DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN

DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

"REPOTENCIACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SEPARADOR CICLÓNICO PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE PINTURA EN POLVO EN INSELEC CIA. LTDA ."

AUTORES: EDUARDO DAVID BAZURTO SUNTAXI
JERSON DAVID NARANJO GUAMAN

DIRECTOR: ING. HÉCTOR ALEJANDRO CALVOPIÑA ENRIQUEZ, MSC.

31/07/2026

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Protección de superficies metálicas en la industria

La industria metalmecánica requiere proteger sus superficies para conservar vida útil y apariencia funcional.



Envolvente sin protección Envolvente con recubrimiento

Corrosión

golpes, manipulación y operación

Desgaste

golpes, manipulación y operación

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Pintura electrostática en polvo

La pintura electrostática permite obtener un recubrimiento uniforme, resistente y con un mayor aprovechamiento del material.



Adherencia

Las partículas son atraídas hacia el metal

Uniformidad

Capa continua y acabado homogéneo

Recuperación

El polvo no adherido permanece seco

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

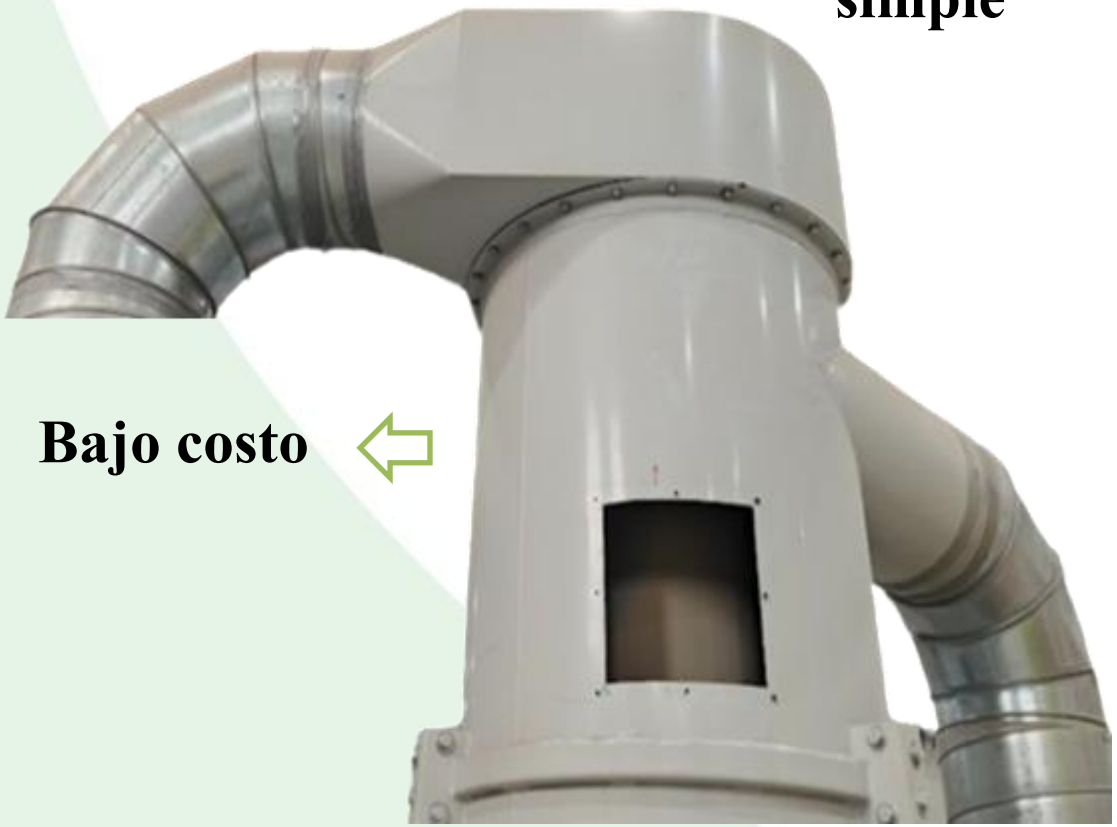
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

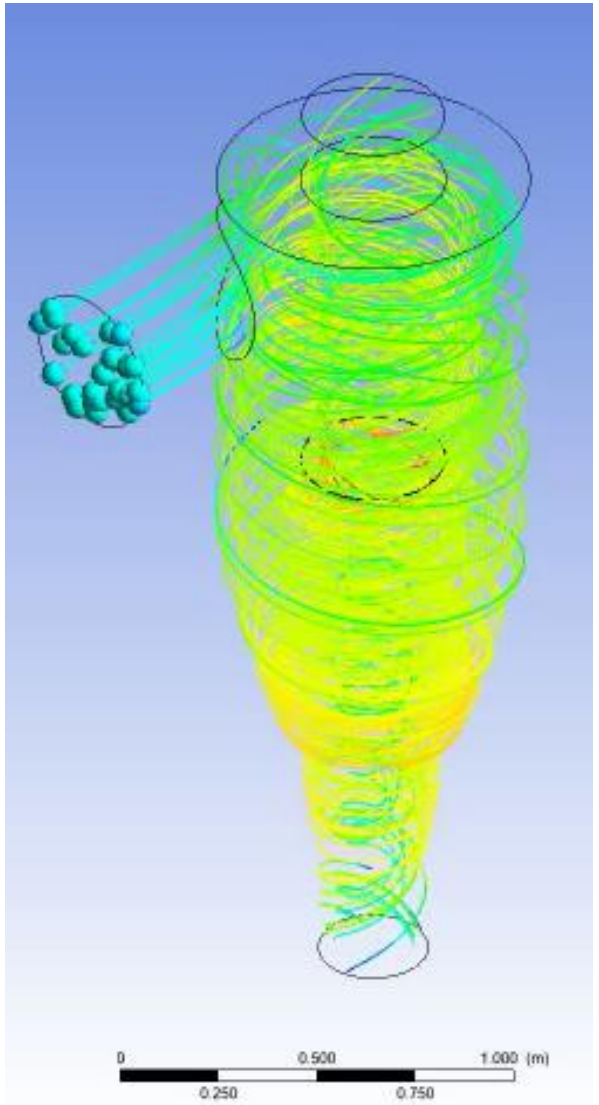
Separador ciclónico: Recuperación de pintura en polvo

Mantenimiento simple



Bajo costo

Robustez mecánica



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

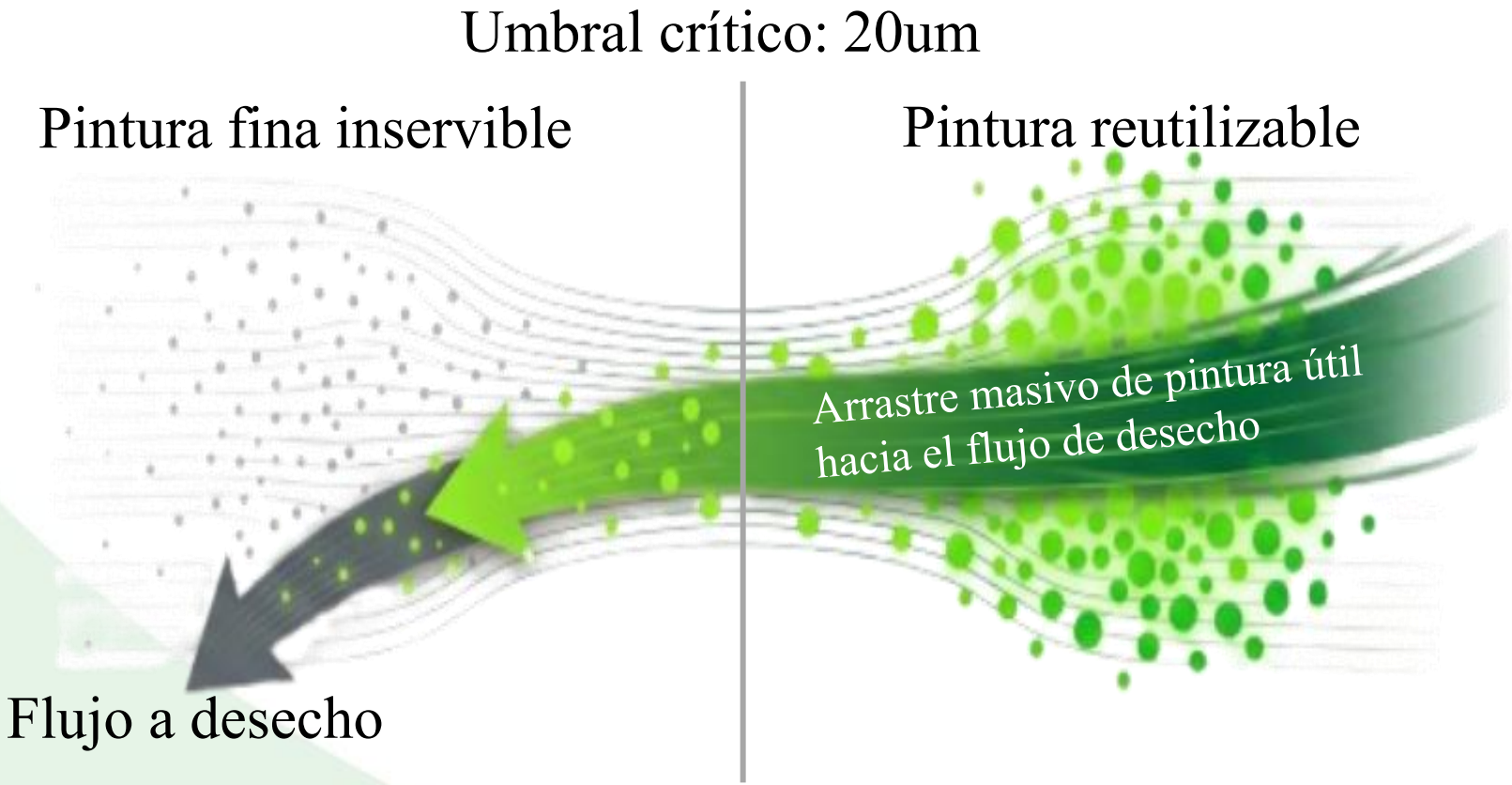
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

INSELEC Cía. Ltda

Problema: El separador ciclónico envía pintura reutilizable al depósito de desecho debido a una separación granulométrica ineficiente.



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

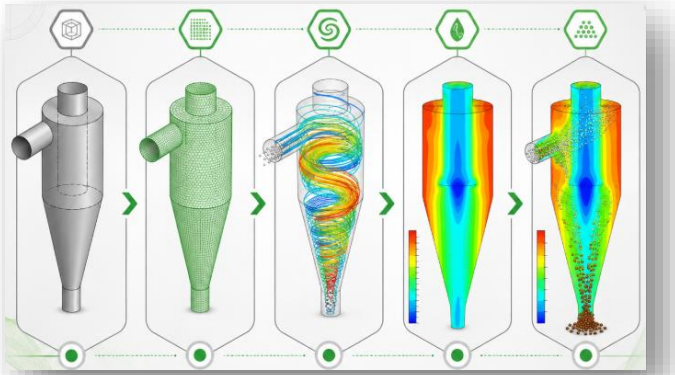
Objetivos

Objetivo general: Repotenciar y optimizar un separador ciclónico para la recuperación de pintura en polvo en INSELEC Cía. Ltda.

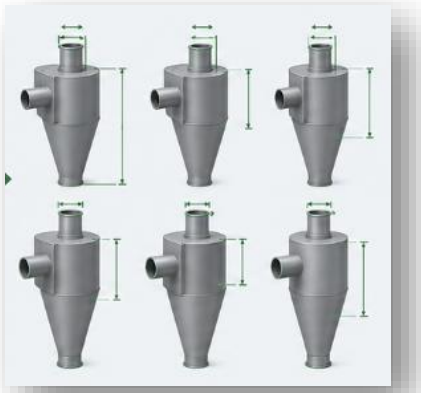
1 Caracterizar



2 Modelar



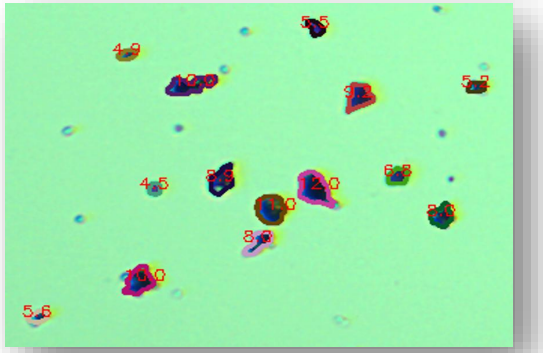
3 Evaluar



4 Seleccionar

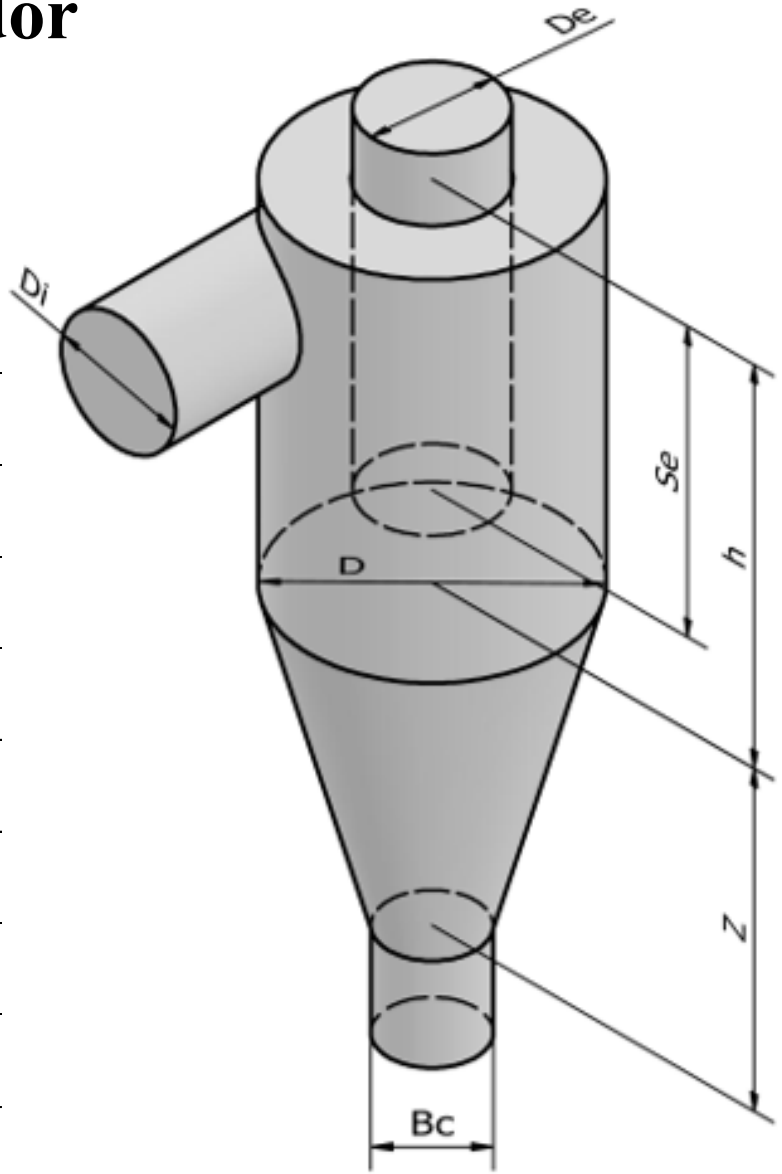


5 Validar



Nomenclatura y mediciones del separador ciclónico

Descripción	Variable	Medida [cm]
Diámetro de entrada	D_i	37
Diámetro del buscador de vórtice	D_e	37
Longitud del buscador de vórtice	S_e	78
Diámetro del cuerpo	D	80
Longitud del cuerpo	h	104
Diámetro de salida del polvo	B_c	28
Longitud del cono	Z	96



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

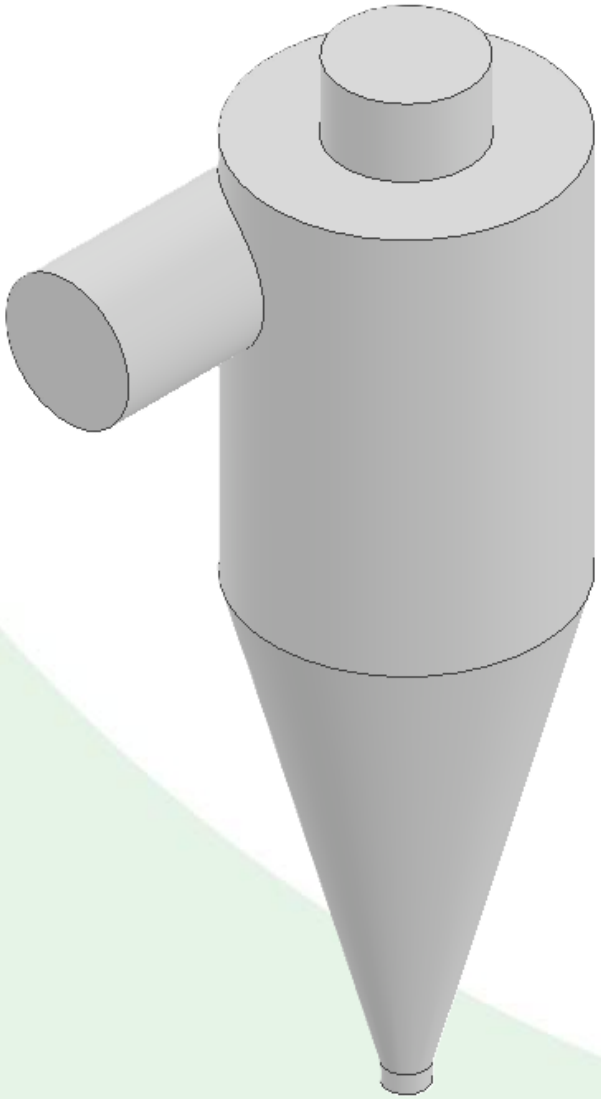
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

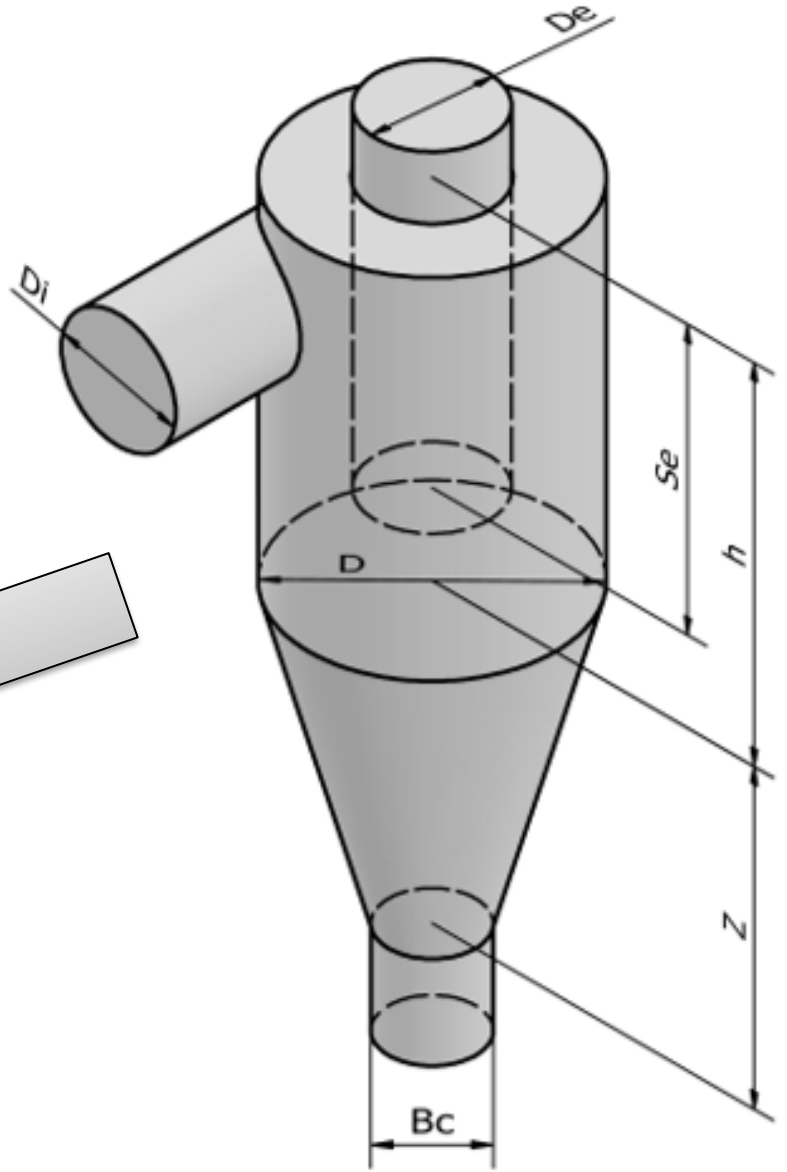
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

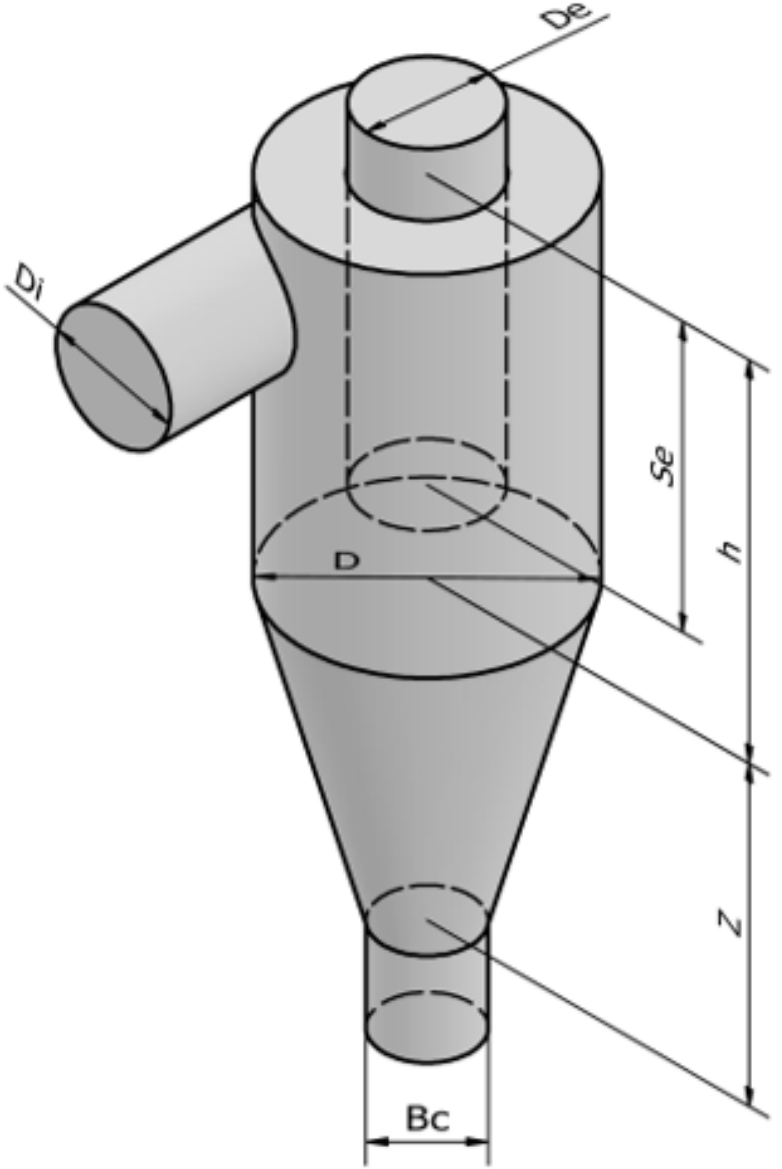
Modelo CAD, en base a las medidas obtenidas previamente





Evaluación de las proporciones geométricas

	Tipo de ciclón		
Variable	**Relaciones**	**Valores en INSELEC**	**Tipo de ciclón**
Diámetro de entrada	D_i/D	0.46	Alta Eficiencia
Diámetro del buscador de vórtice	D_v/D	0.46	Alta Eficiencia
Longitud del buscador de vórtice	S_e/D	0.975	Alto rendimiento
Longitud del cuerpo	h/D	1.3	+
Longitud del cono	Z/D	1.2	-
Diámetro de salida del polvo	B_c/D	0.35	Convencional



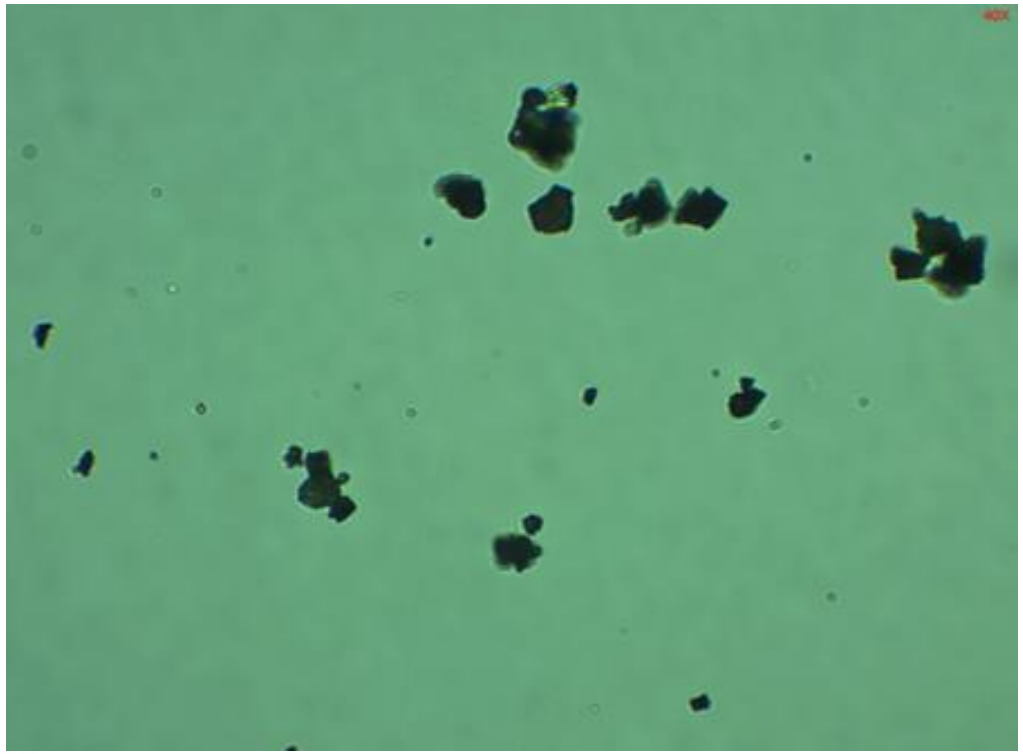
Criterios de evaluación para optimización del separador ciclónico

Se sugiere que las partículas fugitivas posean un diámetro menor a 20 μm.

↳ Se tolerará una fracción de polvo fino en el material recuperado

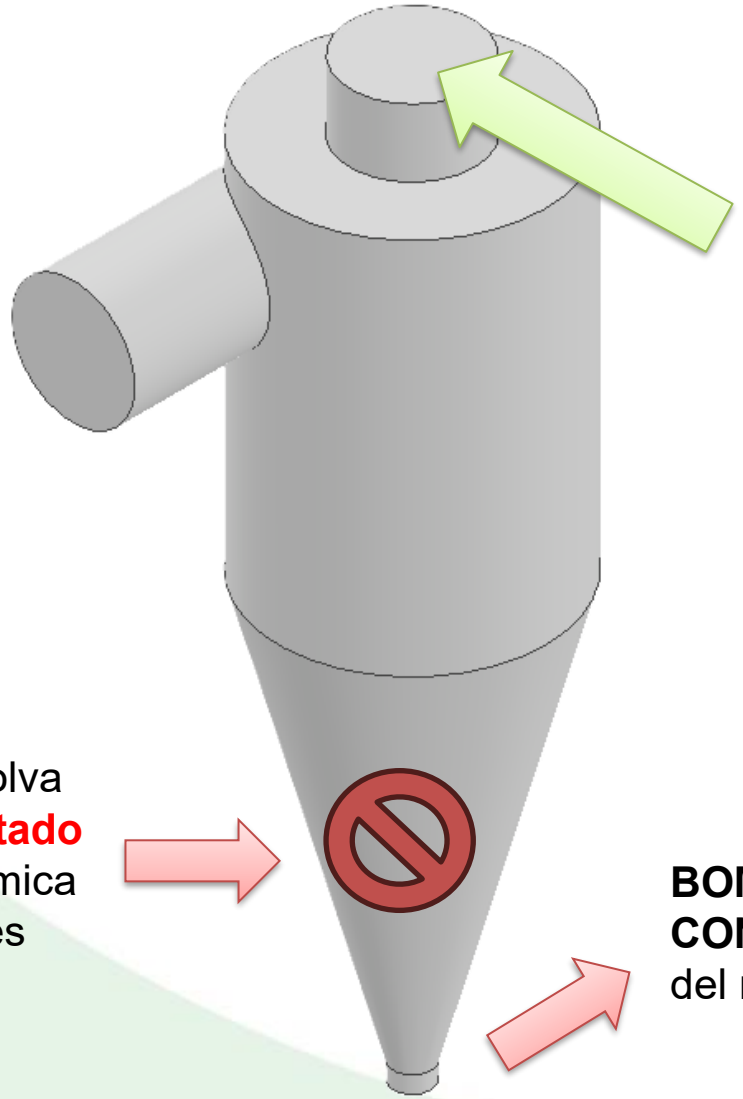
El control metrológico se ejecutará en el depósito de desecho.

Los ensayos de caracterización se llevaron a cabo en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



Muestra de pintura en polvo virgen

Toma de muestras para evaluar el rendimiento



PUNTO DE MUESTREO DE RECHAZO(Aprobado): Toma en reservorio de desechos aguas abajo del ventilador. Representando la fracción no capturada.

PUNTO DE MUESTREO INICIALMENTE PLANTEADO (Tolva Inferior - Polvo Adherido): **Descartado** debido a la inestabilidad aerodinámica del arranque y depósitos residuales acumulados que alteran la representatividad granulométrica.

BOMBA DE TRANSFERENCIA CONTINUA (Imposibilita toma del material recuperado)

Simulación computacional CFD

Definición de condiciones de frontera

	Parámetro de Ansys Fluent	Valor	
Modelos	Viscoso	K Omega SST	
	Fase Discreta	Tipo de inyección	Group
		Lugar de inyección	Coordenadas del centro Inlet
		Distribución de diámetros	Rosin-Rammler
		Máx. Número de pasos	80000
		Factor de longitud de paso	5
		Saffman Lift Force	Si

Definición de condiciones de frontera CFD

	Parámetro de Ansys Fluent	Valor	
Modelos	Fase Discreta	**Point Properties** Velocidad: 8 m/s Parámetro de Propagación: 3.5 Número de diámetros: 20	**Rechazo** Diámetro mín.: 1e-06 m Diámetro máx.: 1.5e-05 m Diámetro Prom.: 1e-05 m Total Flow Rate: 1.1e-4
			Aceptación 20-45 Diámetro mín.: 20e-06 m Diámetro máx.: 45e-06 m Diámetro Prom.: 30e-06 m Total Flow Rate: 4.2e-4
			Aceptación 45-75 Diámetro mín.: 45e-06 m Diámetro máx.: 75e-06 m Diámetro Prom.: 60e-06 m Total Flow Rate: 3.4e-4
			Aceptación 75-100 Diámetro mín.: 75e-06 m Diámetro máx.: 100e-06 m Diámetro Prom.: 87e-06 m Total Flow Rate: 0.8e-4

Definición de condiciones de frontera

	Parámetro de Ansys Fluent	Valor	
		Turbulent Dispersion	Modelo de Dispersión: Discrete-random-walk
			Número de intentos: 10
			Constante de escala de tiempo: 0.15
		Phisical Models	Drag Law : esférica con la activación del Rough wall model
Materiales	Fluido - Aire	Densidad	0.86 kg/m3
		Viscosidad	1.813e-05 kg/(m*s)
	Partículas	Densidad constante	1810 kg/m3
Condiciones de borde	Inlet	Velocidad	16.8 m/s
		Diámetro hidráulico	0.37 m
		DPM	Reflect
	Outlet up	Diámetro hidráulico	0.37 m
		DPM	Escape
		Presure	0 Pa
	Outlet down	DPM	Trap
	Wall_fluid	DPM	Reflect
Inicialización	Método de inicialización	Inicialización Estándar	
	Compute from	Inlet	
	X Velocity	−16.8 m/s	
Cálculo de Ejecución	Número de iteraciones	600	

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

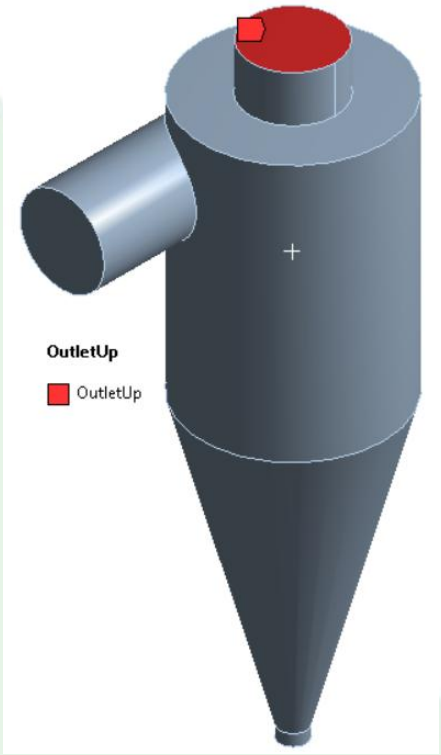
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

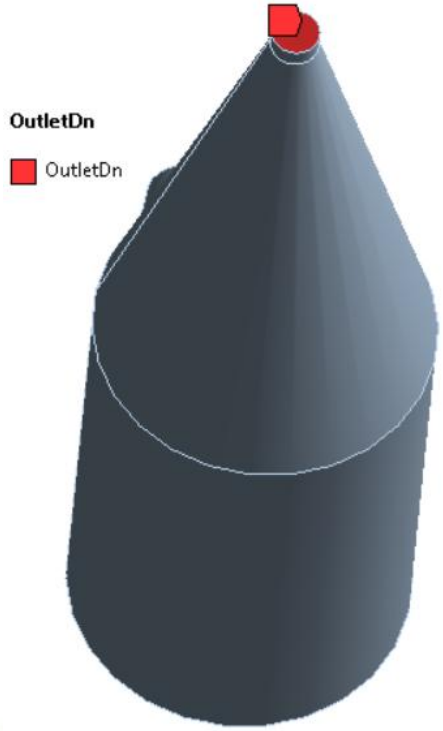
TRABAJOS FUTUROS

Estudio de independencia de malla

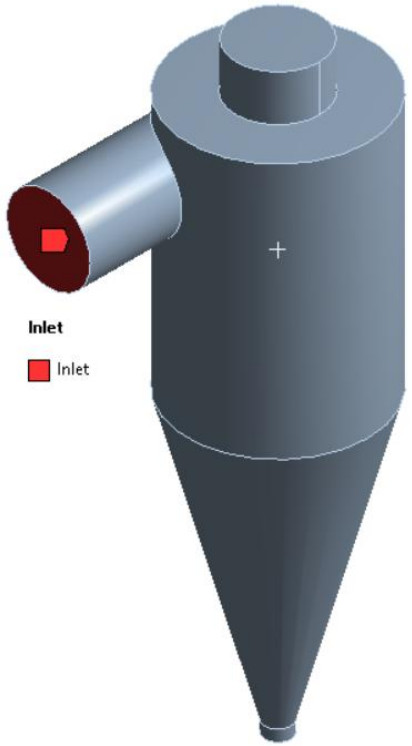
Caída de presión (ΔP)



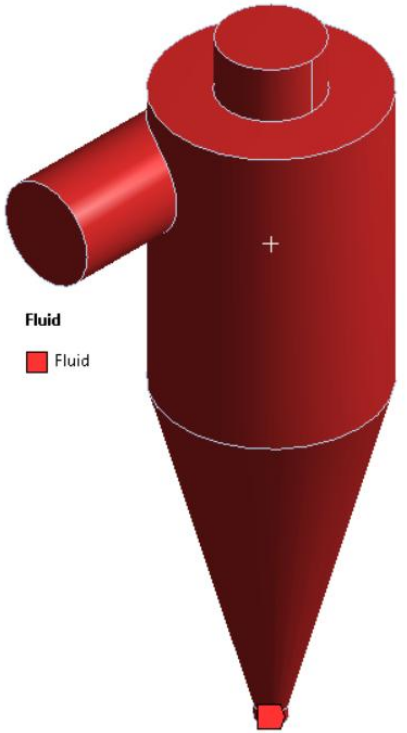
OutletUp



OutletDn



Inlet



Fluid

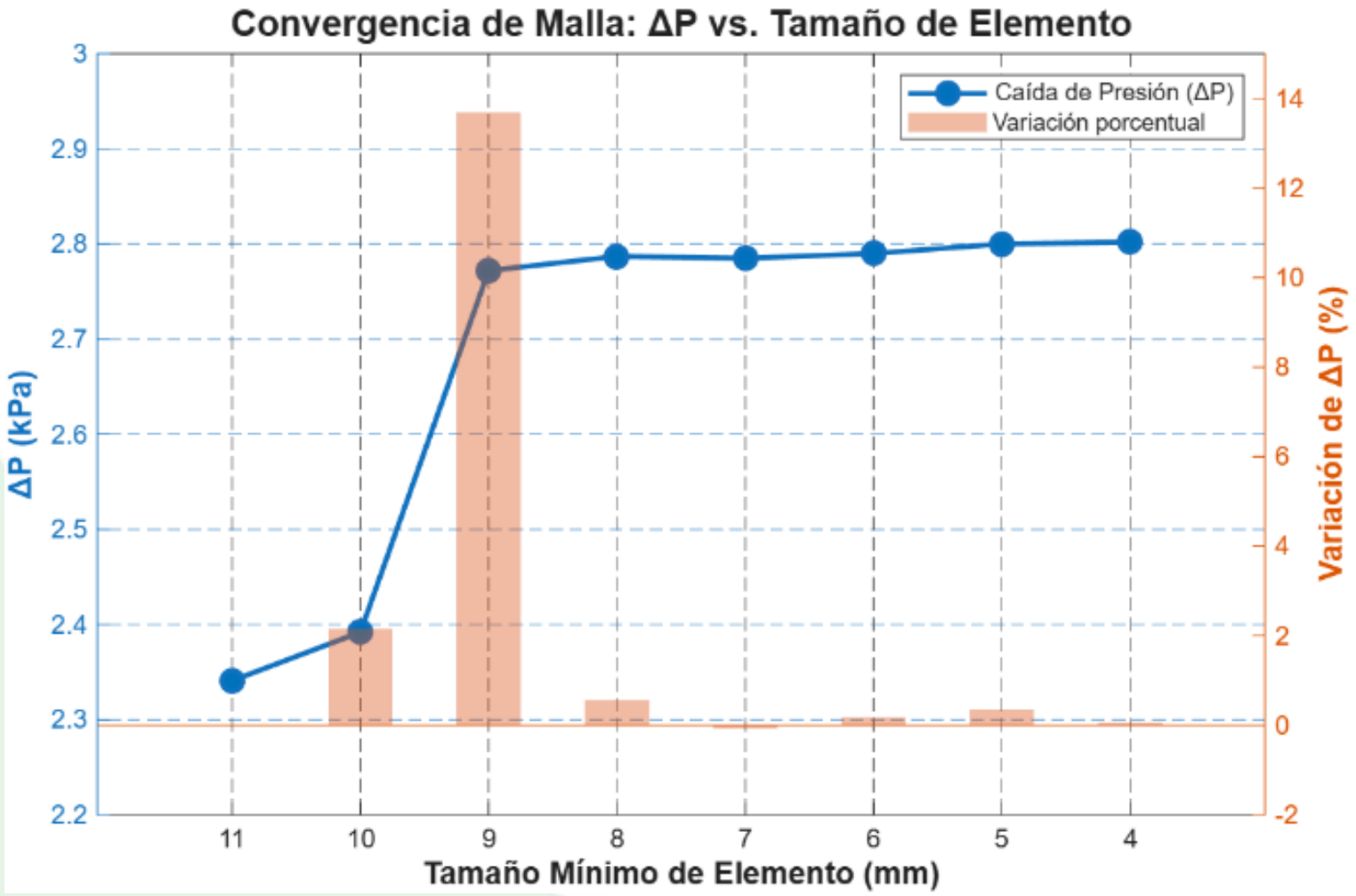
Estudio de independencia de malla

Caída de presión (ΔP)

Tamaño Min [mm]	Tamaño Max [mm]	Quallity Mesh	Mesh Elements	Inlet [kPa]	Oulet Up [kPa]	ΔP [MPa]	Variación de ΔP
11	66	0,1485	1692569	2.8524	0.512	2.341	-
10	60	0,1778	2082400	2.9152	0.523	2.392	2.15%
9	54	0,1901	2616824	3.2926	0.521	2.772	13.69%
8	48	0,1863	3319304	3.3027	0.515	2.787	0.56%
7	42	0,1776	4393912	3.2987	0.513	2.785	-0.07%
6	36	0,1786	6080748	3.3062	0.516	2.790	0.18%
5	30	0,1802	8957994	3.3168	0.516	2.800	0.36%
4	24	0,1842	14484895	3.3210	0.519	2.802	0.06%

Estudio de independencia de malla

Caída de presión (ΔP)



Cálculo de la velocidad óptima

$$V_{MEIV} = \frac{18\mu\,\beta}{d_{50}^2 \rho_p}\left(\sqrt{\mathrm{e\,f^2}\,(e+1) + \frac{(1-e)e^2\,R}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b}} - f(e+1)\right)\left(\frac{e^2}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b} - \frac{f^2(e+1)^2}{R}\right)^{-1}$$

Categoría	Variable	Valor	Unidades
Propiedades del lugar del estudio	T_0	291.15	K
	T	296.05	K
	μ_0	18.27	μ Pa s
	C	120	K

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + C}{T + C}$$

$$\mu(296.05\,) = 1.851 \cdot 10^{-5}\ Pa \cdot s$$

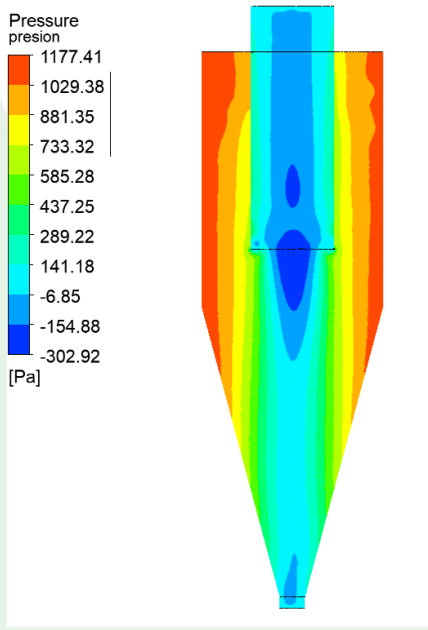
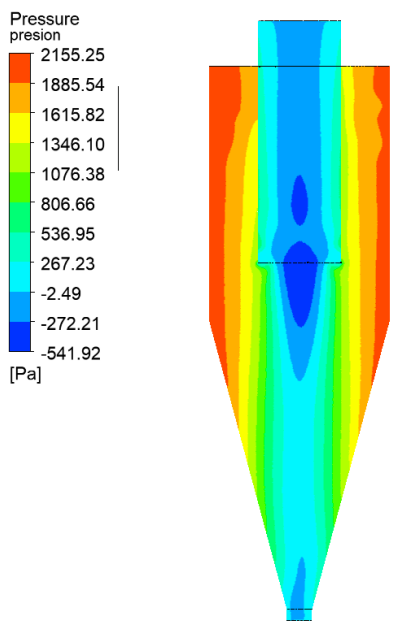
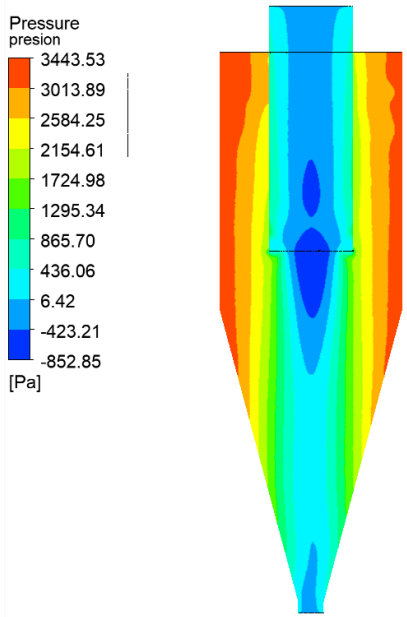
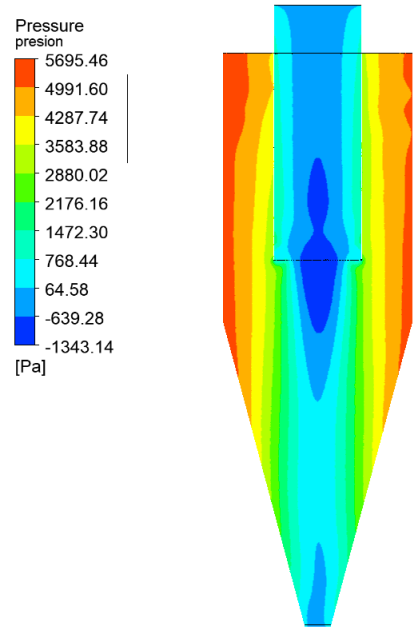
Cálculo de la velocidad óptima

$$V_{MEIV} = \frac{18\mu\,\beta}{d_{50}^2 \rho_p}\left(\sqrt{\mathrm{e\,f^2}\,(e+1) + \frac{(1-e)e^2\,R}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b}} - f(e+1)\right)\left(\frac{e^2}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b} - \frac{f^2(e+1)^2}{R}\right)^{-1}$$

Categoría	Variable	Valor	Unidades
Dinámica del flujo	β	1	Adimensional
Propiedades del fluido	μ	1.851×10^{-5}	Pa · s
	d_{50}	20×10^{-6}	m
	ρ_p	1810	kg/m^3
Fenómeno de colisión	e	0.71	Adimensional
	f	0.8	Adimensional
Geometría del ciclón	K_a	4.67	Adimensional
	dr	0.46	Adimensional
	b	0.37	m
	R	0.4	m

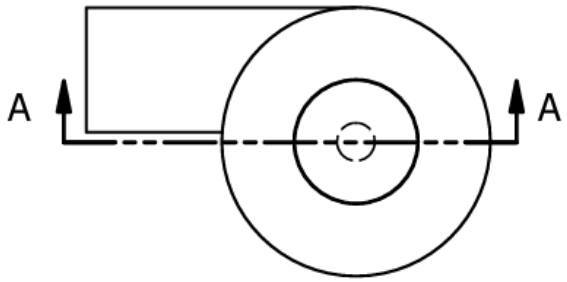
$$V_{MEIV} = 20.84\ m/s$$

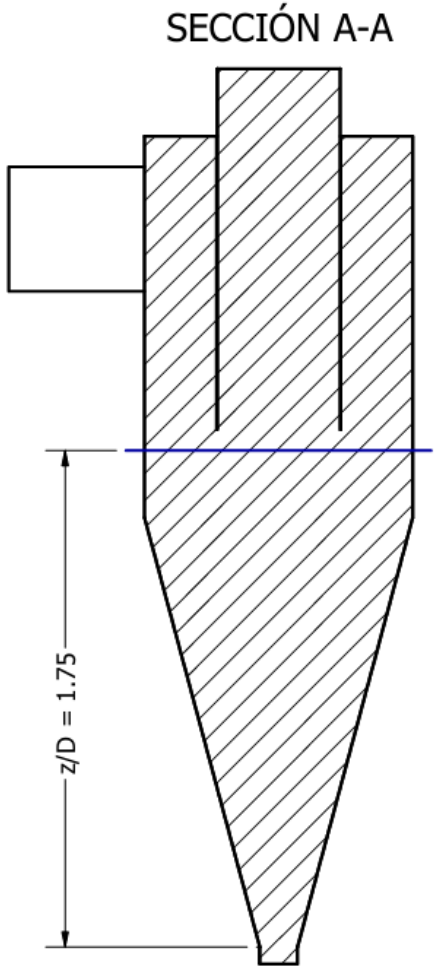
Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Presión				

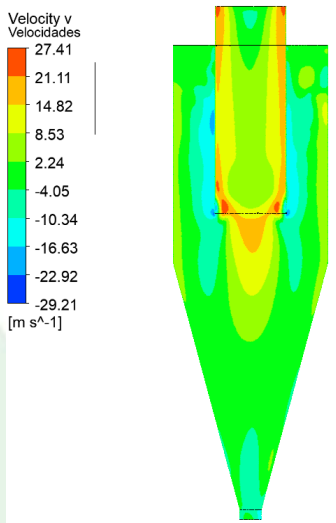
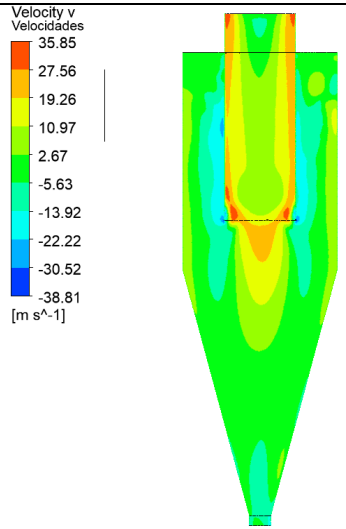
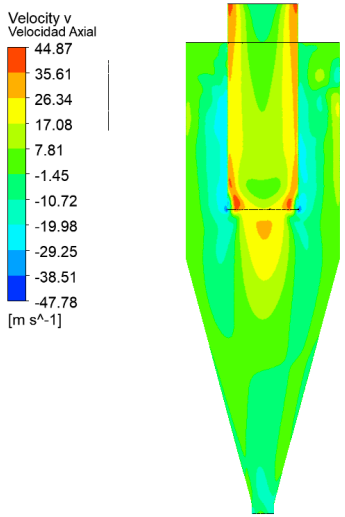
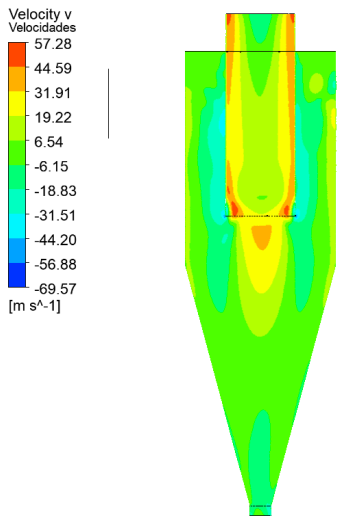
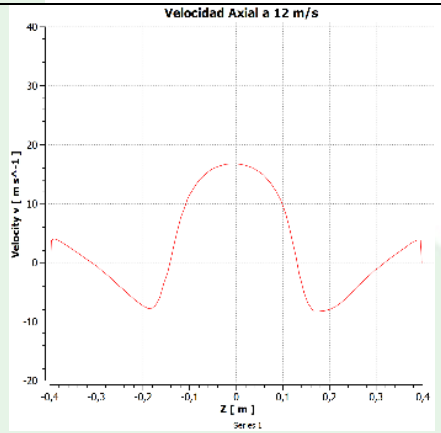
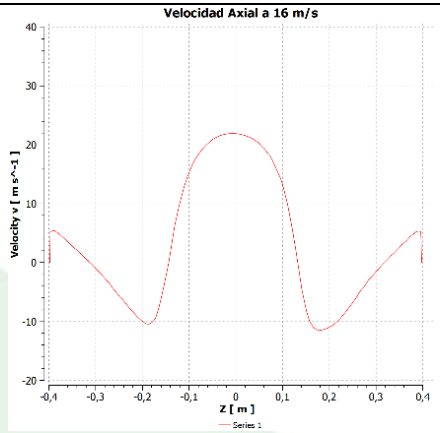
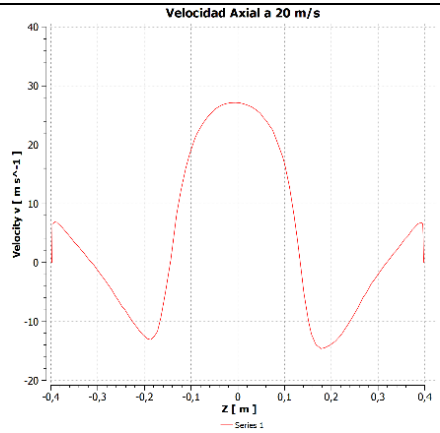
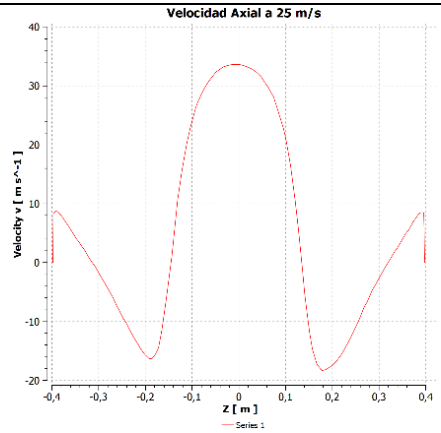
Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

Representación geométrica de la línea de extracción de datos para los perfiles de velocidad





Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Axial				
Axial				

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

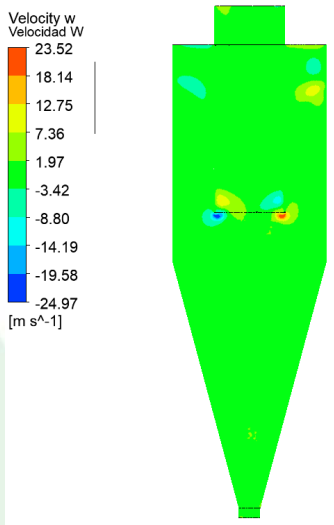
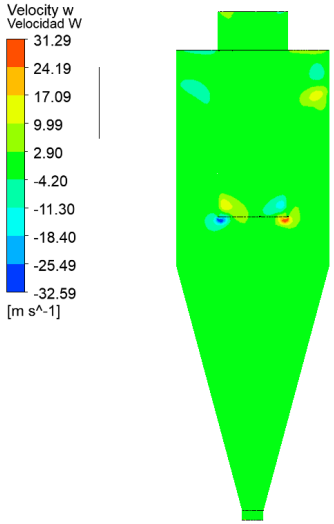
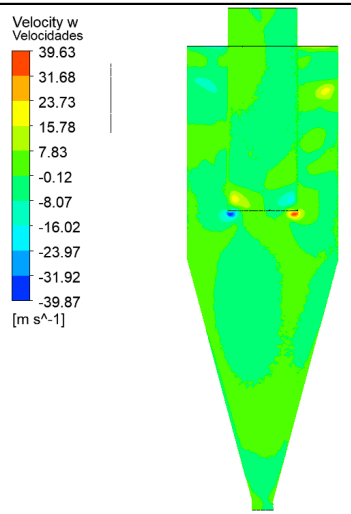
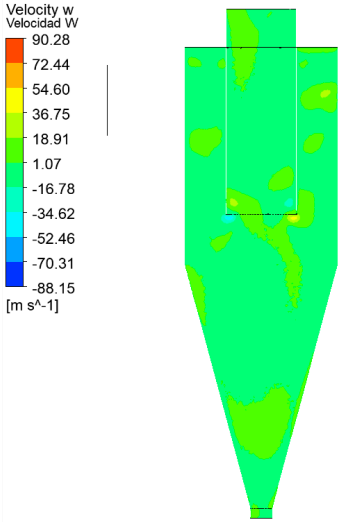
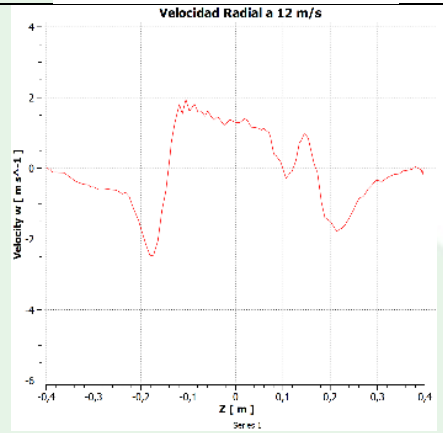
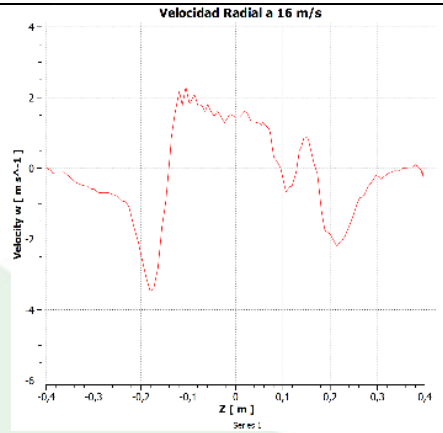
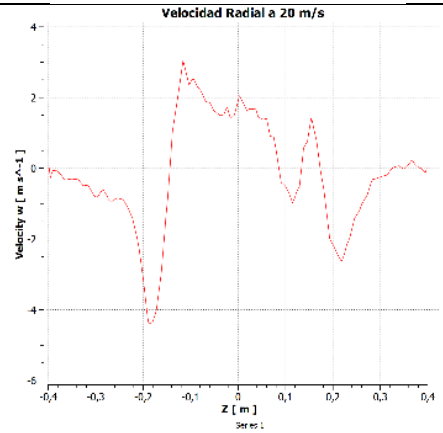
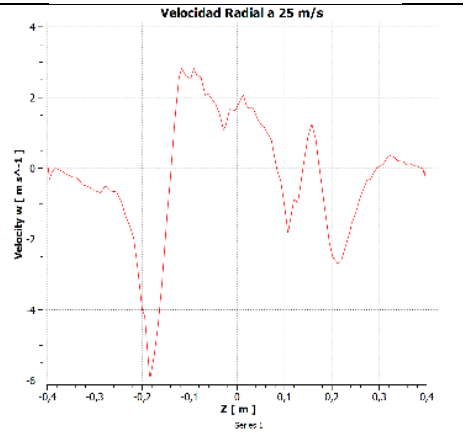
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Radial				
Radial				

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

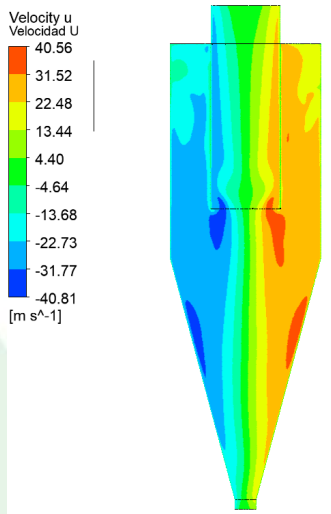
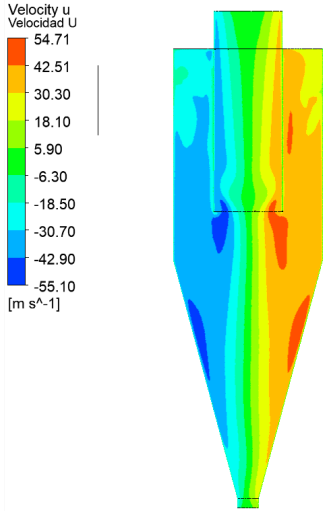
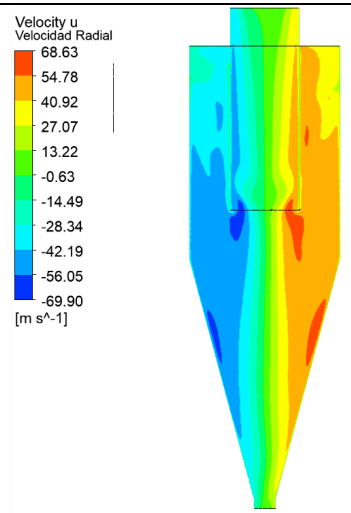
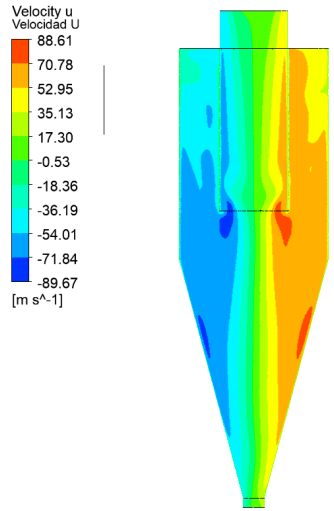
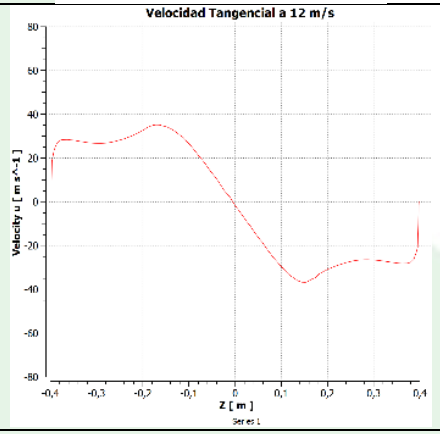
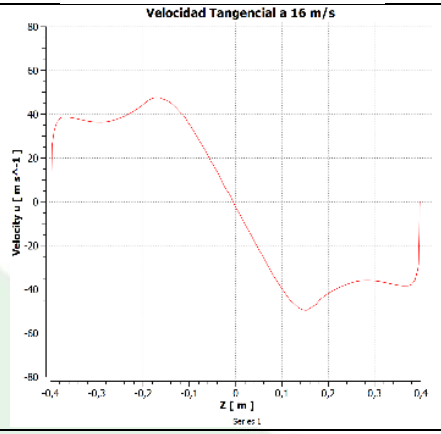
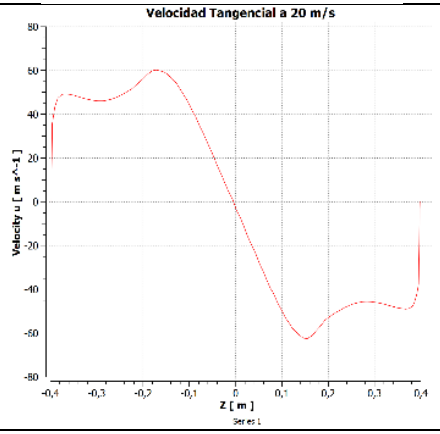
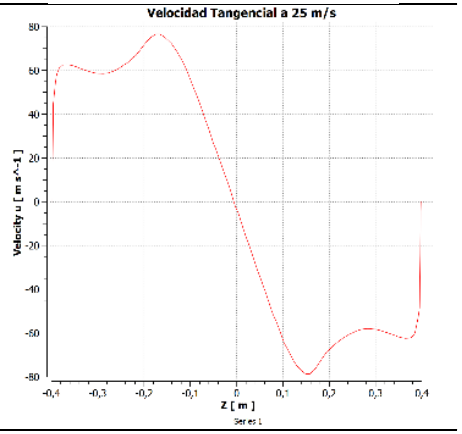
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Tangencial				
Tangencial				

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

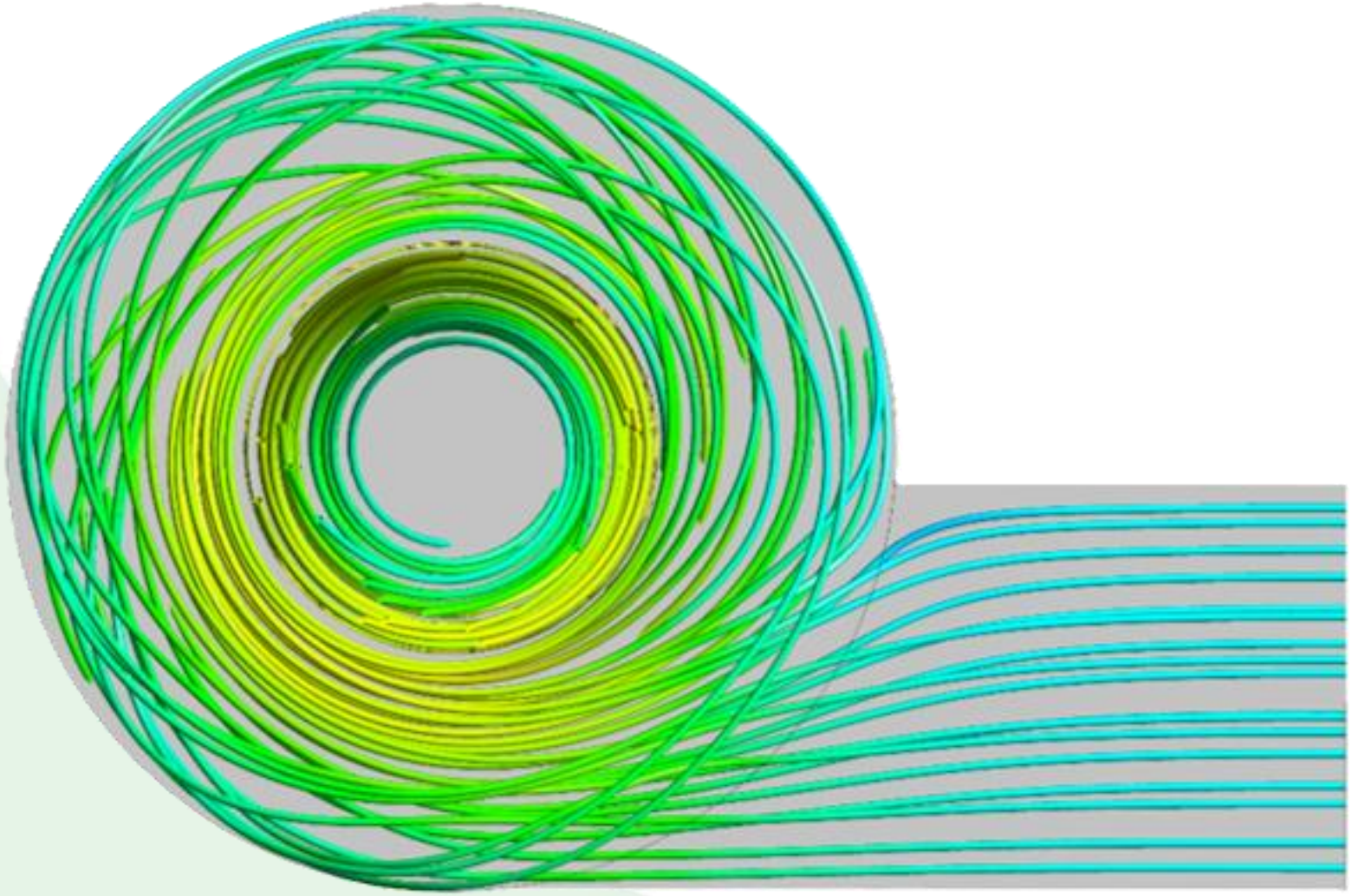
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Visualización de las líneas de trayectoria de la fase discreta en la entrada del ciclón



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

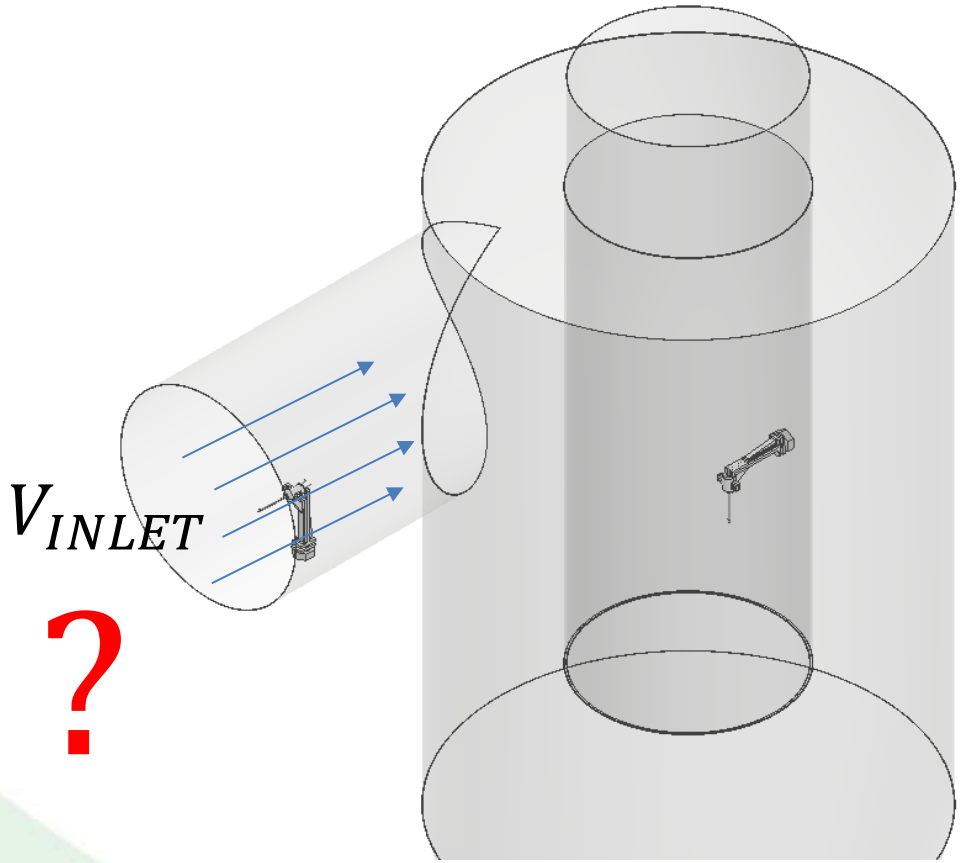
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Incertidumbre de la velocidad de entrada



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

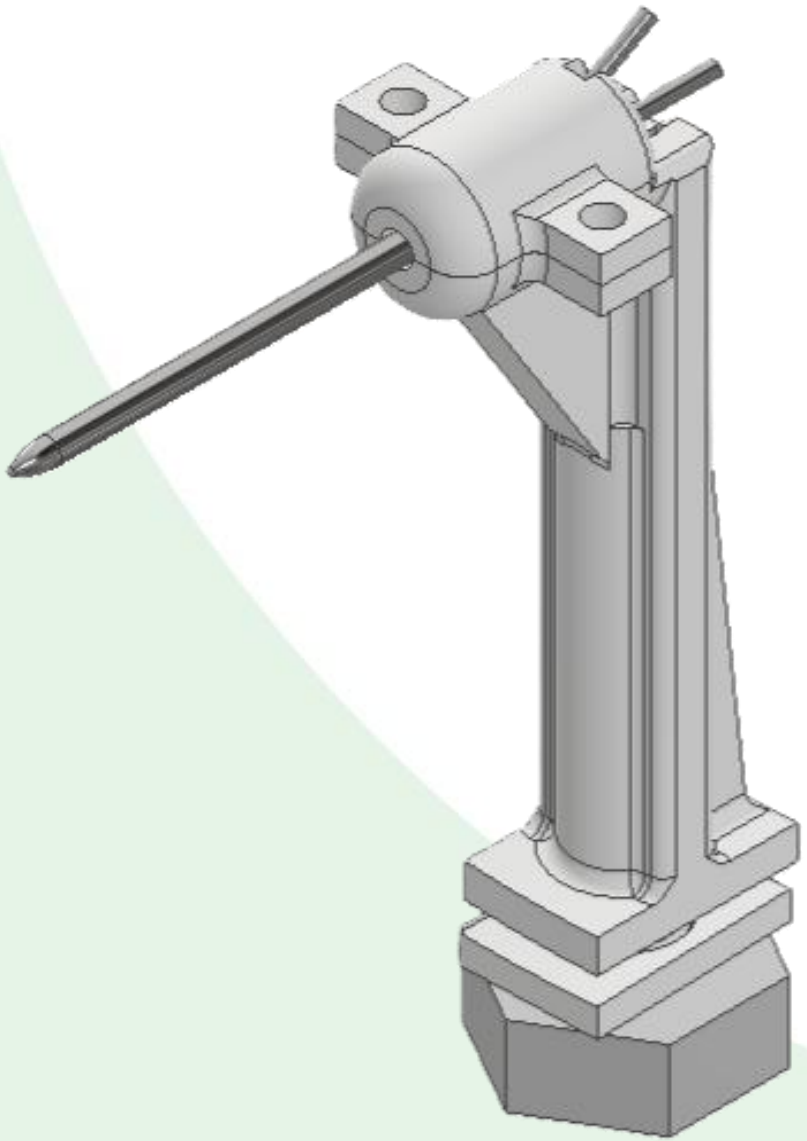
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

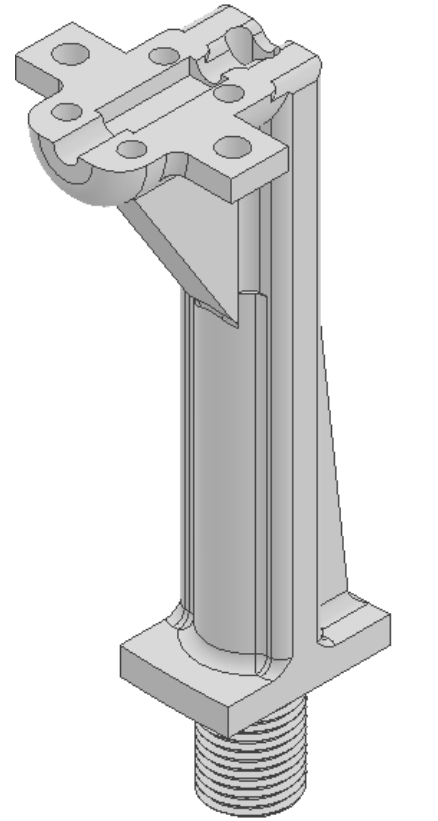
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

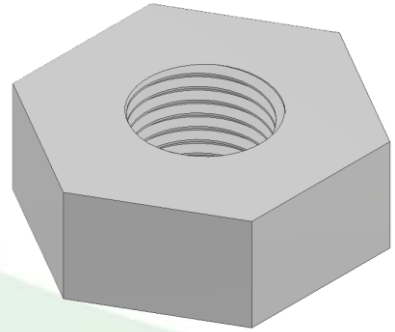
CONCLUSIONES

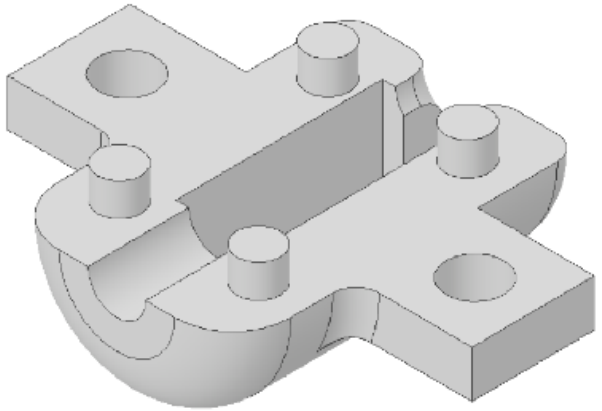
TRABAJOS FUTUROS

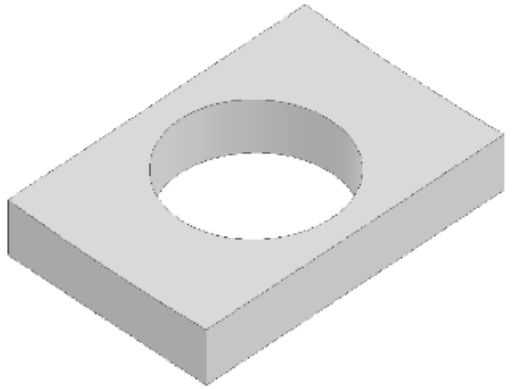
Diseño de soportes para tubos Pitot











ANTECEDENTES

OBJETIVOS

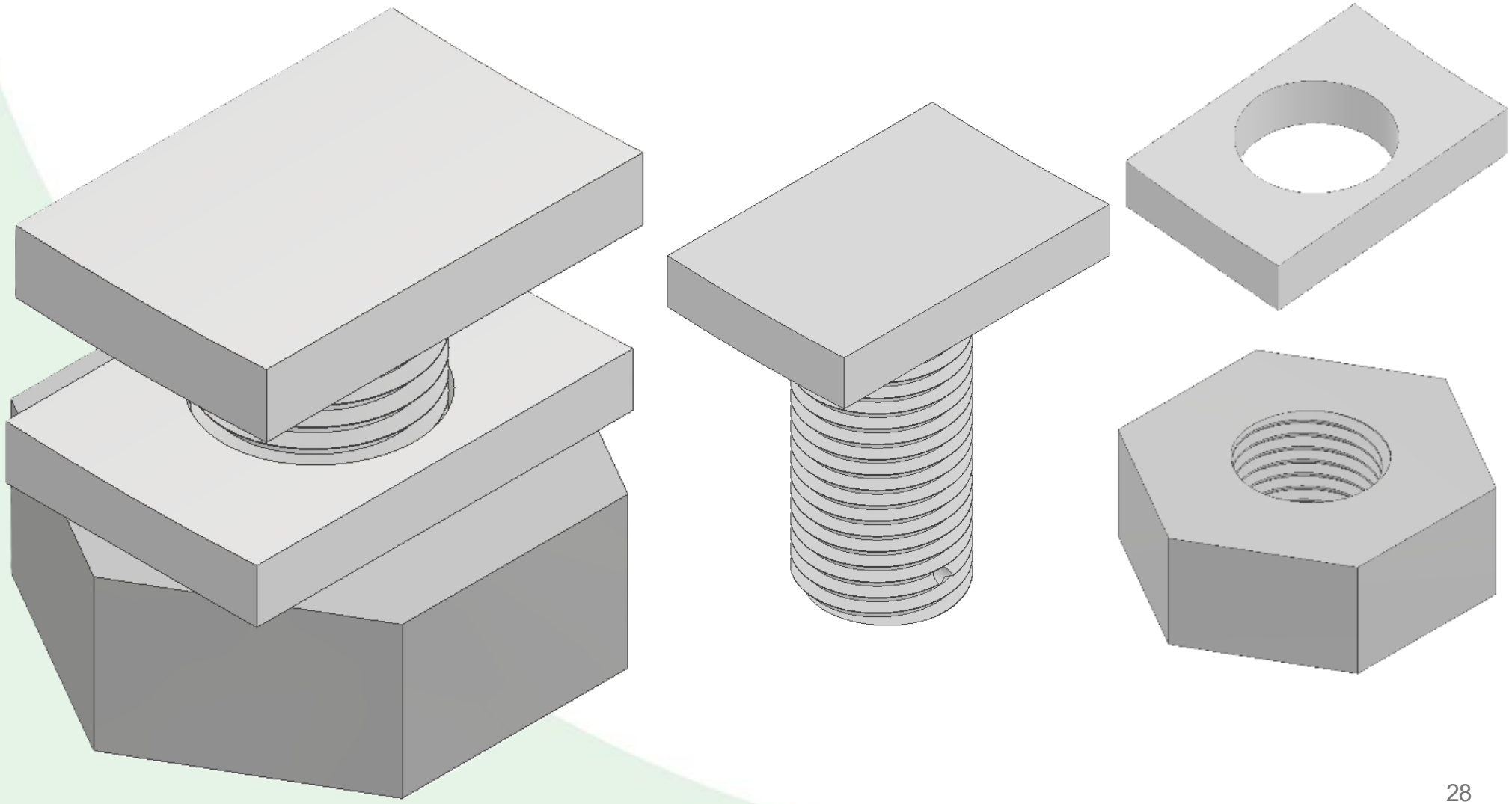
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Diseño de soportes para tubos Pitot



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

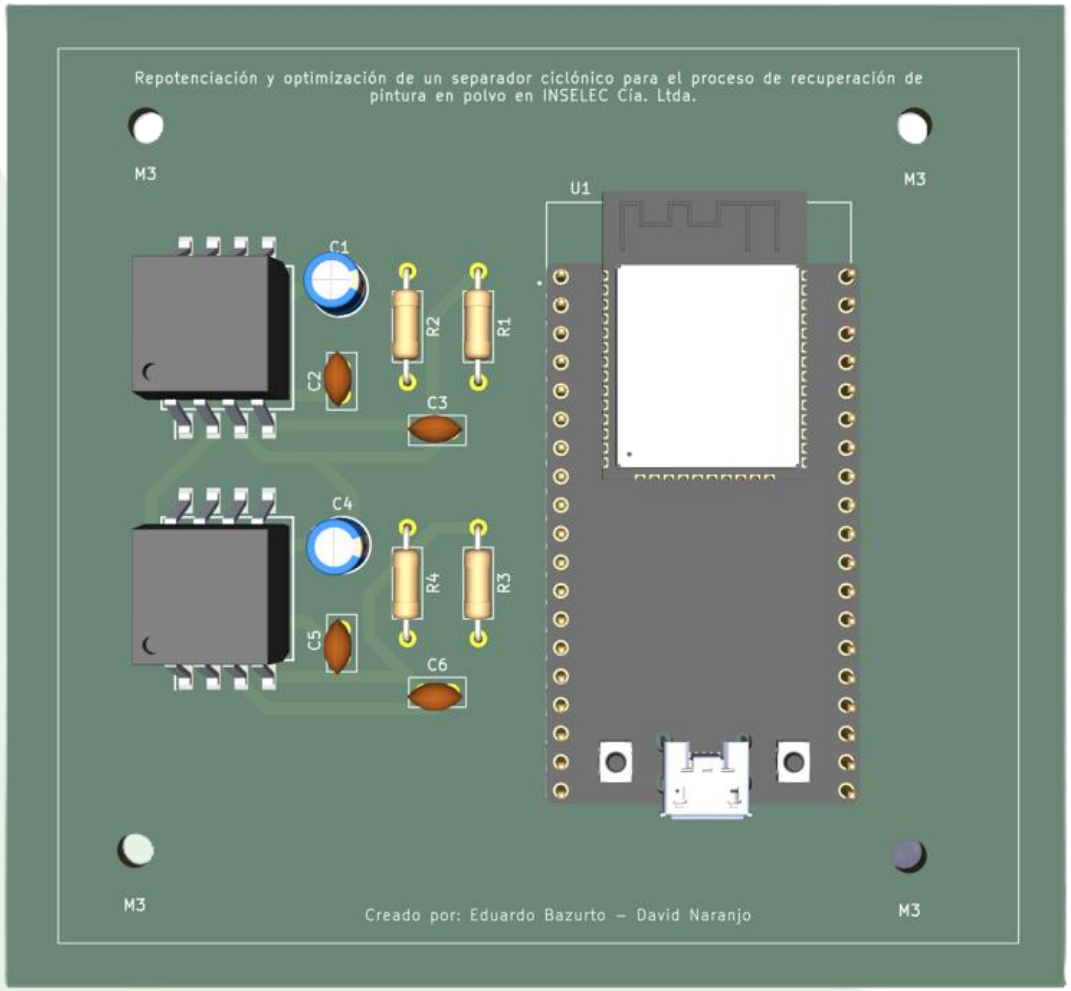
DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

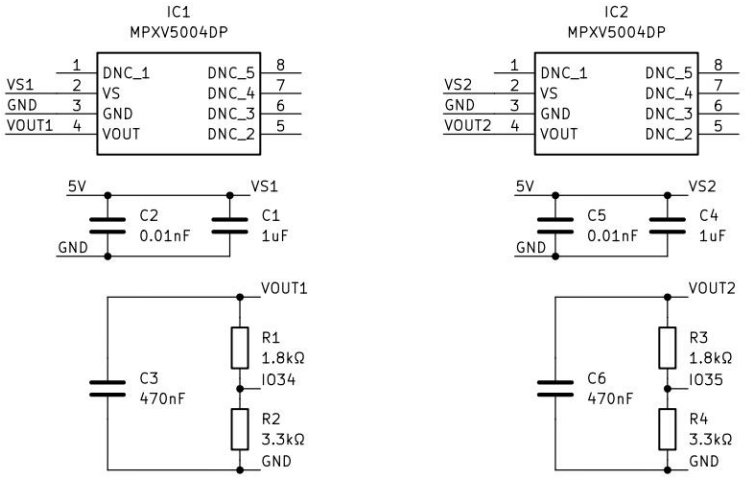
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

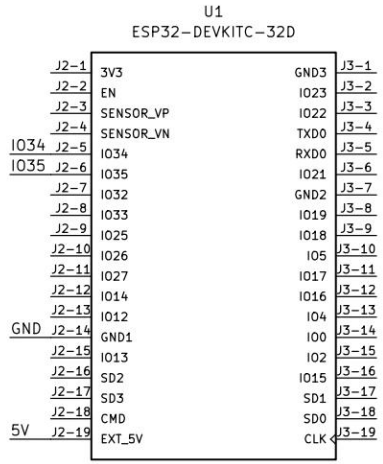
CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Diseño del sistema de instrumentación y acondicionamiento de señal







ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

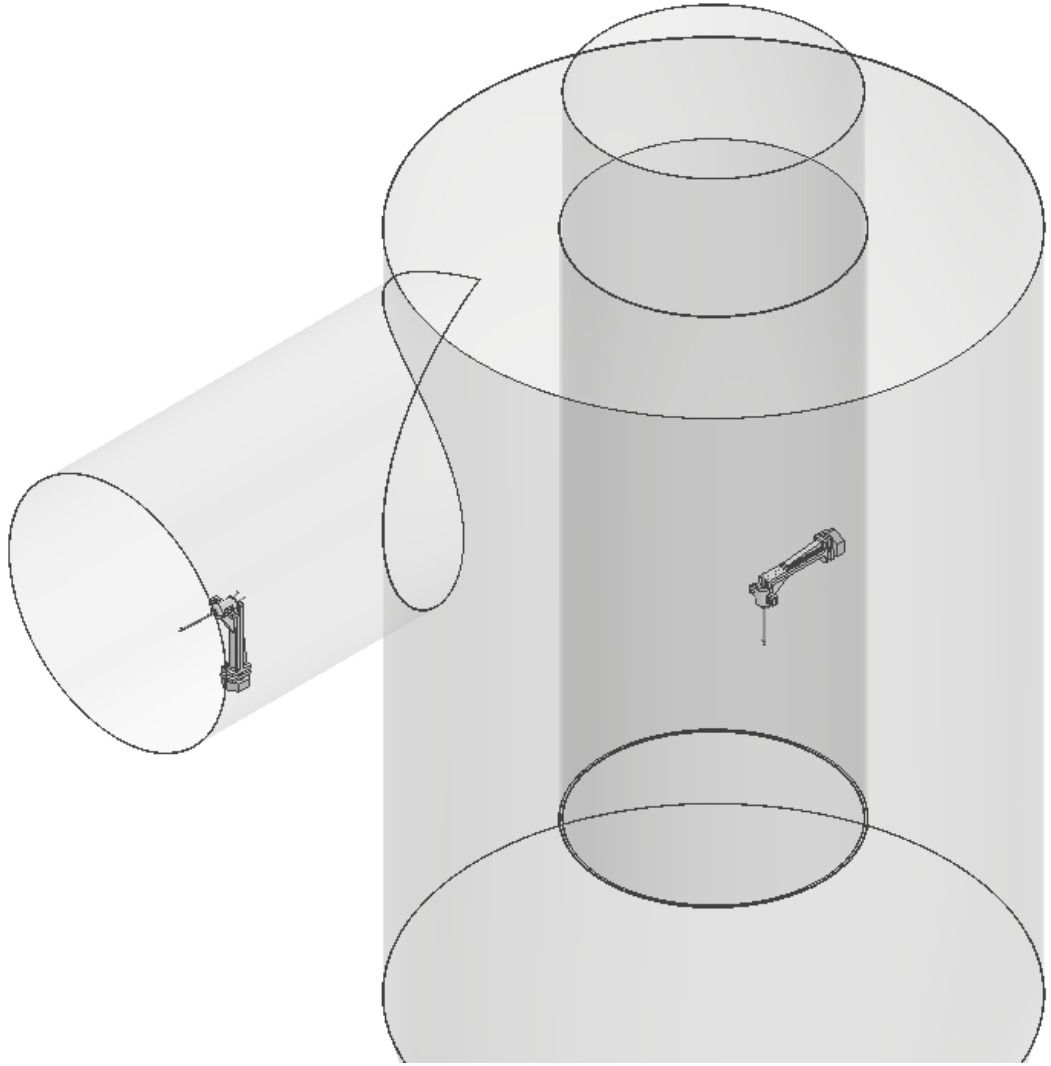
CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Integración de sensores

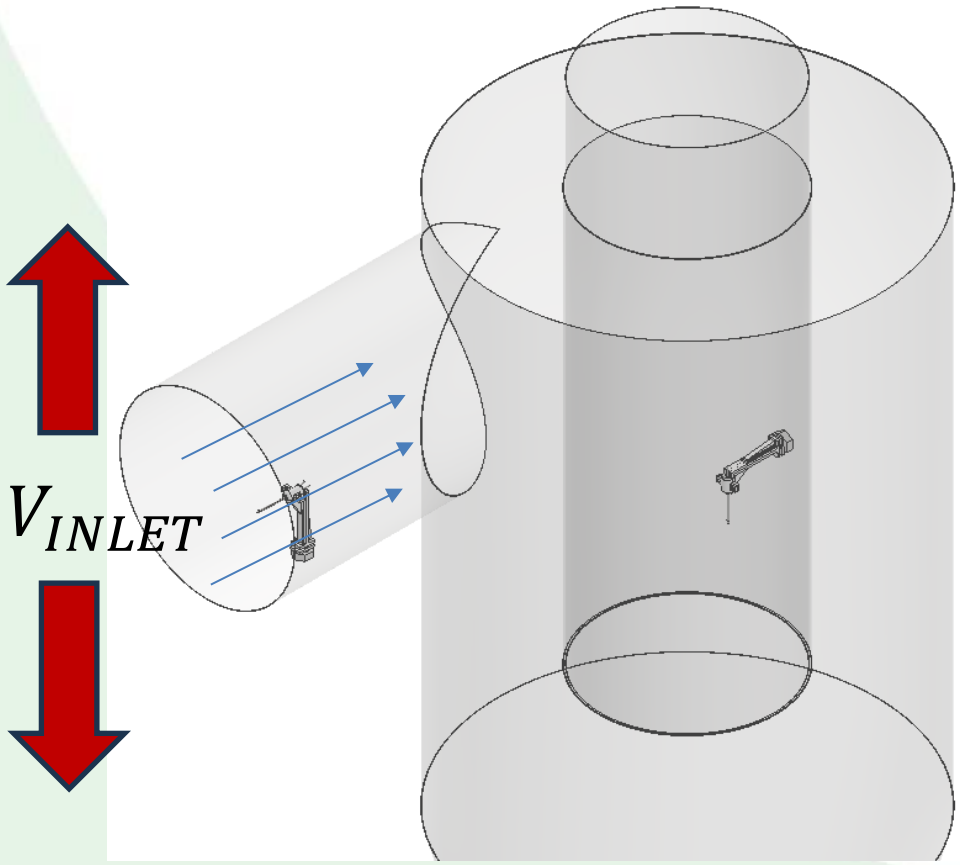




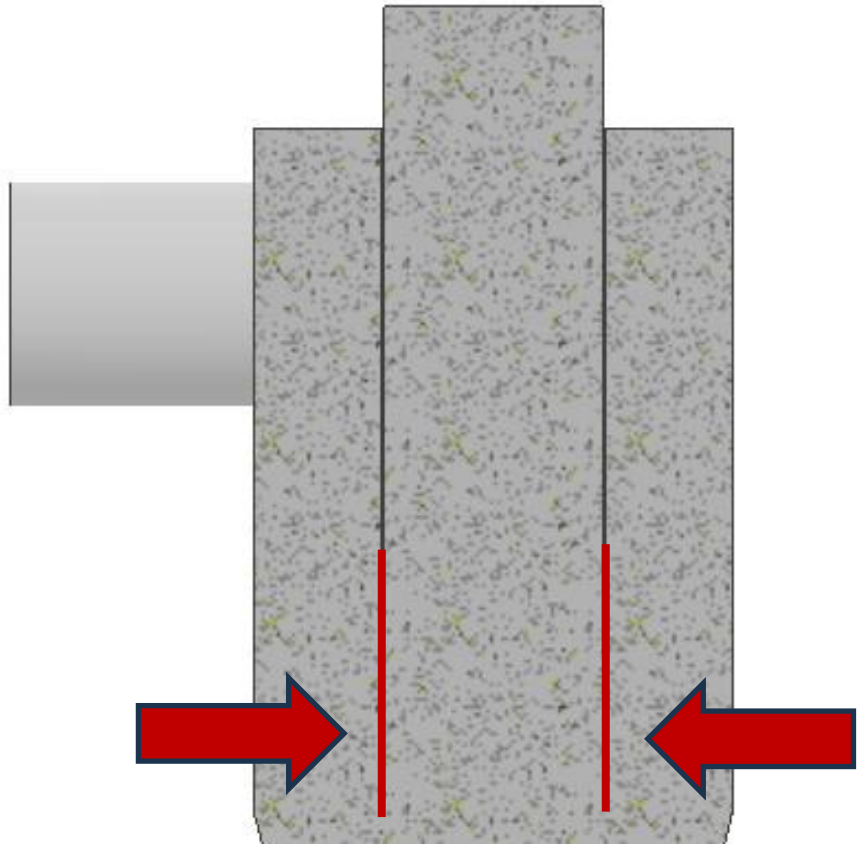


Plan de intervención y jerarquización de mejoras

Regulación de la velocidad de entrada



Reducción del diámetro del tubo localizador de vórtice



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

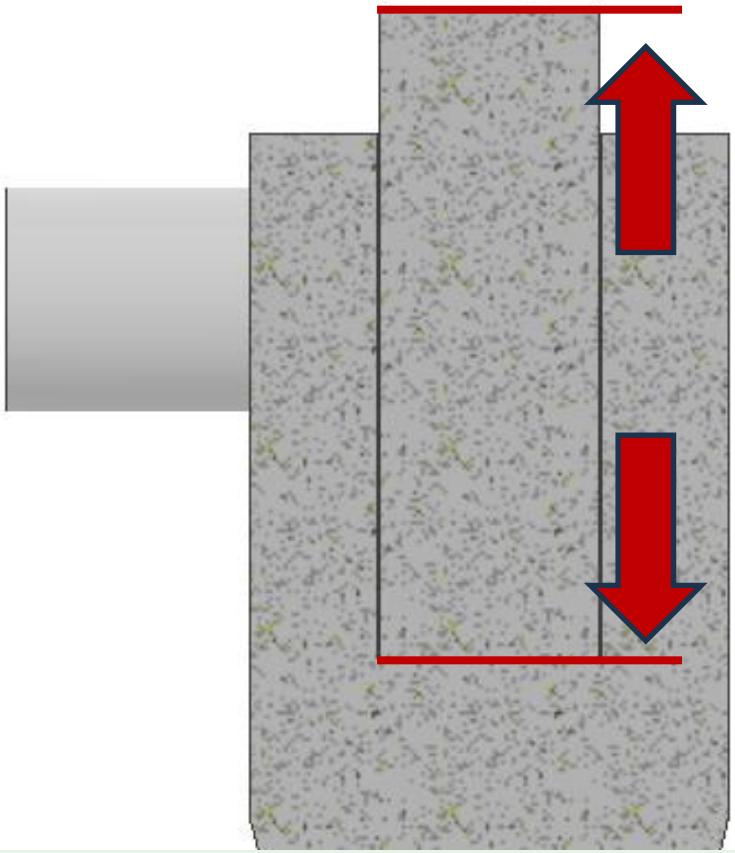
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

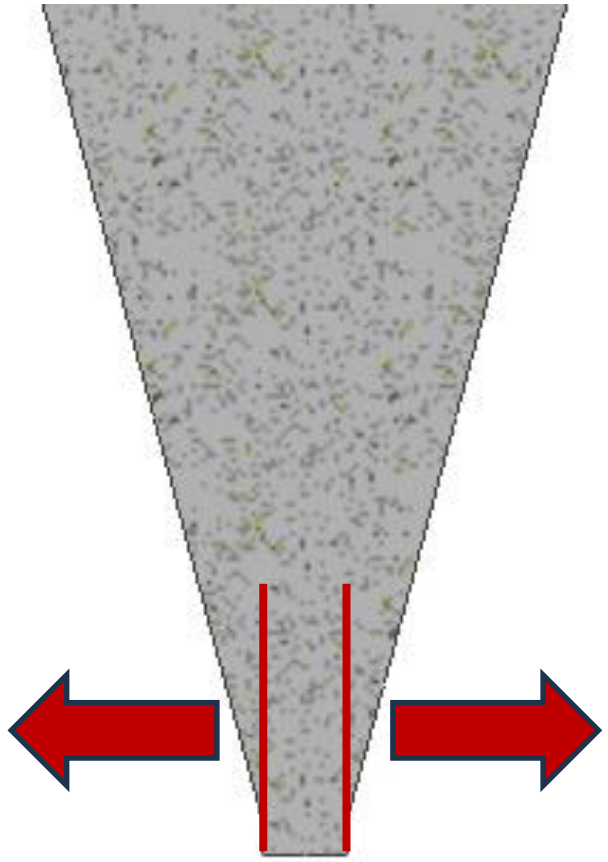
TRABAJOS FUTUROS

Plan de intervención y jerarquización de mejoras

Ajuste longitudinal del tubo localizador de vórtice



Ampliación del diámetro de descarga cónica



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

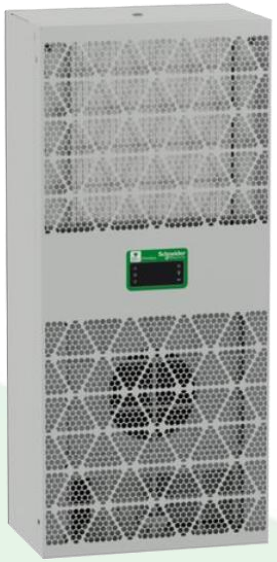
Selección de los componentes

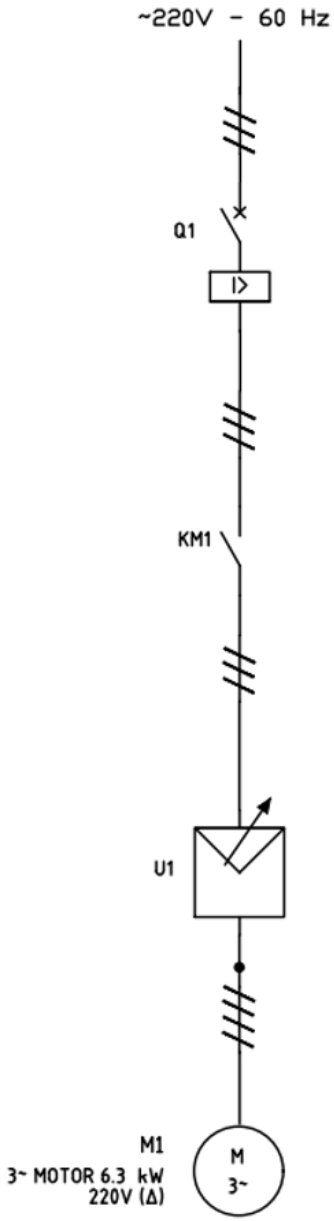












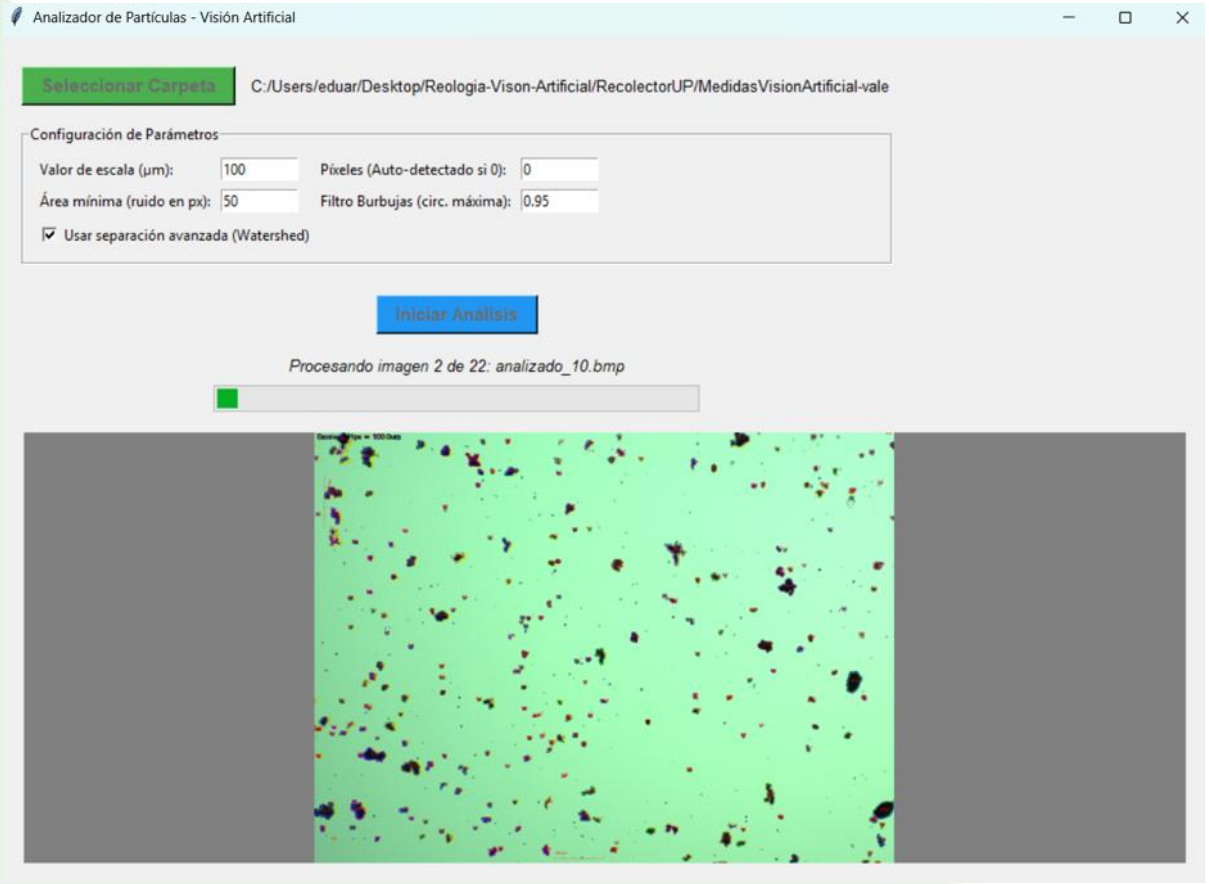
Pruebas experimentales

Frecuencia del VDF (Hz)	Velocidad del Flujo de Aire (m/s)
40	8.83
50	12.30
60	15.30
65	17.70
70	17.90

Análisis de datos

La caracterización granulométrica se lo realizo utilizando microscopía óptica en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Implementación de visión artificial



Librerías

OpenCV
NumPy
Pandas
PIL (Pillow)
Tkinter
ReportLab

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Análisis de datos

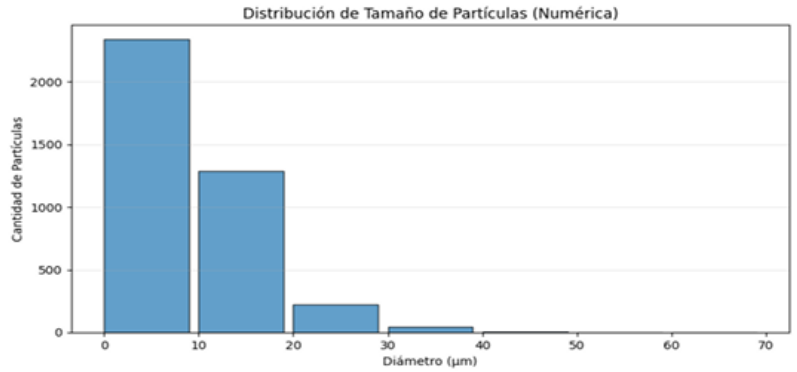
Ilustración del reporte estadístico generado automáticamente en formato PDF

Particle Size Analysis Report (Volume Weighted)

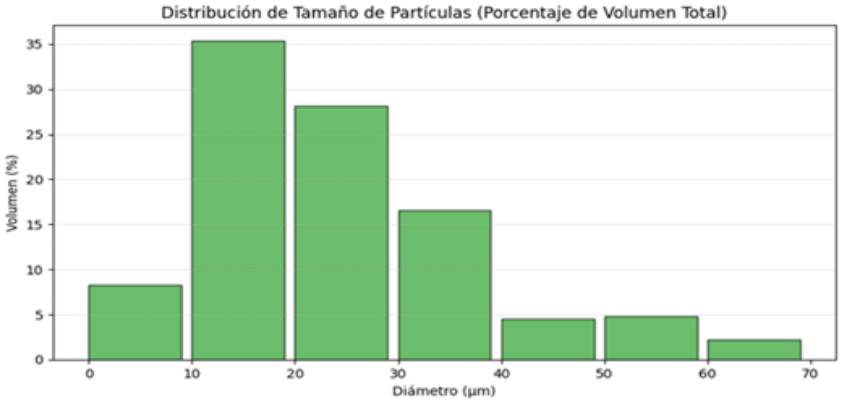
Carpeta Analizada: RecolectorUP
Total Partículas: 3903
Promedio (Numérico): 10.42 um
Rango: 4.41 - 61.46 um
Volumen Total Calculado: 5.42e+06 um³

D10 (um)	D50 (um)	D90 (um)
10.60	21.45	41.06

Particle size distribution (Numerical)



Particle size distribution (Volume %)



Distribution Table (Numeric and Volume)

Diam um	Cant	Num %	Vol %	Cum Vol %
0 - 10	2336	59.85	8.32	8.32
10 - 20	1289	33.03	35.34	43.66
20 - 30	222	5.69	28.18	71.84
30 - 40	46	1.18	16.6	88.44
40 - 50	6	0.15	4.5	92.95
50 - 60	3	0.08	4.81	97.76
60 - 70	1	0.03	2.24	100.0

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

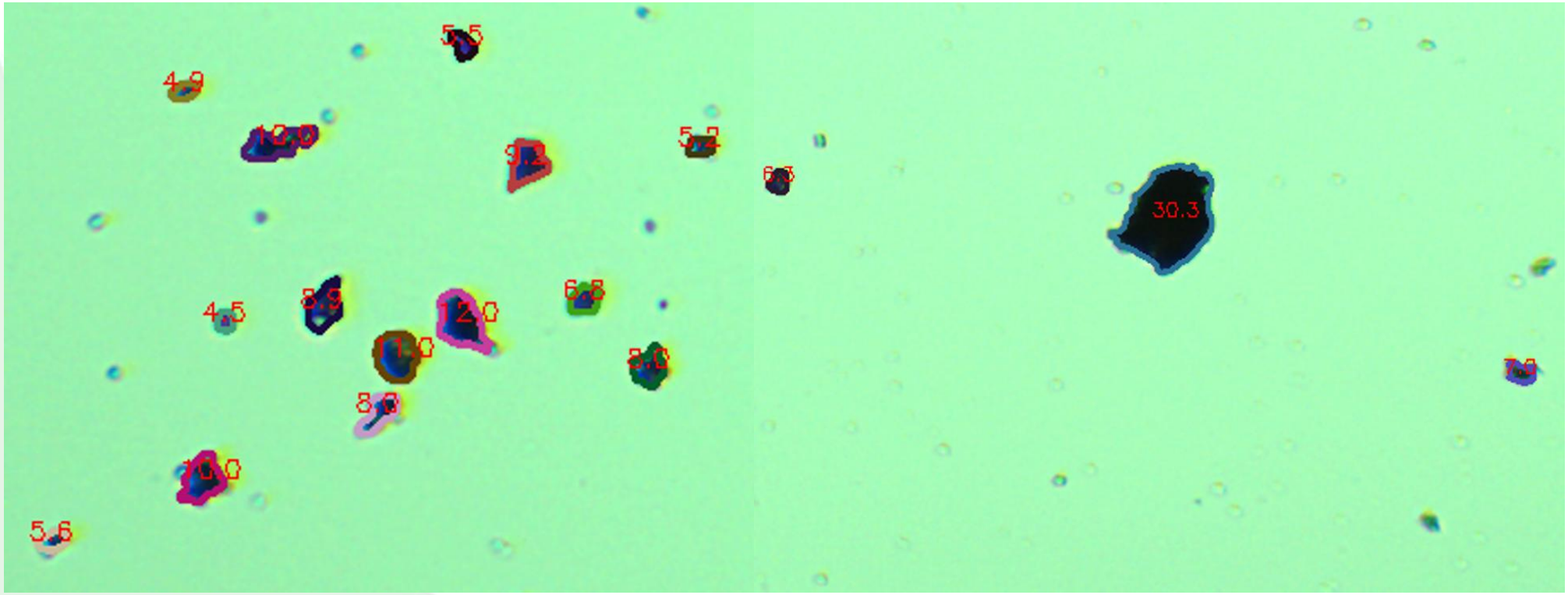
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Análisis de datos

Una vez calibrado el algoritmo



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

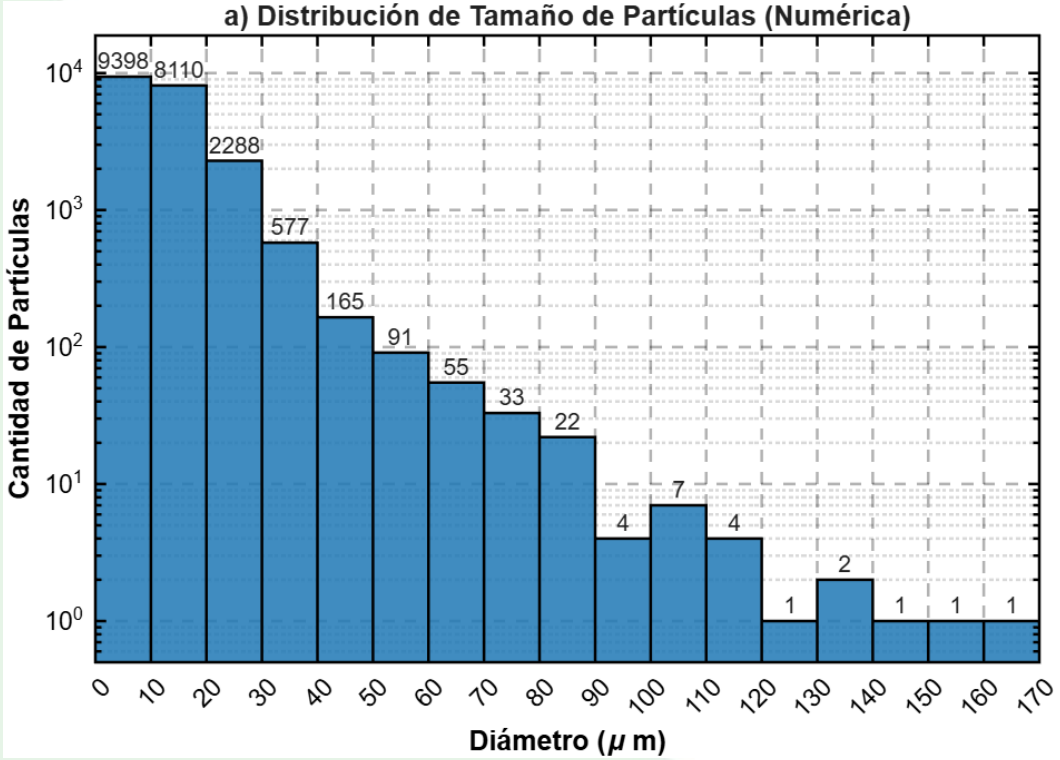
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

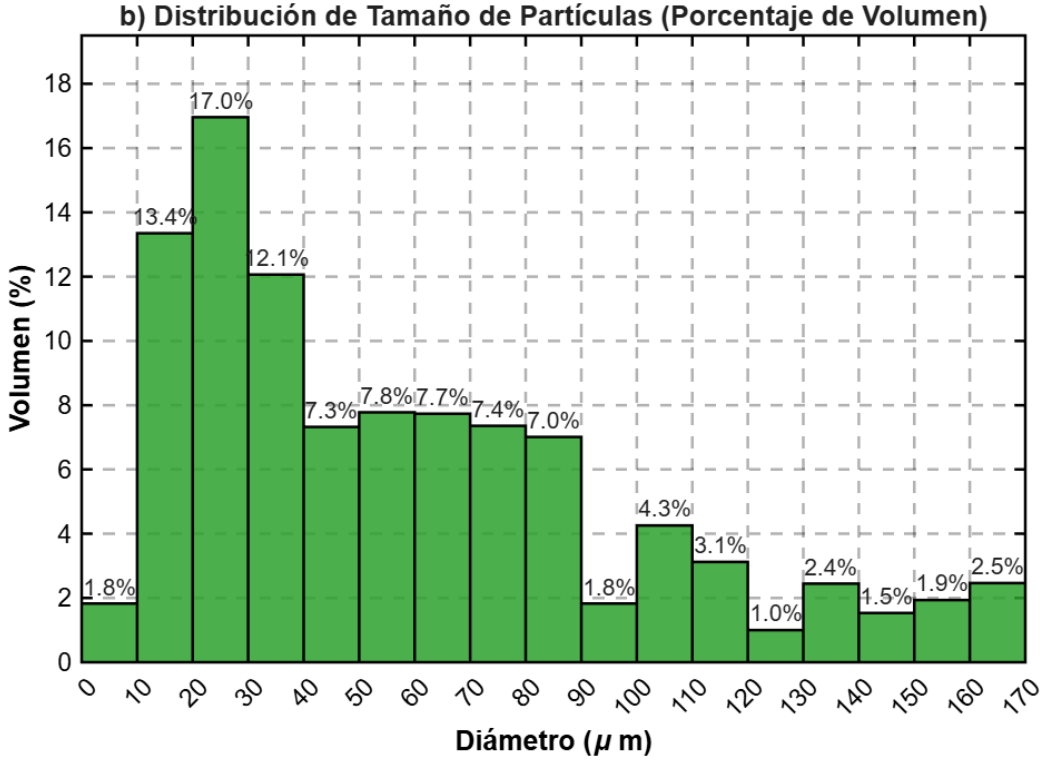
CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Resultados de la distribución granulométrica

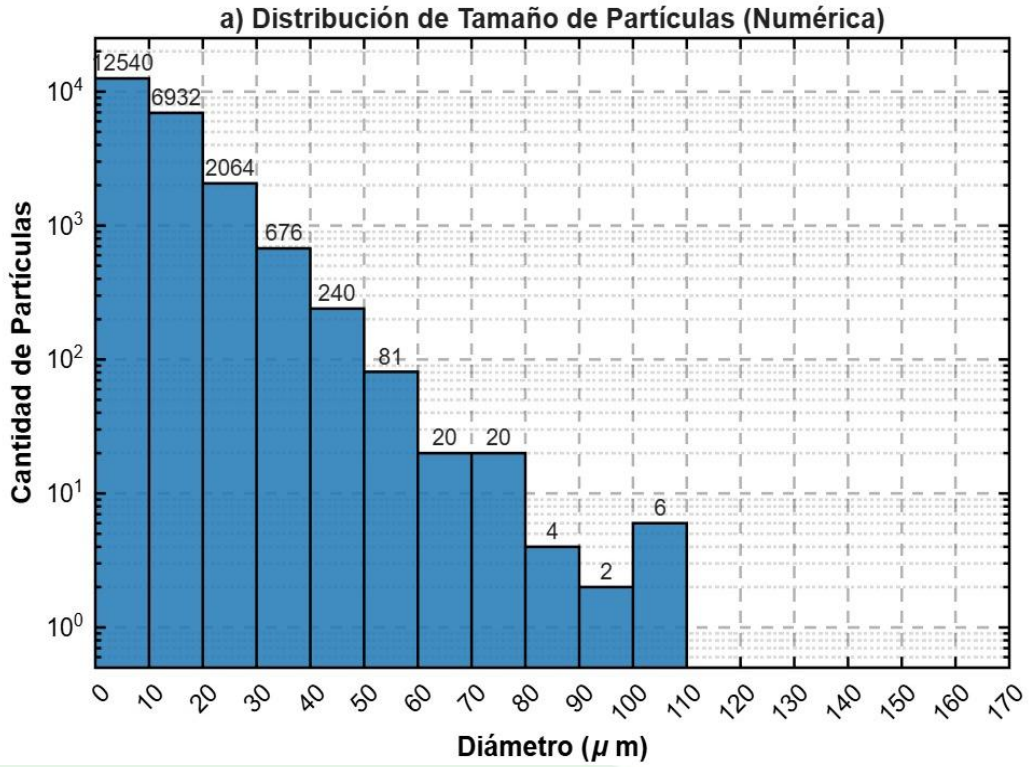
Distribución granulométrica de la PINTURA NUEVA

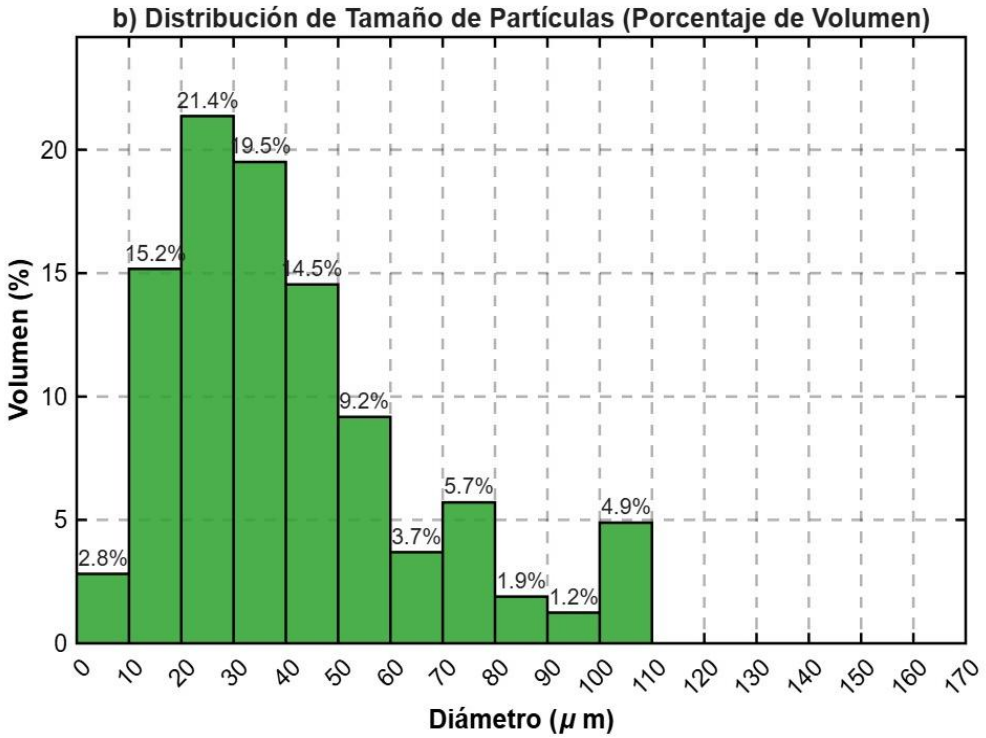




Resultados de la distribución granulométrica

Caracterización granulométrica del desecho
PRE-INTERVENCIÓN





ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

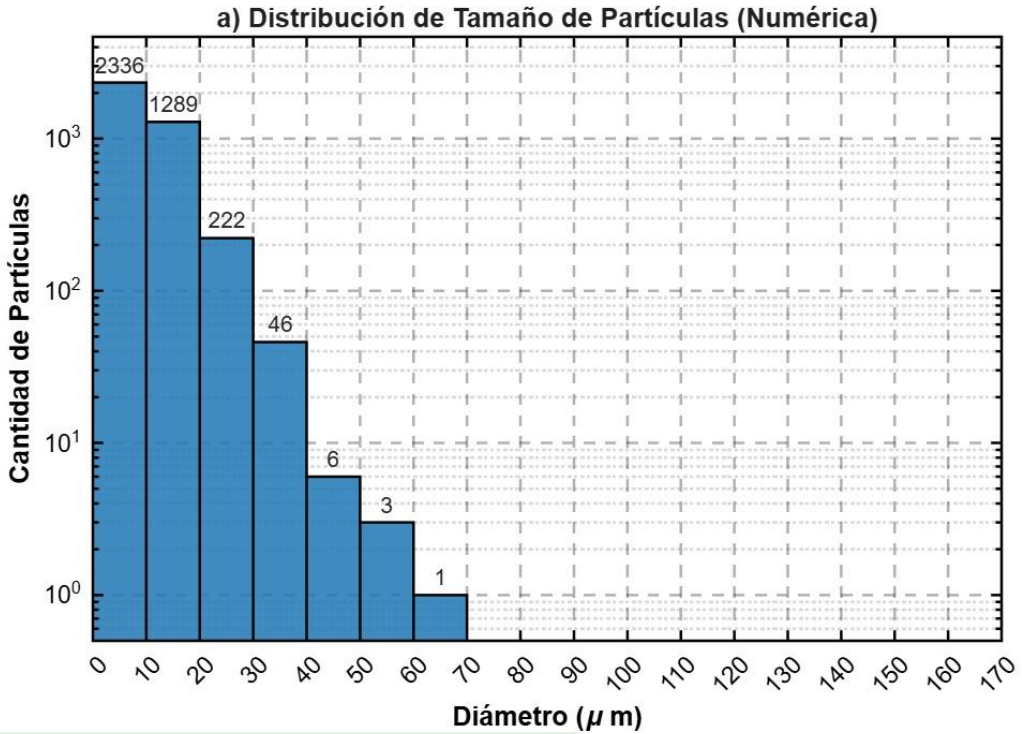
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

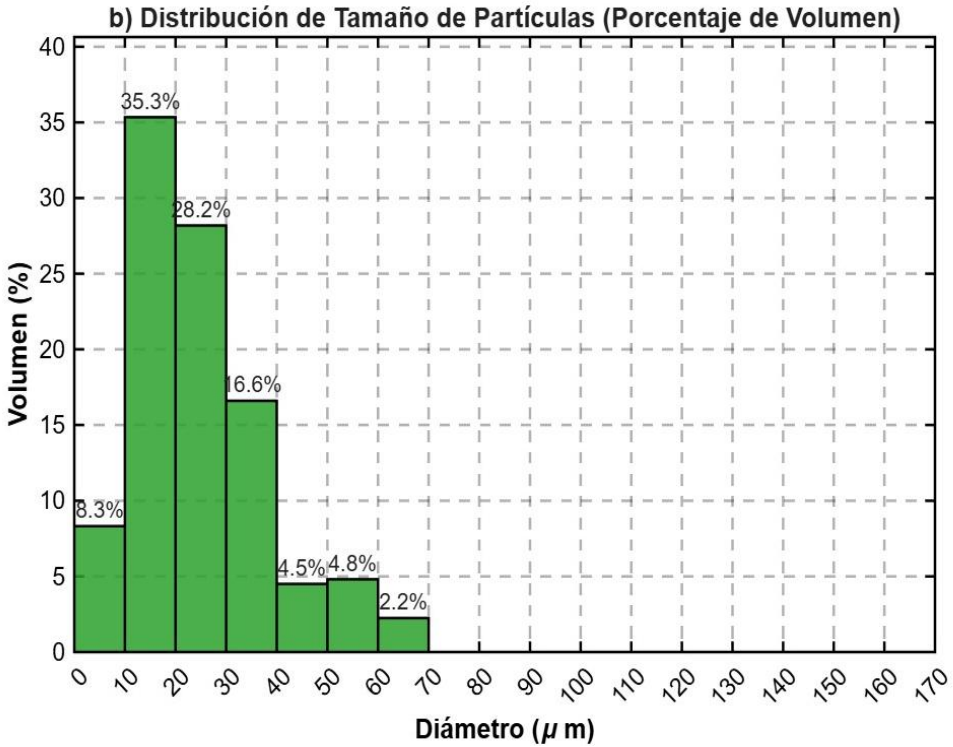
CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Resultados de la distribución granulométrica

Caracterización granulométrica del desecho
POST-INTERVENCIÓN





ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

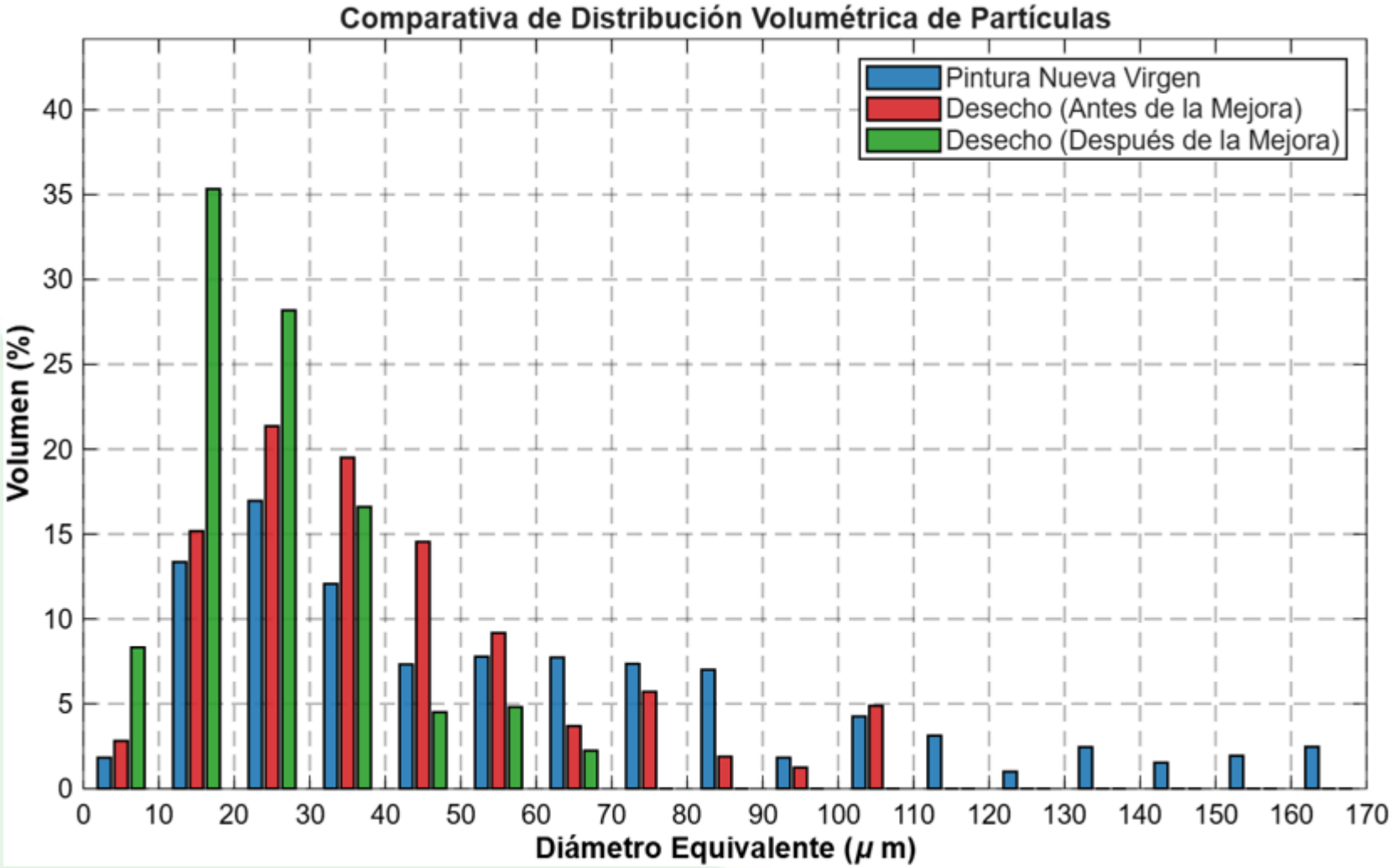
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Resultados de la distribución granulométrica

Comparativa de la distribución granulométrica volumétrica entre la pintura virgen y el desecho (pre y post intervención)



Resultados de la distribución granulométrica

Comparativa de los percentiles volumétricos antes y después de la repotenciación

Parámetro	Sin Mejoras (12.3 m/s) [μm]	Con Mejoras (15.3 m/s) [μm]	Variación [μm]
D10	15.65	10.60	-5.05
D50 (Mediana)	35.32	21.45	-13.87
D90	74.79	41.06	-33.73

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

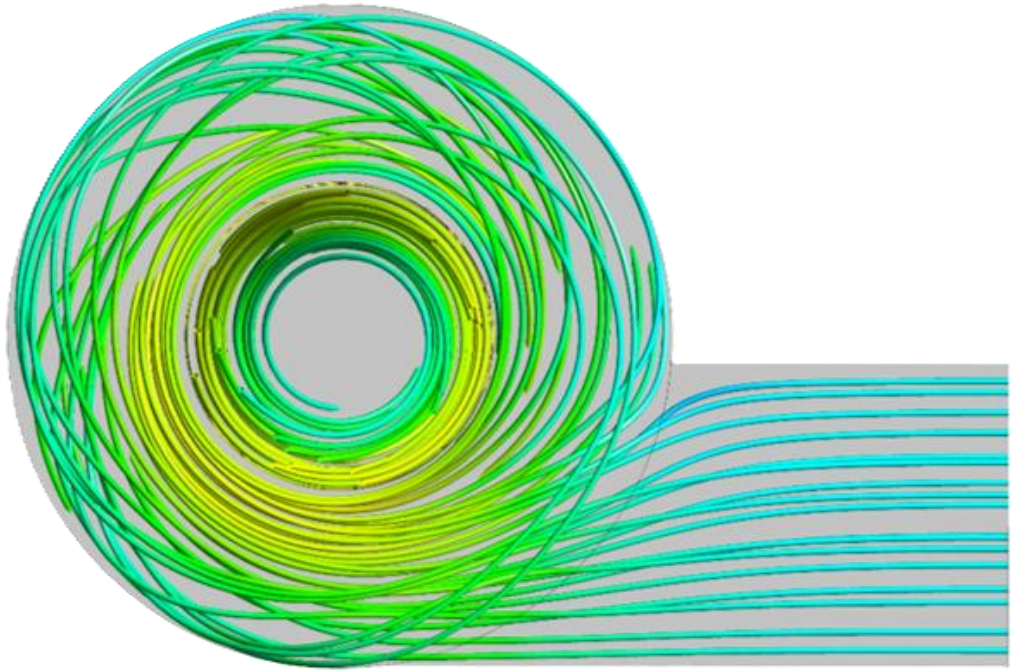
Conclusiones

1 Evaluación virtual del flujo gas-sólido

↗ **Rango evaluado:**
12–25 m/s

≋ **Variable clave:**
Velocidad de admisión

◎ **Resultado:**
Mayor selectividad centrífuga



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

2 Diagnóstico físico

60 Hz

12.3 m/s → **15.3** m/s

+24.4%

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

3 Granulometría

Fracción fina

18	→	43.6
% volumen		% volumen

Tamaño al desecho

100-110	→	60-70
mm		mm

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

4 Impacto

Ahorro

Ambiental

+25.6%

De volumen de rechazo

Costos

Calidad

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

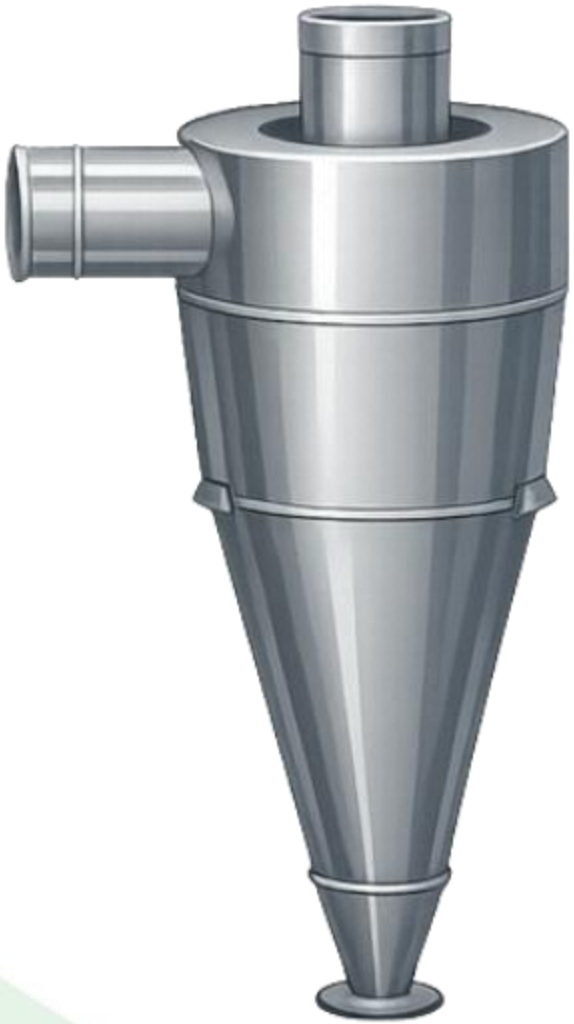
IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Trabajos futuros

Mayor velocidad





Monitoreo de partículas de 20 a 30 um

Vortex finder menor



ANTECEDENTES

OBJETIVOS

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SEPARADOR

PRUEBAS Y RESULTADOS

CONCLUSIONES

TRABAJOS FUTUROS

Trabajos futuros



Inspección continua con visión artificial



Integración de la carga electrostática en CFD