

Planteamiento de un diseño preliminar de un filtro autolimpiante con el uso de la energía hidráulica para la separación de mezclas líquido sólido para la empresa AC Ingeniería Virtual

Victoria Vanessa Ruedas Racines y Dianys Vanessa Mercado Guerra

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad Práctica Empresarial

Director

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

PhD en Ingeniería Química

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi hermano Mario Ruedas, quien creyó en mí desde el primer momento y me enseñó a perder el miedo de seguir mis sueños lejos de casa, que siempre estuvo para mí, mi ejemplo a seguir.

A mis padres Yaneth Racines y Noel Ruedas, cuyo esfuerzo y amor incondicional hicieron posible este sueño que los alejó de su pequeña, pero que día a día agradece la fortuna de tenerlos presentes en cada pequeño paso y a mi segunda madre, Beatriz Racines por estar siempre presente y amarme como una hija.

A mi hermana Yenifer Ruedas, por estar siempre a mi lado, brindándome tanto amor, abrazos y buenos consejos. Su cariño y comprensión han sido un refugio constante en mi vida.

A Jhonattan Camilo, quien ha sido mi compañero incondicional, por su amor, paciencia y constante apoyo desde que lo conocí.

A mi abuelita Angela Ortiz y mi primo Álvaro Padilla, quienes con mucho amor me acompañaron y aconsejaron en este camino.

A mi compañera y amiga, Dianys Mercado por ser apoyo y motivación en este camino que nos enseñó a creer en nosotras mismas.

A mi amiga, Paola Carreño, por escucharme y estar en cada lagrima de felicidad y tristeza en este proceso.

Victoria Ruedas Racines.

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la sabiduría y la perseverancia necesarias para llegar hasta aquí.

A mis padres, Wilfrido Mercado y Yaniris Guerra, por su amor incondicional y su apoyo constante, quienes han sido mi ejemplo de dedicación y esfuerzo. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo misma dudaba.

A mi hermana, Danna Mercado, por ser mi confidente y escucharme cuando más lo necesitaba, llenando mis días de ánimo y palabras de aliento.

A mi compañero de universidad, Maycol Tavera, por compartir sus conocimientos en ingeniería mecánica siendo un pilar fundamental en este proyecto y brindarme sus buenos consejos que me permitieron salir adelante.

A mi amiga y compañera de tesis, Victoria Ruedas, por su constancia y su confianza. Gracias por estar siempre ahí y brindarme esa linda amistad que hemos conservado en los últimos años.

Dianys Mercado Guerra.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al PhD. Fredy Augusto Avellaneda Vargas quien siempre nos brindó su apoyo incondicional en el recorrido de este proyecto, así como sus consejos y recomendaciones. De la misma forma, a la Universidad Industrial de Santander por haber sido el lugar en donde nos formamos profesionalmente, otorgándonos los conocimientos necesarios para llevar a cabo este trabajo de grado. Finalmente, a la empresa AC Ingeniería Virtual y a la red de Tecnoparque por permitirnos trabajar con ellos.

Tabla de Contenido

		Pág.
	Introducción	15
1	Objetivos.....	17
1.1	Objetivo general.....	17
1.2	Objetivos específicos	17
2	Marco Conceptual.....	18
2.1	Filtración.....	18
2.2	Filtro autolimpiante.....	18
2.3	Energía hidráulica	19
2.4	Autolimpieza en filtros	19
2.5	Aplicaciones.....	19
2.6	Niveles de madurez tecnológica	20
3	Metodología	21
3.1	Determinar las principales variables operativas y de diseño de la tecnología de filtro autolimpiante de mezclas líquido-sólido con energía hidráulica en su autolimpieza para cumplir el objetivo 1. 21	
3.1.1	Identificación y recopilación de información sobre prototipos de filtración.....	22
3.1.2	Identificación y selección de variables operativas.....	22
3.1.3	Detectar variables relevantes de diseño en el filtro autolimpiante	22
3.2	Desarrollar alternativa preliminar de diseño de filtro autolimpiante usando software de diseño asistido por ordenador que permita desarrollar prototipo en impresión 3D para cumplir el objetivo 2.....	23

3.2.1	Información de diseño del prototipo base del filtro autolimpiante	23
3.2.2	Montaje del proceso para las pruebas iniciales del filtro autolimpiante	23
3.2.3	Hallazgos del prototipo inicial	24
3.2.4	Propuesta de alternativa de diseño preliminar del filtro autolimpiante	24
3.2.5	Impresión 3D de la propuesta diseñada.	25
3.3	Comparar alternativa de filtros autolimpiantes existentes en el mercado respecto a la tecnología de filtro autolimpiante desarrollada, para definir alternativas de mejora en el proceso o en el equipo para cumplir el objetivo 3.....	25
3.3.1	Recopilación de información sobre diseños de filtros en el mercado.....	25
3.3.2	Comparación de tecnología de filtro autolimpiante mediante variables de diseño ..	25
3.3.3	Alternativas de mejora en el equipo.....	26
4	Resultados y Análisis	26
4.1	Principales variables operativas y de diseño de la tecnología de filtro autolimpiante como respuesta del objetivo 1	26
4.1.1	Información sobre prototipos de filtración	26
4.1.2	VARIABLES OPERATIVAS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN	27
4.1.3	VARIABLES RELEVANTES DE DISEÑO EN EL FILTRO AUTOLIMPIANTE	30
4.2	Propuesta de alternativa preliminar de diseño de filtro autolimpiante como respuesta del objetivo 2.....	31
4.2.1	Diseño inicial del prototipo base del filtro autolimpiante.....	31
4.2.2	Montaje para las pruebas iniciales del filtro autolimpiante	34
4.2.3	Modificaciones propuestas al prototipo inicial	35

4.2.4	Información de la propuesta de alternativa de diseño preliminar del filtro autolimpiante.....	37
4.2.5	Impresión 3D de la propuesta diseñada	43
4.3	Comparar alternativa de filtros autolimpiantes en el mercado con la tecnología de filtro autolimpiante desarrollada, para definir alternativas de mejora en el proceso o en el equipo como respuesta al objetivo 3.....	45
4.3.1	Recopilación de información sobre diseños de filtros en el mercado.....	45
4.3.2	Comparación de tecnología de filtro autolimpiante mediante variables de diseño ..	47
4.3.3	Alternativas de mejora en el equipo.....	50
5	Conclusiones	52
6	Recomendaciones	54
	Referencias Bibliográficas	55
	Apéndices.....	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Lista de materiales para el montaje del proceso</i>	23
Tabla 2 <i>VARIABLES OPERATIVAS EN FILTROS AUTOLIMPIANTES</i>	28
Tabla 3 <i>VARIABLES DE DISEÑO EN FILTROS AUTOLIMPIANTES</i>	30
Tabla 4 <i>Planos técnicos filtro autolimpiante</i>	33
Tabla 5 <i>Comparación de materiales en impresión 3D</i>	36
Tabla 6 <i>Especificación de diámetro y espesor para recipientes a presión</i>	39
Tabla 7 <i>Tipos de filtros en el mercado</i>	46
Tabla 8 <i>Filtros en el mercado en comparación de la tecnología de filtro autolimpiante</i>	46
Tabla 9 <i>Cuadro comparativo entre los filtros autolimpiantes en el mercado</i>	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Escala de madurez tecnológica de COLCIENCIAS</i>	20
Figura 2 <i>Diagrama metodológico</i>	21
Figura 3 <i>Despiece del filtro</i>	33
Figura 4 <i>Prototipo base de filtro autolimpiante</i>	33
Figura 5 <i>Diagrama del proceso de pruebas iniciales</i>	34
Figura 6 <i>Plano técnico propuesta carcasa inferior</i>	38
Figura 7 <i>Plano técnico propuesta carcasa superior</i>	38
Figura 8 <i>Plano técnico propuesta raspador</i>	40
Figura 9 <i>Malla del filtro autolimpiante inicial</i>	41
Figura 10 <i>Malla modificada</i>	41
Figura 11 <i>Plano técnico propuesto malla filtrante</i>	41
Figura 12 <i>Plano técnico propuesta turbina</i>	42
Figura 13 <i>Piezas del prototipo preliminar del filtro autolimpiante</i>	43
Figura 14 <i>Piezas del filtro autolimpiante impresas en 3D</i>	44
Figura 15 <i>Prototipo preliminar del filtro autolimpiante</i>	44
Figura 16 <i>Propuesta de turbina Pelton</i>	51

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Niveles de Madurez de la Tecnología- Colciencias	66
Apéndice B. Plano técnico carcasa inferior	67
Apéndice C. Plano técnico carcasa superior	68
Apéndice D. Plano técnico raspador	69
Apéndice E. Plano técnico malla filtrante.....	70
Apéndice F. Especificaciones del rodamiento del filtro autolimpiante	71
Apéndice G. Plano técnico turbina	72
Apéndice H. Ficha técnica bomba centrífuga.....	73
Apéndice I. Partes de la bomba centrífuga	74
Apéndice J. Plano técnico propuesta carcasa inferior.....	75
Apéndice K. Plano técnico propuesta carcasa superior	76
Apéndice L. Plano técnico propuesta raspador.....	77
Apéndice M. Plano técnico propuesta malla filtrante	78
Apéndice N. Plano técnico propuesta turbina.....	79
Apéndice O. Filtro autolimpiante con rascador interno de la empresa Hanke Filter.....	80
Apéndice P. Especificaciones de diseño del filtro autolimpiante Hanke Filter	80
Apéndice Q. Diseño del filtro autolimpiante FM-4000	81
Apéndice R. Especificaciones de diseño del filtro autolimpiante FMA-4003.....	81
Apéndice S. Diseño del filtro autolimpiante Mini sigma	82
Apéndice T. Especificaciones de diseño de filtro autolimpiante mini sigma 4”	82
Apéndice U. Diseño de los modelos MCFM de Amiad Water Systems	83

Apéndice V. Especificaciones de diseño de los modelos MCFM de filtro autolimpiante 84

Glosario

Afluente: fluido que ingresa a un sistema de filtración para ser tratado o procesado.

Aguas superficiales: cuerpos de agua ubicados sobre la superficie terrestre, como ríos, lagos o embalses.

Balasto: material granular de diámetro de partícula entre 40 y 50 mm, como grava o piedra triturada, usado para estabilizar estructuras o filtrar agua.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering): tecnología de fabricación aditiva que utiliza un láser para sinterizar polvo metálico de manera selectiva y capa por capa, creando piezas metálicas precisas en impresión 3D.

Efluente: fluido que sale de un sistema de filtración tras haber sido procesado o tratado.

FDM (Fused Deposition Modeling): tecnología de impresión 3D que deposita filamento plástico fundido capa por capa para fabricar objetos.

Hidrofobicidad: propiedad de los materiales que les permite repeler el agua al reducir la adhesión entre sus superficies y el líquido.

PLA (Ácido poliláctico): plástico biodegradable derivado de recursos naturales como el almidón de maíz, utilizado en impresión 3D.

SLM (Selective Laser Melting): tecnología de impresión 3D que utiliza un láser de alta potencia para fundir y fusionar polvo metálico de forma precisa, produciendo piezas completamente densas.

Tracción: Capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a alargarlo o estirarlo.

Resumen

Título: Planteamiento de un diseño preliminar de un filtro autolimpiante con el uso de la energía hidráulica para la separación de mezclas líquido sólido para la empresa AC Ingeniería Virtual*

Autor: Victoria Vanessa Ruedas Racines y Dianys Vanessa Mercado Guerra**

Palabras Clave: Filtro autolimpiante, filtración, diseño.

Descripción: Este trabajo presenta el diseño preliminar de un filtro autolimpiante con energía hidráulica, desarrollado en conjunto con la empresa AC Ingeniería Virtual. La empresa, especializada en soluciones de ingeniería computacional y orientada a la modernización industrial, proporcionó el diseño inicial del filtro, que sirvió como base para este proyecto. El objetivo principal fue mejorar dicho prototipo para la separación de mezclas líquido-sólido.

Este trabajo de grado incluyó la identificación de variables operativas críticas, la implementación de pruebas experimentales al prototipo inicial y el desarrollo de mejoras para superar sus deficiencias. Entre las problemáticas detectadas destacaron fugas en el cuerpo del filtro, baja densidad en las piezas impresas en 3D, un raspador ineficiente y la limitada capacidad de la bomba. Las modificaciones realizadas abarcaron el incremento en la densidad de impresión y el rediseño de componentes como el raspador y la turbina. Además, se ajustaron parámetros clave como el tamaño de los poros en la malla filtrante y el diseño del cuerpo del filtro para corregir la funcionalidad del sistema.

Se concluye, las variables operativas y de diseño importantes que se deben tener en cuenta en la tecnología de filtro autolimpiante. Así mismo, se propone un posible diseño preliminar que debe continuar su proceso en función de los niveles de madurez tecnológica para ser evaluado y estudiar su funcionalidad para determinar si puede ser competitivo en el mercado. Finalmente, se hace una comparación entre los filtros autolimpiantes existentes y su diseño que permitieron proponer futuras modificaciones, incluyendo pruebas controladas adicionales y el empleo de materiales más adecuados como el acero inoxidable, para mejorar la resistencia y durabilidad del filtro.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Freddy Augusto Avellaneda, Doctor en Ingeniería Química. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Approach for a preliminary design of a self-cleaning filter with the use of hydraulic energy for the separation of solid-liquid mixtures for the company AC Ingeniería Virtual*

Author(s): Victoria Vanessa Ruedas Racines y Dianys Vanessa Mercado Guerra**

Key Words: Self-cleaning filter, filtration, design.

Description: This work presents the preliminary design of a self-cleaning filter powered by hydraulic energy, developed in team with the company AC Ingeniería Virtual. The company, specialized in computational engineering solutions and focused on industrial modernization, provided the initial filter design, which served as the foundation for this project. The main objective was to improve this prototype for the separation of liquid-solid mixtures.

This degree included identifying critical operational variables, conducting experimental tests on the initial prototype, and developing improvements to address its shortcomings. Key issues identified included leaks in the filter body, low density in 3D-printed components, an inefficient scraper, and the limited capacity of the pump. The modifications involved increasing the printing density and redesigning components such as the scraper and turbine to ensure efficient performance, and adjusting key parameters such as the pore size of the filtering mesh and the filter body design to enhance system functionality.

In conclusion, the operational and design variables essential for self-cleaning filter technology are highlighted. Furthermore, a preliminary design is proposed, which should advance through technological maturity stages to evaluate its functionality and determine its potential competitiveness in the market. Lastly, a comparison is drawn between existing self-cleaning filters and the proposed design, allowing for the recommendation of future modifications. These include conducting additional controlled tests and employing more suitable materials, such as stainless steel, to enhance the filter's resistance and durability.

* Degree Work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Freddy Augusto Avellaneda, PhD in Chemical Engineering. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, PhD Chemical Engineering.

Introducción

Los filtros convencionales a medida que se contaminan, generan una caída de presión que obliga a los ventiladores o bombas a trabajar más intensamente para mantener el flujo del medio. Esto resulta en un aumento significativo del consumo energético. Por lo tanto, el monitoreo de la presión diferencial en los filtros es esencial para identificar cuándo deben ser reemplazados, evitando así un consumo excesivo de energía (Doria, 2023).

Una posible solución para mitigar este inconveniente es el uso de energía hidráulica para realizar el proceso de autolimpieza en los filtros. Sin embargo, se presentan desafíos técnicos significativos en el diseño dado que debe minimizar el consumo energético durante la operación y el proceso de limpieza, como es el caso de filtraciones con retrolavado a baja presión (James, 2024).

El filtro autolimpiante es una tecnología innovadora, económica, sostenible y segura que se adapta a las necesidades y facilita el proceso de filtrado al no detener su funcionamiento para su limpieza, lo que ahorra costos, tiempo, prolonga la vida útil del medio filtrante y permite manejar grandes volúmenes de fluidos teniendo la ventaja de aprovechar la energía del fluido para mover el sistema (Quiminet, 2011).

Los sistemas de filtros autolimpiantes pretenden ser parte de la solución a la excesiva contaminación de las fuentes hídricas que ha puesto en riesgo la salud humana y la de ecosistemas. Así mismo, la escasez de agua dulce que se ha agravado debido a la explosión demográfica, la industrialización y el cambio climático, factores que han provocado que esta sea una preocupación

ambiental clave (Murshed et al., 2018; Teodosiu et al., 2018). Las aguas residuales industriales son una de las principales causas de contaminación (Deblonde et al., 2011; Xu et al., 2020a, 2020b), por lo que es primordial su tratamiento para superar esta problemática ambiental (Saravanan et al., 2021).

AC Ingeniería Virtual es una empresa de ingeniería computacional especializada en la industria 4.0, dedicada a suplir las necesidades relacionadas con el entendimiento de equipos y procesos, así como el mejoramiento y optimización de procesos industriales, permitiendo la modernización de la industria. Es así como la empresa conecta el conocimiento desarrollado en I+D con su aplicación práctica en el sector industrial, por lo que la empresa creó un diseño base de un filtro autolimpiante que usa la energía hidráulica para lograr la separación de mezclas líquido- sólido (ACIV, s. f.).

Los filtros autolimpiantes han surgido como una solución innovadora al filtrado, por lo que en el presente trabajo se tiene un prototipo inicial de esta tecnología, por esto se plantea la siguiente pregunta ¿Es posible realizar modificaciones al prototipo del filtro autolimpiante que permita mejoras en su diseño? Esta investigación busca responder esta pregunta proponiendo un posible diseño preliminar de filtro autolimpiante.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Plantear un diseño preliminar de un filtro autolimpiante con el uso de la energía hidráulica para la separación de mezclas líquido sólido para la empresa AC Ingeniería Virtual.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar las principales variables operativas y de diseño de la tecnología de filtro autolimpiante de mezclas líquido-sólido que use energía hidráulica en su autolimpieza.
- Desarrollar alternativa preliminar de diseño de filtro autolimpiante usando software de diseño asistido por ordenador que permita desarrollar prototipo en impresión 3D.
- Comparar alternativa de filtros autolimpiantes existentes en el mercado respecto a la tecnología de filtro autolimpiante desarrollada, para definir alternativas de mejora en el proceso o en el equipo.

2 Marco Conceptual

La filtración es esencial en industrias como: alimentarias, petroquímicas, y tratamiento de agua residuales domésticas. Una tecnología innovadora son los filtros autolimpiantes, que han demostrado ser altamente eficientes en la separación de sólidos suspendidos (Vera, 2017). Este proyecto se desarrolló en base a los niveles de madurez tecnológica que permitió establecer su alcance en un entorno de laboratorio.

2.1 Filtración

La filtración es una operación unitaria que consiste en la separación de partículas sólidas insolubles presentes en una solución sólido-líquido. Esto se logra haciendo pasar la suspensión a través de una membrana porosa (filtrado), denominada medio filtrante, que retiene las partículas sólidas (torta) (Ibarz & Barbosa Cánovas, 2005).

2.2 Filtro autolimpiante

El filtrado autolimpiante es un tipo de filtración que elimina partículas y residuos del fluido sin necesidad de intervención manual, utilizan métodos como el retrolavado, raspado mecánico y descarga continua para eliminar los contaminantes atrapados (Brother Filtration, s. f.).

2.3 Energía hidráulica

La energía hidráulica es una fuente de energía renovable que se obtiene del movimiento del agua (Soria et al, 2008). En filtros autolimpiantes, esta energía se utiliza para impulsar mecanismos de limpieza automática sin necesidad de energías externas (Dolphin,2024).

2.4 Autolimpieza en filtros

La autolimpieza en filtros es la capacidad que tiene un sistema de filtración para eliminar automáticamente las partículas acumuladas en su superficie filtrante, sin necesidad de intervención manual. Asegurando una operación continua y eficiente, reduciendo tiempos de inactividad y costos de mantenimiento (Intellect, s.f.). El proceso se puede activar por tiempo o presión diferencial, al alcanzarse el umbral preestablecido, se inicia el ciclo (Euspray, s.f.), que puede involucrar método de retrolavado, que consiste en la inversión del flujo de agua a través de la superficie del filtro o en métodos mecánicos con raspadores o cepillos internos que recorren la superficie de la malla filtrante (Prescad, s.f.).

2.5 Aplicaciones

La solución tecnológica que brindan los filtros autolimpiantes permiten ser utilizados industrialmente en: alimentos, para la eliminación de partículas sólidas o para prevenir la aglomeración de ingredientes (Vidal Brotons et al.,2017), mantener la seguridad y pureza de los productos y prolongar su vida útil (Esquina, 2022); en petroquímica, para separar los sólidos en

suspensión presentes en las mezclas de crudo y gas extraídas de los pozos (Multindustrial, s.f.) y en aguas residuales domésticas, generadas a partir de las actividades diarias de las personas (Castañeda et al., 2013) que contienen componentes fisicoquímicos y biológicos alterados, inapropiadas para el consumo humano sin un tratamiento previo. Aunque están compuestas en su mayoría por agua 99.9 %, el 0,1% equivalen a sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, que presentan los mayores desafíos en su tratamiento y disposición (Diaz et al., 2012).

2.6 Niveles de madurez tecnológica

Los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL), permiten medir el avance de una tecnología desde sus primeras etapas de desarrollo, hasta su implementación en entornos reales o su comercialización (Salazar, 2023). Estos niveles se encuentran vinculados a las actividades de investigación, desarrollo e innovación (COLCIENCIAS, 2010). Además, destaca cómo el grado de innovación varía según el punto de partida: desde tecnologías incipientes (TRL 1-3), en desarrollo (TRL 4-7), hasta aquellas plenamente maduras y disponibles para su implementación (TRL 8-9) (Ibañez, 2014). En la figura 1 y en el apéndice A se pueden observar los niveles.

Figura 1

Escala de madurez tecnológica de COLCIENCIAS.

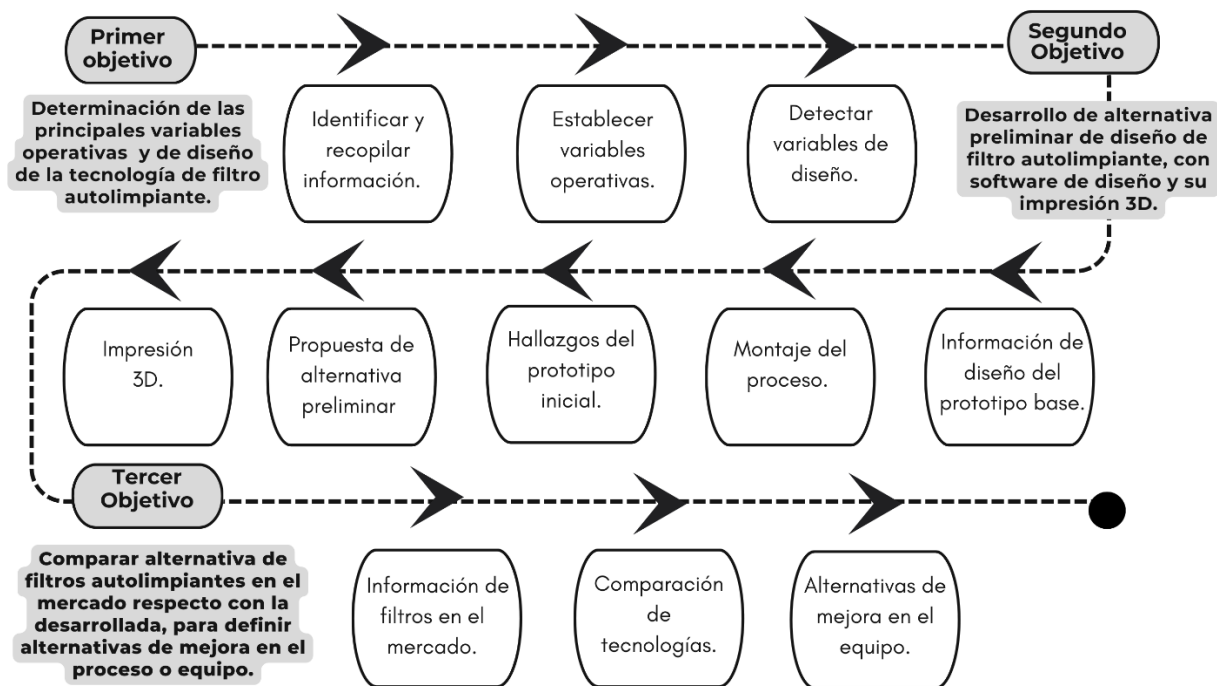


3 Metodología

A continuación, se presenta la metodología implementada para el desarrollo del trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial de acuerdo con los objetivos propuestos.

Figura 2

Diagrama metodológico



3.1 Determinar las principales variables operativas y de diseño de la tecnología de filtro autolimpiante de mezclas líquido-sólido con energía hidráulica en su autolimpieza para cumplir el objetivo 1.

3.1.1 Identificación y recopilación de información sobre prototipos de filtración

A través de la investigación en diversas fuentes bibliográficas, como artículos científicos y reportes técnicos, se recopiló información sobre distintos prototipos de filtración, sus fundamentos teóricos y aplicaciones.

3.1.2 Identificación y selección de variables operativas

Mediante las consultas realizadas en artículos como: “*Filtration efficiency of self-cleaning drum-shaped mesh continuous filter*” por Hongfei Tao et al.,2020; “*Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems*”, por Zong Quanli et al.,2019; y “*Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis*” por Zong Quanli et al.,2015. Se determinaron las principales variables operativas del prototipo experimental de filtro autolimpiante.

3.1.3 Detectar variables relevantes de diseño en el filtro autolimpiante

Siguiendo las recomendaciones de los profesionales de tecnoparque, se consideraron variables claves que influyen en el diseño adecuado del filtro autolimpiante. Inicialmente, se llevó a cabo el montaje del sistema, lo que permitió realizar pruebas preliminares para evaluar su funcionamiento. Durante este proceso, se identificaron errores y oportunidades de mejora, abordados mediante un trabajo colaborativo con los expertos del lugar. Esto aseguró que cada ajuste realizado estuviera respaldado por la experiencia técnica y práctica de los profesionales.

3.2 Desarrollar alternativa preliminar de diseño de filtro autolimpiante usando software de diseño asistido por ordenador que permita desarrollar prototipo en impresión 3D para cumplir el objetivo 2.

3.2.1 Información de diseño del prototipo base del filtro autolimpiante

El prototipo base de filtro autolimpiante se desarrolló en conjunto con la empresa en el que se realizaron modificaciones a lo largo de este proyecto, con el fin de solucionar las oportunidades de mejoras. Se desarrolló la investigación en función de los niveles de madurez tecnológica hasta TRL 4, en donde se llegó a realizar pruebas de laboratorio, así mismo, se realizó la impresión en 3D del filtro en ácido poliláctico.

3.2.2 Montaje del proceso para las pruebas iniciales del filtro autolimpiante

El diagrama del proceso del sistema para las pruebas preliminares se realizó con la colaboración del ingeniero mecánico de la empresa y disposición del espacio en tecnoparque. Inicialmente se realizaron reuniones para organizar y establecer los materiales necesarios para las conexiones del sistema (ver tabla 3), seguidamente se procedió en el montaje del sistema como se muestra en la sección de resultados 5.2.2.

Tabla 1

Lista de materiales para el montaje del proceso

Componente	Cantidad	Unidad
Tubería PVC 1"	3	metros
Válvulas de paso 1" roscada	3	unidad
Tubería PVC 1/2"	0.5	metro

Válvulas de paso 1/2" roscada	1	unidad
Uniones liso hembra-roscado macho 1"	10	unidad
Uniones rápidas liso hembra 1"	3	unidad
Codos a 90° liso hembra 1"	3	unidad
Pasamuro 1" para tanque plano	2	unidad
Tarro (plano) no cilíndrico máx.	1	unidad

3.2.3 Hallazgos del prototipo inicial

Durante las pruebas preliminares realizadas al primer prototipo del filtro autolimpiante, se identificaron varias deficiencias técnicas que afectaron su desempeño y funcionalidad. Entre los principales problemas encontrados se destacan la presencia de fugas en el cuerpo del filtro, baja densidad en la impresión, ensamblaje ineficiente del raspador y la baja potencia de la bomba de 1/4 HP resultó insuficiente para satisfacer las demandas operativas del sistema. Estos hallazgos motivaron la necesidad de proponer soluciones al diseño del filtro autolimpiante.

3.2.4 Propuesta de alternativa de diseño preliminar del filtro autolimpiante

A pesar de resolver los problemas previamente identificados, el filtro aún no cumplía con su función de filtrar y realizar la autolimpieza. Por ello, se propuso una alternativa de diseño preliminar del filtro autolimpiante que se puede revisar a detalle en la sección de resultados 5.2.4.

3.2.5 Impresión 3D de la propuesta diseñada.

Teniendo en cuenta las modificaciones realizadas al prototipo de filtro autolimpiante, se procedió a solicitar la impresión 3D en tecnoparque con el material disponible para los proyectos que es el PLA y considerando el tiempo de espera según la disponibilidad del lugar (un mes aproximadamente). El detalle de la impresión 3D se encuentra en la sección de resultados 5.2.5.

3.3 Comparar alternativa de filtros autolimpiantes existentes en el mercado respecto a la tecnología de filtro autolimpiante desarrollada, para definir alternativas de mejora en el proceso o en el equipo para cumplir el objetivo 3.

3.3.1 Recopilación de información sobre diseños de filtros en el mercado

Mediante la revisión de fuentes proporcionadas por las empresas Caperva Filtración, Oscar Entin Filtración Industrial S.A. y Carbotecnia especializadas en filtros se logró recopilar información de diseño a partir de sus catálogos.

3.3.2 Comparación de tecnología de filtro autolimpiante mediante variables de diseño

Empresas como Hanke Filter, STF Filters, Amiad Water Systems Ltd proveedoras de soluciones de filtración, diseñan filtros de malla, arena y anillas. Estas empresas tienen entre sus catálogos de venta filtros autolimpiantes como los modelos con rascador interno, FMA-4000, mini sigma 4" y MCFM respectivamente. De ellos se consultó parámetros de diseño como el tipo de material de la carcasa y malla, presión, área de filtración, caudal entre otros (ver tablas 7 y 8), así

mismo se realizó una comparación entre las ventajas y desventajas de cada uno incluyendo la tecnología desarrollada en el presente trabajo como se muestra en la sección de resultados 5.3.2.

3.3.3 Alternativas de mejora en el equipo

Para mejorar el diseño del filtro autolimpiante, se proponen cambios basados en tecnologías existentes. También se mencionan las dificultades que se presentaron en el desarrollo de la experimentación preliminar a escala de laboratorio del filtro autolimpiante y sus logros.

4 Resultados y Análisis

En esta sección se exponen los resultados obtenidos durante cada una de las etapas metodológicas planteadas, incluyendo las variables principales, el posible diseño preliminar del filtro autolimpiante, la comparación de esta tecnología con las existentes en el mercado y una alternativa adicional de diseño de turbina en el filtro autolimpiante.

4.1 Principales variables operativas y de diseño de la tecnología de filtro autolimpiante como respuesta del objetivo 1

4.1.1 Información sobre prototipos de filtración

Se identificaron tecnologías como el cribado, empleado para la remoción de sólidos en suspensión en sistemas como el prototipo de lavado de agregados de Morales (2016), que utiliza cribas ajustadas al tamaño de los granos. Andrea Blanco, destacó la eficiencia de cribas directas e indirectas, considerando tanto el tamaño como la forma y densidad de las partículas. Además, la

revista científica de la UCSA (2022) en su artículo “*Sustitución de filtros a cartucho por filtros de mallas en una planta de ósmosis inversa*” comparó filtros de cartucho y de malla, demostrando que los de malla ofrecen mejor rendimiento en el tratamiento de agua. Por otro lado, en “*Sistema de desarenación hidráulica mediante fuerza centrífuga, flujo continuo y autolavable*” realizado por la universidad piloto de Colombia, los desarenadores autolavables resultaron eficaces en la separación de partículas grandes en agua, mientras que los sedimentadores han mejorado su rendimiento con el uso de laminillas inclinadas y floculación con balasto. Finalmente, se destacaron filtros autolimpiantes como los de tipo Bernoulli y de malla con raspador, que son altamente eficientes para aplicaciones industriales con grandes caudales y altas concentraciones de sólidos.

4.1.2 Variables operativas en el proceso de filtración

En investigaciones previas, los científicos determinaron a partir del modelo físico diversas variables que influyen en el filtro como es el caso del artículo “*Filtration efficiency of self-cleaning drum-shaped mesh continuous filter*” que determinó los parámetros que afectan el rendimiento del filtro: el tamaño de los poros de la malla, el caudal, la concentración de sólidos suspendidos del afluente, la densidad del agua y el coeficiente de viscosidad dinámica del agua (Hongfei Tao et al.,2020).

Por otra parte, en el artículo de investigación “*Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems*”, consideró variables como caudal, condición de la arena y tiempo de filtración para determinar las condiciones adecuadas del filtro (Zong Quanli et al.,2019).

En “*Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis*” se evalúan los parámetros más importantes de la pérdida de

carga en un filtro de malla autolimpiante con una mezcla de agua de grifo y arena. Estos parámetros son: nivel de filtración, superficie total de filtración, caudal, concentración de arena total, tiempo de filtración, diámetro interior de las tuberías de entrada y salida, velocidad media de filtración, diámetro medio de la distribución del tamaño de las partículas de arena, viscosidad del agua y densidad del agua (Zong Quanli et al., 2015).

A continuación, se presentan las variables relevantes de la filtración en filtros autolimpiantes, sus efectos e interacciones entre ellas:

Tabla 2

Variables operativas en filtros autolimpiantes

Variable	¿Qué es?	Efecto de la variable	Interacciones con otras variables	Referencia
Tamaño de los poros de la malla	Especifica el tamaño de las aperturas en el material filtrante.	Define la capacidad de retención de partículas en la media filtrante. Un tamaño adecuado garantiza la captura de partículas no deseadas, mientras permite el paso del fluido.	Diámetro medio de la distribución del tamaño de las partículas de arena.	(Macrofilter, 2024)
Concentración de sólidos suspendidos del afluente	Sólidos no disueltos dispersos de manera fina en el fluido.	A medida que aumenta la concentración de sólidos en el afluente facilita la obstrucción del medio filtrante.	Presión y tamaño de los poros de la malla.	(Fabregas, 2024) (Galindo et al., 2016)
Superficie total de filtración	Superficie para llevar a cabo la separación de partículas.	Mayor superficie de filtración mejora la eficiencia para capturar partículas, lo que reduce la resistencia al flujo.	Presión y tamaño de los poros de la malla.	(Amiad Water Systems, s. f.)
Tiempo de filtración	Es el tiempo que demanda realizar la operación de filtración.	El tiempo de filtración puede afectar algunos parámetros de la filtración como: acumulación de sólidos, tipo de filtración, cambios en la presión, etc.	Presión, caudal, velocidad y viscosidad.	(Sanabria, 2015)

Velocidad media de filtración	Cantidad de fluido que pasa a través de un área de filtración en un tiempo determinado.	Una velocidad muy alta puede saturar rápidamente los filtros, reduciendo su capacidad de retención y afectando la calidad del efluente.	Tamaño poros de la malla, concentración de partículas y presión.	(RO AGUA, 2023) (Pérez, 2007)
Viscosidad	Indica el grado de oposición que tiene a las deformaciones.	Afecta la filtración de líquidos indirectamente pues depende a su vez de la temperatura.	Temperatura y pH.	(Sanabria, 2015) (Macrofilter, 2024)
Temperatura	Medida de la energía cinética promedio de las partículas en una sustancia, que se manifiesta como calor.	Temperaturas demasiado altas pueden provocar la degradación del material de la membrana, mientras que temperaturas demasiado bajas pueden reducir la eficiencia de la filtración.	Nivel de filtración.	(Macrofilter, 2024)
Caudal	El volumen de líquido que pasa a través del filtro por unidad de tiempo.	El caudal está en función del volumen del agua demandado y en función de esto será el tamaño de partículas mínimo que queda retenido en el filtro.	Presión.	(Medina & Miranda, 2007) (Aguilar, 2015)
Presión	Representa la “fuerza” con la que una bomba mueve un fluido.	El diferencial de presión en el sistema de filtración indica cuán lleno está el filtro. Ayuda a eliminar las partículas atrapadas, ya que la presión asegura que las partículas retenidas no ingresen al sistema durante el filtrado.	Caudal, velocidad media de filtración.	(Aguilar, 2015) (Macrofilter, 2024)
Nivel de filtración	Expresada como un porcentaje de partículas retenidas en relación con las que entran al sistema.	Un nivel de filtración más alto mejora la captura de partículas pequeñas, pero puede aumentar la resistencia al flujo y la pérdida de carga.	Tamaño de los poros de la malla.	(Redondo, 2018) (Macrofilter, 2024)
Densidad del agua	Masa del agua por unidad de volumen.	La densidad del agua es muy estable, ya que esta varía muy poco a los cambios de presión y temperatura.	Viscosidad, temperatura y presión.	(Medina & Miranda, 2007)
Diámetro medio de la distribución del tamaño de las partículas de arena	Tamaño promedio de las partículas de arena presentes en el líquido.	Determina qué tan fina o gruesa es la media filtrante y el tamaño de partículas que puede retener. Un tamaño de poro adecuado asegura que las partículas no deseadas sean capturadas, permitiendo que el fluido pase sin problemas.	Densidad y tamaño del poro de la malla.	(Medina & Miranda, 2007) (Macrofilter, 2024)

4.1.3 Variables relevantes de diseño en el filtro autolimpiante

Se identificaron las variables claves en el diseño mecánico de filtros autolimpiantes mediante la experimentación preliminar que inciden directamente en su funcionalidad y eficiencia. Entre estos, se destacan las características de las conexiones de entrada y salida, la selección del tipo de material, el diámetro y longitud del cuerpo del filtro, el diseño de las palas o aspas de la turbina, la configuración del medio filtrante, los elementos de sellos y juntas, así como el mecanismo de drenaje o purga. En la tabla 3 se evidencia esta investigación.

Tabla 3

Variables de diseño en filtros autolimpiantes

Variable	¿Qué es?	Efecto de la variable	Interacciones con otras variables	Referencia
Conexiones de entrada y salida	Son componentes que permiten la integración del filtro en un sistema de tratamiento de fluidos, como el agua.	Permite conexiones seguras que evitan fugas y la eliminación o adición de componentes al filtro.	Caudal, presión, temperatura.	(FunMask, s. f.)(Carbo tecnia, s. f.)
Material	Se refiere al tipo de material utilizado para fabricar el filtro, como acero, hierro, cerámica, etc.	Debe ser compatible el material con el fluido para evitar corrosión, degradación, etc. También debe ser resistente para soportar las condiciones de operación.	Presión, temperatura, caudal, tipo de fluido.	(Micronics, s.f.)
Diámetro y longitud del cuerpo del filtro	Son las medidas de ancho y largo del filtro.	A mayor diámetro y longitud mayor capacidad de procesamiento del filtro. Esto depende su aplicación.	Presión, temperatura, caudal.	(Prescad, 2024)
Diseño de palas de la turbina	Se trata de las variables importantes a tener	El ángulo de inclinación de las aspas influye en como el fluido interactúa con las aspas. La longitud determina el área efectiva	Presión, temperatura, caudal.	(García & Nava, 2014)

	en cuenta para que la turbina sea eficiente.	de contacto con el fluido y el perfil de las aspas, el grosor y forma permite mayor captura de energía del fluido.	
Diseño del medio filtrante	Son los parámetros que definen la necesidad que debe suplir el medio filtrante como mallas, cestas o cilindros, así como permitir el flujo sin obstrucciones.	El tamaño y características de las partículas a filtrar indican que el filtro puede capturar y retener eficazmente, el material debe ser compatible con el fluido filtrado y el caudal máximo de funcionamiento determina el tamaño de filtro necesario.	Presión, caudal y tamaño de partículas. (Air Quality De México, 2024)(Joy, 2024)
Diseño de sellos y juntas	El sellado en la filtración es fundamental para garantizar que no tengan fugas y se tenga una distribución uniforme de la presión.	La eficiencia del sellado y juntas dependen de la compatibilidad y la calidad tanto del material de la junta como de la superficie de presión de la junta de la carcasa, así como la precisión del sello.	Tipo del fluido y material del filtro. (AirProControl, s.f.)
Mecanismo de drenaje o purga	El drenaje y la purga en los filtros son esenciales para garantizar su eficiencia operativa y su vida útil.	El tipo de fluido, su viscosidad, densidad y composición química determina el material y el tipo de válvula a usar, el diámetro del drenaje debe ser suficiente para manejar el flujo sin restricciones.	Tipo de fluido, presión, temperatura, densidad y viscosidad. (Geosynthetics, s.f.)

4.2 Propuesta de alternativa preliminar de diseño de filtro autolimpiante como respuesta del objetivo 2.

4.2.1 Diseño inicial del prototipo base del filtro autolimpiante

El primer diseño del filtro se realizó con un software CAD para modelado mecánico 3D. Consta de cinco partes principales: dos carcasas, un raspador, una malla filtrante y una turbina como se muestra en la figura 4. La carcasa inferior tiene forma cilíndrica y se estrecha en un extremo para formar una conexión roscada que sirve como entrada del fluido. Su diámetro es de

100 mm, con un espesor de 12 mm, y cuenta con cuatro puntos de fijación para insertar tornillos de 4 mm de diámetro y 3 pulgadas de longitud (ver apéndice B). Estos tornillos permiten unir la carcasa inferior con la carcasa superior, que funciona como la salida del fluido. La carcasa superior tiene las mismas dimensiones que la inferior, pero incluye un orificio de 41,70 mm de diámetro, por donde se introduce el raspador (ver apéndice C). El raspador está integrado por una base cilíndrica y una superficie superior curva y plana, encargada de retirar los sólidos acumulados en la malla filtrante. Esta pieza se fija al filtro mediante cuatro tornillos golosos (ver apéndice D). Por otro lado, la malla filtrante tiene forma de cono truncado perforada con orificios de 0,4 mm de diámetro, lo que permite el paso del fluido mientras retiene los sólidos (ver apéndice E). Así mismo se tiene el rodamiento de bolas de contacto angular de referencia 7907 (ver apéndice F) para garantizar el movimiento suave y eficaz de la malla con la turbina. Finalmente, la turbina está formada por 16 palas curvas dispuestas radialmente desde un núcleo circular. Estas palas, con un perfil aerodinámico y un ángulo de inclinación de $49,64^\circ$, están diseñadas para interactuar de manera eficiente con el fluido (ver apéndice G). El diseño en Software CAD se hizo siguiendo un proceso sistemático: primero se modelaron los componentes individuales (cuerpo de entrada/salida, turbina, raspador y malla filtrante) utilizando herramientas como extrusión, revolución y cortes, definiendo dimensiones según las especificaciones funcionales. Luego, las piezas se ensamblaron mediante relaciones como coincidencias y concentricidad, asegurando su correcta interacción. Finalmente, se creó una vista explosionada para visualizar el montaje y se generaron planos técnicos con cotas y detalles para fabricación y ensamblaje. Como resultado del diseño se tienen los planos técnicos de las partes del filtro en la tabla 4 y su impresión en 3D en la figura 4.

Figura 3

Despiece del filtro

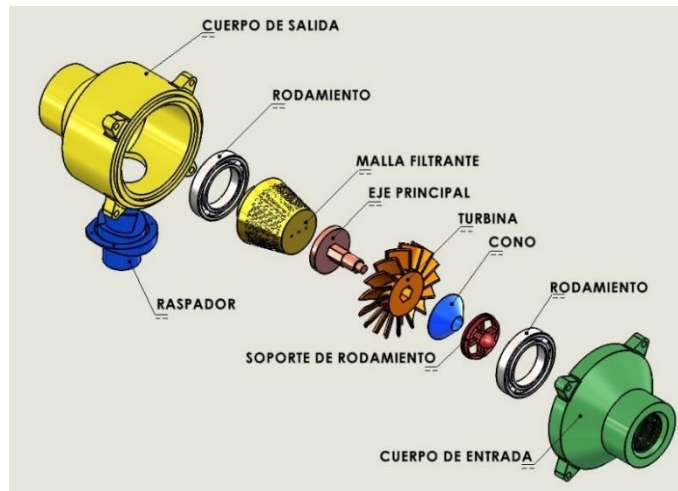


Tabla 4

Planos técnicos filtro autolimpiante

Carcasa inferior	Carcasa superior	Raspador	Malla	Turbina

Figura 4

Prototipo base de filtro autolimpiante



4.2.2 Montaje para las pruebas iniciales del filtro autolimpiante

Con la disposición de los materiales de la tabla 1 de la sección 4.2.2. Se procedió con la limpieza, corte y ensamblaje de las tuberías, las cuales fueron conectadas mediante un recipiente de almacenamiento de agua (1) sellando sus fugas con ayuda de un pasamuro de 1" de tanque plano (2). Esta tubería transporta el fluido con una válvula de paso de 1" (3) para mayor control a la bomba centrífuga de 1 Hp (4). Desde este punto se envía el fluido al filtro autolimpiante, con la opción de una tee de pvc (5) que funciona como un drenaje con válvula de paso de 1/2" (6) y una unión rápida de roscado de 1" (7) para liberar fluido de ser necesario en caso de superar la presión máxima del filtro. En el proceso se tiene un manómetro (8) para medir la presión diferencial que llega al filtro autolimpiante (9). Finalmente, se tiene la tubería que lleva el fluido nuevamente al tanque de almacenamiento donde inicia el proceso como se muestra a continuación.

Figura 5

Diagrama del proceso de pruebas iniciales



4.2.3 *Modificaciones propuestas al prototipo inicial*

Problemas identificados:

- Baja densidad de la impresión del filtro en 3D (20% de relleno)

La densidad insuficiente del material impreso afecta la resistencia estructural, especialmente en zonas sometidas a presiones internas y cargas dinámicas. Esto incrementa el riesgo de deformación y contribuye a la generación de puntos débiles en el cuerpo del filtro.

Propuesta: Según pruebas realizadas por Serrano et al. (2022) al incrementar la densidad de relleno del PLA aumenta la resistencia de compresión del material, por esto se aumenta el relleno de impresión del 20% al 70%, priorizando la resistencia mecánica y la integridad del filtro durante su operación.

- Fugas en el cuerpo del filtro debido a la porosidad del material

El material utilizado para la impresión 3D es el PLA (ácido poliláctico) debido a su disponibilidad en el lugar, su baja contracción en la impresión y su fácil manejo. Sin embargo, es el polímero con mayor porosidad en impresiones 3D, combinado con el bajo nivel de densidad en el relleno compromete el correcto funcionamiento del sistema bajo presión operativa.

Propuesta: al aumentar la densidad de la impresión se espera resolver el inconveniente, de no ser posible, se sugiere cambiar el material por uno de menor porosidad como explica la empresa Macrofilter (2024) mencionando entre los materiales más comunes polímeros como el polipropileno, nylon o el metal; este último fue recomendado por el ingeniero mecánico de la empresa, gracias a sus experiencias anteriores en otros proyectos en el que ha funcionado, pero resulta costoso. En la tabla 5 se hace la comparación de estos tres posibles materiales.

Tabla 5*Comparación de materiales en impresión 3D*

Material	Característica	Porosidad	Resistencia mecánica	Hidrofobicidad	Costo	Referencia
Polipropileno	Dúctil y duradero resistente a productos químicos soldable.	Propensa a la porosidad si no se controla la calidad del filamento o la impresión.	Baja a moderada: Menos resistente al impacto cargas altas.	No absorbe agua.	15-30 USD/kg (filamento para impresión FDM).	(Macrofilter, 2024)
Nylon	Resistente, duradero y ligero, parcialmente flexible, resistente al calor y a los impactos. Piezas resistentes al desgaste.	Menos propensa a porosidad debido a su buena fusión y densidad en impresión 3D.	Alta: Buena resistencia al impacto, a la tracción y flexión.	Absorbe hasta un 10 % de su peso en agua.	20-60 USD/kg (filamento para impresión FDM).	(Macrofilter, 2024)
Metal	Puede ser con titanio, acero inoxidable o aleaciones de níquel tenacidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión y la abrasión.	Alta densidad y baja porosidad debido a procesos como SLM o DMLS.	Muy alta: Soporta cargas altas, con excelente dureza y resistencia.	No absorbe agua.	100-500 USD/kg (polvo metálico para SLM/DMLS).	(Systemes, 2022)

- Diseño inadecuado del ensamble del raspador

La geometría del raspador no cumple con las dimensiones exactas del acoplamiento al cuerpo del filtro, generando pérdidas de presión localizadas y fugas a través de los puntos de unión.

Propuesta: rediseñar el mecanismo de ensamble mediante ajuste de tolerancias y uso de elementos de sellado como roscas, validado por los profesionales de tecnoparque, quienes con su conocimiento técnico resaltaron la importancia de un acoplamiento adecuado.

- Insuficiencia de los puntos de anclaje bajo cargas de apriete

Los puntos de anclaje del prototipo no resisten las cargas generadas por el apriete necesario para sellar adecuadamente el sistema, esto provoca deslizamiento de las carcasas del cuerpo del filtro, pérdida de ajuste y deformaciones.

Propuesta: redimensionar los puntos de anclaje incrementando el espesor del material y colocar un o'ring entre las carcasas del filtro como lo destaca el manual Parker O-Ring ya que reducen las cargas requeridas para un sellado efectivo, ejemplo de esto se encuentran las empresas Eaton Filtration y Amiad Water Systems

- Baja capacidad de la bomba centrífuga (1/4 HP)

La potencia de la bomba no es suficiente, esto limita el caudal y la presión necesaria para un funcionamiento efectivo del filtro afectando el desempeño general del sistema.

Propuesta: obtener una bomba con mayor capacidad hidráulica (1HP), como sugiere Franco O & Pedraza W, (2019) que, en sistemas de filtración, es preferible optar por bombas con mayor capacidad para garantizar el caudal y presión necesarios. (El modelo es una bomba centrífuga tipo caracol modelo EE 1.5 10-1 con referencia 1A0083 de la empresa Barnes de Colombia S.A. por recurso disponible de la empresa para proyectos. La ficha técnica se puede ver en el apéndice H e I).

4.2.4 Información de la propuesta de alternativa de diseño preliminar del filtro autolimpiante

En el diseño del cuerpo del filtro, se definieron valores específicos de espesor y diámetro, cumpliendo con las especificaciones propuestas por Sinnott y Towler (2012), quienes clasifican los recipientes a presión según la relación entre espesor y diámetro. Según estos autores, si dicha

relación es menor a 1:10, el recipiente se considera de pared delgada, mientras que, si es mayor, se clasifica como de pared gruesa. En este caso, dado que el filtro opera a altas presiones, se diseñó como un recipiente de pared gruesa, con una relación espesor/diámetro de 1,6:15,9 (ver figura 6 y 7 o en detalle en el apéndice J y K).

Adicionalmente, el diseño cumple con el espesor mínimo necesario para garantizar que el recipiente sea lo suficientemente rígido para soportar su propio peso y cualquier carga adicional, de acuerdo con los lineamientos de Sinnott y Towler (2012), como se muestra en la tabla 6. Para este prototipo, el diámetro es de 0,159 m y el espesor de 16 mm (ver figura 6 y 7 o en detalle en el apéndice J y K), lo que confirma que se trata de un recipiente rígido.

Figura 6

Plano técnico propuesta carcasa inferior

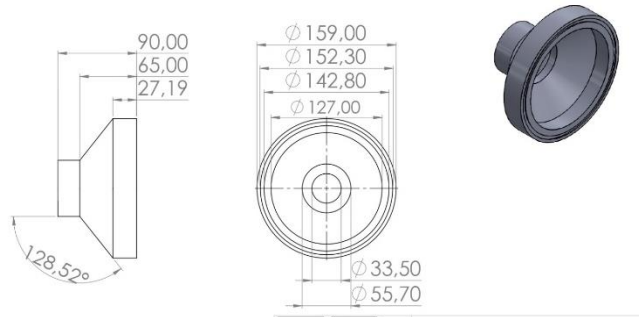


Figura 7

Plano técnico propuesta carcasa superior

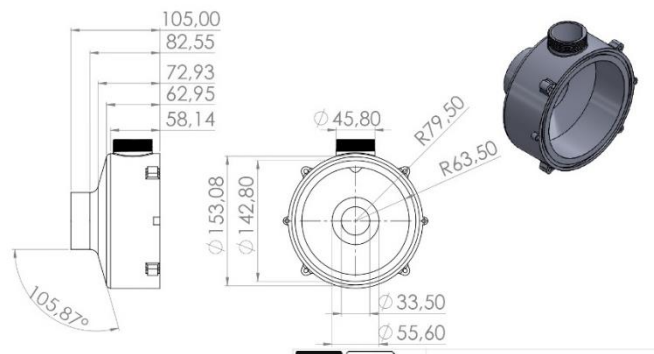


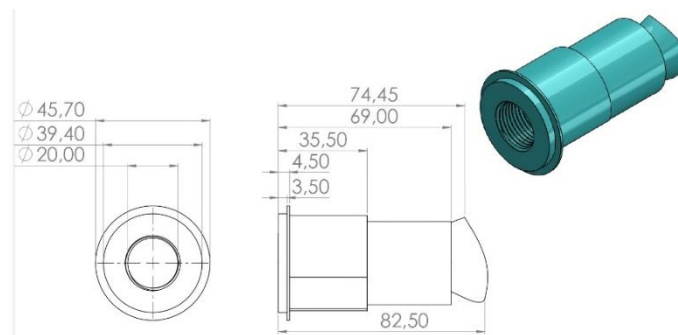
Tabla 6*Especificación de diámetro y espesor para recipientes a presión*

Diámetro del recipiente (m)	Espesor mínimo (mm)
1	5
1 a 2	7
2 a 2,5	9
2,5 a 3,0	10
3,0 a 3,5	12

Nota: Adaptado de Sinnott y Tower

El raspador en el filtro autolimpiante se pensó para la eliminación eficiente de sólidos suspendidos que sean acumulados en la malla del filtro. Existen cuatro tipos principales de raspadores utilizados en filtros autolimpiantes: los internos y externos, que eliminan impurezas de la superficie interna o externa de la malla mediante un raspador rotativo motorizado, utilizado para la filtración en líquidos de viscosidad baja a media y líquidos de alta viscosidad respectivamente; el de cepillo, diseñado para limpiar líquidos de baja viscosidad a través de un cepillo rotatorio; y el de cilindro, que emplea un movimiento vertical accionado por aire para manejar líquidos de viscosidad media y alta (JX Filtration, s.f.).

El diseño del raspador mecánico para el prototipo del filtro autolimpiante del proyecto clasifica como interno, a parte su diseño convexo ofrece una mejor distribución de presión y reduce el riesgo de daños en la superficie de la malla, el problema del diseño del raspador radicó en el ensamble con el cuerpo del filtro debido a sus cuatro puntos, que comprometían el material del filtro en impresión 3D y producía fugas, es por ello que se realizó el cambio de estos puntos a un ensamble con rosca NPT hembra de 1" ya que permite la facilidad del sellado entre el raspador y la carcasa, reduciendo las fugas (ver apéndice L).

Figura 8*Plano técnico propuesta raspador*

El medio filtrante es una malla de 40 mesh (diámetro de poro de 0,4mm) impresa en 3D con resina por su necesidad de ser una pieza con acabados precisos y superficie lisa como se puede ver en la figura 9. Sin embargo, esta característica de poro del filtro propuesto por la empresa puede generar una mayor resistencia al paso del flujo, lo que provoca un aumento en la pérdida de presión dentro del sistema. Como consecuencia, se podría requerir una bomba más potente que garantice el caudal operativo mínimo (Siddiqui et al., 2016).

Esta propiedad de diseño junto a las mencionadas en la sección 4.2.3, afectaron la función principal de la turbina. Por esta razón se propone el diseño de la malla con un diámetro de poro de 1,5mm (aproximadamente mesh 13) lo que permitirá reducir la resistencia al flujo para que pase con mayor facilidad y una menor pérdida de presión mejorando la eficiencia energética al requerir menos potencia de bombeo. Todo esto bajo el supuesto que el filtro está pensado para retener partículas de gran tamaño como tratamientos preliminares de aguas residuales. Esta modificación se puede observar en la figura 9 y 10 (el detalle del plano se encuentra la figura 11 y el apéndice M).

Figura 9

Malla del filtro autolimpiante inicial



Figura 10

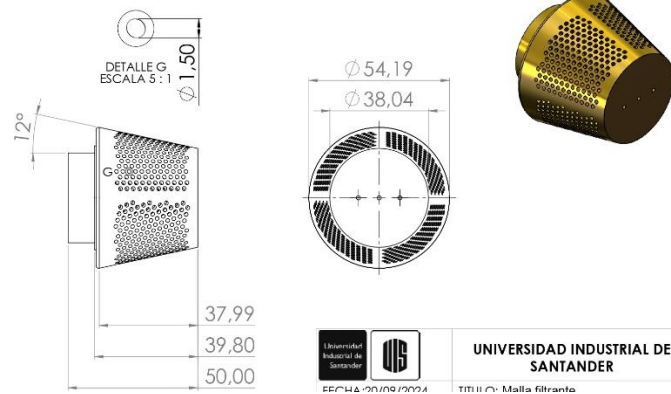
Malla modificada



Nota: Material de impresión en PLA por disposición de tecnoparque.

Figura 11

Plano técnico propuesto malla filtrante



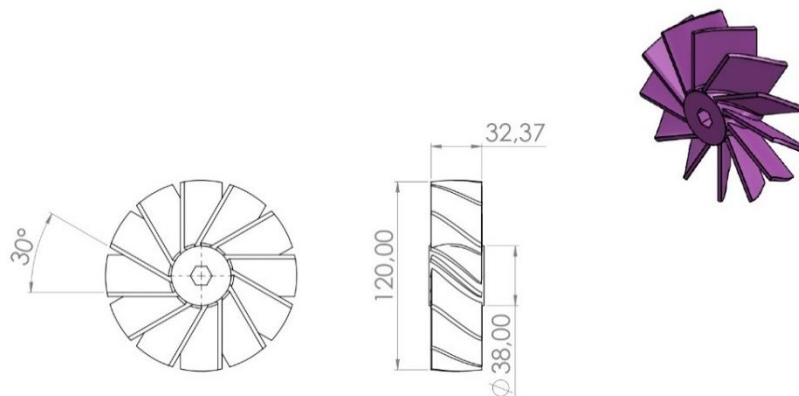
La turbina utilizada en este diseño es de tipo Pelton, que transforma la energía potencial del agua en energía cinética mediante un flujo que impacta sobre sus palas (Oo et al., 2019). Este tipo de turbina es adecuada para saltos hidráulicos elevados, que van desde 300 hasta 1400 m, y para caudales inferiores a $50 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que permite alcanzar mayores velocidades (Enel Green Power s. f.).

En cuanto al número de palas, este debe ser suficiente para interceptar por completo el flujo de agua. Por ello, las turbinas Pelton suelen tener más de 15 palas (Oo et al., 2019). De igual forma, en una turbina hidráulica, el número de palas o cucharas es directamente proporcional al caudal (Fernández, s. f.), debido al poco flujo suministrado en las pruebas se llevó a reducir el número de palas a 12.

Respecto al ángulo de las aspas, según Marchegiani (2004), este debería oscilar entre 15° y 30° en la práctica. En el diseño propuesto, se estableció un ángulo de 30° , alineándose con lo señalado por el autor. Además, los álabes presentan una ligera curvatura que mejora la redirección del flujo, mejorando la transferencia de energía entre el fluido y la turbina. Esta distribución uniforme también favorece un flujo balanceado, minimizando las vibraciones y garantizando una operación más estable. Ver figura 12 o el detalle en el apéndice N.

Figura 12

Plano técnico propuesta turbina



4.2.5 *Impresión 3D de la propuesta diseñada*

El proceso de impresión 3D aplicado a la propuesta de alternativa de diseño del filtro autolimpiante se llevó a cabo mediante el Software de diseño asistido por computadora en el que se realizó el modelado de las piezas y ensamblajes en 3D y los planos en 2D basados en las modificaciones de resolución de los problemas detectados en el prototipo inicial, como se mencionaron en la sección 4.2.3. Este resultado se puede observar en la figura 13. La impresión como todas las realizadas en el presente trabajo se lograron por las instalaciones de tecnoparque y su ayuda gratuita. El material utilizado fue ácido poliláctico (PLA) con el ajuste de densidad de relleno al 70% por la experiencia que se tuvo en las primeras impresiones con menores densidad y los inconvenientes presentados, de esta manera se busca tener una mejor resistencia mecánica y durabilidad de las piezas. El resultado de las piezas impresas se muestra en la figura 14 y su ensamble en el filtro autolimpiante en la figura 15.

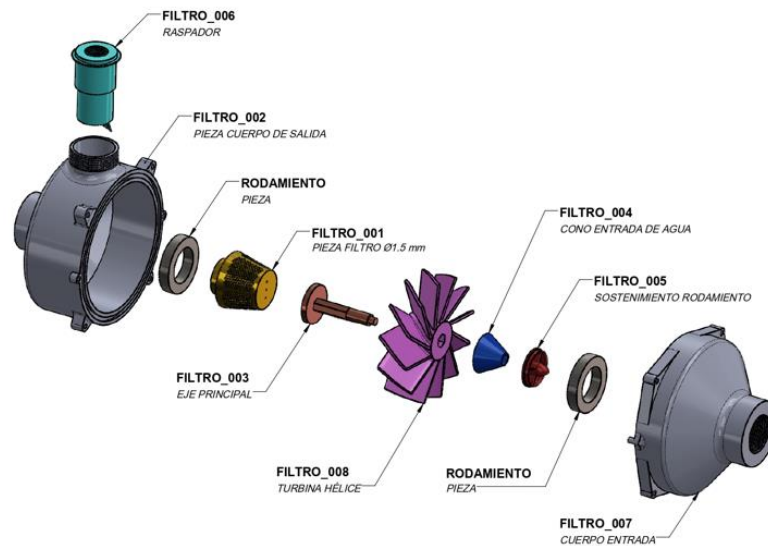
Figura 13

Piezas del prototipo preliminar del filtro autolimpiante



Figura 14

Piezas del filtro autolimpiante impresas en 3D

**Figura 15**

Prototipo preliminar del filtro autolimpiante



4.3 Comparar alternativa de filtros autolimpiantes en el mercado con la tecnología de filtro autolimpiante desarrollada, para definir alternativas de mejora en el proceso o en el equipo como respuesta al objetivo 3.

4.3.1 Recopilación de información sobre diseños de filtros en el mercado

La aplicación de filtros autolimpiantes en industrias como el tratamiento de agua, petroquímica y alimentos; por su alta eficiencia operativa de filtración que lo vuelve ideal para flujos continuos con sólidos suspendidos (Caperva Filtración, s.f.). Estos filtros son considerados filtros a presión. En el mercado se pueden encontrar dentro de esta clasificación los filtros de cartucho, discos y arena; lo que les permite competir con los filtros autolimpiantes. Los filtros de cartucho pueden filtrar partículas muy pequeñas (hasta 50 μm). Empresas como Oscar Entin Filtración Industrial tiene la gama de SFC de la serie Airpel donde la limpieza se lleva a cabo sin interrupciones del flujo mediante rotación de cuchillas rascadoras contra un elemento de filtro fijo. Los filtros de arena son adecuados para aplicaciones con altos niveles de sólidos suspendidos ($>10\text{mg/L}$) (Gutiérrez, 2014) como sistemas de riego y tratamiento de aguas residuales, tiene la ventaja de ser económico por su diseño relativamente sencillo respecto a los otros tipos de filtro. Los filtros de discos tienen el objetivo de retener sólidos suspendidos donde los discos tienen aberturas nominales que están entre 20 y 400 μm , siendo de 130 μm la ideal para riego o para filtrar aguas superficiales; dependiendo de su tamaño tiene conexiones entre 3/4" y 2". Su limpieza puede ser automática con retrolavado en un intervalo de tiempo o cuando la caída de presión del sistema alcanza un nivel determinado (Carbotecnia, 2023).

En la tabla 7 se puede visualizar los filtros y en la tabla 8 se puede observar un cuadro comparativo en cuanto a variables operativas y de diseño.

Tabla 7*Tipos de filtros en el mercado*




Tipos de filtros	Cartucho	Discos	Arena
Imagen			
Referencia	(Oscar Entin Filtración Industrial S.A., s.f.)	(Carbotecnia, 2023)	Pure Aqua Inc (s. f.)

Tabla 8*Filtros en el mercado en comparación de la tecnología de filtro autolimpiante*

Tipo de Filtro	Filtro Autolimpiante	Filtro de Cartucho	Filtro de Arena	Filtro de Discos
Tamaño de poros (μm)	50–200	0.5–100	10–100	20–400
Concentración de sólidos suspendidos (mg/L)	Hasta 2000	Hasta 500	Hasta 3000	Hasta 1500
Superficie de filtración (m^2)	0.2–2	0.05–0.5	1–20	0.2–1
Tiempo de filtración (min)	Operación continua	10–60	10–30	Operación continua
Caudal (m^3/h)	10–200	1–50	20–500	5–200
Presión de operación (bar)	2–10	1–5	1–3	2–6
Diámetro medio de partículas (μm)	10–50	1–20	20–200	50–150
Referencias	(Russell Finex, 2024)	(Caperva Filtración, s.f.)	(Oscar Entin Filtración Industrial S.A., s.f.)	(Amiad Water Systems Ltd., 2023)

4.3.2 Comparación de tecnología de filtro autolimpiante mediante variables de diseño

Empresas como Hanke Filter proveedora de soluciones de filtración, tiene entre sus procesos el filtro autolimpiante con rascador interior que elimina automáticamente partículas e impurezas de la superficie de la malla del filtro a través del raspado mecánico, de forma continua y con lavado a contracorriente. Esta tecnología tiene una filtración cerrada que evita fugas, así mismo emplean dos raspadores, uno de chapa y el otro de cepillo en acero inoxidable, lo que permite un gran efecto de raspado. El diseño de este filtro se encuentra en el apéndice O y sus especificaciones de diseño en el apéndice P.

La empresa STF Filters diseña filtros de malla, arena y anillas. Dentro de los filtros de malla, destacan los modelos autolimpiantes, como el FMA-4000, un filtro hidráulico de limpieza automática, que no requiere energía eléctrica, que opera en tres etapas: en la primera, un prefiltro elimina los sólidos más gruesos; en la segunda, la cámara de filtración, equipada con tecnología de boquillas, succiona las partículas más finas; y, en la tercera, el agua limpia se conduce por una tubería, mientras que los residuos son expulsados por otra salida (Levente-Owm, 2024). El esquema del diseño del filtro se puede ver en apéndice Q y las especificaciones del diseño se pueden observar en el apéndice R.

Por su parte, la empresa Amiad Water Systems Ltd. (2024), ofrece filtros autolimpiantes con diseños variados, entre ellos el modelo de la serie Mini Sigma. Este filtro cuenta con dos cámaras de filtración: la primera, equipada con una malla gruesa, recibe el agua cruda, y la segunda, con una malla fina, retiene las partículas restantes. A diferencia del FMA-4000, el filtro

Mini Sigma se caracteriza por su flexibilidad de instalación, adaptándose a las necesidades específicas de los compradores. El esquema del diseño del filtro y sus datos técnicos se pueden ver en el apéndice S y T.

Así como el filtro mini sigma, la empresa Amiad Water systems Ltd. (2023) también tiene MCFM Filters que son los filtros automáticos con un mecanismo opcional de autolimpieza continua para grandes caudales y gran cantidad de partículas. Los modelos MCFM soportan caudales de hasta 500 m³/h (2.200 gpm), en grados de filtración entre 3000 y 30 µm y diámetros de entrada y salida de 4"-10" (200-250 mm). De esta serie se tienen dos modelos: MCFM 8000 Y 12000, los cuales soportan caudales de hasta 250 m³/h (1,100 gpm) y 500 m³/h (2,200 gpm) respectivamente. El esquema del diseño de este filtro se puede ver en el apéndice U y las especificaciones técnicas en el apéndice V.

Mediante las especificaciones de diseño de los diferentes modelos de filtros autolimpiantes de las empresas mencionadas, se elaboró el siguiente cuadro comparativo que permite evaluar sus ventajas y desventajas frente a la tecnología de la propuesta de prototipo de filtro autolimpiante.

Tabla 9

Cuadro comparativo entre los filtros autolimpiantes en el mercado

Característica	Hanke Filter (Rascador interno)	STF Filters (FMA- 4000)	Amiad Mini Sigma	Amiad MCFM (8000/12000)	Diseño Propio
Caudal máximo	1.5–110 m ³ /h	110 m ³ /h	80 m ³ /h	90–375 m ³ /h	Falta verificar.
Presión	Máx. 1.6 MPa	2.5–10 bar	Máx. 8 bar	Máx. 10 bar	Falta verificar.
Temperatura máxima	200 °C	50 °C	60 °C	60 °C	Limitada por PLA

					(aprox. 60 °C).
Grado de filtración	25–3000 μm	1000 μm	50–500 μm	30–3000 μm	Falta verificar.
Material del filtro	Acero inoxidable (304/316L) o acero al carbono.	Acero (S-235-JR) y malla AISI-316.	Carcasa de RPA, mallas de acero 316L.	Acero al carbono con epóxico / inoxidable 316L.	PLA (menor resistencia mecánica y química).
Área de filtración	2200–5600 cm^2	2475 cm^2	2400 cm^2	4788–12129 cm^2	$\approx 1\text{cm}^2$
Autolimpieza	Rascadores mecánicos (acero) y contracorriente.	Boquillas de succión.	Cámaras separadas para autolimpieza.	Limpieza continua (opcional).	Raspador
Energía eléctrica	Requiere	No requiere	Requiere	Requiere	No requiere
Facilidad de instalación	Media	Baja	Alta	Media	Alta (por su diseño portátil)

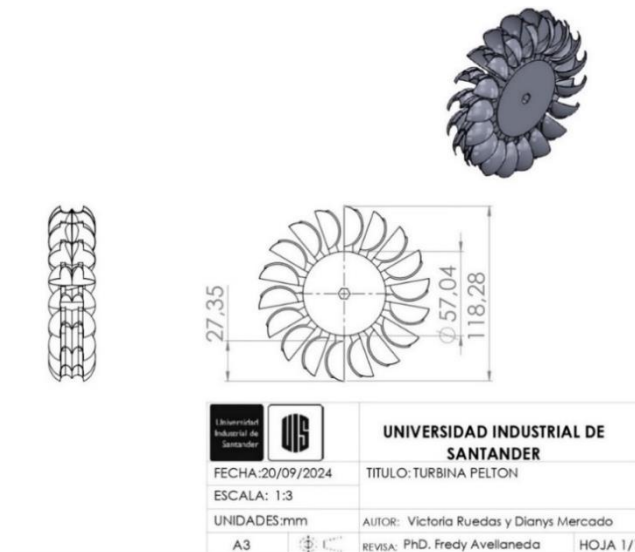
Teniendo en cuenta esta información se puede mencionar entre sus ventajas de la tecnología del prototipo de filtro autolimpiante, la facilidad de instalación por su tamaño, su diseño adaptable a diferentes tipos de instalaciones, ya sea de forma horizontal o vertical permitiendo su posible uso en una PTAR portátil y el posible ahorro de energía eléctrica a partir de la energía hidráulica. Sin embargo, entre las desventajas se encuentra el material del filtro, ya que no es resistente mecánicamente, su área de filtración es baja en comparación de los otros filtros, lo que hace sentido por el tamaño de la malla y por último no se lograron realizar las pruebas necesarias para calcular parámetros operativos fundamentales para evaluar su funcionamiento, dando como resultado que en el momento el prototipo del diseño del filtro preliminar no es competitivo frente a los otros filtros.

4.3.3 *Alternativas de mejora en el equipo*

Para mejorar el diseño del filtro autolimpiante, se proponen varias modificaciones basadas en tecnologías existentes. En el sistema de raspado, se sugiere emplear materiales resistentes como acero inoxidable con recubrimientos antifricción y añadir un raspador de cepillo para una limpieza adecuada como el filtro autolimpiante con rascador interno de la empresa Hanke Filter. Para una mayor eficiencia, se recomienda diseñar el filtro con cámaras separadas para prefiltración y filtración fina, como en los modelos FMA-4003 de STF Filters y Mini Sigma de Amiad Water Systems permitiendo manejar partículas de distintos tamaños y un mayor grado de filtración. El mejoramiento de entradas y salidas para reducir pérdidas de carga, el uso de mallas con revestimientos autolimpiantes y componentes reciclables consolidarían un diseño eficiente, adaptable y sostenible como los filtros autolimpiantes que se encuentran en el mercado.

Por otra parte, en las pruebas preliminares se evidenció poca interacción del fluido (agua) con las aspas de la turbina debido a su entrada al filtro, por esto es necesario rediseñar la entrada del líquido al sistema para generar un flujo en forma de vórtice que permita el movimiento eficaz y correcto de la turbina asegurando un movimiento continuo.

Adicionalmente, como una posible opción a implementar en futuros trabajos de investigación en función de los TRL, se diseñó otro modelo de turbina Pelton que cumple con las especificaciones que se mencionaron en la sección 5.2.4. A diferencia de la anterior, esta cuenta con 18 cucharas alrededor de un núcleo circular que están diseñadas para redirigir el flujo de agua, aprovechando el impulso y reduciendo al mínimo las pérdidas de energía, esta configuración también les permite minimizar la cavitación (Kimerius Aircraft, s. f.). El diseño fue realizado en el software CAD como se muestra en la figura 16.

Figura 16*Propuesta de turbina Pelton*

Finalmente, se sugiere realizar pruebas experimentales controladas, incorporando la medición de variables críticas como el caudal de alimentación, el diferencial de presión y la velocidad de rotación de la turbina. Estas mediciones permitirán evaluar el desempeño del sistema con mayor precisión.

5 Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica se determinaron las principales variables operativas y de diseño para la tecnología de filtro autolimpiante, como caudal, presión, diámetro del poro de la malla, material del filtro, diseño de las palas de la turbina, del medio filtrante, sellos y juntas, entre otras variables que se mencionan en el cuerpo del trabajo. De esta manera se proporcionó una base sólida para identificar las deficiencias evidenciadas en las pruebas preliminares realizadas al prototipo del filtro autolimpiante y al sistema propuesto, como limitaciones en el sistema de sellado, ineficiencia en el raspador y restricciones en el medio filtrante.

Por lo anterior, se desarrolló una propuesta de una posible alternativa del diseño preliminar del filtro autolimpiante que cuenta con mayor diámetro cumpliendo las especificaciones por Sinnott y Towler de relación/espesor 1,6:15,9 con una pared gruesa. Así mismo se rediseñó el raspador mecánico que encaje correctamente con el cuerpo del filtro eliminando ese punto de fuga, entre estos cambios se tiene el aumento del poro de la malla a mesh 13 y una turbina tipo Pelton con 12 aspas con un ángulo de 30° presentando una ligera curvatura para facilitar la distribución uniforme del fluido. Gracias a la experiencia adquirida a través del ensayo y error de las pruebas preliminares que se realizaron, así como las diferentes impresiones por daños en el proceso, se consideran que las partes principales del filtro autolimpiante y de mayor reto son el raspador y la turbina, por permitir que el filtro sea autolimpiante y use su propia energía. Estos son clave y con una complejidad que retan y obligan a diseñarlo con cautela y rigurosidad en cada detalle para permitir el correcto funcionamiento del filtro. Sin embargo, no se dispuso del tiempo suficiente y de los

recursos necesarios para evaluarlo, lo que se espera se pueda llevar a cabo en próximos proyectos de la empresa.

Finalmente, al evaluar las tecnologías de filtros autolimpiantes disponibles en el mercado y compararlas con el diseño preliminar desarrollado, se evidenció que este último aún no es competitivo. Además, carece de variables de diseño y operación calculadas que garanticen un desempeño seguro. Por lo tanto, es imprescindible continuar con pruebas experimentales hasta lograr que el prototipo funcione correctamente. Posteriormente, construirlo a escala piloto para evaluar su aplicación práctica.

6 Recomendaciones

- Material de fabricación:

Las pruebas experimentales iniciales demostraron que el material de impresión 3D PLA no es adecuado para la fabricación del filtro autolimpiante, ya que no soporta altas presiones. Se recomienda que, para futuros prototipos, todas las piezas sean fabricadas en acero inoxidable 316, conocido por su resistencia a la corrosión en ambientes salinos o ácidos, o en acero inoxidable dúplex, que además de ser resistente a la corrosión, es ideal para condiciones de alta presión.

- Simulación del sistema

Antes de realizar nuevas pruebas físicas, es fundamental simular todo el sistema considerando variables operativas como el caudal, la presión, la velocidad y el torque de la turbina. Estas simulaciones ayudarán a prever posibles fallos y asegurar el correcto diseño del filtro antes de su fabricación.

- Potencia de la bomba

La tecnología de filtro autolimpiante se basa en grandes caudales y presiones por lo que la bomba actual de 1HP de potencia tiene un caudal máximo de 95 gpm (21.57 m³/h) que podría no ser suficiente si se llevan a cabo todas las recomendaciones. Por lo que es necesario adquirir una bomba centrífuga de mayor potencia.

Referencias Bibliográficas

- ACIV. (s. f.). AC Ingeniería Virtual Industria 4.0. <https://www.acingeneriavirtual.com>
- AirProControl (s.f.). *Importancia del sellado y la superficie para el efecto de fuga en los filtros HEPA*. <https://www.airprocontrol.com/es/academia/informacion-tecnica/importancia-del-sellado-y-la-superficie-para-el-efecto-de-fuga-en-los-filtros-hepa/>
- Air Quality De México (2024). *La Importancia de los Medios Filtrantes Industriales*. <https://www.aqdemexico.com/la-importancia-de-los-medios-filtrantes-industriales/>
- Amiad Water Systems Ltd. (2023). *Filtro de mallas MCFM automático para uso industrial*. <https://es.amiad.com/products/mcfm-series/>
- Amiad Water Systems (s. f.). *Introducción a la filtración*. <http://ecologiayreuso.com.mx/descargas/AMIAD/INTRODUCCION-AL-MUNDO-DE-LA-FILTRACION.pdf>
- Amiad Water Systems Ltd. (2024). *Sistema de filtración Mini Sigma automático de mallas para riego*. <https://es.amiad.com/products/mini-sigma-series-irr/>
- Bhat, T.A., (2014). An analysis of demand and supply of water in India. *IISTE journal*. 4(11), 67. https://www.researchgate.net/profile/Tariq-Bhat-5/publication/334807513_An_Analysis_of_Demand_and_Supply_of_Water_in_India/links/5d41b8fda6fdcc370a711d23/An-Analysis-of-Demand-and-Supply-of-Water-in-India.pdf
- Blanco, E. A. (s/f). Bloque II– capítulo. clasificación, cribado. Universidad de Cantabria. 5-13. https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/9._clasificacion_cribado.pdf

Brother Filtration. (s. f.). *Understanding Self-Cleaning Filters and How They Work*.

<https://www.brotherfiltration.com/understanding-self-cleaning-filters-and-how-they-work/>

Caperva Filtración | *Filtros autolimpiantes* (s.f.). <https://filtration.caperva.com/equipos-de-filtracion/filtros-autolimpiantes/>

Carbotecnia (2023). *¿Qué es un filtro de discos? para filtrar agua*

<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtros-de-discos/que-son-los-filtros-de-discos/>

Carbotecnia (s. f.). *Conexiones rápidas*. <https://www.carbotecnia.info/producto/conexiones-rapidas-hydrofit-conector-rapido/>

Charry Nuñez, E., & López León, J. A. (2017). *Sistema de desarenación hidráulica mediante fuerza centrífuga, de flujo continuo y autolavable (DEFUCA)* [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]

<https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5753>.

Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 214(6), 442-448. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.08.002>

Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A. R., & Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Revista de Estudios Territoriales*. 14(1), 78-97.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894005>

Dolphin. (2024). *Automatic self-cleaning water filters in stainless steel - Heation*. Heation.

<https://heationab.com/es/articles/automatic-self-cleaning-water-filters-in-stainless-steel/>

- Doria, S. (2023). *Monitorización del filtro para la eficiencia energética*. Blog de WIKA.
<https://blog.wika.com/es/knowhow/monitorizacin-de-los-filtros-crucial-para-la-eficiencia-energetica-en-la-operatividad/>
- Eaton filtration. (s.f.). <https://www.lenntech.es/productos/eaton-filtration.htm>
- Enel Green Power. (s. f.). Turbina hidroeléctrica. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/turbina-hidroelectrica>
- Esquina, M. (2022). *Tipos de filtros en la industria alimentaria*. ATF - Alta Teconología De Filtración. <https://www.atfiltracion.es/2022/09/27/tipos-filtros-industria-alimentaria/>
- Euspray (s.f.). *Filtros autolimpiantes*. <https://www.euspray.com/es/productos/filtros-autolimpiantes/>
- Fabregas, J. (2024). Eliminación de sólidos en suspensión de aguas residuales.
Sigmadaf. <https://sigmadafclarifiers.com/eliminacion-de-solidos-suspendidos-totales-del-agua-residual/>
- Fernández Díez, P. (s. f.). *Turbinas hidráulicas*. Universidad de Cantabria.
https://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf
- Filtration, J. (s.f.). *Filtro autolimpiante rascador*. <https://jxfiltration.com/product/self-cleaning-filter/scrapper-self-cleaning-filter.html>
- Franco Rodríguez, O. S., Forero, P., & Andres, W. (2019). *Diseño de una máquina para el filtrado de aceite lubricante, contaminado*. [Trabajo de grado, Universidad de América]
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7556/1/4141759-2019-2-IM.pdf>
- FunMask (s. f.). *Conexiones para Filtración de Agua*. <https://funmask.es/blog/conexiones-para-filtros-de-agua-6753/>

- Galindo, A., Toncel, E., & Rincón, N. (2016). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Revista ION*. 29 (2), 39-50. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5983/6260>
- García, H., & Nava Mastache, A. (2014). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECCIONEDIMENSIONAMIENTODETURBINAS.pdf
- Geosynthetics (s.f.) *Filtración y Drenaje - TenCate Geosynthetics*. <https://www.tencategeo.us/es-la/solutions/drainage-and-filtration>
- Gutiérrez Guzmán, N., Valencia Granada, E., & Aragón Calderón, R. A. (2014). Eficiencia de remoción de DBO5 y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (coffea arabica). *Revista Colombia forestal*. 17(2), 151-159. <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423939663003.pdf>
- Hanke Filter (s. f.). *Scraper Self Cleaning Filter for viscosity Fluid Filtration*. <https://www.hankefilters.com/products/self-cleaning-filters/scraper-filter.html>
- Hongfei Tao, Yang Zhou, Wenxin Yang, Mahemujiang·Aihemaiti, Qiao Li, Youwei Jiang, & JianQun Wei. (2020). Filtration efficiency of self-cleaning drum-shaped mesh continuous filter. *Desalination and Water Treatment journal*. 208, 227-238 <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26459>
- Ibañez, J. (2014). Niveles de madurez de la tecnología [Technology readiness levels: TRLS]: Una introducción. *Revista de Economía Industrial*, 393, 165-171.

<https://www.mintur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomiaindustrial/393/notas.pdf>

Ibarz, A., & Barbosa Cánovas, G. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos (pp 271). Mundi-prensa.

https://books.google.com.co/books?id=daoSAQAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Intellect, M. R. (s.f.). *Market Research Intellect Market dynamics and precise studies at your fingertips*. Market Research Intellect. <https://www.marketresearchintellect.com/>

James, N. (2024). *Las 7 principales tendencias en filtros autolimpiantes. Informes de Mercado Verificados*. <https://www.verifiedmarketreports.com/es/blog/top-7-trends-in-self-cleaning-filters/>

Joy, A. T. (2024). *Cómo Dimensionar y Seleccionar un Filtro o Colador*. Tameson. <https://tameson.es/pages/dimensionar-seleccionar-filtro-colador>

Kimerius Aircraft (s. f.). *Diseño y construcción de una turbina Pelton*.

<https://www.kimerius.com/app/download/5780662673/Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+una+turbina+Pelton.pdf>

Levente-Owm. (2024). *Sistemas de filtración*. STF-Filters. <https://www.stf-filters.com/es/producto/fma-4000/>

Macrofilter. (2024). *Formas de Medición y Características de las Mallas Metálicas para la Industria*. <https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/formas-de-medicion-y-caracteristicas-de-las-mallas-metalicas-para-la->

industria/?srsltid=AfmBOopvE5HGFdiIxHt59IYyFaFAZpAH0pL8EzBhVePKM1WEzz
yBgfQQ

Macrofilter (2024). *Parámetros para la medición de filtración de fluidos*.

<https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/parametros-en-la-filtracion-de-liquididos/?srsltid=AfmBOooGLJjKGj5UjxDd4scge8gnfrXfF4yuOfnFbx8kB5SaXAk0nUyx>

Marchegiani, A. (2004). *Turbinas pelton*. Universidad Nacional del Comahue, pp-10.

<https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-tecnologica-nacional/mecanica/turbinas-pelton/6600174>

Micronics (s.f.). *Materiales de construcción y filtros prensa: Optimización del diseño de la prensa para sus necesidades de lodos*. <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/optimizing-press-designs-for-slurry-needs/>

Ministerio del Ambiente (2021). *Resolución 1256 de 2021*.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1256-de-2021/>

Ministerio del ambiente (2015). *Resolución 631 de 2015*.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Miranda Almeida, G. A., & Medina Rosero, J. S. (2007). *Diseño de una unidad de filtración de agua de formación de pozos petroleros* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/394/1/CD-0802.pdf>

- Monge Redondo, M. Á. (2018). Filtración (I): consideraciones previas sobre el agua. Iagua.
<https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/filtracion-riego-i-consideraciones-previas>
- Morales Alvarez, L. A. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo para lavado de agregados* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle].
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1110&context=ing_automatizacion
- Multindustrial (s.f.). *Filtro autolimpiante*. <https://multindustrial.com/app/productos/filtro-autolimpiante.php>
- Murshed, S.B., Kaluarachchi, J.J., (2018). Scarcity of fresh water resources in the Ganges Delta of Bangladesh. *Water Security journal*. 4 y 5, 8-18.
<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2018.11.002>
- Oo, T. Z., Nyi, N., & Khaing, C. C. (2019). Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW. *International Journal Of Scientific And Research Publications*. 9(7), 218-224.
<https://doi.org/10.29322/ijsrp.9.07.2019.p9131>
- Oscar Entin Filtración Industrial S.A. (s.f.) *Filtros autolimpiantes*.
<https://oscarentin.com/productos/filtros-autolimpiantes/>
- Parker Hannifin Corporation. (s.f.). *Parker O-Ring Handbook (ORD 5700)*.
<https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5700.pdf>
- Peréz, R. (2007). *Filtración a nivel piloto para depurar el efluente de reactor UASB que trata agua residual con lactosuero*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].

<https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10739/Filtracion%20a%20nivel%20piloto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Prescad (2024). *Cómo fabricamos nuestros filtros industriales:*

DISEÑO. <https://prescad.com/es/blog/como-fabricamos-nuestros-filtros-industriales-diseno/>

Prescad. (s.f.). *Filtros industriales autolimpiables Presmatic- Prescad.*

<https://prescad.com/es/filtros-industriales/presmatic/filtros-autolimpieza/>

Pure Aqua Inc (s. f.) ¿Cuál es el uso de filtros de arena? <https://es.pureaqua.com/blog/cual-es-el-uso-de-filtros-de-arena/>

QuimiNet (2011). *Funcionamiento y ventajas de los filtros autolimpiantes.*

<https://www.quiminet.com/articulos/funcionamiento-y-ventajas-de-los-filtros-autolimpiantes-55150.htm>

RO AGUA (2023). *¿Cuáles son los factores que afectan el funcionamiento del sistema de filtración de agua?* <https://www.roagua.com/es/news/what-are-the-factors-that-affect-the-operation-of-water-filtration-system/>

Russell Finex. (2024). Filtros autolimpiantes. <https://www.russellfinex.com/es/equipos-de-separacion/filtros-autolimpiantes/russell-eco-filter/>

Salazar, Ó. (2023). *¿Qué es la escala de madurez tecnológica (TRL) y para qué se usa?* Euro Funding. <https://euro-funding.com/es/blog/que-es-la-escala-de-madurez-tecnologica-trl/>

Sanabria, E. (2015). *Determinación del tiempo óptimo de un ciclo de filtración en un filtro prensa mediante modelamiento matemático* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional

del Centro del Perú].

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1200/6.%20TESIS%20DE%20DOCTORADO%202015%20-%20Elías%20Sanabria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sánchez, A. P., Hernández, R. A. G., González, F. E. W., Mosqueda, L. M., Zafra, L. C., &

Cortes, I. B. (2022). Sustitución de filtros a cartucho por filtros de mallas en una planta de ósmosis inversa. *Revista Científica de la UCSA*, 9(1), 57-71.

Saravanan, A., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P., &

Reshma, B. (2021b). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development.

Chemosphere journal. 280, 2. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>

Serrano-Cinchilla, L. ., Bustamante-Góez, L. ., & Villarraga-Ossa, J. A. (2022). Influencia de

la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA. *Revista UIS Ingenierías*, 21(2), 107–114. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2-2022009>

Siddiqui, M., Arif, A., & Bashmal, S. (2016). Permeability-Selectivity Analysis of

microfiltration and ultrafiltration membranes: effect of pore size and shape distribution and membrane stretching. *Membranes journal*, 6(3), 40.

<https://doi.org/10.3390/membranes6030040>

Sinnott, R., & Towler, G. (2012). *Diseño en Ingeniería Química* (5.a ed.). Reverté.

Systèmes, D. (2022). *SLS impresión 3D metal*. Dassault Systèmes.

<https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/sls-3d-printing-metal>

- Soria, E., Mosquera, P., & Ruesga, L. M. (2008). *Energía hidráulica*. Haya Comunicación.
https://www.energias-renovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/cuaderno_HIDRAULICA.pdf
- Teodosiu, C., Gilca, A.-F., Barjoveanu, G., Fiore, S., (2018). Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: a review on processes and environmental performances assessment. *Journal of Cleaner Production*. 197(1), 1210-1221.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>
- Vidal Brotons, D. J., Castelló Gómez, M. L., Gras Romero, M. L., Pérez Esteve, E., Barrera Puigdollers, M. C., & Betoret Valls, N. (2017). *Filtración convencional de mezclas de líquidos y sólidos*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83526/Castell%C3%B3Vidal%3BGras%20-%20Filtraci%C3%B3n%20convencional%20de%20mezclas%20de%20l%C3%ADquidos%20y%20s%C3%B3lidos.pdf?sequence=1>
- Xu, D., Lee, L.Y., Lim, F.Y., Lyu, Z., Zhu, H., Ong, S.L., Hu, J., (2020a). Water treatment residual: a critical review of its applications on pollutant removal from stormwater runoff and future perspectives. *Journal of Environmental Management*. 259, 1-2.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109649>
- Xu, X., Yang, Y., Wang, G., Zhang, S., Cheng, Z., Li, T., Yang, Z., Xian, J., Yang, Y., Zhou, W., (2020b). Removal of heavy metals from industrial sludge with new plantebased washing agents. *Chemosphere journal*. 246, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125816>

Zong Q, Liu Z, Liu H, Yang H (2019). Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems. *PLOS ONE journal*. 4(12),1.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226354>

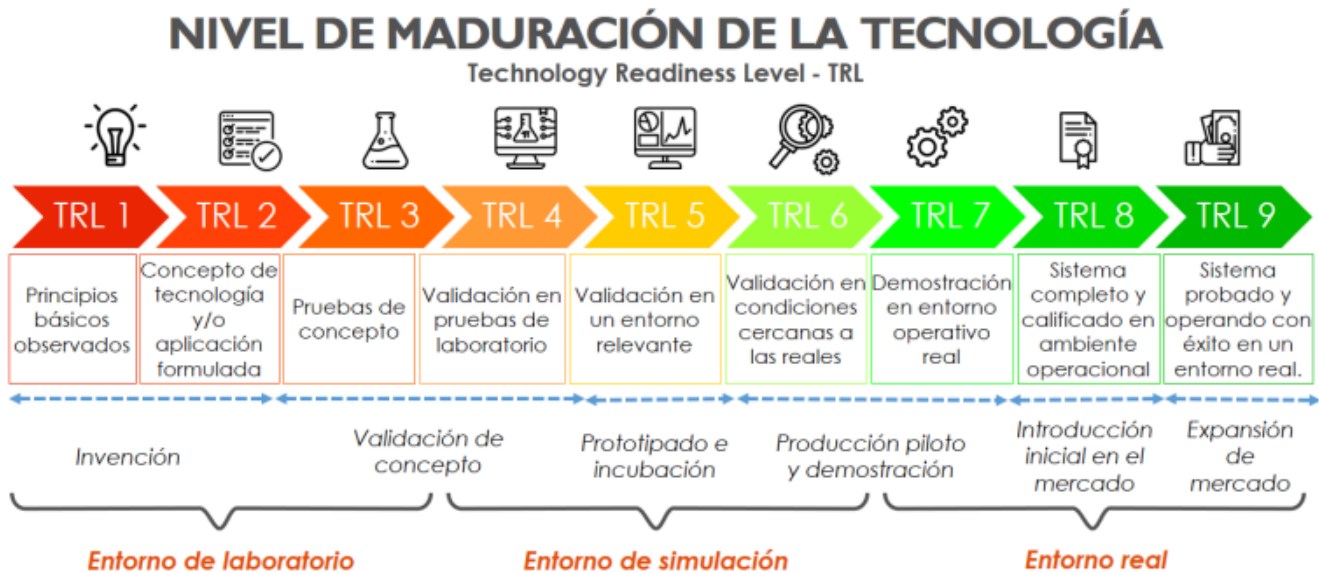
Zong, Q., Zheng, T., Liu, H., & Li, C. (2015). *Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. Biosystems Engineering, 133,* 116-127.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511015000392>

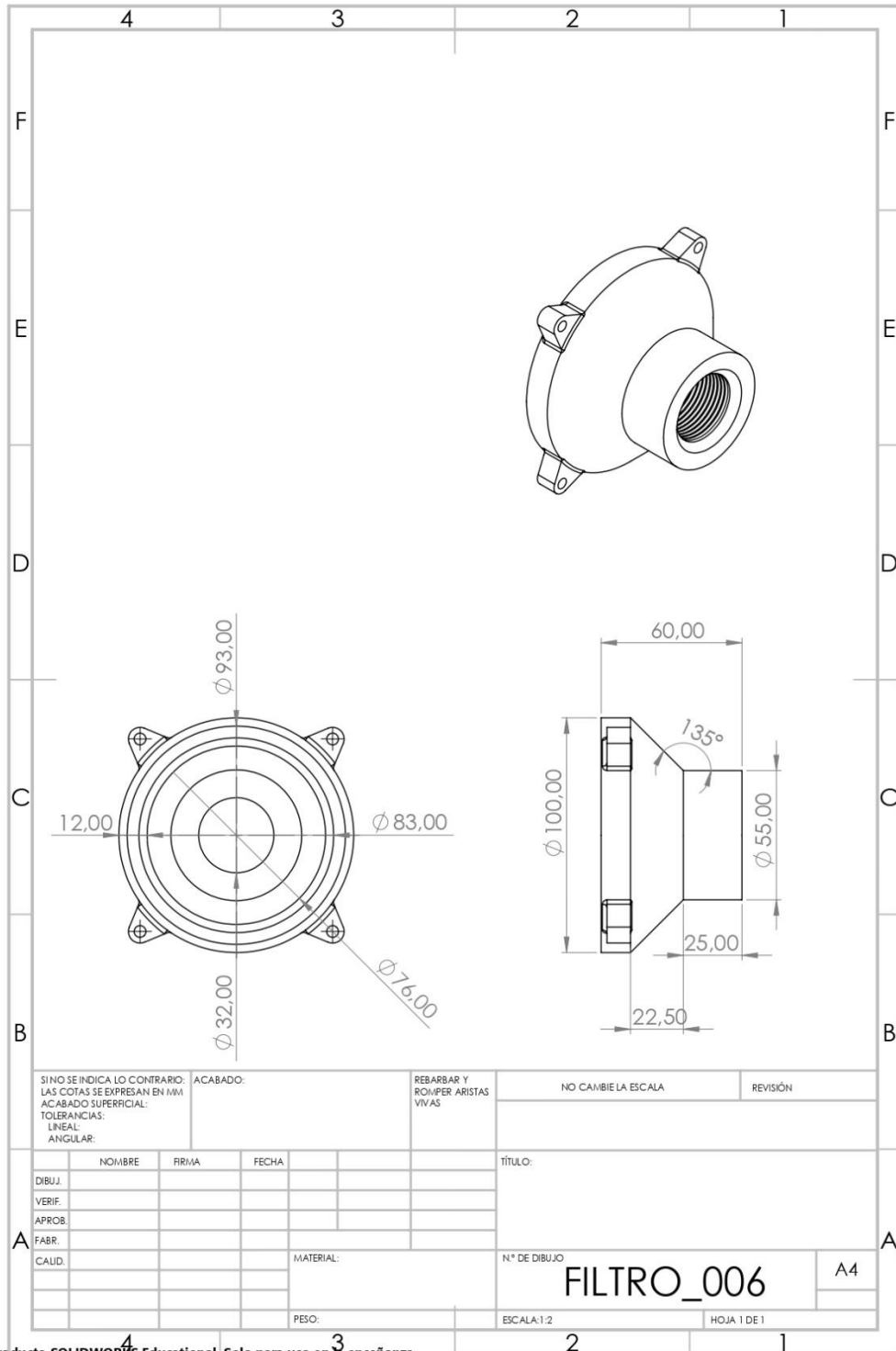
Apéndices

A continuación, se ejemplifica los niveles de madurez tecnológica a partir del documento de Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación N° 1602: Actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS, 2016).

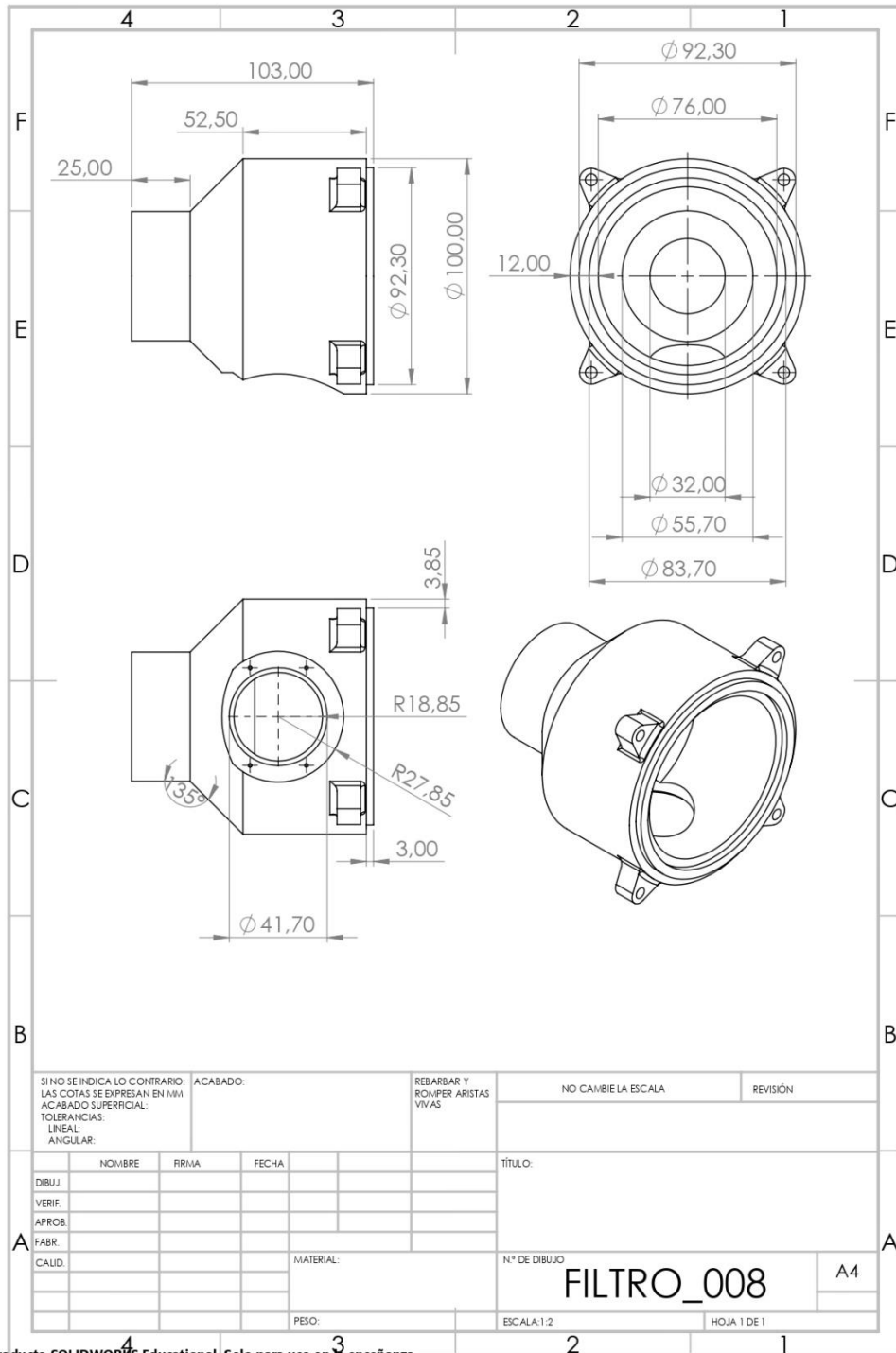
Apéndice A. Niveles de Madurez de la Tecnología- Colciencias



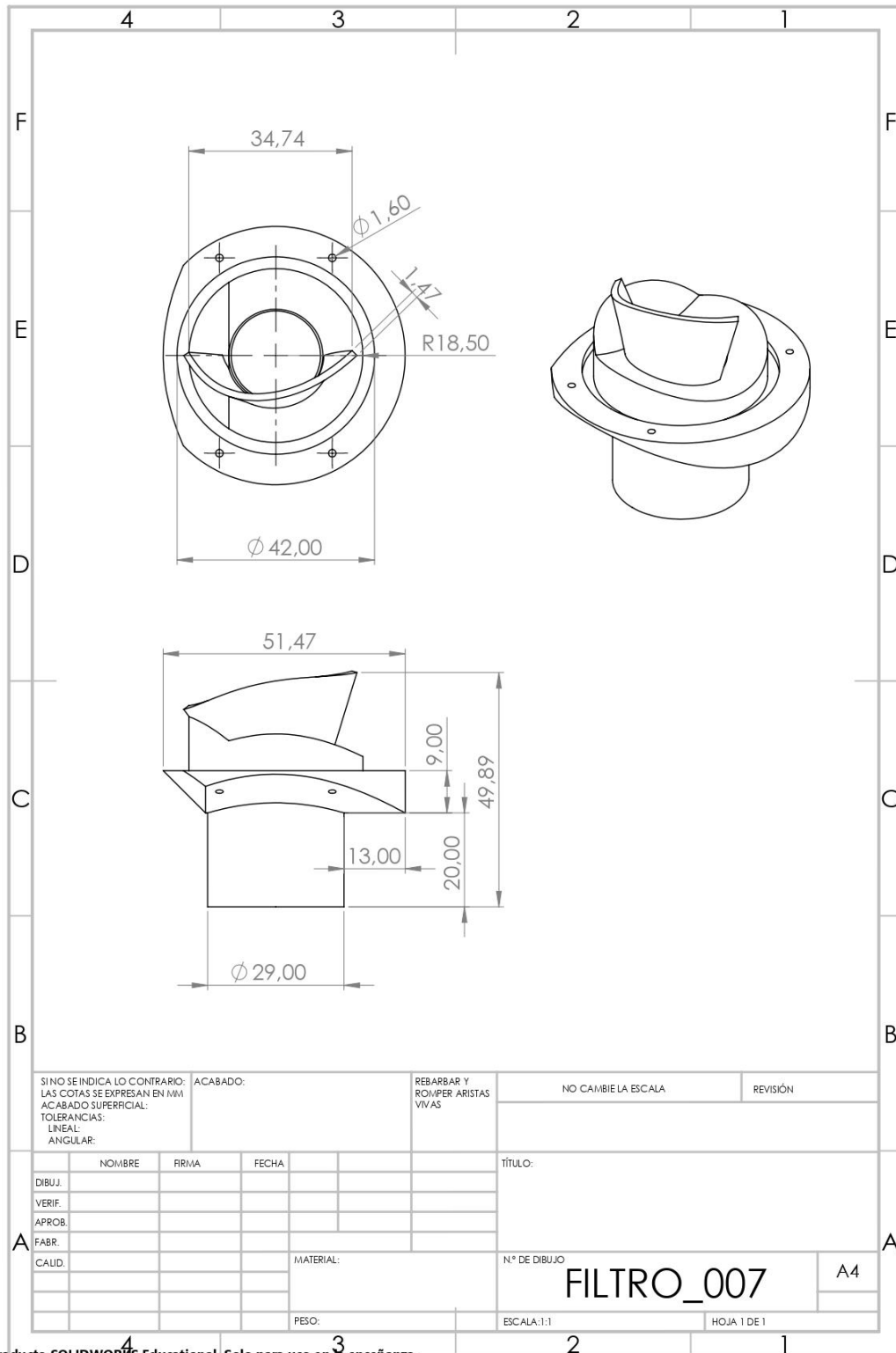
Apéndice B. Plano técnico carcasa inferior



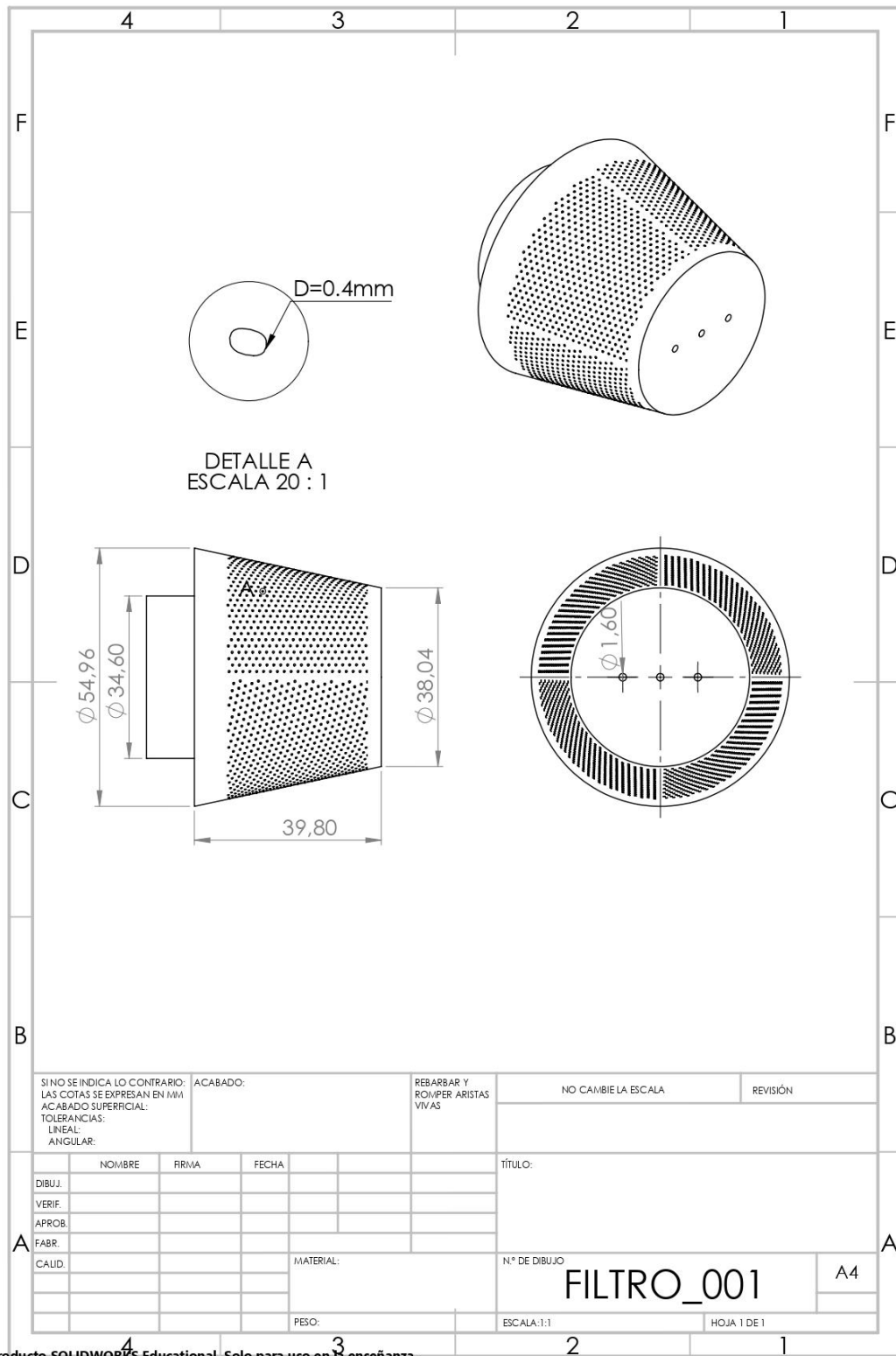
Apéndice C. Plano técnico carcasa superior



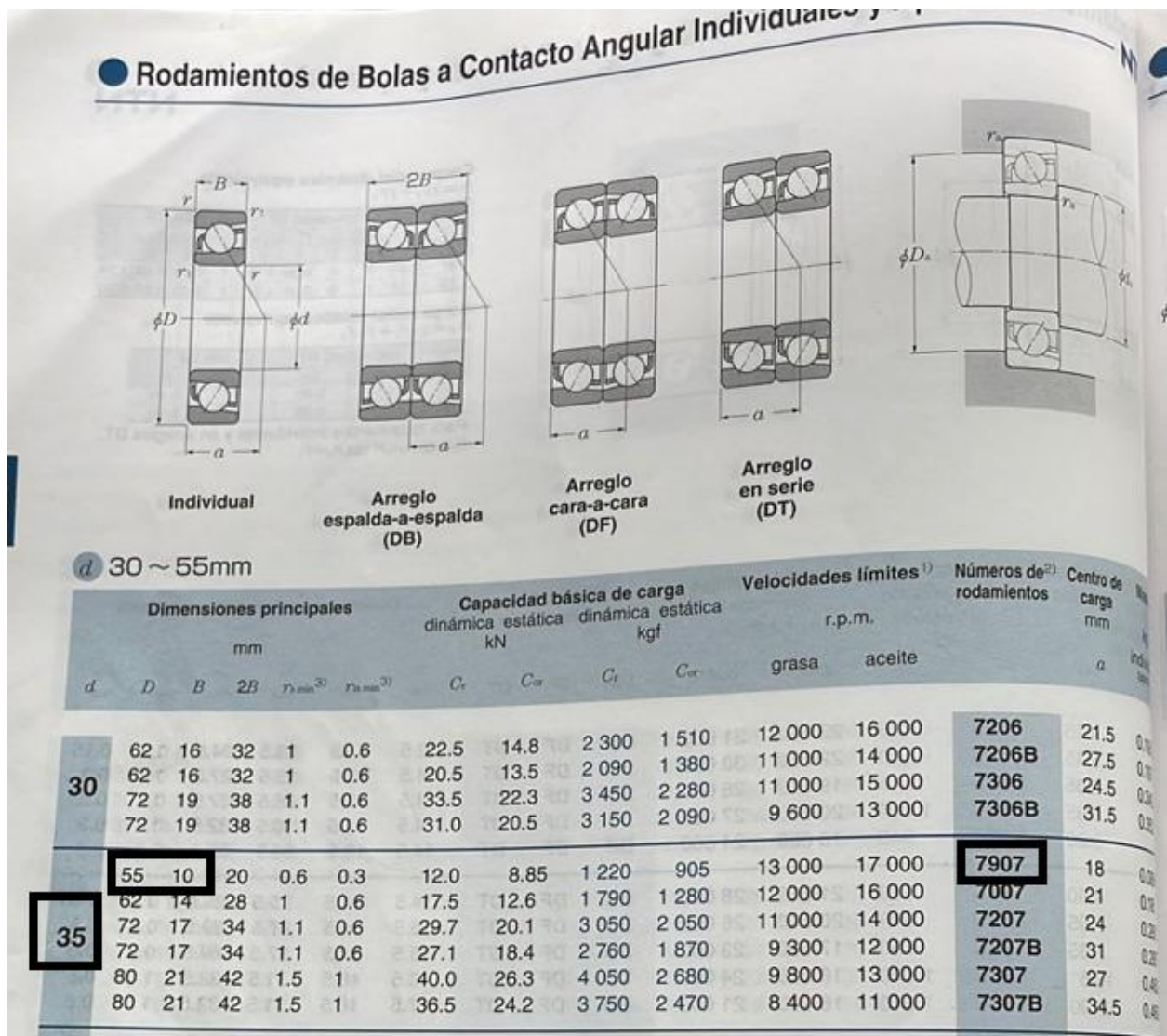
Apéndice D. Plano técnico raspador



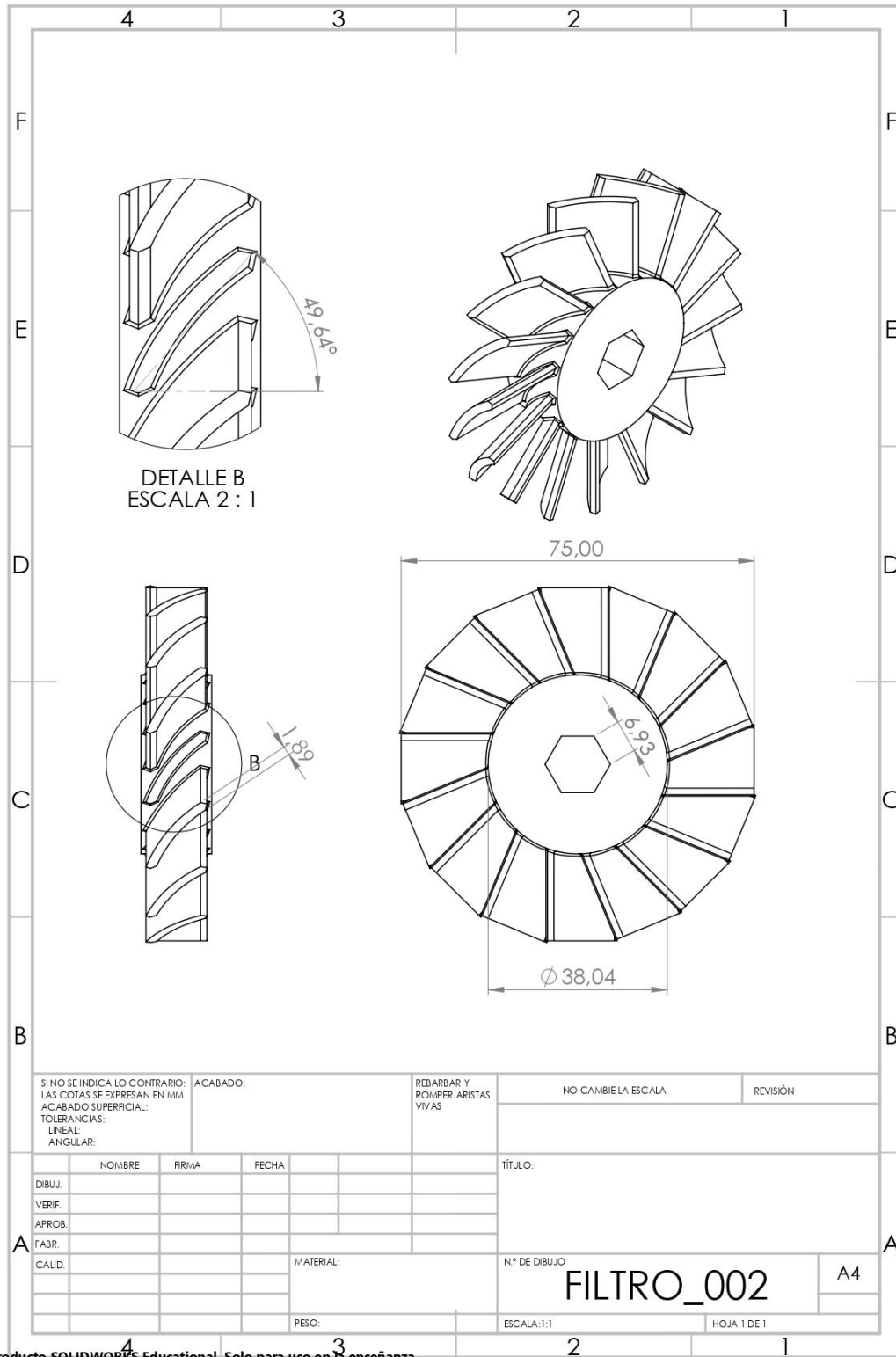
Apéndice E. Plano técnico malla filtrante



Apéndice F. Especificaciones del rodamiento del filtro autolimpiante



Apéndice G. Plano técnico turbina



Apéndice H. Ficha técnica bomba centrífuga



Modelo	Ref.	Potencia (HP)	Voltaje (V)	H max. (mca) *	Q max. (GPM) **	Succión	Descarga	Peso (Kg)
EE 1.5 10-1	1A0083	1.0	110/220	24	91	1-1/2"	1-1/2"	16
EE 1.5 15-1	1A0084	1.5	110/220	27	93	1-1/2"	1-1/2"	19
EE 1.5 20-1	1A0085	2.0	110/220	32	95	1-1/2"	1-1/2"	19

* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada. (mca= metros columna de agua).
 ** El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta. (gpm= galones por minuto).

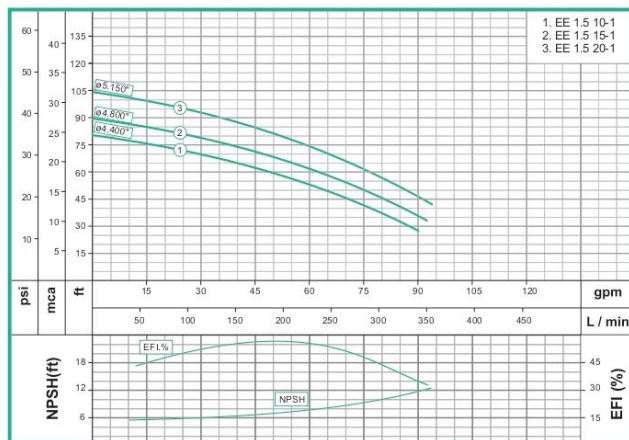


Materiales	
Cuerpo	Hierro fundido ASTM A-48, Clase 30
Impulsor	Noryl
Sello mecánico	Carbón / Cerámica / Buna-N
Acople intermedio	Hierro fundido ASTM A-48, Clase 30
Empaques	Buna Nitrilo

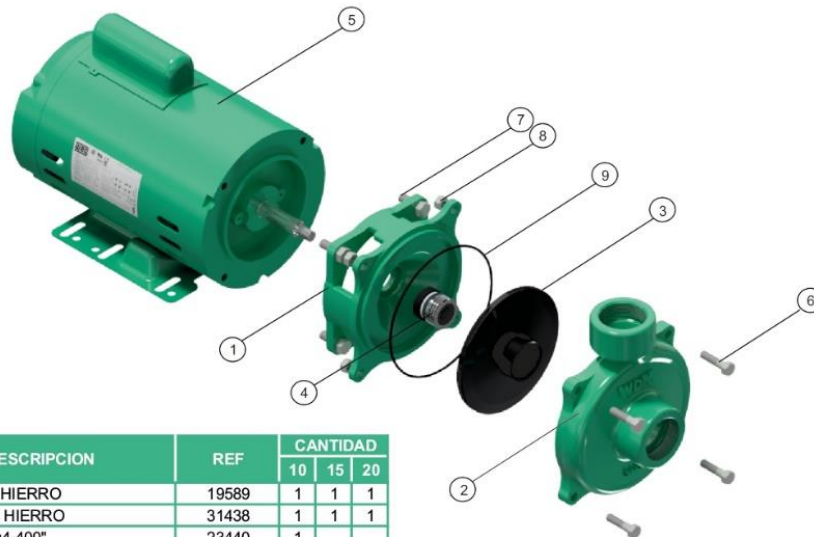
Características de la bomba	
Tipo de bomba	Centrífuga
Tipo de acoplamiento	Monobloque
Succión	1-1/2" NPT
Descarga	1-1/2" NPT
Tipo de impulsor	Cerrado <small>Balanceado dinámicamente según ISO G6,3</small>
Cantidad de impulsores	1
Tipo de sello	Sello mecánico 5/8" TIPO 6
Temperatura Max. Líquido	158° F (70 ° C) Continua

Características del Motor	
Tipo	Eléctrico
Potencia	1.0, 1.5 ó 2.0Hp (Segun modelo)
Diseño	56J
Velocidad	3.600 RPM (nominal)
Aislamiento	Clase B
Voltaje	110/220
Factor de servicio	1.4(1Hp)/1.3(1.5Hp)/1.2(2Hp)
Frecuencia	60Hz
Fases	1

- | Aplicaciones |
|--|
| • Aprovisionamiento de aguas limpias |
| • Recirculación de agua en torres de enfriamiento |
| • Refrigeración de maquinaria/Circuitos de recirculación |
| • Sistemas de Presión |
| • Equipos contra incendio |
| • Plantas de tratamiento |
| • Riego por goteo |



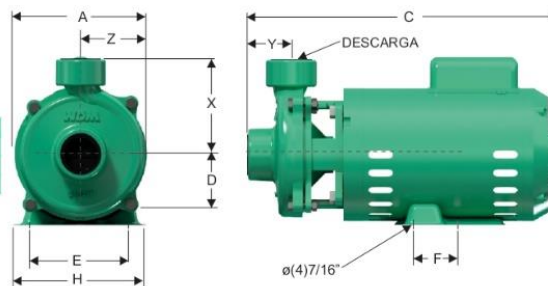
Apéndice I. Partes de la bomba centrífuga



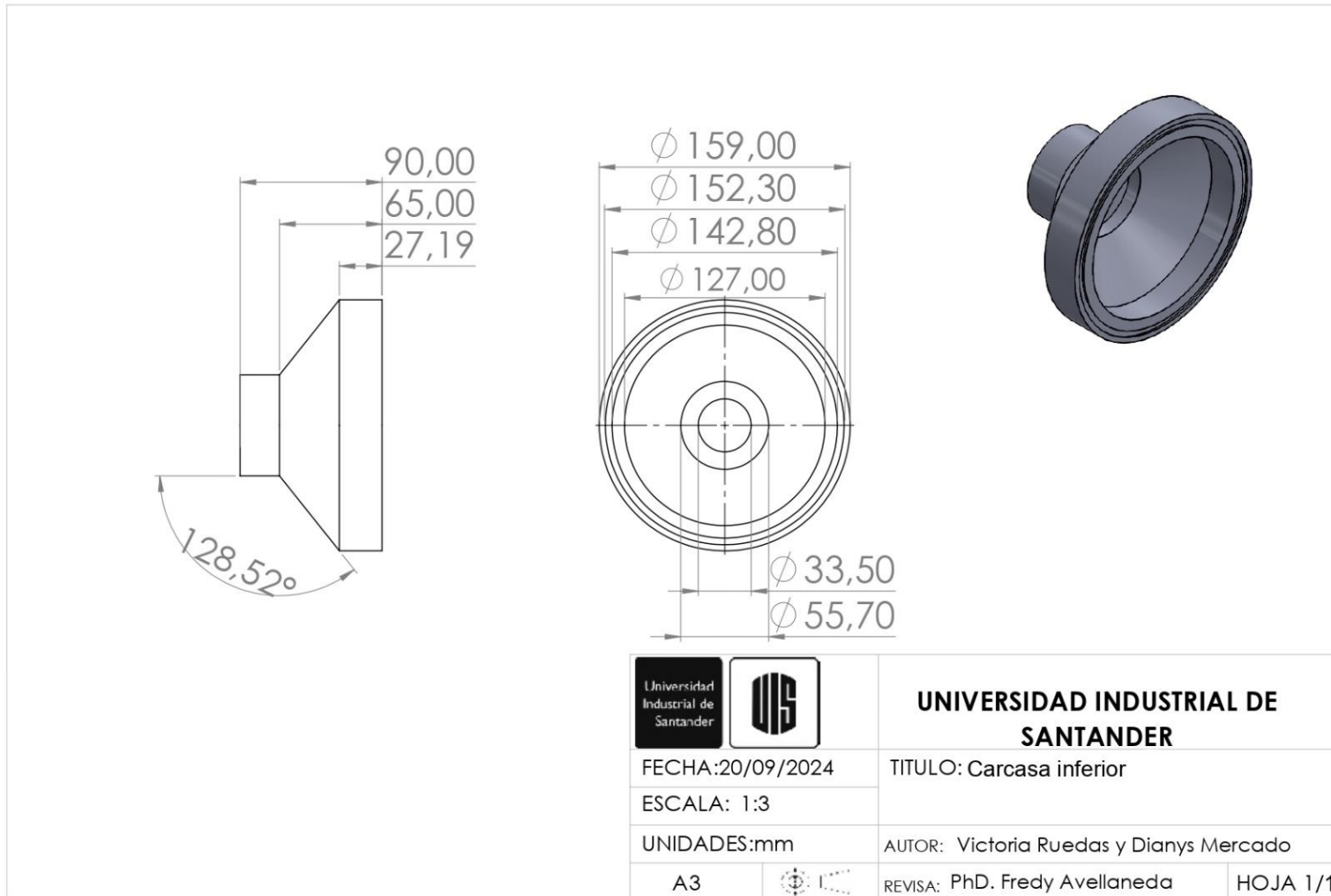
N°	DESCRIPCION	REF	CANTIDAD		
			10	15	20
1	ACOPLE EN HIERRO	19589	1	1	1
2	CUERPO EN HIERRO	31438	1	1	1
3	IMPULSOR ø4,400"	23440	1		
3	IMPULSOR ø4,800"	23480		1	
3	IMPULSOR ø5,150"	23520			1
4	SELLO MECANICO 58° T6	00049	1	1	1
5	MOTOR 1,0HP MONOFASICO	22002	1		
5	MOTOR 1,5HP MONOFASICO	12256		1	
5	MOTOR 2,0HP MONOFASICO	25300			1
6	TORNILLO 5/16"x1-1/4"NC	02220	4	4	4
7	TORNILLO 3/8" x 3/4"NC	02195	4	4	4
8	TUERCA 5/16 NC	02501	4	4	4
9	ANILLO "O" No 2-159	17732	1	1	1

DIMENSIONES EN MILIMETROS

MODELO	SUCxDESC	C	A	E	D	H	F	X	Y	Z
EE 1,5 10-1	1-1/2" x 1-1/4"	358	165	124	89	165	76	117	54	83
EE 1,5 15 1	1-1/2" x 1-1/4"	379	165	124	89	165	76	117	54	83
EE 1,5 20-1	1-1/2" x 1-1/4"	387	165	124	89	165	76	117	54	81



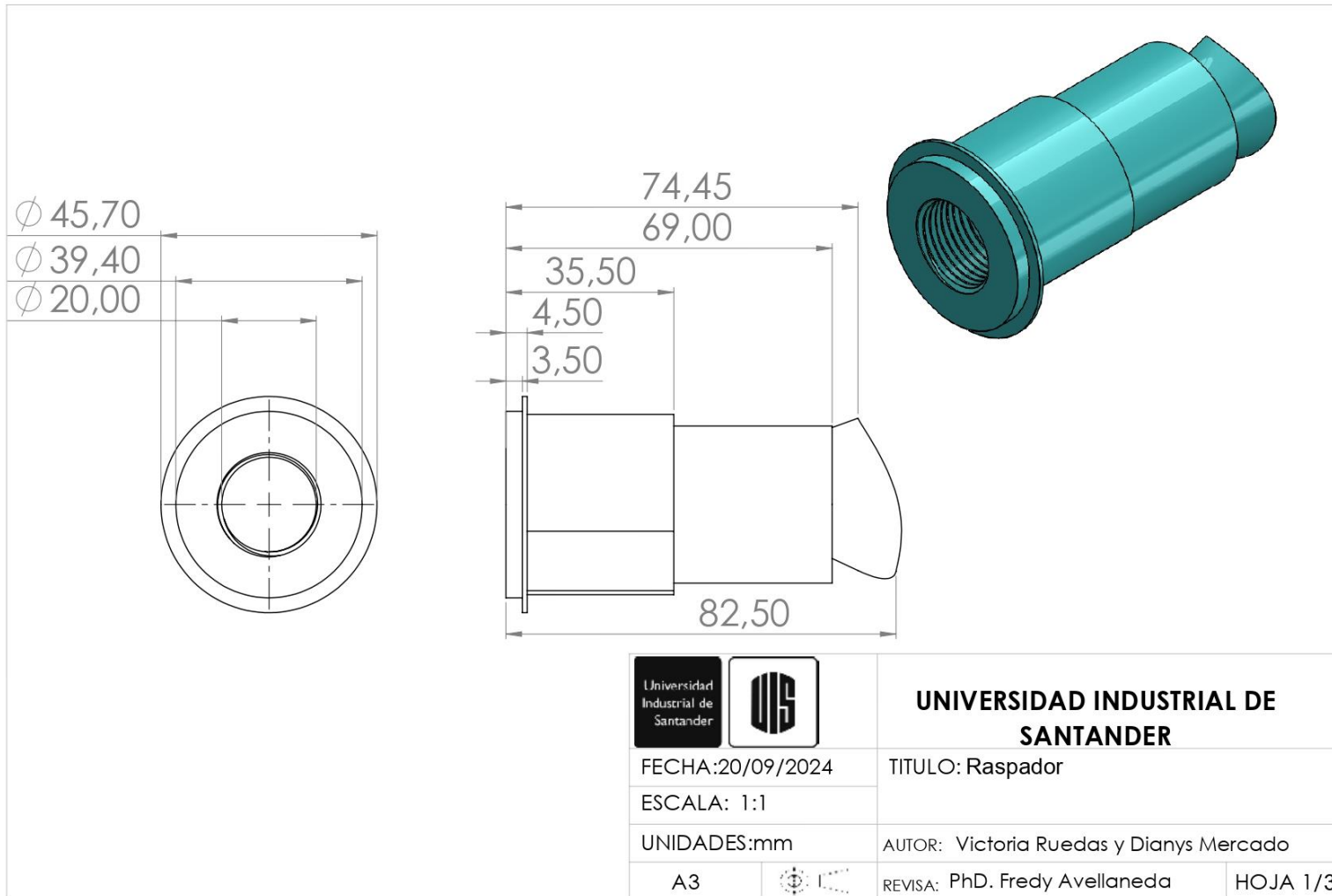
Apéndice J. Plano técnico propuesta carcasa inferior



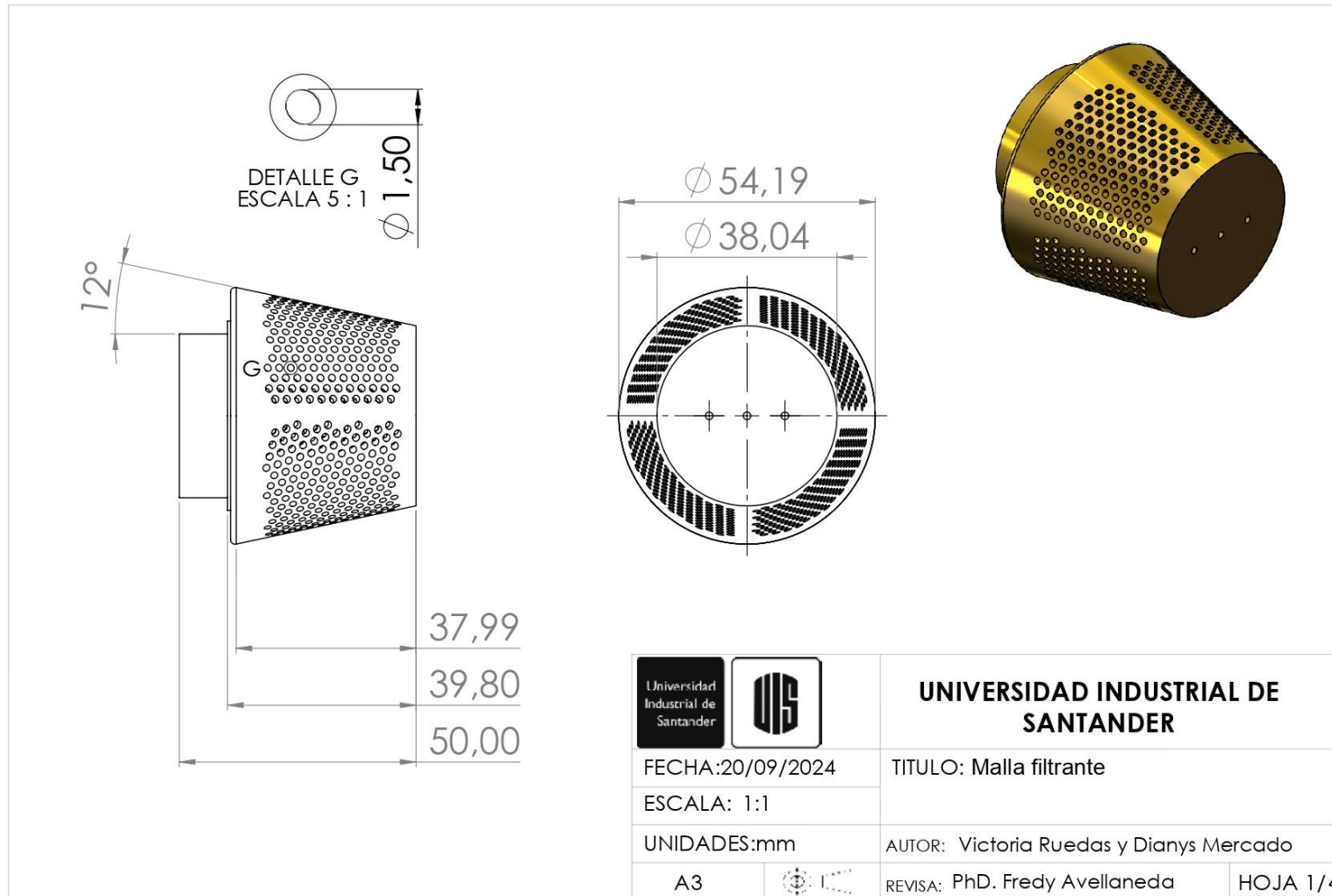
Apéndice K. Plano técnico propuesta carcasa superior



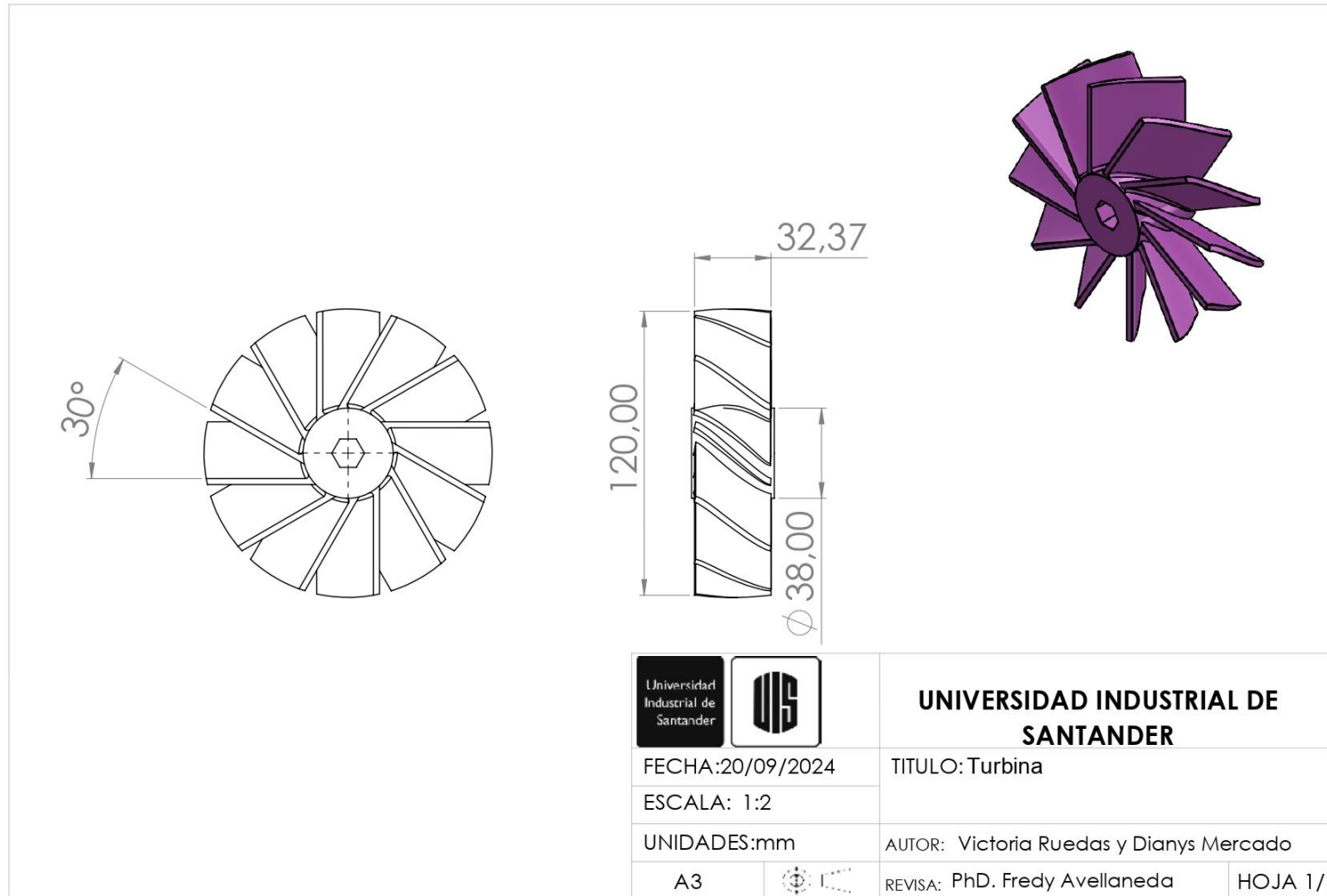
Apéndice L. Plano técnico propuesta raspador



Apéndice M. Plano técnico propuesta malla filtrante



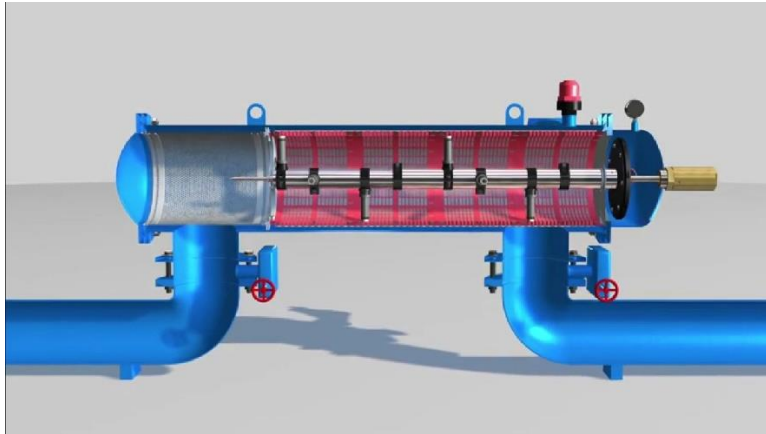
Apéndice N. Plano técnico propuesta turbina



Apéndice O. Filtro autolimpiante con rascador interno de la empresa Hanke Filter**Apéndice P. Especificaciones de diseño del filtro autolimpiante Hanke Filter**

Flujo máximo:	1,5-110 metros ³ /h.
Presión mínima de funcionamiento:	0,1 MPa
Presión máxima de funcionamiento:	1,6 MPa
Diámetro nominal de entrada y salida:	DN50 – DN200
Diámetro nominal de salida de drenaje:	DN25 – DN50
Temperatura máxima de funcionamiento:	200 °C
Clasificación del filtro:	25–3000 μm
Área de filtrado:	2200 cm ² – 5600 cm ²
Material del raspador:	SS304, SS316L, alambre de acero inoxidable
Material del elemento filtrante:	Acero inoxidable 304 y acero inoxidable 316L
Material de la carcasa del filtro:	Acero al carbono, SS304, SS316L o personalizado.

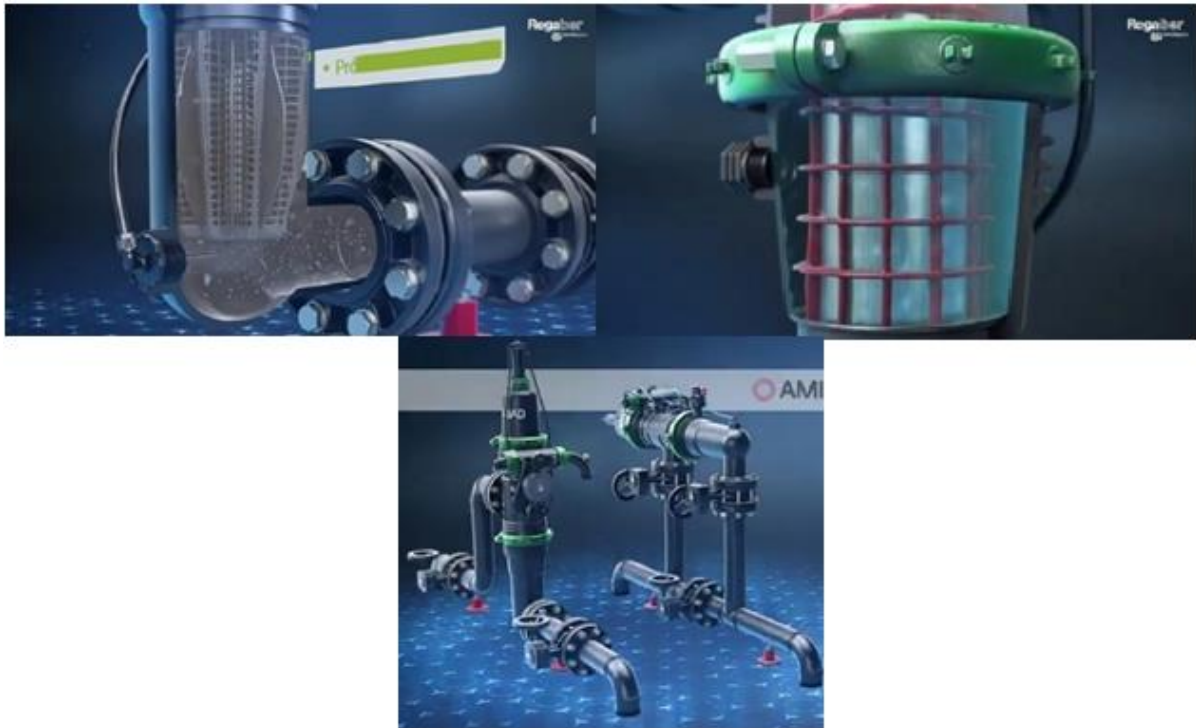
Nota: Adaptado de Hanke Filter.

Apéndice Q. Diseño del filtro autolimpiante FM-4000**Apéndice R. Especificaciones de diseño del filtro autolimpiante FMA-4003**

Diámetro entrada/salida	80 (3")
Presión de trabajo min/máx.	2,5/10 bar
Temperatura máxima del fluido	50 °C
Peso en vacío	100 kg
Superficie filtrante	2475 cm ²
Grados de filtración	1000µm
Duración del ciclo de lavado	30 s
Caudal de lavado	5 m ³ /h
Consumo de agua por lavado	40 L
Caudal	110 m ³ /h
Material cuerpo del filtro y tapas	S-235-JR
Material escáner de aspiración	AISI-304
Material malla filtrante	AISI-316
Material boquilla de succión	PVC
Material válvulas de limpieza	PP

Nota: Adaptado de Levente-Owm, 2024

Apéndice S. Diseño del filtro autolimpiante Mini sigma

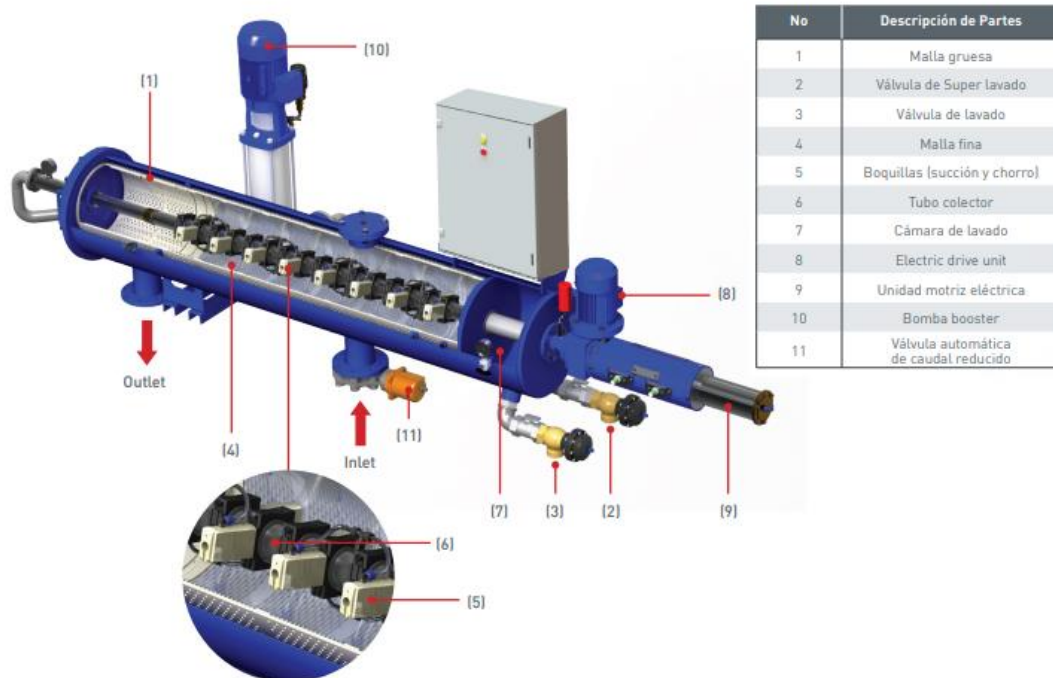


Apéndice T. Especificaciones de diseño de filtro autolimpiante mini sigma 4”

Caudal máximo	80 m ³ /h
Presión de operación mínima durante limpieza	1,5 bar
Presión de operación máxima	8 bar
Temperatura máxima de trabajo	60 °C
Superficie de filtración	2400 cm ²
Diámetros entrada/salida	4"(100mm)
Peso vacío	23 kg
Válvula de descarga	1,5"(40mm)
Tiempo de lavado	10 s
Volumen de agua de rechazo por ciclo de lavado	28 L
Caudal de lavado	10 m ³ /h
Material carcasa y tapa del filtro	RPA
Material mallas	Alambre tejido moldeado acero inoxidable 316 L
Material mecanismo de limpieza	PBT

Material válvula de descarga	Totalmente polimérica
Material sellos	EPDM
Material tubería comando control	PE
Nota: Adaptado de Amiad Water Systems Ltd., 2024	

Apéndice U. Diseño de los modelos MCFM de Amiad Water Systems



Apéndice V. Especificaciones de diseño de los modelos MCFM de filtro autolimpiante

Modelo	MCFM 8000	MCFM 12000
Diametro entrada	4" (100mm)	8" (200mm)
Diametro salida	6" (150mm)	10" (250mm)
Presión de trabajo min	0,4 bar (5,8psi) 1,5 bar (21 psi) para grado de filtración de 30 micrones	
Presión de trabajo max	10 bar (150psi)	
Caudal máximo	90m ³ /h (396gpm)	375m ³ /h (1650gpm)
Grado de filtración	30-3000 µm	
Temperatura máxima	60°C (149°F)	
Área de filtración	Plana = 742 in ²	Plana = 1,078 in ²
	Multicapa = 1,270 in ²	Multicapa = 1,880 in ²
Tipos de mallas	Plana = Acero inoxidable 316L y PVC Multicapa = Acero inoxidable 316L	
Carcasa del filtro	Acero al carbono con recubrimiento epóxico	
Tapa del filtro	37-2 / Acero inoxidable 316	
Mecanismo de limpieza	Plástico, Acero inoxidable 316	
Válvula de descarga	Carcasa de latón	

Nota: Adaptado de Amiad Water Systems Ltd., 2024