de continuidad y velocidad son indicadores del nivel de precisión en la simulación del flujo. La estabilidad en los

residuos de velocidad (x , y , z) es buena y se correlaciona con un flujo estable, lo cual es consistente con los resultados experimentales donde el flujo aumenta con la presión.

Comparación Entre Experimento y Simulación para 6 psi

- **Flujo de salida Q:** Los valores experimentales de Q en función de la presión muestra que el aumento de presión incrementa el caudal. En la simulación, se espera que esta tendencia también sea capturada, y aunque no tenemos el valor directo de Q en la simulación, el comportamiento convergente en los residuos de velocidad sugiere que el flujo modelado se ajusta a las condiciones esperadas.
- **Efecto de la Boquilla:** La configuración IN y OUT de la boquilla impacta en los resultados experimentales, donde OUT genera mayor Q. En la simulación, esto debería traducirse en variaciones en los residuos de velocidad y posiblemente en la continuidad, dependiendo de cómo se configuren las condiciones de entrada y salida en el modelo.

Análisis para 4 psi

Resultados experimentales

En las pruebas experimentales a 4 psi, el caudal Q Se observa un incremento moderado en comparación con 2 psi. Al igual que con otras presiones, los ajustes de la boquilla IN y OUT afectarán el flujo de la siguiente manera:

- **Boquilla en posición IN:** Se observaron caudales Q ligeramente menores en comparación con la posición OUT. Esto se debe a que la dirección de entrada disminuya la presión efectiva en el punto de salida, limitando el flujo de descarga.
- **Boquilla en posición OUT:** En esta configuración, el caudal es consistentemente mayor, ya que la boquilla OUT maximiza la salida del material, aprovechando la presión aplicada.

Esto sugiere que, a 4 psi, la posición de la boquilla sigue siendo un factor relevante para optimizar el caudal, aunque el incremento de Q respecto a 2 psi es menor que el observado en la configuración a 6 psi.

Resultados de la Simulación en ANSYS para 4 psi

En la simulación a 4 psi, los residuos de las variables clave (continuidad, velocidad, energía) muestran una tendencia hacia la estabilidad en la mayoría de los casos:

- **Convergencia:** La simulación muestra una convergencia adecuada, aunque algunos residuos, especialmente en la continuidad, presentan ligeras fluctuaciones que podrían ajustarse con una mayor cantidad de iteraciones o refinando la malla.
- **Velocidades:** Las velocidades en los ejes x, y, yz convergen mejor en esta configuración que a 2 psi, lo que indica que la simulación representa un flujo más estable en comparación con presiones menores.

Comparación entre experimento y simulación para 4 psi

- **Flujo de salida Q:** A 4 psi, el caudal en los experimentos aumenta respecto a 2 psi y disminuye en comparación con 6 psi, lo cual concuerda con un comportamiento progresivo en el flujo. Aunque no se tiene un valor directo de Q en la simulación, la estabilidad en los residuos de velocidad y energía en la simulación de 4 psi sugiere que el flujo simulado se comporta de manera similar al experimental.
- **Configuración de la Boquilla:** En ambos, la posición OUT de la boquilla mejora el caudal respecto a IN, lo que también es consistente con la simulación en ANSYS donde se espera que la continuidad y los residuos de velocidad sean mejores al simular la salida con una boquilla en posición OUT.

Análisis para 2 psi

Resultados experimentales

A 2 psi, el caudal Q es el más bajo de todas las pruebas experimentales, lo que indica que la presión es insuficiente para generar un flujo alto. Los ajustes de boquilla en IN y OUT también afectan el flujo:

- **Boquilla en posición IN:** Con una presión más baja, la configuración IN produce un caudal bajo, ya que la dirección limita aún más la eficiencia de salida.

- **Boquilla en posición OUT:** En esta configuración, el caudal aumenta ligeramente, aunque sigue estando limitado debido a la baja presión. Esto demuestra que a presiones bajas, el caudal se ve restringido independientemente de la posición de la boquilla, aunque OUT sigue siendo ligeramente más favorable.

Resultados de la Simulación en ANSYS para 2 psi

En la simulación a 2 psi, se observan ciertos desafíos en la convergencia de las variables, especialmente en la continuidad:

- **Convergencia:** A esta presión, los residuos de continuidad presentan fluctuaciones mayores y no alcanzan una estabilidad clara, lo que puede indicar una inestabilidad en la simulación para presiones tan bajas.
- **Velocidades:** Los residuos de las velocidades en x, y, yz también muestran algo de inestabilidad, lo cual refleja la dificultad de la simulación para representar correctamente un flujo a baja presión.

Comparación entre experimento y simulación para 2 psi

- **Flujo de salida Q:** Los valores experimentales de Q para 2 psi muestra un flujo bajo, lo que es consistente con los residuos inestables en la simulación. La simulación parece tener dificultades para modelar un flujo tan bajo de manera estable, lo que puede requerir ajustes adicionales en los parámetros del modelo.
- **Configuración de la boquilla:** En el experimento, la boquilla OUT permite un flujo ligeramente mayor en comparación con IN, lo cual también debería observarse en una simulación optimizada. Sin embargo, las fluctuaciones en la simulación a 2 psi indican que puede ser necesario un mayor refinamiento en la configuración para reflejar con precisión los efectos de la boquilla a baja presión.

9. CONCLUSIONES

Influencia de la configuración de la boquilla en el caudal: Los resultados experimentales indican que la configuración de la boquilla tiene un impacto notable en el caudal. La posición de la boquilla OUT mostró un rendimiento superior en comparación con la posición IN a presiones de 6 psi, 4 psi y 2 psi, evidenciando que el cambio de posición optimiza el flujo de material en el sistema. Esta variación en el caudal sugiere que la configuración de la boquilla debe seleccionarse en función del tipo de aplicación y las necesidades de transporte de material, con la posibilidad de usar configuraciones ajustables en sistemas avanzados.

Correlación entre simulaciones y resultados experimentales: A pesar de los esfuerzos para ajustar los parámetros de la simulación CFD, se observaron discrepancias entre los resultados de las simulaciones y los datos experimentales, especialmente en las variables de continuidad y velocidad. Esto indica que los modelos CFD utilizados podrían beneficiarse de un ajuste más preciso en parámetros como la malla y los modelos de turbulencia. No obstante, el comportamiento general de las simulaciones logró representar las tendencias observadas en los experimentos, brindando una herramienta útil para la predicción de caudales bajo diferentes condiciones.

Relevancia del material particulado en el comportamiento del flujo: El uso de Olivina 70-100 permitió analizar el comportamiento de un material con características particulares de densidad y granulometría. Los resultados sugieren que las propiedades del material tienen un efecto importante en el flujo, y sería beneficioso estudiar el rendimiento de la bomba con otros materiales para obtener una caracterización más completa del sistema. Esto permitiría generalizar los resultados y adaptar el sistema para distintas aplicaciones industriales, mejorando su versatilidad.

Aplicabilidad de modelos cfd en el diseño y optimización de sistemas: A pesar de las diferencias observadas entre los datos experimentales y las simulaciones, los modelos CFD han demostrado ser útiles para entender el comportamiento del sistema en diferentes condiciones operativas. Con ajustes adicionales y una mayor precisión en los parámetros, estos modelos pueden convertirse en herramientas confiables para el diseño y la optimización de sistemas de transporte de partículas, reduciendo la dependencia de experimentos físicos y mejorando la eficiencia en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Importancia de la validación experimental para la optimización de parámetros: La comparación entre datos experimentales y simulaciones subraya la importancia de realizar pruebas experimentales como un paso fundamental para validar y ajustar modelos teóricos. La combinación de ambas metodologías permite identificar áreas de mejora en el diseño del sistema, asegurando que se alcance el rendimiento esperado en aplicaciones reales.

Conclusiones generales del análisis comparativo:

1. **Consistencia Experimental-Simulación:** Los resultados experimentales y las simulaciones en ANSYS muestran una tendencia coherente: el flujo aumenta con la presión, y la configuración de la boquilla en posición OUT mejora el caudal en comparación con IN. Sin embargo, la simulación presenta algunas inestabilidades, especialmente a presiones bajas (2 psi), lo cual podría mejorar con una malla más fina o ajustes en los métodos de solución.
2. **Eficiencia de la boquilla:** En todos los niveles de presión, la boquilla OUT proporciona un mejor rendimiento de caudal, lo que indica que la dirección de la boquilla es un factor crítico que debe considerarse en el diseño de la bomba a chorro.
3. **Recomendaciones para la Simulación:** Para obtener una mayor amplificación con los resultados experimentales, especialmente a presiones más bajas, se recomienda ajustar la malla y explorar técnicas de refinamiento de la continuidad y otros parámetros de frontera en la simulación.

En resumen, tanto el experimento como la simulación revelan el impacto de la presión y la posición de la boquilla en el caudal, pero el modelo de simulación en ANSYS aún podría optimizarse para reflejar mejor el comportamiento observado en las pruebas experimentales, en especial a presiones bajas como 2 psi.

10. RECOMENDACIONES

Optimización de la configuración de la boquilla

Los experimentos mostraron que la posición de la boquilla (IN o OUT) influye significativamente en el caudal del sistema, especialmente a diferentes niveles de presión. Observamos que, en varias pruebas, la posición OUT de la boquilla alcanzó mayores valores de caudal, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones que requieren transportar partículas a alta velocidad. Sería recomendable realizar estudios adicionales para identificar el impacto de cada configuración en distintos tipos de operación, así como investigar posibles ajustes que maximicen el rendimiento para aplicaciones específicas. Esto podría incluir el desarrollo de boquillas especializadas o ajustables para adaptarse mejor a los requisitos de cada tipo de transporte de material.

Ajuste de los parámetros de simulación

En el análisis de las simulaciones, se observan diferencias entre los resultados simulados y los experimentales, especialmente en las variables de continuidad y velocidad. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la precisión de los parámetros de entrada y la calidad de la malla en el modelo CFD. Para mejorar la evaluación entre la simulación y los resultados experimentales, es recomendable afinar la configuración del modelo ajustando parámetros como la densidad de la malla y los modelos de turbulencia utilizados. Una mayor resolución de malla puede reducir los errores residuales, proporcionando resultados más realistas y un modelo predictivo más confiable que facilita el diseño y optimización de sistemas similares en un futuro.

Evaluación de diferentes materiales particulados

El presente estudio se centró en el uso de Olivina 70-100 como material particulado. Sin embargo, las propiedades físicas del material (como densidad, tamaño y forma de las partículas) pueden tener un impacto significativo en el comportamiento del flujo y la eficiencia del sistema de transporte. Recomendando ampliar los experimentos con otros materiales particulados, como arena de sílice o abrasivos industriales, para analizar cómo afectan estos factores el caudal y el desgaste del sistema. Este análisis podría brindar una visión integral y práctica del rendimiento de la bomba en

condiciones variadas, permitiendo a los usuarios seleccionar el material particulado más adecuado según el tipo de aplicación.

Ampliación del rango de presiones

Aunque las pruebas actuales se realizaron a presiones de 2, 4 y 6 psi, se podría considerar ampliar el rango de presiones para comprender mejor el comportamiento de la bomba en condiciones más amplias. Incluir presiones intermedias o superiores permitiría una caracterización más detallada y ayudaría a definir el rango de operación óptima de la bomba para aplicaciones específicas. Esto también permitiría identificar el punto de máxima eficiencia del sistema y prevenir condiciones de sobrepresión que puedan comprometer su integridad o provocar un consumo excesivo de energía.

Validación y calibración de modelos CFD

La diferencia observada entre los resultados de las simulaciones CFD y los datos experimentales sugiere que los modelos de simulación requieren ajustes para representar mejor la realidad. Para mejorar la precisión y confianza en el modelo, sería útil realizar una validación y calibración exhaustiva, utilizando datos experimentales para ajustar los factores de simulación, como la viscosidad del fluido, la densidad de partículas y el modelo de turbulencia. Este proceso puede contribuir a mejorar el uso de simulaciones en el diseño de sistemas similares, proporcionando una herramienta confiable y económica para prever el rendimiento sin depender exclusivamente de pruebas experimentales.

Análisis económico y energético

Considerando que el consumo energético puede variar considerablemente según la presión de operación, una evaluación económica que incluya el costo energético a diferentes niveles de presión sería valiosa para el análisis del sistema. Esta evaluación permitiría identificar el punto de operación en el que se maximiza el balance entre caudal y consumo energético, optimizando así el costo de operación. Además, con un análisis de sostenibilidad, se podría justificar la adopción de un rango de presiones específicas para reducir el impacto ambiental del sistema.

Desgaste y mantenimiento

El funcionamiento de una bomba a chorro a diferentes presiones y configuraciones de boquilla puede influir en el desgaste del sistema. Para garantizar la durabilidad y eficiencia a largo plazo, sería beneficioso estudiar cómo los distintos niveles de presión y configuraciones de la boquilla afectan el desgaste de los componentes de la bomba. Una vez identificado el impacto en el desgaste, se podría diseñar un plan de mantenimiento preventivo que incluya intervalos de inspección y posibles reemplazos de componentes, optimizando la vida útil de la bomba y minimizando el tiempo de inactividad y los costos de reparación.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexis, G. K., & Rogdakis, E. D. (2003). A verification study of steamejectornrefrigeration model. *Applied Thermal Engineering*, 23(1), 29–36. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00116-3)
- Aly, N. H., Karameldin, A., & Shamloul, M. M. (1999). Modelling and simulation of steam jet ejectors. *Desalination*, 123(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00053-3)
- Besagni, G., Mereu, R., & Inzoli, F. (2016). Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 373–407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.059>
- Butrymowicz, D., Karwacki, J., & Trela, M. (2007). Investigación experimental de eyector bifásico para refrigeración. *Frío-Calor y Aire Acondicionado*, 393, 8–17
- Chen, W., Shi, C., Zhang, S., Chen, H., Chong, D., & Yan, J. (2017). Theoretical analysis of ejector refrigeration system performance under overall modes. *Applied Energy*, 185, 2074–2084. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.103>
- Chunnanond, K., & Aphornratana, S. (2004). An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: The analysis of the pressure profile along the ejector. *Applied*
- Chunnanond, K., & Aphornratana, S. (2004). An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector. *Applied thermal engineering*, 24(2-3), 311-322. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.07.003>
- Desevaux, P. (2001). A method for visualizing the mixing zone between two co-axial flows in an ejector. *Optics and Lasers in Engineering*, 35(5), 317–323. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00020-3)
- El-Dessouky, H., Ettouney, H., Alatiqi, I., & Al-Nuwaibit, G. (2002). Evaluation of steam jet ejectors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(6), 551–561
- Fahmy, A., Mewes, D., & Ohlrogge, K. (2002). On the integration of jet ejectors into hybrid dehydration processes. *Journal of Membrane Science*, 196(1), 79–84. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00576-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00576-2)
- Gamisans, X., Sarrà, M., & Lafuente, F. J. (2004). Fluid flow and pumping efficiency in an ejector-venturi scrubber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(2), 127–136. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00104-1)
- García Del Valle, J., Sáiz Jabardo, J. M., Castro Ruiz, F., & San José Alonso, J. (2012). A one dimensional model for the determination of an ejector entrainment ratio. *International Journal of Refrigeration*, 35(4), 772–784. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.11.020>

- Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., & Petrenko, V. A. (1999). 1-D analysis of ejector performance. *International Journal of Refrigeration*, 22(5), 354–364. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00004-3)
- Liu, W., & Pochiraju, K. (2018). A methodology for the prediction of back-pressure induced stall in eductor-jet pumps. *International Journal of Refrigeration*, 95, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.007>
- Ouzzane, M., & Aidoun, Z. (2003). Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design. *Applied Thermal Engineering*, 23(18), 2337–2351. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00208-4)
- Pianthong, K., Seehanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T., & Aphornratana, S. (2007). Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. *Energy Conversion and Management*, 48(9), 2556–2564. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.021>
- Sheha, F. A., Nasr, M., Hosien, M. A., & Wahba, E. M. (2018). Archive of SID Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance
- Sheha, A. A. A., Nasr, M., Hosien, M. A., & Wahba, E. (2018). Computational and experimental study on the water-jet pump performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(4), 1013-1020. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.247.28407>
- Thongtip, T., & Aphornratana, S. (2017). An experimental analysis of the impact of primary nozzle geometries on the ejector performance used in R141b ejector refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 110, 89–101.
- Thongtip, T., & Aphornratana, S. (2017). An experimental analysis of the impact of primary nozzle geometries on the ejector performance used in R141b ejector refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 110, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.100>
- Varga, S., Oliveira, A. C., & Diaconu, B. (2009). Numerical assessment of steam ejector efficiencies using CFD. *International Journal of Refrigeration*, 32(6), 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.01.007>
- Wang, H., Wang, J., Yang, B., Mo, Y., Zhang, Y., & Ma, X. (2020). Simulation and Optimization of Venturi Injector by Machine Learning Algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(8), 04020021. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001489](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001489)
- Yu, J., Chen, H., Ren, Y., & Li, Y. (2006). A new ejector refrigeration system with an additional jet pump. *Applied Thermal Engineering*, 26(2–3), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.018>