

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño y control de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación
avanzada para el tratamiento de efluentes de la industria curtiembre

INGE-2318

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Jesús David Martínez Granoble

Julián José Echáiz Arteaga

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

A nuestros estimados familiares y amigos.

Esta tesis es el fruto de un viaje que no hubiera sido posible sin su constante apoyo y amor.

Cada página refleja el aliento, la inspiración y la fortaleza que nos han brindado. Con profunda gratitud, dedicamos este logro a ustedes, quienes han sido nuestro refugio y motivación en cada paso de este camino académico.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento principalmente a nuestras familias quienes nos apoyaron de inicio a fin para lograr nuestras metas y objetivos académicos. A nuestros profesores, por impartir lecciones que trascienden las aulas y por inspirarnos a perseguir la excelencia. A nuestro tutor de tesis, Eloy Moncayo, M.Sc., cuya experticia y consejo han sido fundamentales en la realización de este trabajo. A nuestro profesor, Carlos Saldarriaga, Ph.D., por su invaluable guía y dedicación en este proyecto. Y a la ESPOL, por ser un espacio de crecimiento académico y personal, fomentando un ambiente de investigación y desarrollo que ha enriquecido nuestra formación.

Declaración Expresa

Nosotros, Jesús David Martínez Granoble y Julián José Echáiz Arteaga, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 2 de febrero del 2024.

Jesús David Martínez Granoble

Julián José Echáiz Arteaga

Evaluadores

Carlos Xavier Saldarriaga Mero, Ph.D.

Profesor de Materia

Eloy Leonardo Moncayo Triviño, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto se enfoca en el diseño y control de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada para el tratamiento de efluentes de la industria del cuero, con el objetivo de desarrollar un método eficiente y sostenible que reduzca la carga contaminante y la toxicidad de estos efluentes. En su desarrollo, se utilizaron equipos avanzados para la generación de cavitación y sistemas de control automatizados para la oxidación, complementados con análisis químicos y monitoreo en tiempo real, utilizando materiales resistentes y eficaces. Los resultados obtenidos mostraron una notable eficacia en la reducción de la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos, mejorando la eficiencia energética y reduciendo los costos operativos, superando los métodos convencionales locales de tratamiento. En conclusión, el sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada se presenta como una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de efluentes en la industria del cuero, ofreciendo importantes beneficios ambientales y económicos.

Palabras Clave: Cavitación hidrodinámica, Eficiencia, Eficacia, Beneficio económico.

Abstract

This project focuses on the design and control of a hydrodynamic cavitation system with advanced oxidation for the treatment of effluents from the tanning industry, with the objective of developing an efficient and sustainable method to reduce the pollutant load and toxicity of these effluents. In its development, advanced equipment for cavitation generation and automated control systems for oxidation were used, complemented with chemical analysis and real time monitoring, using resistant and efficient materials. The obtained results showed a remarkable effectiveness in reducing the concentration of contaminants, with an improvement in energy efficiency and a reduction in operating costs, surpassing conventional local treatment methods. In conclusion, the hydrodynamic cavitation system with advanced oxidation is presented as an effective and sustainable solution for effluent treatment in the tanning industry, offering significant environmental and economic benefits.

Keywords: Hydrodynamic cavitation, Efficiency, Effectiveness, Economic benefit.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
ÍNDICE DE PLANOS	X
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Marco teórico	5
1.5.1 Cavitación hidrodinámica	5
1.5.2 Tecnologías de oxidación avanzada	8
1.5.3 Problemas ambientales y regulaciones en la industria curtiembre	9
1.5.4 Tecnologías existentes para el tratamiento de efluentes en la industria curtiembre	10
1.5.5 Diseño de sistemas de tratamiento de efluentes	10
Capítulo 2	14
2.1 Metodología	15
2.1.1 Alternativas de solución	15
2.2 Proceso de diseño	22

2.2.1	Requerimientos del diseño	23
2.2.2	Cálculos y selección del motor y la bomba centrífuga.....	24
2.2.3	Cálculos y selección del sistema de transmisión de potencia	27
2.3	Cálculos mecánicos del dispositivo de cavitación.....	28
2.3.1	Selección del tanque de almacenamiento.....	29
2.3.2	Análisis de esfuerzos de las tuberías	30
2.4	Diseño eléctrico y de potencia.....	34
2.5	Diseño mecánico y de control	35
2.5.1	Componentes.....	35
2.5.2	Tipo de controlador	36
2.5.3	Acción de control	37
2.5.4	Selección del controlador	38
2.5.5	Configuración y programación del PLC	39
Capítulo 3	43
3.1	Resultados y análisis.....	44
3.1.1	Diseño del dispositivo de cavitación.....	44
3.1.2	Modelado y mallado del dispositivo de cavitación	45
3.1.3	Análisis del dispositivo cavitante a una presión de entrada de 7 bares.....	46
3.1.4	Análisis del dispositivo cavitante a una presión de entrada de 10 bares.....	50
3.2	Diseño del sistema de cavitación hidrodinámica.....	56
3.2.1	Análisis del diseño mecánico del sistema de cavitación hidrodinámica.....	56
3.3	Análisis de costos	57
3.3.1	Costo de componentes.....	57
3.3.2	Factibilidad económica	58
Capítulo 4	60
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	61

<i>4.1.1 Conclusiones</i>	61
<i>4.1.2 Recomendaciones</i>	63
Referencias	65
Apéndices	68

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
AISI	American Iron and Steel Institute
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
STS	Sólidos Totales Suspendidos
STD	Sólidos Totales Disueltos
OMS	Organización Mundial de la Salud
CH	Cavitación Hidrodinámica
COT	Carbono Orgánico Total
AC	Alternating Current
PLC	Programmable Logic Controller

Simbología

m	Metro
s	Segundo
h	Hora
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
kg	Kilogramo
mm	Milímetro
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
KPa	Kilo pascal
Psi	Libra por pulgada cuadrada
mA	Miliamperio
Cr	Cromo
C	Carbono
HP	Caballo de Fuerza
N	Newton
Rpm	Revolución por minuto
KW	Kilovatio

Índice de figuras

Figura 1.1 Variación de la presión, en función de la geometría y la posición, en un dispositivo de cavitación hidrodinámica	6
Figura 1.2 Representación general de un dispositivo Venturi	12
Figura 2.1 Metodología de diseño.....	23
Figura 2.2 Gráfico de altura manométrica vs caudal de distintos modelos de bombas centrífugas	25
Figura 2.3 Selección de modelo de bomba centrífuga	26
Figura 2.4 Dimensiones de la bomba centrífuga.....	26
Figura 2.5 Banda SPZ1400	27
Figura 2.6 Diagrama P&ID del sistema de cavitación hidrodinámica propuesto	38
Figura 2.7 Sistema modelado en LabView	41
Figura 3.1 Dimensiones del dispositivo de cavitación.....	44
Figura 3.2 Modelamiento en CFD del dispositivo de cavitación utilizando el software Ansys Fluent	45
Figura 3.3 Contorno y vector de velocidades del efluente en el dispositivo de cavitación	46
Figura 3.4 Curva de velocidad en la sección intermedia del dispositivo de cavitación.....	47
Figura 3.5 Contorno y vector de presiones del efluente en el dispositivo de cavitación	48
Figura 3.6 Curva de presión en la sección intermedia del dispositivo de cavitación	49
Figura 3.7 Contorno y vector de velocidades del efluente en el dispositivo de cavitación	50
Figura 3.8 Curva de velocidad en la sección intermedia del dispositivo de cavitación.....	51
Figura 3.9 Contorno y vector de presiones del efluente en el dispositivo de cavitación	52
Figura 3.10 Curva de presión en la sección intermedia del dispositivo de cavitación.....	54
Figura 3.11 Diseño 3D del sistema de cavitación hidrodinámica en SolidWorks	56

Índice de tablas

Tabla 1 Evaluación del peso específico de cada criterio.....	18
Tabla 2 Clasificación de cada criterio con respecto a su peso	19
Tabla 3 Evaluación de criterios, generación de burbujas.....	19
Tabla 4 Evaluación de criterios, eficiencia de cavitación	19
Tabla 5 Evaluación de criterios, consumo de energía.....	20
Tabla 6 Evaluación de criterios, costos de implementación	20
Tabla 7 Evaluación de criterios, mantenimiento.....	20
Tabla 8 Evaluación de criterios, volumen de flujo.....	21
Tabla 9 Evaluación de criterios, durabilidad.....	21
Tabla 10 Evaluación de criterios, escalabilidad	21
Tabla 11 Matriz de decisión	22
Tabla 12 Listado de componentes: Bandas y poleas.....	28
Tabla 13 Variables de entrada del sistema de control.....	40
Tabla 14 Variables de salida del sistema de control	41
Tabla 15 Tabla de comparación para la selección del mejor dispositivo de cavitación.....	55
Tabla 16 Detalle de costo de componentes seleccionados	57

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Estructura del sistema
- PLANO 2 Tablero eléctrico del sistema
- PLANO 3 Sistema de transmisión de potencia
- PLANO 4 Tubo de Venturi

Capítulo 1

1.1 Introducción

En esta sección se presenta el problema central que motiva el desarrollo del presente proyecto, definiendo cuales son las causas y consecuencias en la industria curtiembre en Ecuador. La inadecuada gestión de efluentes resulta en una contaminación ambiental severa, debido a la liberación de compuestos orgánicos, metales pesados y sales en ríos cercanos. Este problema no sólo pone en peligro la salud pública y la integridad ecológica, sino que también conlleva sanciones económicas significativas para las empresas involucradas, debido al incumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes.

1.2 Descripción del problema

La industria del cuero en Ecuador, así como en otras regiones del mundo enfrenta importantes desafíos relacionados con el manejo de aguas residuales altamente contaminantes. Estas aguas residuales contienen una combinación de compuestos orgánicos, metales pesados y sales que se convierten en una grave amenaza para el medio ambiente. La falta de tratamiento adecuado de estas aguas residuales en el Ecuador puede resultar en la contaminación de los cuerpos de agua circundantes, como arroyos y ríos, con efectos perjudiciales en la flora y fauna acuáticas, dañando los ecosistemas naturales y poniendo en peligro la biodiversidad local. Además, estas aguas residuales pueden contaminar fuentes de agua utilizadas para consumo humano y agricultura, lo que a su vez pone en riesgo el bienestar de la mayoría de las comunidades que viven cerca de ríos y que dependen de estas fuentes hídricas. Consecuentemente, el incumplimiento de las normas medioambientales relacionadas con la gestión de aguas residuales expone a las curtidurías a fuertes multas. Económicamente, la gestión ineficiente de las aguas residuales de las curtidurías genera costos adicionales para las empresas, lo que afecta su viabilidad a largo plazo. Por lo que se realizará el diseño y control de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada con el objetivo de disminuir la carga contaminante de las aguas residuales industriales.

1.3 Justificación del problema

El sector de la curtiembre en Ecuador se enfrenta a un desafío monumental en términos de gestión de efluentes, los cuales están cargados de compuestos orgánicos, sales y metales pesados que son perjudiciales tanto para el ser humano y el medio ambiente. La liberación indiscriminada de estos efluentes en cuerpos de agua cercanos resulta en una contaminación severa que, además, incumple con las regulaciones ambientales vigentes, acarreando sanciones económicas significativas para las empresas involucradas. Según un estudio realizado por la Corporación para el Desarrollo de la Producción, el tratamiento inadecuado de efluentes en la industria curtiembre ha resultado en multas acumuladas que ascienden a varios millones de dólares anualmente, lo que resalta la magnitud del problema [1].

La ineficiencia en el tratamiento de efluentes no sólo representa una amenaza ambiental, sino que también pone en riesgo la sostenibilidad y competitividad del sector curtiembre en el país. La necesidad de soluciones tecnológicas eficaces es palpable, y la propuesta de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada se presenta como una vía prometedora para abordar esta problemática.

Adicionalmente, la gestión ineficaz de efluentes contribuye a la pérdida de recursos hídricos valiosos, un desafío crítico en una era donde la falta de agua se ha convertido en una realidad en muchas regiones. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del agua puede tener un impacto directo en la salud humana, siendo los niños los más vulnerables a enfermedades relacionadas con la calidad del agua [2].

El tratamiento eficaz de los efluentes no sólo alinearía a la industria con las normativas ambientales, sino que también podría resultar en la recuperación y reutilización de agua, contribuyendo a la economía circular y a la sostenibilidad a largo plazo del sector.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Diseñar y controlar un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales industriales en la etapa de pelambre de la industria de curtiembre.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Diseñar un dispositivo de cavitación eficiente que promueva la formación, expansión y colapso de burbujas para maximizar la eficacia del proceso de oxidación avanzada.
2. Seleccionar las tuberías adecuadas en términos de diámetro, material y tamaño para garantizar un flujo óptimo de las aguas residuales a través del sistema.
3. Integrar válvulas, llaves, medidores de presión, temperatura y caudal en el diseño del sistema para permitir un control preciso de los parámetros operativos.
4. Determinar la capacidad óptima del tanque de almacenamiento de agua residual y su eficiencia en el proceso de tratamiento.
5. Seleccionar una bomba centrífuga adecuada que suministre el caudal necesario para el proceso de cavitación y oxidación.
6. Elegir el generador de ozono más apropiado y determinar la cantidad óptima de ozono que se liberará al sistema por hora para mejorar el proceso de oxidación avanzada.
7. Diseñar un panel de control que automatice el proceso de tratamiento, que gestione la bomba, las válvulas y la liberación de ozono.

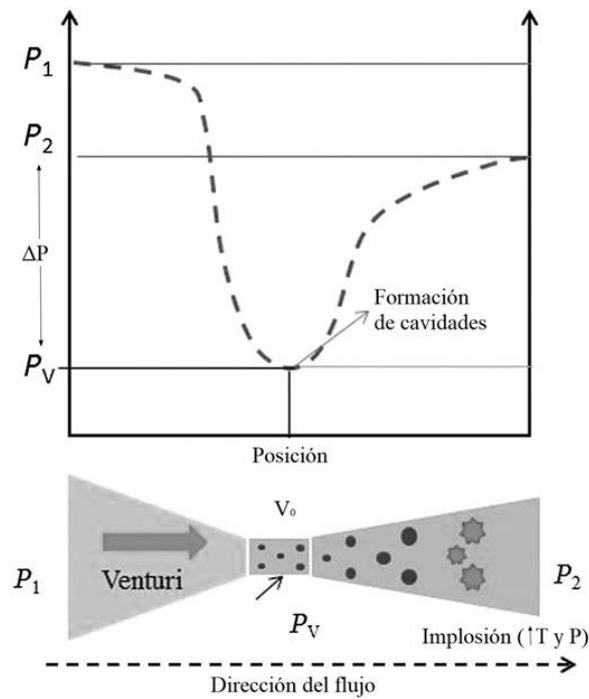
1.5 Marco teórico

1.5.1 Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es descrita como el evento en el cual se originan, se desarrollan, expanden y eventualmente implosionan burbujas dentro de un medio líquido. Este fenómeno ocurre como consecuencia de las fluctuaciones de presión en un fluido cuando su velocidad se incrementa abruptamente, a menudo como resultado de una modificación súbita en la geometría y/o área de corte transversal del conducto por donde fluye el líquido. En la zona de constricción, la energía cinética del líquido se intensifica a costa de la presión. Con una estrangulación efectiva, la presión dentro del sistema disminuye, llegando a su presión de vapor, lo que provoca la evaporación inmediata del medio circundante en el líquido y la transferencia de ciertos gases disueltos hacia esta fase gaseosa recién formada. Posteriormente, a través del dispositivo en su totalidad o pasaje estrecho, las cavidades generadas crecen hasta alcanzar su dimensión máxima. Finalmente, al ensancharse el conducto, la velocidad se reduce y la presión se restaura en la sección posterior, lo que lleva a un colapso abrupto y violento de las cavidades.

Figura 1.1

Variación de la presión, en función de la geometría y la posición, en un dispositivo de cavitación hidrodinámica



Nota. Gráfico obtenido de “Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry” [3]

En la Figura 1.1, la sección superior señala tres aspectos cruciales para la generación del pulso de presión: la configuración y estructura de la cámara de cavitación, las presiones operativas y la rapidez del fluido. La alternancia de presiones, impulsada por la alteración del área de flujo y el incremento resultante de la velocidad en el flujo, conlleva a la emergencia de la cavitación. Durante la etapa de expansión de las burbujas, también denominada rarefacción, se gestiona y regula el tiempo de permanencia del líquido a través de la garganta; esto, a su vez, incide en las dimensiones de las cavidades, la frecuencia de eventos de cavitación, y la presencia y magnitud de ciertas interacciones entre burbujas. En el momento de la reducción o colapso de las cavidades, propiciada por la restauración repentina de la presión, se dispersa calor y se manifiestan picos elevados de temperatura en el sistema. Esto lleva a una reacción termolítica que, cuando el agua

actúa como medio continuo, la partícula se divide en los radicales de hidrógeno (H) e hidroxilo (OH). Posteriormente, la difusión molecular de estos radicales provoca una reacción química de oxidación estable y deseada para el procedimiento.

La magnitud de la reducción de presión (ΔP) tiene un impacto directo en la intensidad de la implosión en las cavidades, lo que afecta la mayoría de los efectos del procedimiento. Por lo tanto, la presión de descarga se convierte en una de las variables más significativas en el análisis del fenómeno de la cavitación hidrodinámica. Es crucial examinar, determinar y ajustar de manera oportuna los parámetros geométricos y operativos en los dispositivos de estrangulamiento para lograr la recuperación de presión y la intensidad energética necesaria para cada proceso de cavitación [4].

La cavitación hidrodinámica (CH) ha emergido como una tecnología prometedora en el ámbito del tratamiento de aguas y efluentes, especialmente en la degradación de contaminantes orgánicos. Esta técnica se basa en la generación de burbujas de cavitación en un fluido, las cuales, al colapsar, producen radicales hidroxilos altamente reactivos que pueden degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos presentes en el agua [5].

La producción de radicales hidroxilos es el mecanismo primario de degradación de contaminantes en el proceso de CH. Estos radicales, al ser altamente reactivos, tienen la capacidad de degradar una amplia variedad de contaminantes orgánicos presentes en el agua. La cantidad y tasa de formación de estos radicales están influenciadas por diversas variables y condiciones del reactor [6].

Diversos estudios han investigado la aplicación de la CH en combinación con otros procesos de oxidación avanzada. Por ejemplo, la combinación de CH con ozonización ha demostrado ser efectiva en el tratamiento de aguas ricas en nutrientes, especialmente en la

destrucción de microalgas [7]. Además, se ha observado que la CH combinada con procesos fotocatalíticos puede ser efectiva en la degradación de compuestos como la tetraciclina [8].

En el contexto de la industria curtiembre, la CH ha mostrado potencial en la degradación de colorantes y otros contaminantes orgánicos. Por ejemplo, la degradación del colorante Ácido Rojo 88 ha sido estudiada utilizando CH, mostrando resultados prometedores en términos de eficiencia de degradación [9]. Además, la CH ha sido aplicada en la degradación de pesticidas como el clorpirifos [10] y la carbamazepina [11], lo que sugiere su potencial aplicabilidad en el tratamiento de efluentes de diversas industrias.

La optimización del proceso de CH es esencial para maximizar su eficiencia. Estudios han investigado la influencia de diversos parámetros, como la presión de cavitación, el pH del agua, y la concentración de peróxido de hidrógeno, en la eficiencia de degradación de contaminantes [6]. Estos estudios sugieren que una adecuada selección y control de los parámetros operativos pueden mejorar significativamente la eficiencia del proceso de CH.

1.5.2 Tecnologías de oxidación avanzada

Dentro de las soluciones emergentes para enfrentar este desafío, las tecnologías de oxidación avanzada (AOTs) han ganado prominencia. Estos procesos, centrados en la producción de radicales hidroxilos, demuestran una gran eficacia en la eliminación de compuestos orgánicos persistentes. La capacidad de los AOTs para descomponer estos contaminantes los convierte en una herramienta esencial en el arsenal de tratamiento de efluentes.

La fotocatalisis, por ejemplo, utiliza la energía lumínica para activar un catalizador, típicamente el dióxido de titanio (TiO_2), que a su vez produce radicales hidroxilos capaces de oxidar y descomponer los contaminantes. Por otro lado, la ozonización emplea ozono (O_3) como agente oxidante, siendo especialmente eficaz en la eliminación de una amplia gama de

contaminantes orgánicos. Esta técnica puede ser aún más potente cuando se combina con otros procesos, como la fotocatalisis, ampliando su rango de acción y eficiencia.

La electro-oxidación, que utiliza corriente eléctrica para inducir la oxidación de contaminantes en solución acuosa, ha demostrado ser particularmente útil para la degradación de compuestos orgánicos específicos. Mientras que el ultrasonido, a través de la generación de cavitación, produce radicales hidroxilos que actúan sobre los contaminantes, ofreciendo una alternativa innovadora en el tratamiento de efluentes [12].

1.5.3 Problemas ambientales y regulaciones en la industria curtiembre

La industria de procesamiento de cuero enfrenta múltiples desafíos ecológicos, incluida la polución de cuerpos de agua, debido a los químicos presentes en las aguas de desecho. Esta situación surge de la conversión de pieles de animales en cuero para la fabricación de artículos de cuero. La inadecuada administración de desechos y la ausencia de tecnología apropiada para su manejo resaltan como causas principales de la polución en este sector. Asimismo, se producen desechos y subproductos, tanto sólidos como líquidos, tales como sobrantes de cuero, residuos de curtido y sustancias como sulfuros y amonio, que agravan la situación contaminante.

Los efluentes de la curtiembre contienen una amplia gama de compuestos tóxicos y no tóxicos, resultantes de la aplicación de diversos químicos en el proceso de curtido. Estos efluentes presentan alta demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales, entre otros contaminantes como el cromo, que es ampliamente utilizado en el proceso de curtido.

Respecto a las normativas, Ecuador ha introducido medidas ecológicas dirigidas a la industria del cuero con la finalidad de promover una manufactura de cuero más respetuosa con el medio ambiente. Estas medidas tienen como propósito disminuir la contaminación y orientar la

industria hacia prácticas más sostenibles. No obstante, la infracción de estas normas y la gestión ambiental insuficiente de la industria curtiembre son retos pendientes de solución [1].

1.5.4 Tecnologías existentes para el tratamiento de efluentes en la industria curtiembre

Según el estudio realizado por Lozano Morillo [13], se han propuesto e implementado diversas tecnologías para tratar estos efluentes. Una de las tecnologías destacadas en el estudio es la cavitación hidrodinámica, Un proceso fisicoquímico que origina microburbujas de vapor como consecuencia de variaciones en la presión y la temperatura. Estas microburbujas, al colapsar, generan ondas de choque y radicales libres capaces de degradar contaminantes presentes en el agua.

Además, el estudio propone la combinación de la cavitación hidrodinámica con ozonización y oxígeno atmosférico. El ozono es un potente oxidante que puede degradar una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Al combinar estas tecnologías, se busca mejorar la eficiencia en la reducción de la carga orgánica y de metales, en particular el cromo, que es comúnmente utilizado en el proceso de curtido.

El estudio evaluó varios tratamientos, incluyendo cavitación hidrodinámica con y sin sistema de enfriamiento, ozonización, oxígeno atmosférico y la combinación de cavitación hidrodinámica con ozonización y oxígeno atmosférico. Los resultados mostraron que la combinación de cavitación hidrodinámica con ozono fue la más eficiente, logrando reducciones significativas en parámetros como DBO, DQO, STS, STD, aceites y grasas, sulfuro y cromo.

1.5.5 Diseño de sistemas de tratamiento de efluentes

De acuerdo con Silvia Isabel Nieto Zapata [14], al diseñar sistemas de tratamiento de efluentes basados en cavitación hidrodinámica, es esencial considerar varios factores clave para garantizar su eficacia. A diferencia de los métodos convencionales, la cavitación hidrodinámica utiliza la formación y colapso de burbujas microscópicas para generar condiciones extremas de

temperatura y presión, lo que resulta en la producción de radicales hidroxilos altamente reactivos que degradan los contaminantes.

Para un diseño óptimo, es crucial determinar las condiciones de operación que maximicen la formación de estas burbujas. Esto implica considerar aspectos como la presión, el flujo y la geometría del reactor. Además, es esencial monitorear y ajustar parámetros como el pH, ya que puede influir en la eficacia del proceso de cavitación.

En el estudio realizado por Nieto Zapata, se observó que la eficiencia de reducción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en efluentes de la industria textil y de curtiembre aumentaba con el tiempo de tratamiento, alcanzando su máximo a los 60 minutos. Esto sugiere que el tiempo de residencia es un factor crítico a considerar en el diseño del sistema.

Además, al seleccionar o diseñar un reactor de cavitación hidrodinámica, es importante considerar la incorporación de componentes adicionales que puedan optimizar el proceso, como generadores de ultrasonido o sistemas de recirculación.

El diseño de sistemas de tratamiento de efluentes ha incorporado diversas tecnologías para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas. Una de las tecnologías que ha ganado relevancia en los últimos años es el uso del tubo de Venturi, especialmente en combinación con procesos de ozonización.

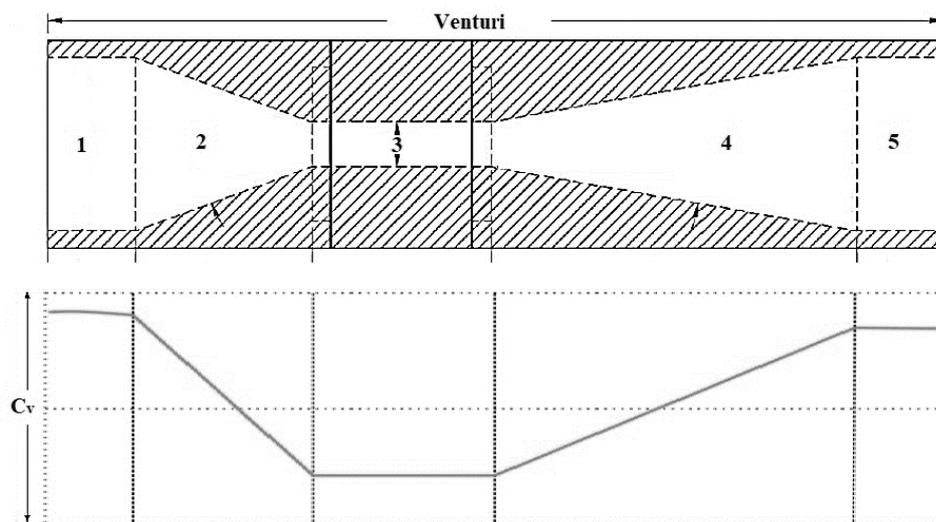
Según Pedreros Calvo et al.[15], el tubo de Venturi se ha utilizado para mejorar el rendimiento de un sistema de ozonización en el tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica. La inyección de ozono a través de un tubo de Venturi mejora el intercambio de masa entre el gas y el agua, lo que resulta en una mayor eficiencia en la mineralización de la materia orgánica. En su estudio, los autores aplicaron sulfato ferroso como catalizador y ajustaron el pH del agua a condiciones alcalinas para optimizar el proceso. Los resultados preliminares indicaron que, bajo condiciones óptimas, se logró una reducción del 30.73% en la demanda química de

oxígeno (DQO) y del 36.85% en el carbono orgánico total (COT) en un tiempo de reacción de 4.5 horas.

El uso del tubo de Venturi en combinación con otros procesos, como la ozonización catalizada, demuestra su potencial en el diseño de sistemas avanzados de tratamiento de efluentes. La capacidad de este dispositivo para mejorar el intercambio de masa y, por lo tanto, la eficiencia del proceso, lo posiciona como una herramienta valiosa para los ingenieros y profesionales del sector del tratamiento de aguas.

Figura 1.2

Representación general de un dispositivo Venturi



Nota. 1. Ingreso del fluido. 2. Zona de convergencia. 3. Garganta o constricción. 4. Etapa de expansión y recuperación de presión. 5. Descarga. C_v . Número de cavitación. [16]

Otro de los componentes que ha sido ampliamente utilizado en la ingeniería de procesos es la placa de orificios. Su aplicación en el tratamiento de efluentes ha demostrado ser valiosa, especialmente en la distribución uniforme del influente en diversas unidades de tratamiento.

Según A. L. Macías, D. C. Rodríguez y F. Molina [17], el diseño adecuado de los sistemas de distribución de influente en unidades de tratamiento de aguas residuales es esencial para garantizar el correcto rendimiento hidráulico de cada unidad. En su estudio, los autores evaluaron

el diseño de los sistemas de distribución de influente en varias plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Utilizando la metodología propuesta por Hudson en 1981, se evaluó el rendimiento del diseño actual y se realizó un redimensionamiento para distribuir el flujo de manera uniforme. Los resultados indicaron que el diseño existente no era eficiente y que el nuevo redimensionamiento aseguraba una distribución homogénea del flujo. Además, se concluyó que el número de orificios y el diámetro de la tubería son parámetros cruciales para controlar la distribución del flujo y la pérdida de carga total en el sistema.

En otro estudio relacionado con la cavitación hidrodinámica, Baghele, Khambete y Christian [18] investigaron el potencial de la cavitación hidrodinámica como tratamiento terciario utilizando una placa de orificios de 1 mm de diámetro. El estudio demostró que al optimizar la longitud del chorro del orificio, se puede mejorar la degradación de la demanda química de oxígeno y el potencial de desinfección.

Capítulo 2

2.1 Metodología

Inicialmente, se identificaron y formularon varias soluciones para el tratamiento de efluentes en la industria curtiembre. Estas incluyeron distintas configuraciones de sistemas de cavitación hidrodinámica con procesos de oxidación avanzada. Cada alternativa se evaluó en función de su eficacia potencial en la eliminación de contaminantes, viabilidad técnica y sostenibilidad.

2.1.1 Alternativas de solución

Tras un exhaustivo análisis comparativo de diversas metodologías, la integración de cavitación hidrodinámica con un proceso de oxidación avanzada utilizando ozono emergió como la alternativa más destacada. Esta decisión se fundamentó en un conjunto de factores críticos que la distinguían como la solución óptima para el tratamiento de efluentes en la industria curtiembre.

La combinación de cavitación hidrodinámica y ozonización mostró una capacidad superior para degradar una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en los efluentes de curtiembre. La cavitación hidrodinámica, al generar altas temperaturas y presiones localizadas, rompe las moléculas de agua y facilita la formación de radicales hidroxilos, que son extremadamente efectivos en la degradación de contaminantes. Por su parte, el ozono actúa como un potente oxidante que complementa este proceso, mejorando aún más la eficacia en la disminución de la carga contaminante.

La naturaleza particular de los efluentes de curtiembre, caracterizados por su alta carga orgánica y presencia de compuestos difíciles de tratar, como los taninos y cromo, demandaba una solución especializada. La cavitación hidrodinámica combinada con la oxidación avanzada por ozono, demostró ser especialmente efectiva en descomponer estos compuestos complejos y reducir su impacto ambiental.

Desde una perspectiva operativa, esta combinación ofreció beneficios significativos en términos de costes operativos, mantenimiento y sostenibilidad. La capacidad de operar a temperaturas y presiones moderadas redujo los costes energéticos, mientras que la utilización de ozono, un agente oxidante potente pero relativamente seguro y ambientalmente benigno, alineó el proceso con las crecientes preocupaciones en materia de sostenibilidad ambiental.

La adaptabilidad y la escalabilidad del sistema creado para emplear cavitación hidrodinámica y oxidación con ozono fue otro factor crucial en su elección. El diseño permitía ajustes y modificaciones para adaptarse a diferentes volúmenes de tratamiento y a variaciones en la composición de los efluentes, garantizando así su aplicabilidad en otras industrias.

En el capítulo previo, se detalló el fenómeno de la cavitación hidrodinámica, siendo generada mediante dos dispositivos principales: la placa de orificios y el tubo de Venturi, cuyo propósito es diseñar un sistema de cavitación eficiente, se presentarán tres alternativas que incorporan tanto tubos de Venturi como placas de orificios.

- **Solución A**

Se presenta el diseño de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada(ozonización) con dos tuberías, cada una equipada con un tubo de Venturi. Esta configuración busca generar cavitación a través de ambos tubos de Venturi, circulando mayor cantidad de fluido y optimizando la eficacia del proceso.

- **Solución B**

En esta alternativa, se plantea el diseño de un sistema de cavitación hidrodinámica con sistema de enfriamiento con dos tuberías, cada una incorporando una placa de orificio. La cavitación se produce mediante las placas de orificio, permitiendo el flujo de una cantidad sustancial de fluido. Este diseño busca capitalizar los beneficios específicos de las placas de orificios en la generación de cavitación.

- **Solución C**

Esta opción propone un sistema de cavitación hidrodinámica con dos tuberías, donde una de ellas contiene una placa de orificio y la otra un tubo de Venturi. La combinación de los dos dispositivos busca aprovechar las características únicas de cada uno, permitiendo que transcurra una mayor cantidad de fluido y optimizando la generación de cavitación.

- **Parámetros para seleccionar la solución**

Después de exponer las tres soluciones, se realizó un análisis detallado para elegir la opción más adecuada, considerando criterios predefinidos por el cliente. A continuación, detallaremos los criterios que se emplearon para desarrollar la toma de decisiones:

1. **Generación de burbujas:** Evaluara la cantidad de burbujas que se pueden generar en cada dispositivo de cavitación.
2. **Eficiencia de cavitación:** Medirá la capacidad de cada solución para generar cavitación de manera eficiente.
3. **Consumo de energía:** Evaluará el consumo de energía asociado con cada configuración del sistema.
4. **Costos de implementación:** Evaluara los costos asociados con la instalación e implementación de cada una de las soluciones.
5. **Mantenimiento:** Evaluará la facilidad y costo de mantenimiento de cada uno de los componentes utilizados en cada configuración.
6. **Volumen de flujo:** Evaluará el volumen de fluido que puede pasar a través de cada una de las configuraciones de los dispositivos de cavitación.
7. **Durabilidad:** Evaluara la vida de funcionamiento de cada dispositivo de cavitación y el desgaste debido al fenómeno de la cavitación hidrodinámica.

8. **Escalabilidad:** Evaluara que tanto puede escalar el sistema si las características del sistema aumentan

Después de haber definidos los criterios de evaluación, se determinó la ponderación de cada uno según la importancia, pudiendo ser mayor, igual o menor unas entre otras, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1

Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	$\Sigma+1$	Ponderación
1		0.5	1	1	1	0.5	1	1	7	0.1944
2	0.5		1	1	1	0.5	1	1	7	0.1944
3	0	0		1	1	0.5	1	1	5.5	0.1528
4	0	0	0		0.5	0	0	0.5	2	0.0556
5	0	0	0	0.5		0	0.5	0.5	2.5	0.0694
6	0.5	0.5	0.5	1	1		1	1	6.5	0.1806
7	0	0	0	1	0.5	0		0.5	3	0.0833
8	0	0	0	0.5	0.5	0	0.5		2.5	0.0694
Suma									36	1

Luego, los criterios se clasificaron de mayor a menor impacto sobre las alternativas propuestas, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2*Clasificación de cada criterio con respecto a su peso*

Peso	Criterio	Clasificación	% de decisión
7	Generación de burbujas	1	19.44 %
7	Eficiencia de cavitación	2	19.44 %
6.5	Volumen de flujo	3	18.06 %
5.5	Consumo de energía	4	15.28 %
3	Durabilidad	5	8.33 %
2.5	Escalabilidad	6	6.94 %
7	Mantenimiento	7	6.94 %
2	Costos de implementación	8	5.56 %

Tabla 3*Evaluación de criterios, generación de burbujas*

A>C>B					
<i>Generación de burbujas</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0.50
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	0	1		2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 4*Evaluación de criterios, eficiencia de cavitación*

B>A=C					
<i>Eficiencia de cavitación</i>	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0.5	1.5	0.25
Solución B	1		1	3	0.50
Solución C	0.5	0		1.5	0.25
			Suma	6	1

Tabla 5*Evaluación de criterios, consumo de energía*

A=B=C					
Consumo de energía	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0.5	0.5	2	0.33
Solución B	0.5		0.5	2	0.33
Solución C	0.5	0.5		2	0.33
Suma				6	1

Tabla 6*Evaluación de criterios, costos de implementación*

A=B>C					
Costos de implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.17
Suma				6	1

Tabla 7*Evaluación de criterios, mantenimiento*

A=B=C					
Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0.5	0.5	2	0.33
Solución B	0.5		0.5	2	0.33
Solución C	0.5	0.5		2	0.33
Suma				6	1

Tabla 8*Evaluación de criterios, volumen de flujo*

A>C>B					
Volumen de flujo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A		1	1	3	0.50
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	0	1		2	0.33
Suma				6	1

Tabla 9*Evaluación de criterios, durabilidad*

A=B=C					
Durabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A		0.5	0.5	2	0.33
Solución B	0.5		0.5	2	0.33
Solución C	0.5	0.5		2	0.33
Suma				6	1

Tabla 10*Evaluación de criterios, escalabilidad*

A=B>C					
Escalabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.17
Suma				6	1

Después de evaluar el impacto de cada criterio en nuestra decisión, se hizo determinó cómo cada posible solución se alineaba con los criterios establecidos. Esto ayudó a elegir cuál de las tres

soluciones propuestas era la más óptima para resolver el problema. Como se muestra en las Tablas 3 a 10, se adoptó el enfoque del método ordinal de criterios ponderados para este fin. Posteriormente, utilizando los datos recabados en las mencionadas tablas, se creó una matriz de decisión que se presenta en la Tabla 11, para elegir la mejor de las tres alternativas propuestas como nuestra solución óptima.

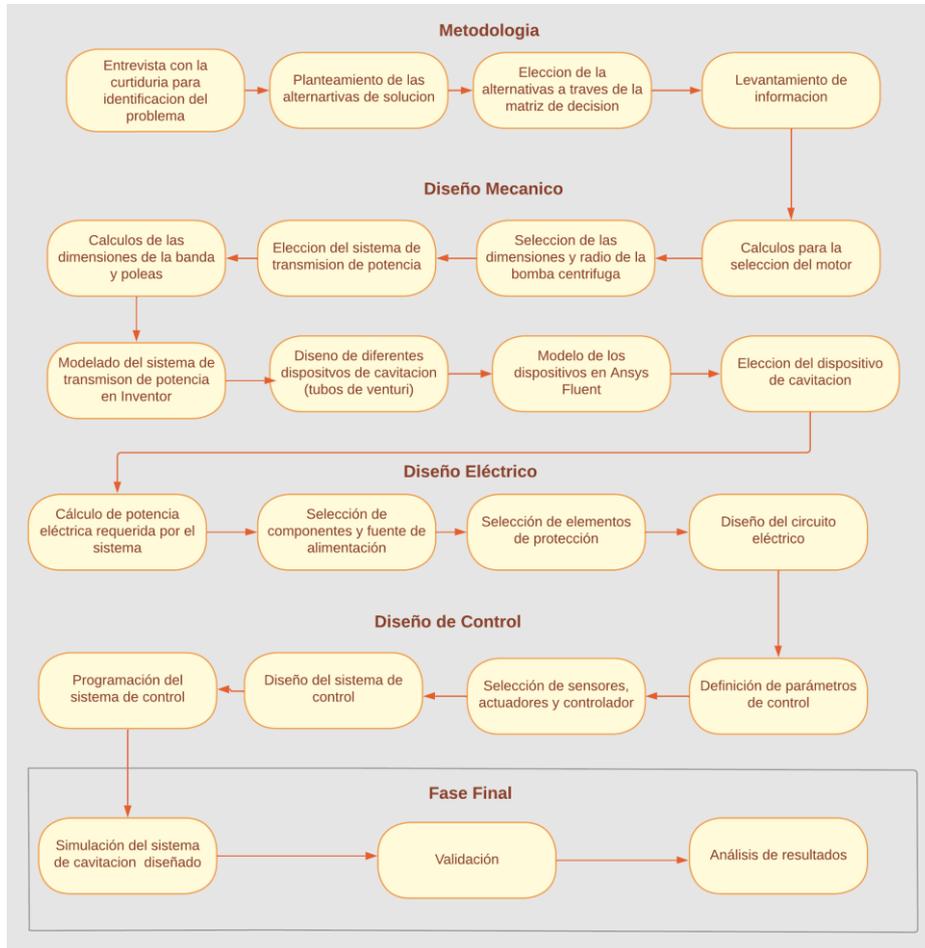
Tabla 11

Matriz de decisión

		A>B>C									
Alternativas	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	$\Sigma+1$	Ponderación	
A	0.50	0.25	0.33	0.42	0.33	0.50	0.33	0.42	4.08	0.37	
B	0.17	0.50	0.33	0.42	0.33	0.17	0.33	0.42	3.67	0.33	
C	0.33	0.25	0.33	0.17	0.33	0.33	0.33	0.17	3.24	0.29	

2.2 Proceso de diseño

Tras elegir la mejor alternativa de solución, se desarrolló un mapa conceptual para trazar las fases requeridas para alcanzar el diseño definitivo de la propuesta mencionada, como se evidencia en la Figura 2.1.

Figura 2.1*Metodología de diseño*

2.2.1 Requerimientos del diseño

Para la elaboración del diseño de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada se tomó en cuenta los criterios del cliente con respecto al diseño siendo fundamental para garantizar una consideración exhaustiva en el proceso de diseño e implementación del sistema. Por lo que, se presenta los requerimientos esenciales del sistema:

- **Generación de burbujas:** El sistema de cavitación debe ser diseñado para lograr una eficiente generación de burbujas maximizando su efectividad.
- **Volumen o caudal del efluente:** Se establece un requisito de 4 litros por segundo para el volumen o caudal del efluente, considerando la capacidad de tratamiento del sistema.

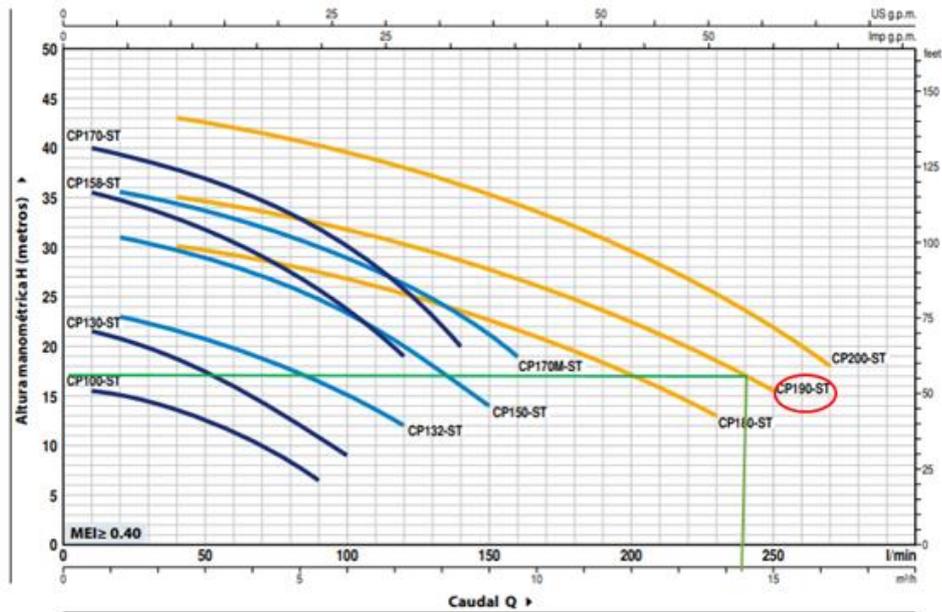
- **Elección del motor:** Se especifica que el motor a utilizar debe ser trifásico con una potencia de 2 HP o 3 HP.
- **Diámetro de la bomba centrífuga:** Para mejorar la eficiencia de la cavitación, se establece que el diámetro de cada boca de la bomba centrífuga debe ser diferenciado, siendo uno más grande que el otro.
- **Costo de implementación:** Se debe optimizar el costo de implementación del sistema de cavitación, asegurando la eficiencia económica del proyecto.
- **Mantenimiento:** El costo del mantenimiento del sistema es un factor clave a considerar en nuestro diseño.

2.2.2 Cálculos y selección del motor y la bomba centrífuga

Según la información proporcionada por un representante de la Curtiduría Tungurahua, el caudal del efluente en el proceso de curtido del cuero varía en un rango de 2 a 4 litros/segundo entre las 8:00 a.m. y las 5:00 p.m. Para la selección de la bomba centrífuga, se tomará como referencia un caudal de 4 litros/s, que representa el valor máximo dentro de ese rango. Además, la altura de elevación del efluente se estima en 2.5 metros.

Figura 2.2

Gráfico de altura nanométrica vs caudal de distintos modelos de bombas centrífugas



Con estos datos, se procederá a seleccionar la bomba centrífuga adecuada a través de la curva característica donde la elección de la bomba centrífuga dependerá de la intersección de la curva característica de la bomba con el punto de operación específico, que en este caso es un caudal de 4 litros/segundo equivalente a 240 litros/minuto y una altura de elevación de 2.5 metros.

La bomba centrífuga seleccionada para este proyecto es el modelo CP190-ST, la cual tiene una capacidad de caudal de 240 litros/minuto y una altura de elevación máxima de 16 metros. Dado que la elevación requerida es de 2.5 metros, esta bomba cumple ampliamente con los requisitos del diseño.

Figura 2.3

Selección de modelo de bomba centrífuga

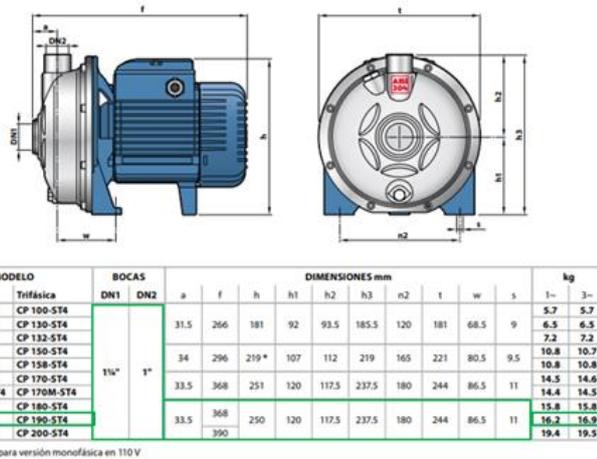
MODELO		POTENCIA (P ₂)		▲	Q	H metros																	
Monofásica	Trifásica	kW	HP			0	0.6	1.2	2.4	3.6	5.4	6.0	7.2	8.4	9.0	9.6	12	13.8	15	16.2			
					m ³ /h	l/min																	
					0	10	20	40	60	90	100	120	140	150	160	200	230	250	270				
CPm 100-ST4	CP 100-ST4	0.25	0.33	IE2	16	15.5	15	13.5	11.2	6.5													
CPm 100-ST6	CP 100-ST6				22.5	21.5	20.8	18.8	16	10.8	9												
CPm 130-ST4	CP 130-ST4	0.37	0.50	IE3	24	-	23	21.5	19.8	16.5	15	12											
CPm 130-ST6	CP 130-ST6					32	-	31	29.8	28	24.8	23.2	20	16	14								
CPm 132-ST4	CP 132-ST4	0.55	0.75	IE3	36.5	35.5	34.5	33	31	26.2	24	19											
CPm 132-ST6	CP 132-ST6					41	40	39.2	37.8	36	32	30	25.8	20									
CPm 150-ST4	CP 150-ST4	0.75	1	IE3	36.5	-	35.5	34.3	33	30	29	26.4	23	21	19								
CPm 150-ST6	CP 150-ST6					31.5	-	-	30	29.2	27.5	26.8	25.2	23.5	22.5	21.5	17	13					
CPm 158-ST4	CP 158-ST4	0.75	1	IE3	37	-	-	35	34	32.2	31.5	30.2	28.7	27.8	27	22.7	18.5	15.5					
CPm 158-ST6	CP 158-ST6					45	-	-	43	42	40.2	39.5	38	36.5	35.5	34.5	29.8	25.5	22	18			
CPm 170-ST4	CP 170-ST4	1.1	1.5	IE3																			
CPm 170-ST6	CP 170-ST6																						
CPm 170M-ST4	CP 170M-ST4	1.1	1.5	IE3																			
CPm 170M-ST6	CP 170M-ST6																						
CPm 180-ST4	CP 180-ST4	1.1	1.5	IE3																			
CPm 180-ST6	CP 180-ST6																						
CPm 190-ST4	CP 190-ST4	1.5	2	IE3																			
CPm 190-ST6	CP 190-ST6																						
CPm 200-ST4	CP 200-ST4	2.2	3																				
CPm 200-ST6	CP 200-ST6																						

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grado 3B.
▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30-1)

Además, se optó por una bomba centrífuga trifásica, específicamente la CP190-ST4, que cuenta con una potencia de 2 HP. La elección de una bomba trifásica se ajusta a la factibilidad técnica de la empresa.

Figura 2.4

Dimensiones de la bomba centrífuga



En cuanto a las dimensiones de la bomba, las bocas de entrada y salida tienen tamaños específicos. La boca de entrada es de 3/4 de pulgada, mientras que la boca de salida es de 1 pulgada, la frecuencia es de 50 Hz y la velocidad de giro es de 2 900 rev/min. Pero debido a los requerimientos

del cliente, la boca de entrada será de $\frac{3}{4}$ pulgada mientras que la boca de salida se mantendrá en 1 pulgada.

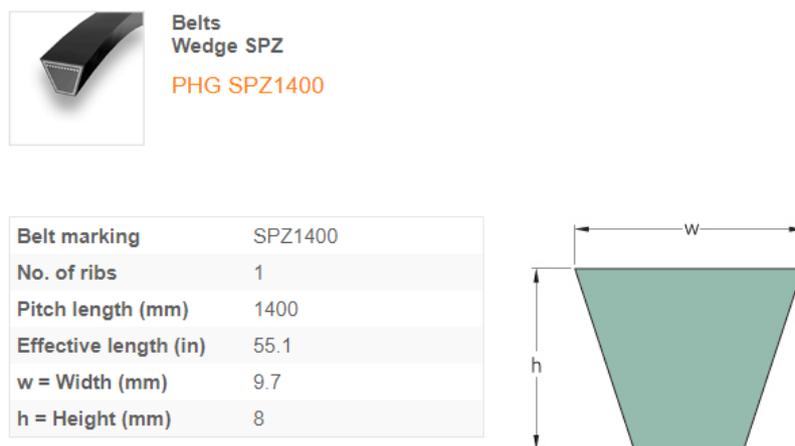
2.2.3 Cálculos y selección del sistema de transmisión de potencia

La velocidad de giro del motor seleccionado es de 2 900 rev/min, el cual es muy elevado para el sistema de cavitación siendo ideal una velocidad de 1 000 rev/min siendo necesario diseñar un sistema de transmisión de potencia que conectara el motor con la bomba centrífuga con una velocidad de 1 000 rev/min. Por lo que, el sistema de transmisión de potencia elegido son las bandas en “V” debido al costo a diferencia de otros sistemas como cadenas o correas sincrónicas teniendo un alto tiempo de vida útil y una buena eficiencia mecánica.

Para calcular y diseñar el sistema de banda en v que conectará el motor y la bomba hidráulica se deberá seguir los pasos indicados en el apéndice A.

Figura 2.5

Banda SPZ1400



En esta etapa, disponemos de toda la información para la selección de la banda más adecuada para nuestro sistema. Optamos por el fabricante SJK siendo el modelo escogido PZ1400, cumpliendo así con los requisitos específicos de nuestro sistema donde la longitud de banda es de 1 400 mm y perteneciendo a la familia SPZ. Además, esta banda presenta una altura de 8 mm y un

ancho de 9.7 mm. Se destaca que, para transmitir eficientemente de 2 900 rpm a 1 000 rpm a la bomba centrífuga, solo se requiere una única banda SPZ1400.

Finalmente, se realiza un listado de las medidas y características del sistema de transmisión de bandas en “V” elegido para conectar el motor con la bomba centrífuga:

Tabla 12

Listado de componentes: Bandas y poleas

Marca:	SKF
Familia de bandas y poleas:	SPZ
Diámetro de la polea pequeña:	140 mm
Diámetro de la polea grande:	400 mm
Longitud de la banda:	1 400 mm
Número de bandas:	1

2.3 Cálculos mecánicos del dispositivo de cavitación

Para realizar los siguientes cálculos, se deben asumir los siguientes parámetros:

Presión atmosférica de la ciudad de Ambato:

$$P_{\text{atm}} = 97 \text{ [KPa]}$$

Densidad del efluente en la etapa de pelambre:

$$\rho_{20 \text{ } ^\circ\text{C}} = 996 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Viscosidad dinámica del efluente en la etapa de pelambre:

$$\mu = 0.001003 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$$

Presión atmosférica de la ciudad de Ambato:

$$P_{\text{atm}} = 97 \text{ [KPa]}$$

Diámetros de las tuberías conectadas al sistema:

$$d_{1/2"} = 15.76 \text{ mm} = 0.01576 \text{ [m]}$$

$$d_{1"} = 26.64 \text{ mm} = 0.02664 \text{ [m]}$$

$$d_{3/4"} = 20.93 \text{ mm} = 0.02093 \text{ [m]}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad del fluido, D es el diámetro característico del tubo, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

2.3.1 Selección del tanque de almacenamiento

Para la selección y dimensionamiento del tanque de almacenamiento, se debe seguir el siguiente requerimiento donde la capacidad del tanque debe ser de 80 litros. Por lo que:

Volumen del tanque de almacenamiento:

$$V = 8.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \quad (2.1)$$

Además, el tanque tiene forma cilíndrica siendo óptimo utilizar la Ecuación (2.14) que corresponde al volumen de un cilindro:

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad (2.2)$$

$$V_t = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h \quad (2.3)$$

Donde:

V_t : volumen del tanque de almacenamiento

D : diámetro del tanque

h : altura del tanque

Por consiguiente, se debe integrar un factor de seguridad de 1.1 y la altura debe ser 1.5 veces más grande que el diámetro del tanque para un correcto diseño del tanque de almacenamiento. Por lo que:

$$h = 1.5 D$$

$$V_t \times f_s = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h$$

$$V_t \times f_s = \frac{\pi \times D^2}{4} \times 1.5 D$$

$$V_t \times f_s = \frac{1.5 \times \pi \times D^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_t \times f_s \times 4}{1.5 \times \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{(8.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3) \times (1.1) \times (4)}{1.5 \times \pi}}$$

$$D = 0.421 \text{ m}$$

$$h = 1.5D = 0.63 \text{ m}$$

En este caso, el diámetro y la altura del tanque de almacenamiento serán de 0.42 m y 0.63 m respectivamente.

2.3.2 Análisis de esfuerzos de las tuberías

Por consiguiente, es necesario realizar un análisis de esfuerzos a las tuberías, donde el material que se eligió debido a su precio fue ASTM A53, el cual tiene un esfuerzo de fluencia de 240 MPa:

$$\sigma_{\text{fluencia}} = 240 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{fluencia}} = \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{F_s} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\text{admisible}} = \frac{240 \text{ MPa}}{2} = 120 \text{ MPa}$$

Además, se procede a realizar un análisis de los esfuerzos a los que se encuentra sometido:

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{T \times c}{J} \quad (2.5)$$

Donde:

τ : esfuerzo de torsión $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$

T: par de torsión [Nm]

c: radio del cilindro [m]

J: momento polar de inercia $[\text{m}^4]$

Como la presión máxima a la que estará sometida el fluido es de 7 bares y el factor de seguridad es de 2, la nueva presión máxima de trabajo es de:

$$P = 14 \text{ bares} = 1.4 \text{ MPa}$$

Fuerza tangencial:

$$F = P \times A \quad (2.6)$$

Donde:

F: fuerza tangencial [N]

P: presión máxima del fluido $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$

A: área interior de la tubería $[\text{m}^2]$

Se define la ecuación del área en función del diámetro de la tubería, donde el diámetro de la tubería escogida es la de $\frac{3}{4}$ ":

$$A = \pi \times r_{\frac{3}{4}"}^2$$

$$A = \pi \times \left(\frac{d_{\frac{3}{4}"}}{2}\right)^2$$

$$A = \pi \times \frac{d_{\frac{3}{4}"}^2}{4}$$

Se reemplazan los valores y se obtiene:

$$F = P \times \pi \times \frac{d_{\frac{3}{4}"}^2}{4}$$

$$F = 1400000 \times \pi \times \frac{0.02093^2}{4}$$

$$F = 481.68 \text{ N}$$

Par de torsión :

$$T = F \times c \times n \quad (2.7)$$

Donde:

T: par de torsión [N m]

F: fuerza tangencial [N]

c: radio interior de la tubería [m]

Se reemplazan los valores y se obtiene:

$$T = 481.68 \times 2 \times 0.02093$$

$$T = 20.16 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, utilizando la ecuación del esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{T \times c}{J} \quad (2.8)$$

$$\tau = \frac{20.16 \times 0.02093}{\frac{\pi}{2} (0.02670^4 - 0.02093^4)}$$

$$\tau = 26.57 \text{ KPa}$$

El esfuerzo torsional que está sometido la tubería es de 26.57 KPa.

Esfuerzo de compresión:

$$\sigma = \rho \times g \times h \quad (2.9)$$

Donde:

σ : esfuerzo de presión del efluente [Pa]

ρ : densidad del efluente [kg/m^3]

g: gravedad [m/s^2]

h: altura de la tubería [m]

Reemplazando los valores se obtiene:

$$\sigma = \rho \times g \times h \quad (2.10)$$

$$\sigma = 996 \times 9.81 \times 0.24$$

$$\sigma = 2.34 \text{ KPa}$$

El esfuerzo de compresión que es sometido la tubería es de 2.34 KPa.

Esfuerzos principales:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.11)$$

Reemplazado los valores se obtiene:

$$\sigma_x = \sigma = 2.34 \text{ KPa}$$

$$\sigma_y = 0 \text{ KPa}$$

$$\tau = 26.57 \text{ KPa}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{-2.34 \text{ KPa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{2.34 \text{ KPa}}{2}\right)^2 + 26.57 \text{ KPa}^2}$$

$$\sigma_1 = 25.43 \text{ KPa}$$

El esfuerzo principal primario que está sometido la tubería es de 25.43 KPa.

Procedemos a calcular el esfuerzo principal secundario:

$$\sigma_2 = \frac{-2.34 \text{ KPa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{2.34 \text{ KPa}}{2}\right)^2 + 26.57 \text{ KPa}^2}$$

$$\sigma_2 = -27.77 \text{ KPa}$$

El esfuerzo principal secundario es de -27.77 KPa.

Energía de distorsión máxima:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_y^2 \quad (2.12)$$

Donde:

σ_{12} : esfuerzos principales [KPa]

σ_y : esfuerzo de fluencia del material [KPa]

Se reemplazan los valores:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq 120^2$$

$$25.43^2 - 25.43 \times -27.77 + -27.77^2 \leq 120^2$$

$$25.43^2 + 25.43 \times 27.77 + 27.77^2 \leq 120^2$$

$$2\ 124.05\ \text{KPa} \leq 14\ 400\ \text{KPa}$$

$$2.12\ \text{MPa} \leq 14.4\ \text{MPa}$$

Según los resultados presentados 2.12 MPa es menor que 14.4 MPa, se cumple la teoría de energía de distorsión máxima, concluyendo que la tubería no sufrirá deformación o fractura siendo adecuada para aplicarla al sistema.

2.4 Diseño eléctrico y de potencia

Se implementará un panel de control equipado con una interfaz intuitiva y funcionalidades avanzadas para facilitar la supervisión y manipulación del sistema. Este panel integrará controles específicos para:

- **Válvulas neumáticas:**

Las válvulas neumáticas estarán bajo control directo, permitiendo la regulación precisa del flujo en cada canal del sistema. La interfaz proporcionará opciones para abrir, cerrar y ajustar gradualmente las válvulas.

- **Transmisores electrónicos:**

Los datos recopilados por los transmisores electrónicos, como caudal, presión y temperatura, se visualizarán en el panel de control. Los operadores podrán monitorear las condiciones del sistema y realizar ajustes según sea necesario.

- **Alarmas:**

Se integrarán sistemas de alarma para alertar sobre condiciones fuera de rango o posibles problemas en el sistema. Estas alarmas se visualizarán de manera destacada en el panel, proporcionando una respuesta rápida a cualquier anomalía.

En el apéndice C se presentan los diagramas eléctricos del sistema.

2.5 Diseño mecánico y de control

2.5.1 Componentes

- **Estructura principal**

La estructura principal del sistema estará fabricada en acero inoxidable AISI 304, proporcionando durabilidad y resistencia contra la corrosión. Montada sobre ruedas para facilitar la movilidad y adaptarse a diferentes entornos.

- **Tanque de almacenamiento**

Se implementará un tanque de almacenamiento con una capacidad de 80 litros permitirá almacenar el fluido antes de entrar al proceso de cavitación hidrodinámica.

- **Transmisores electrónicos de caudal**

Se emplearán transmisores electrónicos de caudal, fabricados en acero inoxidable, con una señal de salida de 4-20 mA. Estos medirán y registrarán el caudal del fluido en diferentes puntos clave del sistema.

- **Indicador-transmisor electrónico de caudal**

Otro componente crucial será el indicador-transmisor electrónico de caudal, fabricado en acero inoxidable.

- **Transmisores electrónicos de presión diferencial**

Dos transmisores de presión diferencial, de acero inoxidable, con salida de señal de 4-20 mA, medirán las variaciones de presión en el sistema, ofreciendo datos cruciales para el control y monitoreo.

- **Válvulas neumáticas de regulación**

Dos válvulas neumáticas de regulación, fabricadas en acero inoxidable, serán utilizadas para ajustar la presión con Cv de 1,25 y 5. Además, una válvula neumática adicional regulará el caudal con un Cv de 5.

- **Convertidores electroneumáticos**

Tres convertidores electroneumáticos, que operan en el rango de 4-20 mA/0,2-1 bar, contribuirán al control preciso del sistema, convirtiendo señales eléctricas en presión neumática.

2.5.2 Tipo de controlador

En el diseño avanzado del sistema se implementó un controlador Proporcional-Integral (PI) para regular de manera precisa y eficiente variables críticas del sistema: la presión en la entrada de los dos tubos de Venturi, el nivel del tanque y la temperatura del sistema medida desde el tanque.

El controlador PI combina una respuesta proporcional inmediata con una acción integral a largo plazo. Esta dualidad permite al controlador ajustar dinámicamente la salida en función de la desviación inmediata de la variable (acción proporcional) y acumular el error a lo largo del tiempo para corregir desviaciones prolongadas (acción integral).

La presión a la entrada de los tubos de Venturi es fundamental para mantener la eficacia del proceso de cavitación. El controlador PI regula esta presión para optimizar la formación de burbujas de cavitación, ajustándola según las variaciones en las condiciones del flujo o en las características del efluente. Este ajuste preciso es crucial para asegurar la eficiencia del proceso.

La temperatura dentro del tanque tiene un impacto significativo en la eficacia del proceso de cavitación y oxidación. El controlador PI regula esta temperatura, compensando cualquier desviación de un rango de temperatura establecido, lo cual es esencial para la consistencia y efectividad del tratamiento.

2.5.3 Acción de control

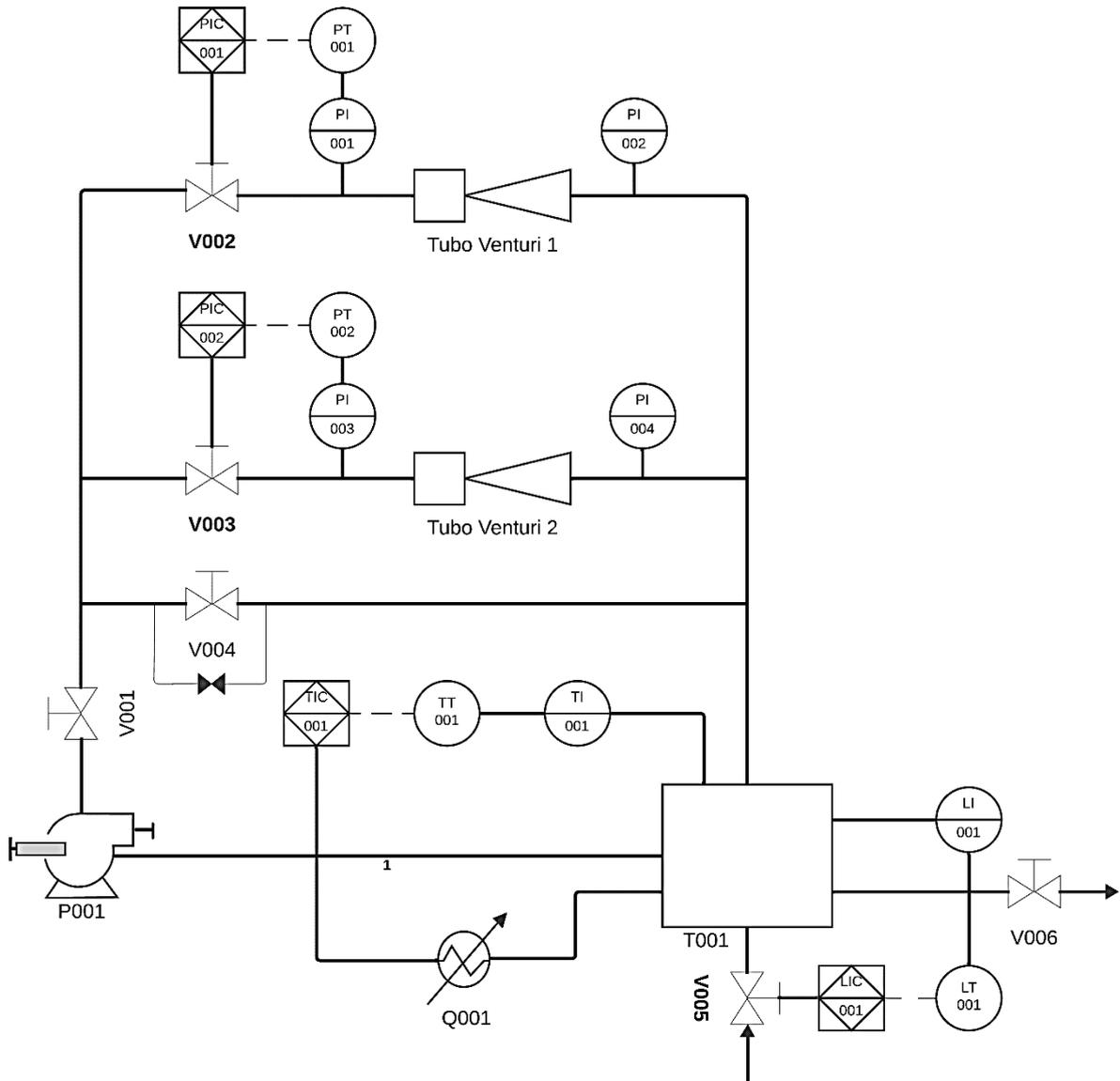
La función del control proporcional se basa en multiplicar la señal de error por una constante proporcional, lo que permite reducir considerablemente el error en estado estacionario.

En el apéndice F se presenta en detalle la acción de control del sistema.

El diagrama P&ID proporcionado en la figura 2.6 detalla el sistema de control complejo integrado en el proceso de cavitación hidrodinámica diseñado.

Figura 2.6

Diagrama P&ID del sistema de cavitación hidrodinámica propuesto



2.5.4 Selección del controlador

Se seleccionó el modelo CPU 1212C AC/DC/Relay de la serie SIMATIC S7-1200 de Siemens para el diseño del sistema por su robustez, flexibilidad y la capacidad de expansión que ofrece para satisfacer las necesidades específicas del sistema de control. Este modelo se destaca por su integración de 10 entradas digitales y 6 salidas digitales, lo cual cumple y supera el mínimo de entradas digitales requeridas para el sistema. Además, su configuración inicial de 2 entradas

analógicas y 2 salidas analógicas permitiendo tener una base sólida para la supervisión y control de procesos.

Para complementar las necesidades del proyecto de contar con al menos 6 entradas analógicas y 3 salidas analógicas, se propone la integración de un módulo de expansión de E/S analógicas de la misma serie. Este módulo adicional está diseñado para integrarse sin problemas con la CPU 1212C, lo que garantiza una comunicación fluida y una expansión del sistema. Se seleccionó el módulo de expansión SM 1234 debido a que cumple con los requerimientos específicos del sistema con respecto a las entradas y salidas. Este módulo ofrece una combinación de 4 entradas analógicas y 2 salidas analógicas.

2.5.5 Configuración y programación del PLC

En la Tabla 13 se identifican las variables de entrada del sistema de control, la variable "START" se refiere a un interruptor utilizado para iniciar el proceso, mientras que "STOP" se relaciona con un interruptor para detenerlo, ambos son de tipo booleano representando estados binarios. Las variables "P1" y "P2" corresponden a sensores de presión en la entrada y salida del primer tubo de Venturi, respectivamente, mientras que "P3" y "P4" desempeñan el mismo papel para el segundo tubo de Venturi; todas son del tipo entero, indicando valores de presión discretos. La variable "L1" monitoriza el nivel de líquido en un tanque, y "T1" mide la temperatura; ambas son enteros que representan lecturas de nivel y temperatura en unidades enteras, facilitando la integración de los datos de los sensores en la lógica de control del PLC.

Tabla 13

Variables de entrada del sistema de control

Variables	Descripción	Tipo de variable
“START”	Pulsador que inicia el sistema	Bool
“STOP”	Pulsador que detiene el sistema	Bool
“SW1”	Switch que abre o cierra la válvula de entrada del fluido	Bool
“SW2”	Switch que abre o cierra la válvula de recirculación	Bool
“SW3”	Switch que abre o cierra la válvula de salida del sistema	Bool
“P1”	Sensor de presión de la entrada del primer tubo de Venturi	Int
“P2”	Sensor de presión de la salida del primer tubo de Venturi	Int
“P3”	Sensor de presión de la entrada del segundo tubo de Venturi	Int
“P4”	Sensor de presión de la salida del segundo tubo de Venturi	Int
“L1”	Sensor de nivel del tanque	Int
“T1”	Sensor de temperatura	Int

Conforme a la Tabla 14, las variables de salida en el sistema automatizado son: "P", que activa o desactiva el motor de la bomba hidráulica y "Q", que maneja el condensador del sistema, ambos como variables booleanas que indican un estado de encendido o apagado. Las válvulas "V1" y "V4" también utilizan señales booleanas para su operación de apertura o cierre, controlando la entrada de fluido y la recirculación de este, respectivamente. Por otro lado, "V2" y "V3" son válvulas que ajustan la presión en los tubos de Venturi y "V5" regula la entrada del sistema, todas estas como variables enteras para permitir un control más granular de la posición de la válvula. Finalmente, "V6" es una válvula en la salida del sistema operada de forma binaria.

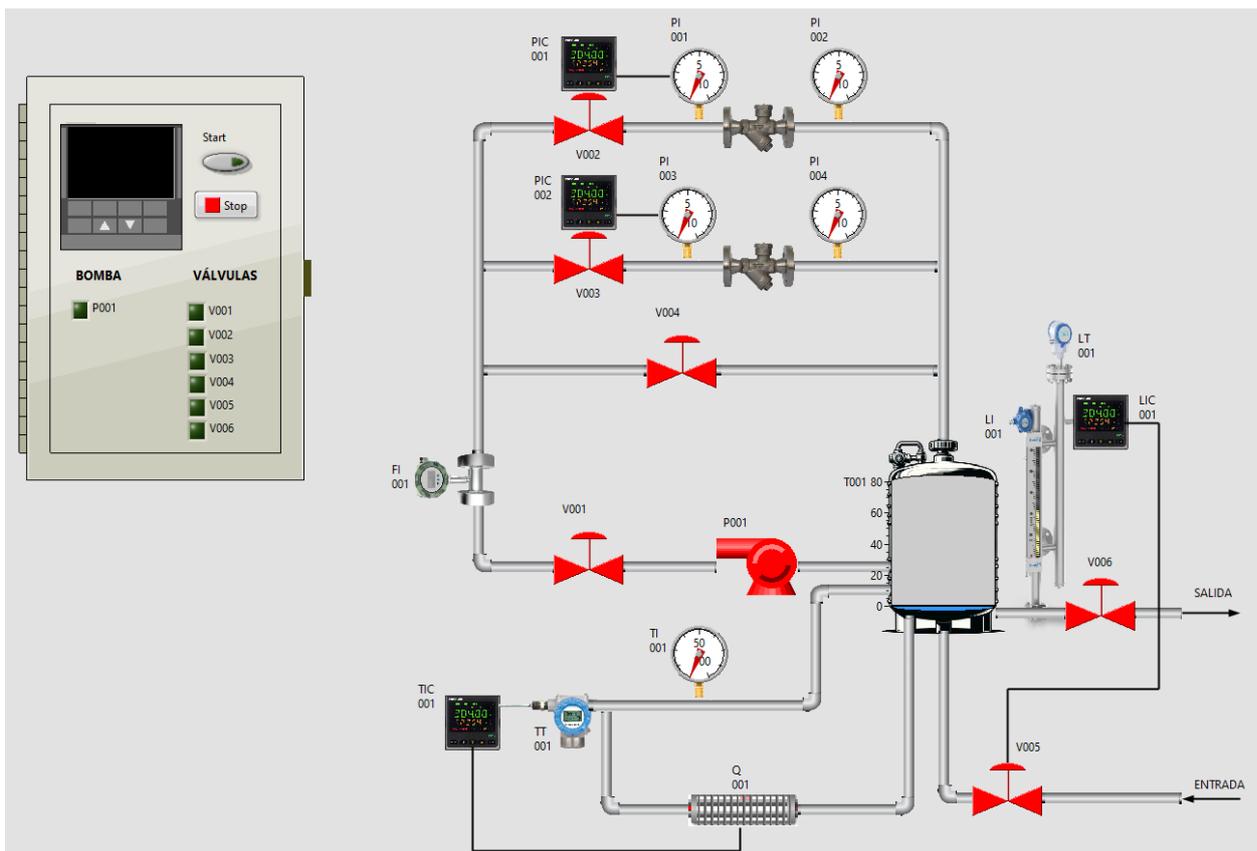
Tabla 14

Variables de salida del sistema de control

Variables	Descripción	Tipo de variable
“P”	Motor de la bomba hidráulica	Bool
“Q”	Condensador del sistema	Bool
“V1”	Válvula de entrada del fluido	Bool
“V2”	Válvula de control de la presión del primer tubo de Venturi	Int
“V3”	Válvula de control de la presión del segundo tubo de Venturi	Int
“V4”	Válvula de recirculación del fluido	Bool
“V5”	Válvula de control a la entrada del sistema	Int
“V6”	Válvula a la salida del sistema	Bool

Figura 2.7

Sistema modelado en LabView



La Figura 2.7 corresponde a una simulación en LabVIEW del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada, integrando dos tubos de Venturi para producir el efecto de cavitación hidrodinámica. El diseño incorpora un tanque de 80 litros, cuya función es clave en el proceso de

tratamiento, y se controla meticulosamente mediante un conjunto de válvulas de control y de estado, asegurando así la regulación óptima del nivel del tanque y la presión en las líneas. Los sensores de presión y nivel se sincronizan con un controlador PLC, lo que permite un monitoreo y ajuste en tiempo real logrando una alta eficiencia en el sistema.

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

En este capítulo se realiza el modelamiento del dispositivo de cavitación utilizando “ANSYS Fluent”, se aborda un análisis exhaustivo de las condiciones de operación, específicamente variando la presión de entrada en un rango comprendido entre 7 y 10 bares, con el propósito de analizar el comportamiento del efluente dentro del tubo de Venturi, con un enfoque particular en identificar las condiciones óptimas que conduzcan a una mayor velocidad, una generación de vapor más significativa y una eficiente cavitación.

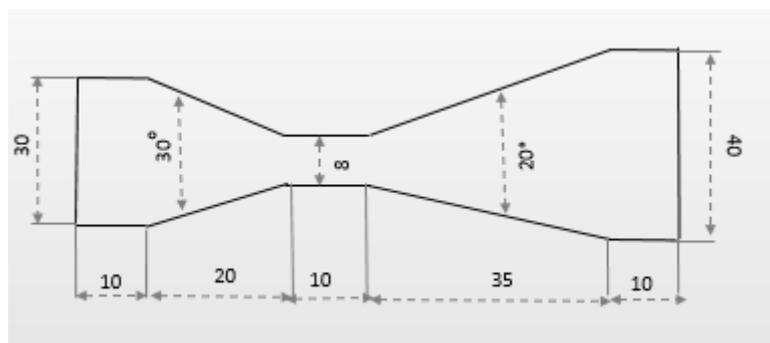
Durante el análisis, se exploró la relación entre la velocidad y presión de entrada del fluido, con el objetivo de determinar si existe una relación significativa entre estos dos parámetros. permitiendo aumentar la eficiencia de la cavitación en el tubo de Venturi.

Los resultados obtenidos permitirán realizar comparaciones entre el dispositivo sometido a diferentes presiones, lo que contribuirá a definir el valor ideal que cumple con los requerimientos del sistema. La información derivada de este análisis será esencial para tomar decisiones fundamentadas sobre la configuración óptima del dispositivo y contribuirá al diseño eficiente del sistema de cavitación hidrodinámica.

3.1.1 Diseño del dispositivo de cavitación

Figura 3.1

Dimensiones del dispositivo de cavitación

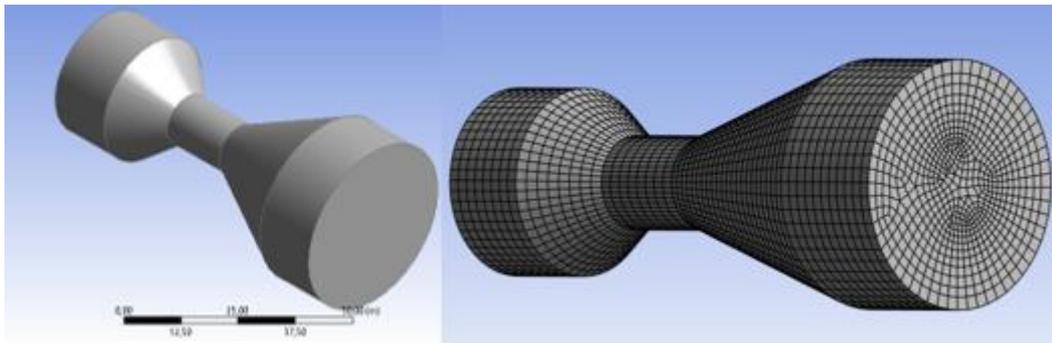


La Figura 3.1 presenta las dimensiones seleccionadas para el dispositivo de cavitación, que servirán como referencia en el software “Ansys Fluent” para realizar el modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD) del dispositivo. El modelo se someterá a dos presiones de entrada adecuadamente elegidas después de revisar documentación técnica. Los valores de presión seleccionados son 7 bares y 10 bares.

3.1.2 Modelado y mallado del dispositivo de cavitación

Figura 3.2

Modelamiento en CFD del dispositivo de cavitación utilizando el software Ansys Fluent



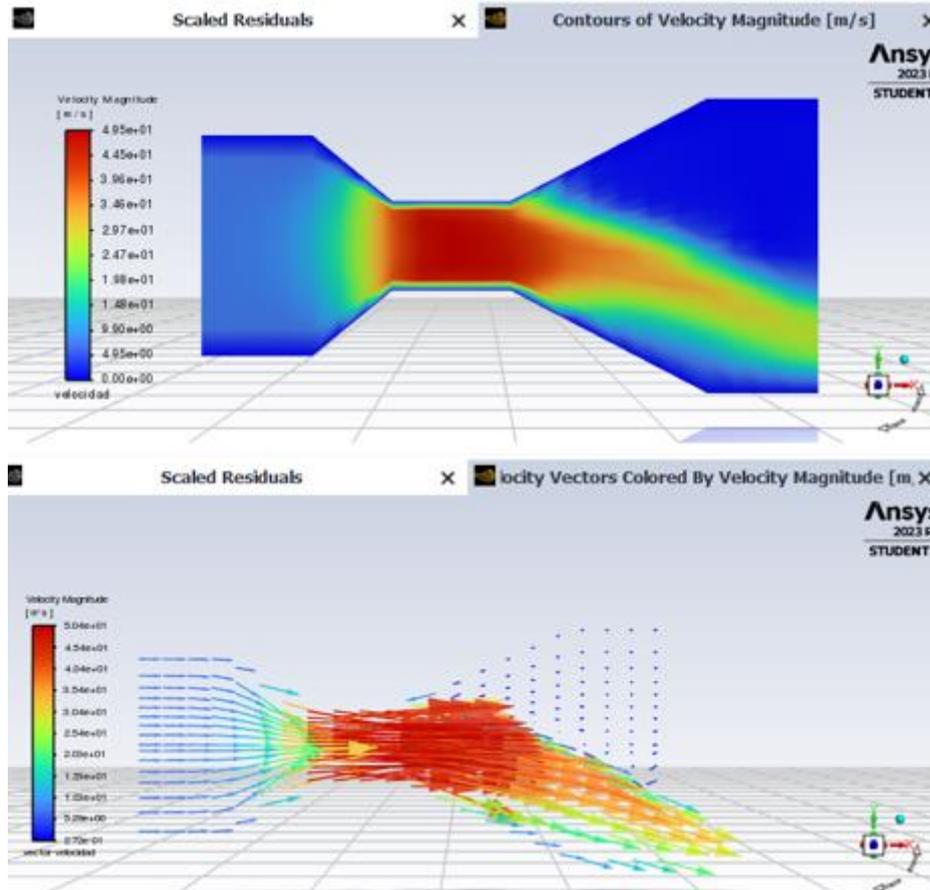
La Figura 3.2 muestra el diseño geométrico del dispositivo de cavitación, simulado mediante el software “Ansys Fluent”. El dispositivo elegido es un tubo de Venturi con las dimensiones previamente definidas, seguido de un mallado de 3 milímetros, los cuales permitirán garantizar un alta precisión en los resultados que se obtendrán en el análisis de las variables de presión y velocidad.

3.1.3 Análisis del dispositivo cavitante a una presión de entrada de 7 bares

3.1.3.1 Análisis del perfil de velocidad del tubo de Venturi

Figura 3.3

Contorno y vector de velocidades del efluente en el dispositivo de cavitación



La Figura 3.3 presenta una visualización del comportamiento de la velocidad del efluente bajo una presión de entrada al tubo de Venturi de 7 bares. La sección superior de la imagen presenta el contorno de velocidad, mientras que en la parte inferior se detallan los vectores de velocidad para una comprensión más completa.

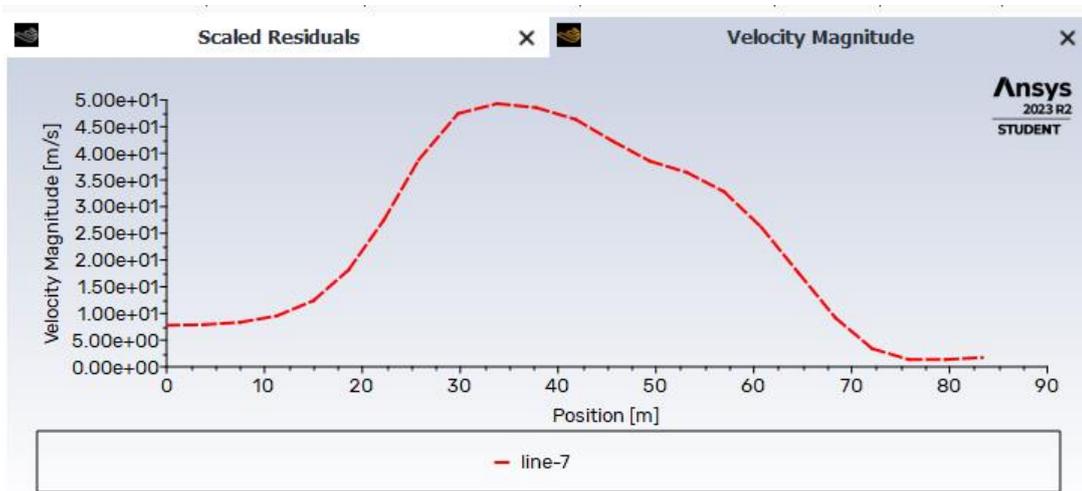
En la entrada del tubo Venturi, la velocidad inicial es baja y permanece constante, siempre y cuando no haya variaciones en el área por la cual fluye el efluente. A medida que el fluido atraviesa una sección de área más pequeña que la de la entrada, la velocidad experimenta un aumento gradual, alcanzando su valor máximo de 49.5 m/s en la entrada de la sección intermedia,

conocida como garganta. La velocidad permanece constante hasta que se produce un cambio en el área.

Al llegar al área de la salida cónica del tubo Venturi, la velocidad disminuye gradualmente, especialmente en la parte superior. En la parte inferior, se observan velocidades considerables. Este fenómeno se ilustra con mayor claridad en la imagen inferior, que muestra los vectores de velocidad del efluente. En la salida de la garganta, se genera una desviación hacia la parte inferior, donde la velocidad varía entre 2 m/s y 3 m/s, mientras que, en la parte superior, las velocidades son muy bajas, aproximándose a 0 m/s. Esta variación de velocidades puede afectar la eficiencia de la cavitación, haciéndola menos eficiente en la parte superior.

Figura 3.4

Curva de velocidad en la sección intermedia del dispositivo de cavitación



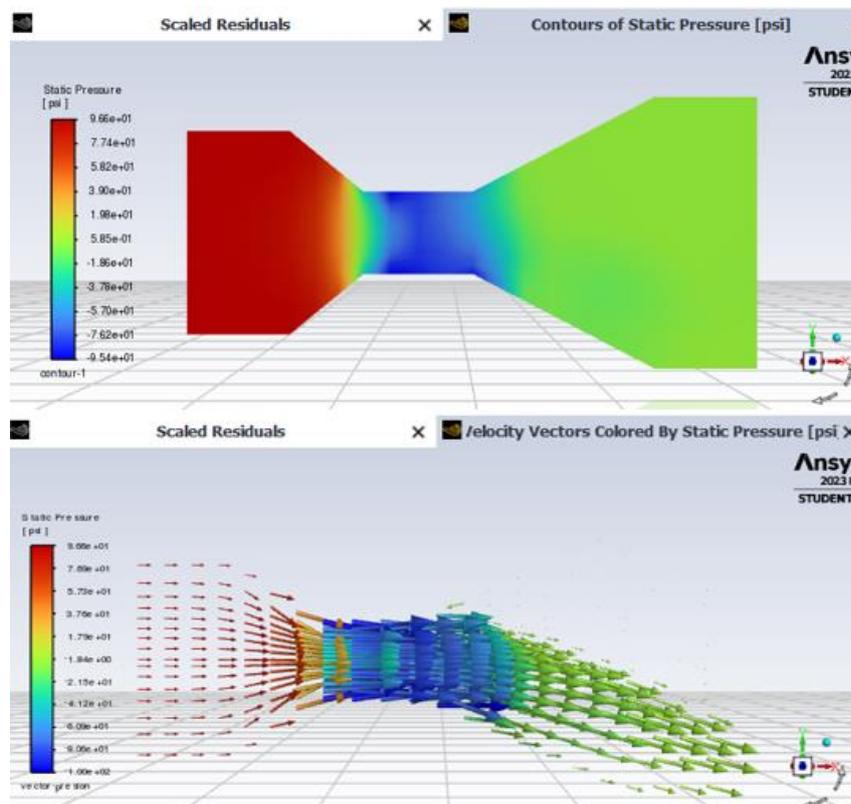
La Figura 3.4 ilustra la curva de velocidad en la sección intermedia del tubo Venturi. En la entrada del dispositivo, la velocidad se mantiene constante en 7.5 m/s hasta una distancia horizontal de 10 cm, correspondiente al área de entrada constante. Desde los 10 cm hasta los 30 cm, se observa una disminución gradual del área del dispositivo con una forma cónica, dando lugar a un aumento gradual de la velocidad hasta alcanzar su punto máximo de 49 m/s.

Es importante destacar que estos cambios en velocidad y área son específicos de la sección intermedia del tubo Venturi, ya que, como se evidencia en la Figura 3.3, la sección inferior presenta velocidades que no son óptimas para la eficiencia del dispositivo.

3.1.3.2 Análisis del perfil de presión del tubo de Venturi

Figura 3.5

Contorno y vector de presiones del efluente en el dispositivo de cavitación



La Figura 3.5 presenta una visualización del comportamiento de las presiones del efluente bajo una presión de entrada en el tubo de Venturi de 7 bares. La sección superior de la imagen presenta el contorno de presión, mientras que en la parte inferior se presentan los vectores de presión para poder obtener más información.

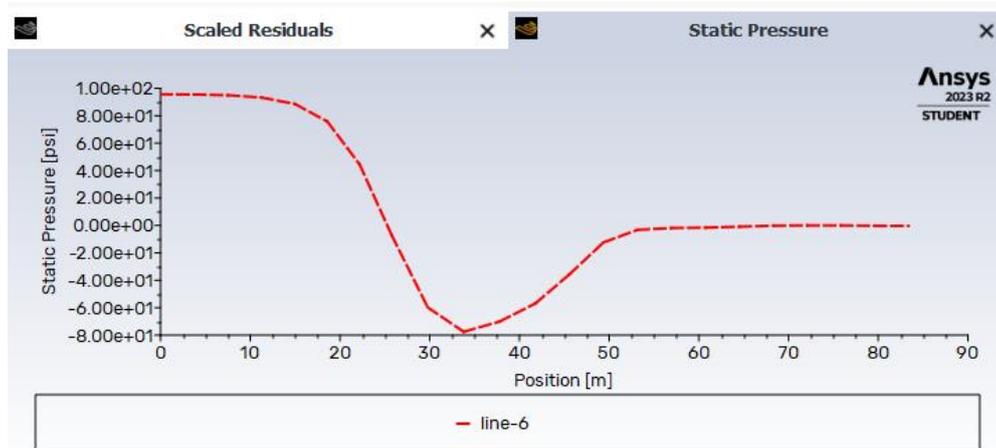
En la entrada del tubo Venturi, la presión es de aproximadamente 97 psi, equivalente a 7 bares, que constituye la presión más alta en el dispositivo. Esta presión se mantiene constante siempre que el área del tubo por donde fluye el efluente no varíe. A medida que el fluido atraviesa

una sección de área más pequeña que la de la entrada, la presión experimenta una disminución gradual, alcanzando su valor mínimo de -79 psi en la entrada de la sección intermedia, representado por el color azul. La presión se mantiene en este valor bajo hasta que hay un cambio de área al final de la garganta del dispositivo.

Al llegar al área de la salida cónica del tubo Venturi, la presión aumenta gradualmente hasta aproximadamente un tercio de la sección cónica del dispositivo. Posteriormente, se mantiene sin variación de presión tanto en la sección cónica restante, donde el área aumenta, como en la salida, donde el área no varía. Sin embargo, se observa que en la parte inferior hay un color ligeramente menos intenso, indicando una relación entre la variable velocidad y la variable presión del fluido en el dispositivo de cavitación.

Figura 3.6

Curva de presión en la sección intermedia del dispositivo de cavitación



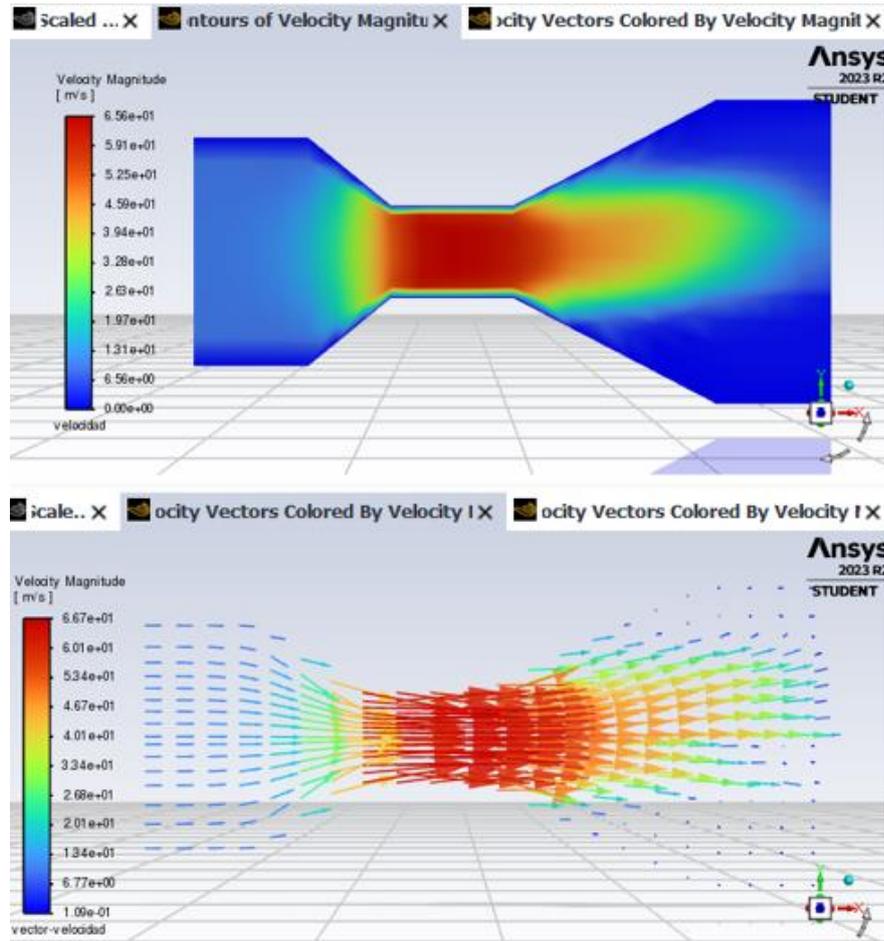
La Figura 3.6 ilustra la curva de presión en la sección intermedia del tubo Venturi. En la entrada del dispositivo, la presión permanece constante en 97 psi hasta una distancia horizontal de 10 cm, que corresponde al área de entrada constante. Cabe señalar que, en la parte inferior, se evidencia una disminución de presión, como se explicó anteriormente, indicando una relación entre la velocidad y la presión que no cumple con la eficacia deseada.

3.1.4 Análisis del dispositivo cavitante a una presión de entrada de 10 bares

3.1.4.1 Análisis del perfil de velocidad del tubo de Venturi

Figura 3.7

Contorno y vector de velocidades del efluente en el dispositivo de cavitación



La Figura 3.7 presenta una visualización del comportamiento de la velocidad del efluente bajo una presión de entrada al tubo de Venturi de 10 bares. La sección superior de la imagen presenta el contorno de velocidad, mientras que en la parte inferior se detallan los vectores de velocidad para una comprensión más completa.

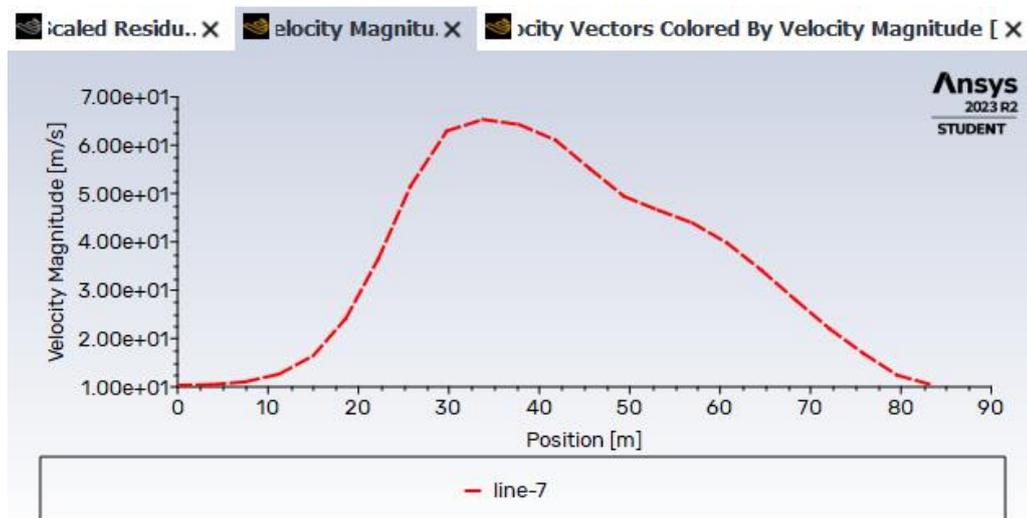
En la entrada del tubo Venturi, la velocidad inicial es baja y se mantiene constante, siempre y cuando no haya variaciones en el área por donde fluye el efluente. A medida que el fluido atraviesa una sección de área más pequeña que la de la entrada, la velocidad experimenta un

aumento gradual, alcanzando su valor máximo de 66 m/s en la entrada de la garganta. En la garganta, la velocidad presenta pequeñas fluctuaciones en referencia a la velocidad máxima, hasta que se produce un cambio en el área.

Al llegar al área de la salida cónica del tubo Venturi, la velocidad disminuye gradualmente. A diferencia de la Figura 3.3, la velocidad decrece en la zona intermedia de la sección de la salida cónica del Venturi, logrando una distribución uniforme tanto en la parte superior como en la inferior. La velocidad continúa disminuyendo hasta el final de la salida del tubo Venturi, donde alcanza su valor mínimo. Este patrón de velocidad, con una alta velocidad en la garganta y una distribución uniforme en la salida, contribuye a una cavitación mucho más eficiente.

Figura 3.8

Curva de velocidad en la sección intermedia del dispositivo de cavitación



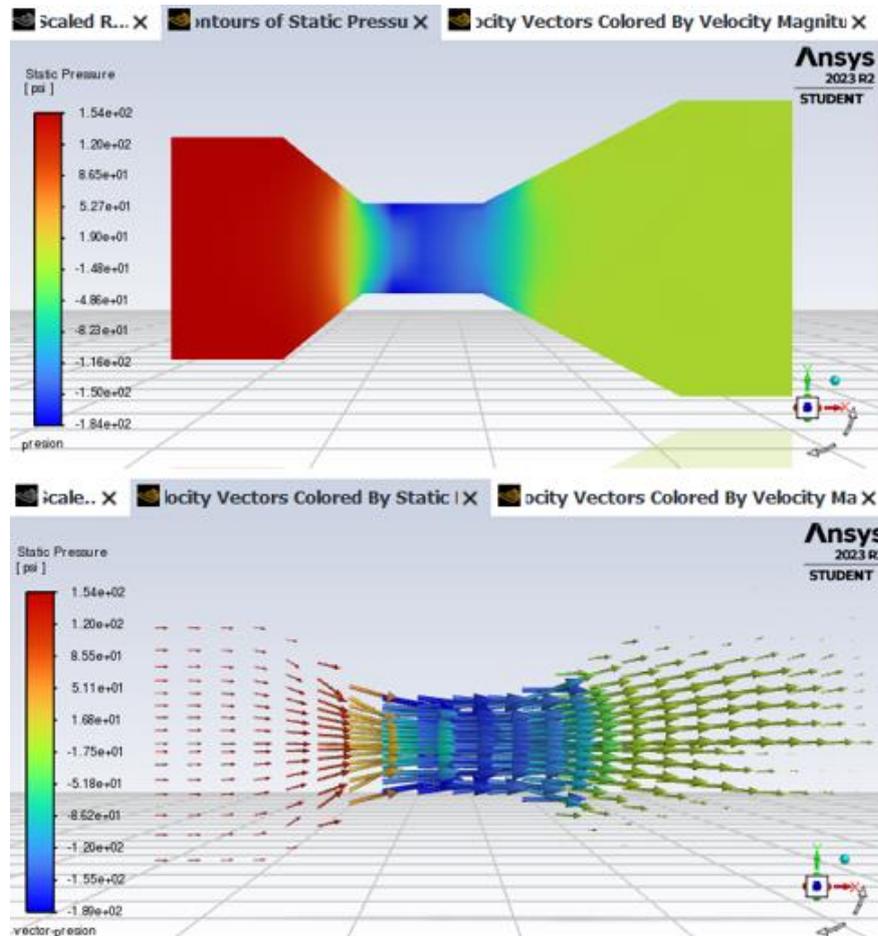
La Figura 3.8 presenta una representación gráfica de la curva de velocidad en la sección intermedia del tubo Venturi. En la entrada del dispositivo, la velocidad se mantiene constante en 10 m/s hasta una distancia horizontal de 10 cm, donde el área permanece constante. Desde los 10 cm hasta los 30 cm, se observa una reducción gradual del área del dispositivo con una forma cónica, resultando en un aumento progresivo de la velocidad hasta alcanzar su punto máximo de 66 m/s.

Este diseño garantiza que los últimos 2 cm de la salida de área fija resulten en una velocidad mínima, logrando que al final de la salida del tubo Venturi, la velocidad del fluido coincida con la velocidad de entrada de 10 m/s. Por lo que, se asegura una alta velocidad del fluido y, en consecuencia, una eficiencia mejorada en el fenómeno de cavitación, destacando la eficacia de este dispositivo como un diseño que cumple con los requerimientos necesarios.

3.1.4.2 Análisis del perfil de presión del tubo de Venturi

Figura 3.9

Contorno y vector de presiones del efluente en el dispositivo de cavitación



La Figura 3.9 presenta una representación del comportamiento de las presiones en el efluente bajo una presión de entrada en el tubo Venturi de 10 bares. La sección superior de la

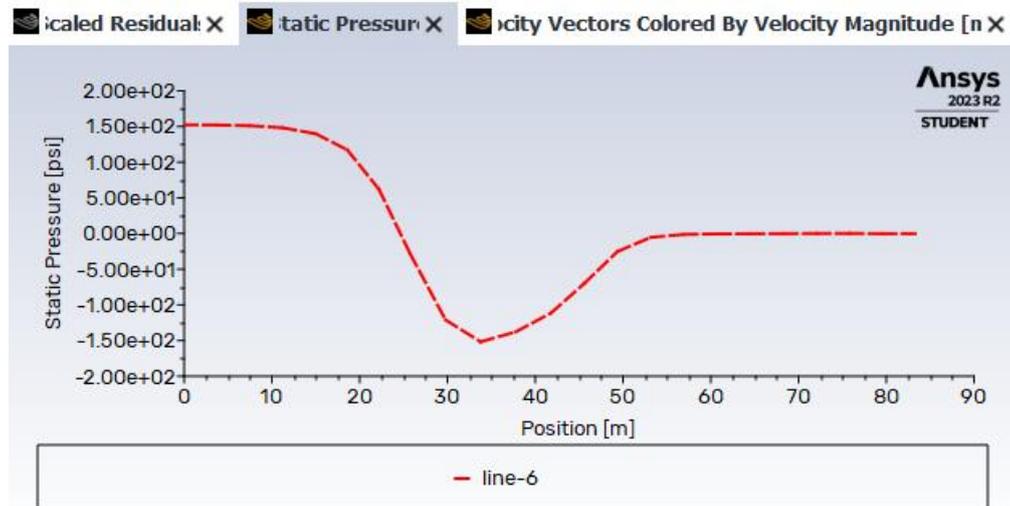
imagen muestra el contorno de presión, mientras que en la parte inferior se exhiben los vectores de presión para obtener una comprensión más detallada.

En la entrada del tubo Venturi, la presión alcanza aproximadamente 154 psi, equivalente a 10 bares, siendo la presión más elevada en el dispositivo. Este valor se mantiene constante siempre que no haya variaciones en el área del tubo por donde fluye el efluente. A medida que el fluido atraviesa una sección de área más reducida que la de la entrada, se observa una disminución gradual de la presión, llegando a su punto mínimo de -184 psi en la entrada de la sección intermedia, representado por el color azul. Esta presión baja se mantiene constante hasta que hay un cambio en el área al final de la garganta del dispositivo.

Al llegar al área de la salida cónica del tubo Venturi, se observa un aumento gradual de la presión hasta aproximadamente un tercio de la sección cónica del dispositivo, representado por el color celeste. Posteriormente, los dos tercios restantes de la salida cónica mantienen un valor constante de presión tanto en la sección cónica restante, donde el área aumenta, como en la salida del Venturi, donde el área es fija con un valor de -3 psi, representado por el color verde. Además, se evidencia que en la salida de la garganta del Venturi, el valor permanece constante, al igual que en la entrada del Venturi, indicando que el diseño es el más óptimo.

Figura 3.10

Curva de presión en la sección intermedia del dispositivo de cavitación



La Figura 3.10 representa la curva de presión del efluente en la sección intermedia del tubo Venturi. Al inicio del dispositivo, la presión se mantiene constante en 154 psi hasta alcanzar una distancia horizontal de 10 cm, que corresponde al área de entrada constante. A partir de los 10 cm y hasta los 30 cm, se evidencia una reducción gradual del área del dispositivo con una forma cónica descendente, dando lugar a una disminución progresiva de la presión hasta alcanzar su punto mínimo de -184 psi. Esto sugiere una relación inversa entre la variable velocidad y la variable presión, y debido a la uniformidad observada, se anticipa una cavitación eficiente en este diseño.

Tabla 15

Tabla de comparación para la selección del mejor dispositivo de cavitación

Parámetros comparativos	Dispositivo de cavitación 1	Dispositivo de cavitación 2
Presión de entrada(bar)	7	10
Velocidad mínima a la entrada del Venturi (m/s)	7.5	10
Velocidad mínima a la salida del Venturi (m/s)	1	10
Velocidad máxima en la garganta del Venturi (m/s)	49.5	66
Distribución uniforme	no	si
Cavitación eficiente	no	si

Después de llevar a cabo el análisis de los dispositivos de Venturi sujetos a dos presiones de entrada diferentes, se pudo determinar que para el dispositivo de cavitación 1, sometido a una presión de entrada de 7 bares, la velocidad mínima del fluido a dicha presión fue de 7 m/s, y la velocidad a la salida del dispositivo fue de 1 m/s. Esto indica que el fluido será más lento al salir del dispositivo de cavitación, lo que podría generar algún problema. En contraste, la velocidad de entrada para el dispositivo de cavitación 2, sometido a 10 bares, fue de 10 m/s, y la velocidad a la salida del dispositivo fue también de 10 m/s, siendo idéntica a la de entrada y permitiendo que el efluente circule adecuadamente.

Un punto crucial es la velocidad máxima del fluido y la uniformidad de la distribución en la salida de la garganta del Venturi, lo que determina si el dispositivo generará una cavitación eficiente. Se demostró que el dispositivo 2 tuvo una velocidad máxima en la garganta de 66 m/s, en comparación con los 49 m/s del dispositivo 1. Además, la distribución del dispositivo 2 es más uniforme que la del dispositivo 1, lo que permite generar una cavitación mucho más eficiente. Por lo tanto, se concluye que el dispositivo de cavitación 2, sometido a una presión de entrada de 10

bares, es el más adecuado para el sistema. Es esencial ajustar el parámetro de presión de entrada en el control PI a 10 bares para garantizar un rendimiento óptimo del sistema.

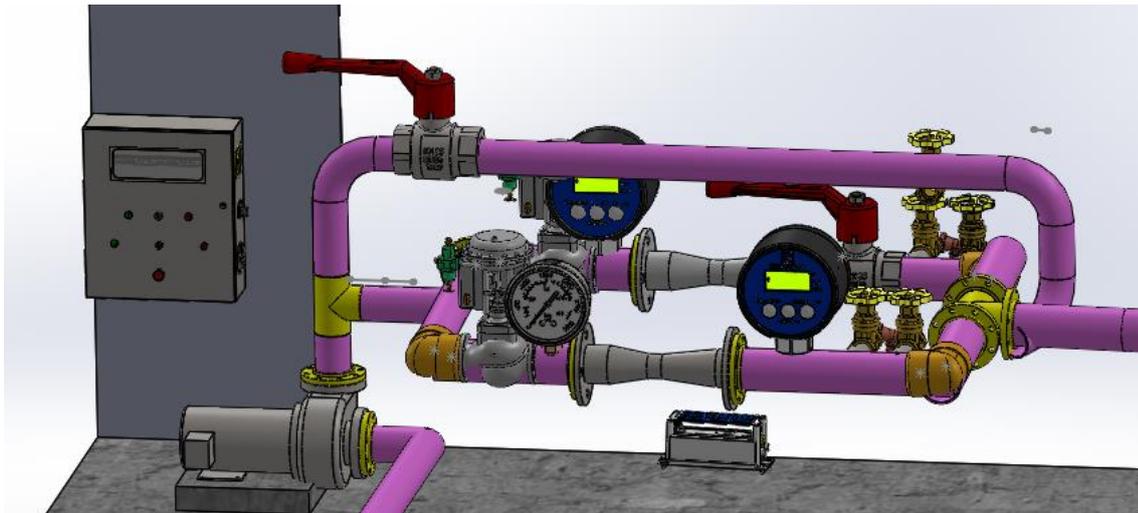
3.2 Diseño del sistema de cavitación hidrodinámica

En esta sección, se presentará el modelado 3D en SolidWorks del sistema de cavitación hidrodinámica y la integración del diseño mecánico, eléctrico y de control.

3.2.1 Análisis del diseño mecánico del sistema de cavitación hidrodinámica

Figura 3.11

Diseño 3D del sistema de cavitación hidrodinámica en Solidworks



La Figura 3.11 presenta el diseño del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada, destacando cambios significativos en la disposición de los componentes. La reestructuración se realizó para adaptarse al espacio disponible por el cliente, eligiendo una disposición vertical en lugar de horizontal.

En este diseño, el sistema de cavitación consta de dos dispositivos cavitantes, y se destaca que la presión de entrada del efluente al dispositivo debe ser de 10 bares para maximizar la generación de cavitación. Se han incorporado dos manómetros para medir la presión de entrada. Además, el sistema está compuesto por tres líneas de tuberías: las dos primeras, ubicadas en

paralelo, permiten el paso del fluido y la generación de cavitación, mientras que la tercera línea, situada en la parte superior, se encarga de la recirculación del fluido.

En la parte posterior, se observa un generador de ozono conectado a la tubería después del Venturi, contribuyendo a una mayor reducción de carga contaminante. Finalmente, se incluye un panel de control que regula y protege el motor conectado a la bomba centrífuga, encargado de desplazar el fluido a lo largo de todo el sistema. Este diseño integral garantiza una operación eficiente y controlada del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada.

3.3 Análisis de costos

3.3.1 Costo de componentes

A continuación, se presenta los componentes necesarios para el diseño y fabricación del sistema de cavitación hidrodinámica con su respectivo análisis de costos.

Tabla 16

Detalle de costo de componentes seleccionados

Cant.	Componente	Modelo/Detalle	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
1	Motor	Motor eléctrico trifásico 2000 rpm 220 Vac, 60 HZ	400,00	400,00
1	Banda	banda SKF SPZ 1400	20,00	20,00
1	Polea grande	Polea SKF SPZ 400	60,00	60,00
1	Polea pequeña	Polea SKF SPZ 140	40,00	40,00
1	Bomba centrífuga	Bomba centrífuga de eje libre de ¾ “ y 1”	1000,00	1000,00
1	Tanque	Tanque de acero ASTM A53	250,00	250,00
1	Tuberías	Suministro e instalación del sistema de tuberías (ASTM A53)	300	300
2	Tubo de Venturi	Fabricación del tubo de Venturi de acero inoxidable	500,00	1000,00
1	Caja metálica	Fabricación de caja metálica	100	100
1	Interruptor termomagnético tripolar	NXB-63 3P 10A 6KA	8,50	8,50

1	Interruptor termomagnético monopolar	NXB-63 1P 2A 6kA	3,50	3,50
1	Contactador trifásico	NXC-09M10 220V 60Hz	15,00	15,00
1	Relé térmico trifásico	NR2 - 25-10	18,00	18,00
3	Luces pilotos	Luz Led Monoblock Ue 120 Vac	3,00	9,00
3	Pulsadores	Pulsador led 120 Vac	2,50	7,50
2	Transmisor de presión	de transmisor electrónico de presión diferencial AISI 316 (4÷20 mA)	200,00	400,00
2	Válvula de presión	de Válvulas neumáticas de regulación de presión AISI 316	100,00	100,00
2	Convertidor electroneumático	Convertidor electroneumático (4÷20 mA)	500,00	1000,00
1	Válvula de caudal	Válvula reguladora de caudal	100,00	100,00
1	Válvula de apertura/cierre	de Válvula de apertura/cierre para entrada del fluido	50,00	50,00
1	Medidor de caudal	de Caudalímetro	150,00	150,00
1	Unidad central CPU	SIMATIC S7-1200 CPU 1212C AC/DC/Relé 6ES7212-1BE40-0XB0	566,00	566,00
1	Módulo de señal Entradas / Salidas analógicas	SM1234 6ES7234-4HE32-0XB0	736,00	736,00
1	Generador de ozono	de Generador de ozono de 4 gr/h	300,00	600,00
Total				6 933,50

Ver detalles de los componentes en el Anexo E.

3.3.2 Factibilidad económica

La construcción del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada, con un costo total aproximado de \$ 6 933.50 según la Tabla 16, puede parecer inicialmente elevado. Sin embargo, al analizar detenidamente el panorama, se revela como una inversión considerablemente

baja en comparación con las multas mensuales que las industrias generadoras de aguas residuales con altas cargas contaminantes podrían enfrentar por incumplir con las normas mínimas de descarga en ríos o alcantarillado.

Es importante destacar que estas multas suelen ser significativamente más elevadas que el costo de implementar este sistema de tratamiento avanzado. Por lo tanto, este gasto se convierte en una solución económicamente viable para las empresas, ya que les permite cumplir con los estándares ambientales y evitar penalizaciones financieras más onerosas.

Este enfoque no solo beneficia a la industria de curtiembres, sino que también es aplicable a cualquier tipo de sector industrial que genere aguas residuales. La viabilidad del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada se destaca como una estrategia inteligente y accesible para cualquier empresa que aspire a cumplir con las normativas ambientales, proteger los recursos hídricos y, al mismo tiempo, mantener sus costos operativos en un rango aceptable.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección, se presentarán las conclusiones alcanzadas a partir de los objetivos establecidos, tras llevar a cabo los correspondientes diseños y análisis del sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada. Se evaluará si dicho diseño satisface los requisitos del cliente y cumple con los objetivos inicialmente propuestos.

4.1.1 Conclusiones

Para alcanzar el objetivo general propuesto, se definieron objetivos específicos del proyecto centrados en el diseño de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada para reducir la carga contaminante de las aguas residuales industriales de la industria Curtiembre. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de cada objetivo específico, basadas en los análisis previamente detallados.

- La elección del mejor diseño del dispositivo de cavitación se la reflejó en la Tabla 15, la cual compara el rendimiento del dispositivo de cavitación bajo diferentes niveles de presión, indicando que se logró diseñar un dispositivo tipo tubo de Venturi con elevada velocidad del efluente en el interior del dispositivo y una eficaz generación de burbujas, propiciando así una cavitación eficiente en el tubo de Venturi. Esto también se ve reflejado en la Figura 3.7, donde el perfil de velocidad revela una significativa velocidad en la garganta y una distribución uniforme en la salida, favoreciendo una buena cavitación concluyendo que la presión de entrada del efluente al dispositivo de cavitación tipo Venturi debe mantenerse regulada a 10 bares para lograr un alto grado de cavitación.
- Se seleccionaron las tuberías adecuadas para transportar el efluente en el sistema diseñado, donde se determinó que las tuberías estarán en la entrada y la salida de la boca de la bomba centrífuga, presentando un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 1 pulgada, como se ilustra en la Figura 2.4. El material seleccionado para las tuberías es el ASTM A53, y a través de un

análisis de esfuerzos, se ha demostrado que dicho material es capaz de soportar el flujo del efluente que circulará por el sistema de cavitación.

- Fue posible determinar la capacidad óptima del tanque de almacenamiento del efluente para el sistema de cavitación hidrodinámica, definiendo sus dimensiones donde el volumen del tanque de almacenamiento se ha establecido en 80 litros, adoptando una forma cilíndrica con una altura de 0.63 m y un diámetro de 0.42 m. Por consiguiente, el material seleccionado para el tanque es el ASTM A53, el mismo utilizado para las tuberías, debido a su costo accesible y su capacidad para soportar los esfuerzos y presiones del efluente cumpliendo de manera efectiva con los requisitos del sistema, asegurando una capacidad adecuada para gestionar el almacenamiento del efluente en el proceso de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada.
- La elección de una bomba centrífuga adecuada para suministrar el caudal necesario en el proceso de cavitación y oxidación se llevó a cabo inicialmente con una bomba de 2 900 rev/min, alineada con los requerimientos de caudal de entrada del efluente establecidos en 4 litros/segundo. Sin embargo, dada la necesidad de mantener una velocidad óptima de 1,000 rev/min en el sistema de cavitación, se implementó un sistema de transmisión de potencia que conecta el motor a la bomba centrífuga con dicha velocidad donde se optó por un sistema de bandas en “V”, considerando su bajo costo, un tiempo de vida útil prolongado y una eficiencia mecánica destacada.
- Se ha concretado el diseño de un panel de control, cuya representación visual se encuentra detallada en la Figura C6, donde este panel facilita un control integral sobre el motor de la bomba hidráulica y el generador de ozono mediante la integración de componentes eléctricos de protección y control. Por lo tanto, la Figura C4 proporciona una representación detallada de los elementos específicos presentes en el panel, destacando la

disposición de interruptores, dispositivos de seguridad e indicadores permitiendo una buena supervisión y un ajuste adecuado de los parámetros operativos.

- Finalmente, se logró el diseño exitoso de un sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada al integrar de manera adecuada todos los componentes por separada en un solo sistema. Esta integración ha generado un sistema robusto, que demuestra ser eficiente en la reducción de la carga contaminante de DQO y DBO en el efluente de la industria curtiembre donde la versatilidad y eficacia del sistema no se limitan solo a la industria del cuero, sino que también se extienden a diversas industrias como la minera, alimentaria, petrolera, entre otras. Por lo que, este dispositivo no solo aborda las necesidades específicas de la industria curtiembre, sino que también ofrece una solución adaptable y efectiva para diversos sectores industriales, demostrando su aplicabilidad y contribución a la gestión sostenible de aguas residuales.

4.1.2 Recomendaciones

- Se optó por el tubo de Venturi como el dispositivo de cavitación principalmente debido a su capacidad para generar una mayor cantidad de burbujas durante el fenómeno de cavitación. Sin embargo, se sugiere explorar la posibilidad de analizar la interacción con la placa de orificios, otro dispositivo generador de cavitación lo que proporcionaría nuevos resultados sobre si la reducción de carga contaminante sería más significativa utilizando la placa de orificios en comparación con el tubo de Venturi.
- El ASTM A56 fue seleccionado como el principal material para las tuberías y el tanque de almacenamiento debido a su asequibilidad y disponibilidad, lo que contribuye a la reducción de los costos de implementación. Aunque ofrece una buena resistencia a la corrosión, se sugiere considerar el uso de acero inoxidable como material preferido. Esto no solo proporciona una mayor protección contra la corrosión, sino que también evita

posibles efectos adversos de la cavitación que podrían provocar un desgaste más rápido de las tuberías.

- El sistema de cavitación hidrodinámica con oxidación avanzada se centra en el tratamiento del efluente de la industria curtiembre, pero se sugiere llevar a cabo pruebas y aplicar este sistema a efluentes de otras industrias. Se ha demostrado previamente que este enfoque es eficiente para reducir la carga contaminante en diversas áreas industriales, tales como la petrolera, metalúrgica y de alimentos.
- Dado el diseño planteado, se establece que la presión de entrada ideal es de 10 bares. Sin embargo, se sugiere la posibilidad de modificar el diseño con el objetivo de reducir la presión de entrada. Se ha demostrado que con valores en el rango de 7 u 8 bares también se puede lograr una cavitación eficiente.

Referencias

- [1] M. J. Silva y D. Salinas Morales, “La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana”, *Revista Científica UISR.*, vol. 9, n.º 1, pp. 69–80, enero de 2022. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- [2] Water, Sanitation, Hygiene and Health. “A primer for health professionals”. World Health Organization. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-WSH-19.149>
- [3] J. Carpenter, M. Badve, S. Rajoriya, S. George, V. K. Saharan y A. B. Pandit, “Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry”, *Rev. Chem. Eng.*, vol. 33, n.º 5, enero de 2017. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>
- [4] L. F. Gutiérrez-Mosquera, S. Arias-Giraldo y D. F. Cardona-Naranjo, “Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la ingeniería y la agroindustria”, *Sci. Tech.*, vol. 24, n.º 2, p. 283, junio de 2019. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.22517/23447214.19921>
- [5] B. Wang et al., “Hydrodynamic cavitation and its application in water treatment combined with ozonation: A review”, *J. Ind. Eng. Chemistry*, agosto de 2022. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.07.031>
- [6] R. Shokoohi, A. Rahmani, G. Asgari, M. Ashrafi y E. Ghahramani, “The effect of the combined system of hydrodynamic cavitation, ozone, and hydrogen peroxide on chlorophyll a and organic substances removal in the raw water”, *Scientific Rep.*, vol. 13, n.º 1, junio de 2023. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37167-0>

- [7] Z. Wu, H. Shen, B. Ondruschka, Y. Zhang, W. Wang y D. H. Bremner, “Removal of blue-green algae using the hybrid method of hydrodynamic cavitation and ozonation”, *J. Hazardous Mater.*, vol. 235-236, pp. 152–158, octubre de 2012. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.034>
- [8] X. Wang, J. Jia y Y. Wang, “Combination of photocatalysis with hydrodynamic cavitation for degradation of tetracycline”, *Chem. Eng. J.*, vol. 315, pp. 274–282, mayo de 2017. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.011>
- [9] V. K. Saharan, A. B. Pandit, P. S. Satish Kumar y S. Anandan, “Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of acid red 88 dye”, *Ind. & Eng. Chemistry Res.*, vol. 51, n.º 4, pp. 1981–1989, abril de 2011. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1021/ie200249k>
- [10] S. B. Randhavane y A. K. Khambete, “Hydrodynamic cavitation: An approach to degrade chlorpyrifos pesticide from real effluent”, *KSCE J. Civil Eng.*, vol. 22, n.º 7, pp. 2219–2225, agosto de 2017. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2045-0>
- [11] P. Thanekar, M. Panda y P. R. Gogate, “Degradation of carbamazepine using hydrodynamic cavitation combined with advanced oxidation processes”, *Ultrason. Sonochemistry*, vol. 40, pp. 567–576, enero de 2018. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.001>
- [12] J. O. Tijani, O. O. Fatoba, G. Madzivire y L. F. Petrik, “A review of combined advanced oxidation technologies for the removal of organic pollutants from water”, *Water, Air, & Soil Pollut.*, vol. 225, n.º 9, agosto de 2014. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2102-y>
- [13] R. Y. Lozano Morillo, “Aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica, ozono y oxígeno atmosférico para la mejora de la calidad de aguas residuales de la empresa de

curtiembre”, tesis de grado, Univ. Cesar Vallejo, Lima, 2020. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/67566>

[14] S. I. Nieto Zapata, “Aplicación de la cavitación hidrodinámica para reducir los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los efluentes de la industria textil y de curtiembre”, tesis de grado, Univ. Cesar Vallejo, Lima, 2019. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46661>

[15] C. Pedreros Calvo, K. V. Valderrama López, R. N. Agudelo Valencia, K. Pérez Cortés y C. E. Campo, “Reduction of COD and TOC concentration in pharmaceutical wastewater using Fe₂₊ catalyzed ozone: Full-scale case study”, *Appl. Chem. Eng.*, vol. 5, n.º 2, p. 111, octubre de 2022. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.24294/ace.v5i2.1646>

[16] M. Navarrete et al., “Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica”, en SOMI Congr. Instrumentacion, Puerto Vallarta, México. Univ. Nac. Auton. Mex., 2014, p. 10.

[17] A. L. Macías, D. C. Rodríguez y F. J. Molina, “Design of influent distribution system in domestic wastewater treatment units”, *TecnoLógicas*, vol. 25, n.º 55, noviembre de 2022, art. n.º e2428. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.22430/22565337.2428>

[18] N. S. Baghele, A. K. Khambete y R. A. Christian, “Application of effective orifice jet length for treating SST effluent of STP by hydrodynamic cavitation”, *Environmental Technol.*, pp. 1–22, junio de 2022. Accedido el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2087047>

Apéndices

Apéndice A – Cálculos del sistema de transmisión de potencia

- **Paso 1: Cálculo del factor de servicio C2**

Figura A1

Selección del motor AC trifásico

Types of driven machinery		Soft starts			Heavy starts		
		Duty time h/day 10 and under	Over 10 to 16	Over 16	Duty time h/day 10 and under	Over 10 to 16	Over 16
Class 1 Light duty	Blowers, exhausters and fans (up to 7.5 kW), centrifugal compressors and pumps, Belt conveyors (uniformly loaded)	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Class 2 Medium duty	Agitators (uniform density), blowers, exhausters and fans (over 7.5 kW), Rotary compressors and pumps (other than centrifugal), Belt conveyors (not uniformly loaded), generators and exciters, laundry machinery, line shafts, machine tools, printing machinery, sawmill and woodworking machinery, screens (rotary).	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Class 3 Heavy duty	Agitators and mixers (variable density), brick machinery, bucket elevators, compressors and pumps (reciprocating), conveyors (heavy duty), Hoists, mills (hammer), pulverisers, punches, presses, shears, quarry plant, rubber machinery, screens (vibrating), textile machinery.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Class 4 Extra heavy duty	Crushers (gratory-jaw roll), mills (ball-rod-tube).	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

La elección del motor AC trifásico con arranque suave para la bomba centrífuga de la Curtiduría Tungurahua se basa en una potencia de 2 HP (1.5 kW) y la clasificación como Clase 1 *light duty*, con ocho horas diarias de operación. Este motor, al tener un arranque suave, ofrece una transición gradual y controlada, minimizando picos de corriente y reduciendo el desgaste. Por lo que, su factor de servicio es de 1.0 asegurando una operación eficiente y confiable durante el período de trabajo, contribuyendo a la durabilidad y rendimiento óptimo del sistema en la gestión de efluentes de la curtiduría.

- **Paso 2: Elección de la familia de bandas en “V”**

$$P_d = P_r C_2 = 1.5 \text{ kW} \times 1 = 1.5 \text{ kW} \quad (\text{A1})$$

Donde:

P_d : es la potencia de diseño del motor en kilovatios (kW).

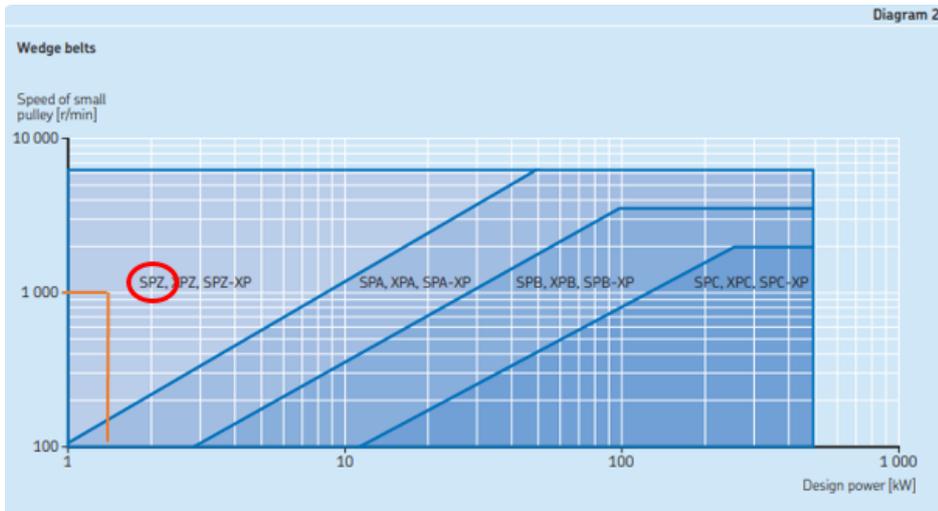
P_r : es la potencia nominal del motor en kilovatios (kW).

C_2 : es el factor de servicio.

La potencia de diseño se determina utilizando el factor de servicio obtenido previamente. A partir de esta potencia de diseño, que coincide con la potencia nominal del motor de 1.5 kW, y considerando que la velocidad se reducirá a 1 000 rpm, donde la polea más pequeña alcanzará dicha velocidad, se procede a seleccionar la familia de banda que se utilizará en el sistema. Este paso es crucial para garantizar una transmisión de potencia eficiente y adecuada entre las poleas. Como se puede observar en el diagrama, las bandas en “V” deberán ser escogidas de la familia SPZ para que cumpla con los requerimientos del sistema.

Figura A2

Selección de bandas en “V”



- **Paso 3: Elección de la longitud de la banda y el diámetro de las poleas**

Primero se determina el radio de velocidad requerido

$$I_r = \frac{VP_p}{VP_G} = \frac{2900 \text{ rpm}}{1000 \text{ rpm}} = 2.9 \quad (\text{A2})$$

Donde:

P_d : es la velocidad del motor trifásico.

P_r : es la velocidad deseada para la bomba centrífuga

I_r : es el radio de velocidad.

Figura A3

Selección de dimensiones de la banda y poleas

Speed ratio	Datum diameter of pulleys		Belt length															
	Driver	Driven	800	900	1 000	1 120	1 250	1 400	1 600	1 800	2 000	2 240	2 500	2 800	3 150	3 550	4 000	4 500
	mm	mm	mm															
2,25	*80	180	189	241	292	352	418	493	594	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,25	140	315	-	-	-	-	252	331	434	535	638	758	888	1 039	1 214	1 415	1 640	1 891
2,35	*85	200	166	219	270	331	397	473	573	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,36	95	224	-	188	241	303	369	445	546	646	747	867	997	1 148	1 323	1 523	1 748	1 998
2,36	106	250	-	-	208	271	338	414	515	616	717	837	968	1 118	1 293	1 494	1 719	1 969
2,37	118	280	-	-	-	233	302	379	481	582	683	803	934	1 084	1 260	1 460	1 685	1 936
2,39	132	315	-	-	-	258	336	439	541	642	763	894	1 045	1 220	1 421	1 646	1 897	-
2,49	90	224	-	192	244	306	372	448	549	650	750	871	1 001	1 151	1 327	1 527	1 752	2 002
2,50	*80	200	169	222	274	335	401	476	577	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,50	100	250	-	-	212	275	342	418	520	621	721	842	972	1 123	1 298	1 498	1 723	1 974
2,50	112	280	-	-	-	237	306	383	485	586	687	808	938	1 089	1 264	1 465	1 690	1 940
2,50	160	400	-	-	-	-	-	-	339	444	547	669	801	953	1 129	1 330	1 556	1 806
2,50	200	500	-	-	-	-	-	-	-	424	550	684	837	1 014	1 216	1 442	1 694	-
2,52	125	315	-	-	-	262	341	444	546	647	769	899	1 050	1 226	1 426	1 652	1 902	-
2,63	95	250	-	-	215	278	345	422	523	624	725	845	976	1 126	1 302	1 502	1 727	1 978
2,64	*85	224	-	195	248	310	376	452	553	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,64	106	280	-	-	241	310	387	489	590	691	812	943	1 093	1 269	1 469	1 695	1 945	-
2,67	150	400	-	-	-	-	-	-	345	451	554	676	808	960	1 136	1 337	1 563	1 814
2,67	118	315	-	-	-	267	346	449	551	652	774	905	1 055	1 231	1 432	1 657	1 907	-
2,78	90	250	-	-	218	282	349	425	527	628	729	849	980	1 130	1 306	1 506	1 731	1 981
2,78	180	500	-	-	-	-	-	-	-	437	563	698	851	1 028	1 231	1 457	1 708	-
2,80	*80	224	-	198	251	313	379	456	557	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,80	100	280	-	-	245	314	391	493	595	696	817	947	1 098	1 273	1 474	1 699	1 949	-
2,81	112	315	-	-	-	273	350	453	555	657	778	909	1 060	1 235	1 436	1 662	1 912	-
2,86	140	400	-	-	-	-	-	-	352	457	561	684	816	967	1 143	1 345	1 571	1 821
2,94	*85	250	-	-	222	285	352	429	530	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Con un radio de velocidad calculado de 2.9 y una distancia entre centros de 350 mm, se determinaron los diámetros de las poleas para garantizar una transmisión eficiente de potencia. El diámetro de a polea pequeña según la tabla es de 140 mm, mientras que la polea grande alcanzó un diámetro de 400 mm. Además, la longitud de la banda necesaria es de 1 600 mm.

• **Paso 4: Elección del factor de corrección C1 y C3**

$$f = \frac{D-d}{CC} = \frac{400 \text{ mm} - 140 \text{ mm}}{350 \text{ mm}} = 0.75 \tag{A3}$$

Donde:

D: Diámetro seleccionado de la pole grande.

d: Diámetro seleccionado de la polea pequeña.

CC: Distancia entre centros.

Figura A4

Selección del factor de corrección C_3

Table 7

Arc of contact power correction factor C_3

$\frac{D-d}{CC}$	Arc of contact on small pulley	Arc of contact correction factor C_3
mm	deg.	-
0,00	180	1,00
0,05	177	0,99
0,10	174	0,99
0,15	171	0,98
0,20	169	0,97
0,25	166	0,97
0,30	163	0,96
0,35	160	0,95
0,40	157	0,94
0,45	154	0,93
0,50	151	0,93
0,55	148	0,92
0,60	145	0,91
0,65	142	0,90
0,70	139	0,89
0,75	136	0,88
0,80	133	0,87

Primero, se llevó a cabo el cálculo del factor f , obteniendo un valor de 0.75. Utilizando este resultado, se procedió a consultar la tabla para encontrar el factor de corrección de arco de contacto C_3 , el cual se determinó como 0.88.

Figura A5

Selección del factor de corrección C_1

Table 8

Belt length correction factor C_1

Belt length	Correction factor									
	SPZ	SPA	SPB	SPC	8V	Z	A	B	C	D
	SPZ-XP	SPA-XP	SPB-XP	SPC-XP	8V-XP	ZX	AX	BX	CX	
	XPZ	XPA	XPB	XPC						
	3V	5V								
	3V-XP	5V-XP								
	3VX	5VX								
mm	-									
400	0,50					0,87	0,68			
475	0,65					0,90	0,74	0,64		
530	0,74					0,93	0,78	0,70		
630	0,82	0,77				0,96	0,81	0,76		
710	0,84	0,79				0,99	0,83	0,78		
900	0,88	0,83	0,76			1,05	0,87	0,82	0,73	
1 000	0,90	0,85	0,78			1,06	0,89	0,84	0,76	
1 120	0,93	0,87	0,80			1,08	0,91	0,86	0,78	
1 250	0,95	0,89	0,82			1,11	0,93	0,88	0,80	
1 400	0,96	0,91	0,84	0,70		1,14	0,96	0,90	0,82	
1 600	1,00	0,93	0,86	0,74		1,17	0,99	0,93	0,84	
1 800	1,01	0,95	0,88	0,77		1,22	1,01	0,95	0,86	
2 000	1,02	0,96	0,90	0,80	0,78	1,25	1,03	0,98	0,88	0,78
2 240	1,05	0,98	0,92	0,83	0,80	1,28	1,06	1,00	0,91	0,80
2 500	1,07	1,00	0,94	0,86	0,80	1,29	1,09	1,03	0,93	0,82
2 800	1,09	1,02	0,96	0,88	0,82	1,29	1,11	1,05	0,95	0,84
3 150	1,11	1,04	0,98	0,90	0,84		1,13	1,07	0,97	0,86
3 550	1,13	1,06	1,00	0,92	0,86		1,15	1,09	0,99	0,88

A continuación, se pasa a elegir el factor de corrección C1 de la longitud de banda teniendo que nuestra banda elegida tiene una longitud de 1 600 mm y que pertenece a la familia SPZ obteniendo un valor de 1.00 para el factor de corrección C1.

- **Paso 5: Selección de la potencia nominal**

$$P_b = P_r + P_s = 3.29 \text{ kW} + 0.22 \text{ kW} = 3.51 \text{ kW} \quad (\text{A4})$$

Donde:

P_b : Potencia nominal (Power rating)

P_r : Potencia nominal por correa para diámetro de polea pequeño

P_s : Potencia nominal basada en la relación de velocidad

Figura A6

Selección de la potencia nominal

Power ratings
Section Z

Table 9a

Faster shaft speed n_1 /min	Rated power per belt for small pulley datum diameter [mm]												Additional power per belt for speed ratio			
	67	71	75	80	85	90	95	100	112	125	132	140	1.00 to 1.05	1.06 to 1.24	1.25 to 1.59	> 1.59
	kW												kW			
100	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.19	0.20	--	--	0.01	0.01
500	0.31	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.54	0.62	0.70	0.75	0.80	--	0.01	0.03	0.04
720	0.42	0.46	0.50	0.55	0.59	0.64	0.68	0.73	0.84	0.95	1.02	1.09	--	0.02	0.04	0.05
800	0.46	0.50	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.80	0.92	1.04	1.11	1.19	--	0.02	0.04	0.06
900	0.50	0.55	0.59	0.65	0.71	0.77	0.82	0.88	1.01	1.15	1.22	1.31	--	0.02	0.05	0.07
960	0.53	0.58	0.63	0.69	0.75	0.81	0.87	0.92	1.06	1.21	1.29	1.38	0.01	0.03	0.05	0.07
1000	0.55	0.60	0.65	0.71	0.77	0.83	0.89	0.95	1.10	1.25	1.33	1.42	0.01	0.03	0.05	0.08
1100	0.59	0.64	0.70	0.76	0.83	0.90	0.97	1.03	1.19	1.35	1.44	1.54	0.01	0.03	0.06	0.08
1200	0.63	0.69	0.75	0.82	0.89	0.96	1.04	1.11	1.27	1.45	1.55	1.65	0.01	0.03	0.06	0.09
1300	0.67	0.73	0.79	0.87	0.95	1.03	1.10	1.18	1.36	1.55	1.65	1.76	0.01	0.03	0.07	0.10
1400	0.71	0.77	0.84	0.92	1.01	1.09	1.17	1.25	1.44	1.64	1.75	1.87	0.01	0.04	0.07	0.11
1440	0.72	0.79	0.86	0.94	1.03	1.11	1.20	1.28	1.47	1.68	1.79	1.92	0.01	0.04	0.08	0.11
1500	0.74	0.82	0.89	0.97	1.06	1.15	1.24	1.32	1.52	1.74	1.85	1.98	0.01	0.04	0.08	0.11
1600	0.78	0.86	0.93	1.02	1.12	1.21	1.30	1.39	1.60	1.83	1.95	2.08	0.01	0.04	0.08	0.12
1700	0.82	0.90	0.98	1.07	1.17	1.27	1.36	1.46	1.68	1.92	2.04	2.19	0.01	0.05	0.09	0.13
1800	0.85	0.94	1.02	1.12	1.22	1.32	1.42	1.52	1.76	2.01	2.14	2.29	0.01	0.05	0.10	0.14
1900	0.89	0.97	1.06	1.17	1.28	1.38	1.49	1.59	1.83	2.09	2.23	2.39	0.01	0.05	0.10	0.14
2000	0.92	1.01	1.10	1.21	1.33	1.44	1.55	1.65	1.91	2.18	2.32	2.48	0.01	0.05	0.11	0.15
2100	0.95	1.05	1.14	1.26	1.38	1.49	1.60	1.72	1.98	2.26	2.41	2.58	0.01	0.06	0.11	0.16
2200	0.99	1.08	1.18	1.30	1.43	1.54	1.66	1.78	2.05	2.34	2.50	2.67	0.01	0.06	0.12	0.17
2300	1.02	1.12	1.22	1.35	1.47	1.60	1.72	1.84	2.12	2.43	2.59	2.77	0.01	0.06	0.12	0.17
2400	1.05	1.16	1.26	1.39	1.52	1.65	1.78	1.90	2.19	2.51	2.67	2.86	0.01	0.06	0.13	0.18
2500	1.08	1.19	1.30	1.43	1.57	1.70	1.83	1.96	2.26	2.59	2.75	2.95	0.01	0.07	0.13	0.19
2600	1.11	1.22	1.34	1.48	1.61	1.75	1.88	2.02	2.33	2.66	2.84	3.03	0.01	0.07	0.14	0.20
2700	1.14	1.26	1.37	1.52	1.66	1.80	1.94	2.08	2.40	2.74	2.92	3.12	0.01	0.07	0.14	0.20
2800	1.17	1.29	1.41	1.56	1.70	1.85	1.99	2.13	2.46	2.81	3.00	3.21	0.02	0.07	0.15	0.21
2880	1.19	1.32	1.44	1.59	1.74	1.89	2.03	2.18	2.52	2.87	3.06	3.27	0.02	0.08	0.15	0.22
2900	1.20	1.32	1.45	1.60	1.75	1.90	2.04	2.19	2.53	2.89	3.08	3.29	0.02	0.08	0.15	0.22
3000	1.23	1.35	1.48	1.63	1.78	1.94	2.09	2.24	2.58	2.94	3.13	3.34	0.02	0.08	0.15	0.22
3100	1.25	1.39	1.52	1.68	1.83	1.99	2.15	2.30	2.66	3.03	3.23	3.45	0.02	0.08	0.16	0.24

Para determinar la potencia nominal, debemos utilizar el valor de velocidad de la polea con mayor velocidad que es de 2 900 rpm que es la velocidad de nuestro motor y el diámetro de la polea más pequeña que es de 140 mm, donde a través de la tabla podremos obtener el P_r y P_s cuyos valores son 3.29 kW y 0.22 respectivamente. A partir de esto, obtenemos el valor de potencia nominal sumándolos, arrojando un valor de 3.51 kW.

- **Paso 6: Calculo del número de bandas en “V”**

Se procede a calcular el *power rating* de la banda con el valor del *power rating* obtenido en el paso anterior que es de 3.51 kW:

$$P_r = P_b C_3 C_1 = 3.51 \text{ kW} \times 0.88 \times 1.00 = 3.09 \text{ kW} \quad (\text{A5})$$

Donde:

P_r : Potencia nominal de la banda

P_b : Potencia nominal

C_1 : Factor de corrección de arco de contacto 1

C_3 : Factor de corrección de arco de contacto 1

Luego, se pasa a calcular el número de bandas en “V” a utilizar.

$$N = \frac{P_d}{P_r} = \frac{3 \text{ kW}}{3.09 \text{ kW}} = 0.97 \approx 1 \quad (\text{A6})$$

Donde:

P_d : Potencia de diseño

P_b : Potencia nominal de la banda

N : Número de bandas en V necesarias

Apéndice B – Programación en lenguaje Ladder usando TIA Portal

Figura B1

Control de presión del primer tubo de Venturi usando la válvula V002

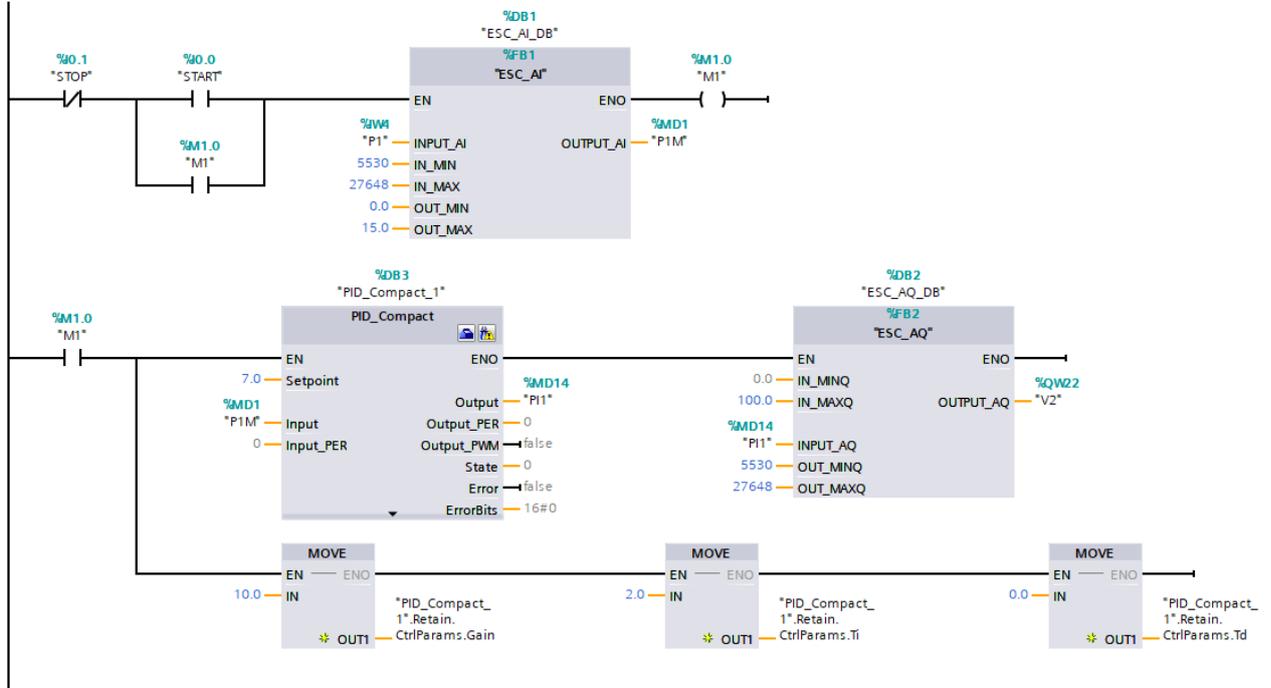


Figura B2

Control de presión del segundo tubo de Venturi usando la válvula V003

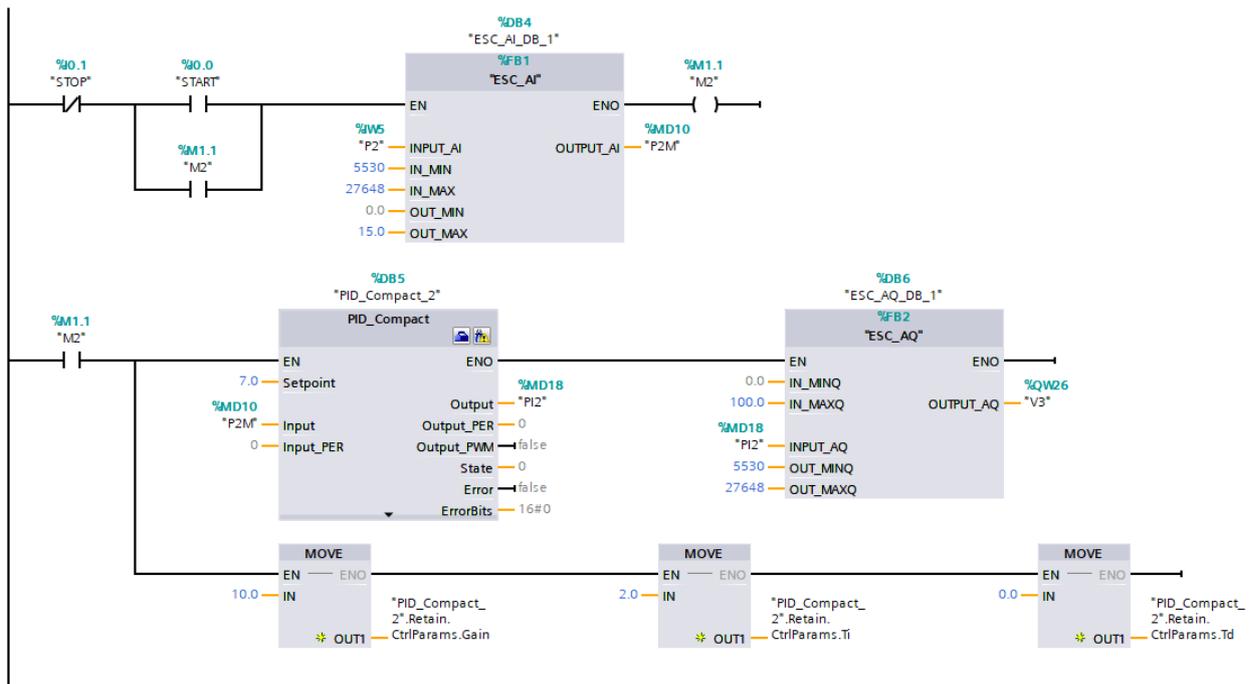


Figura B3

Control de nivel del tanque T001

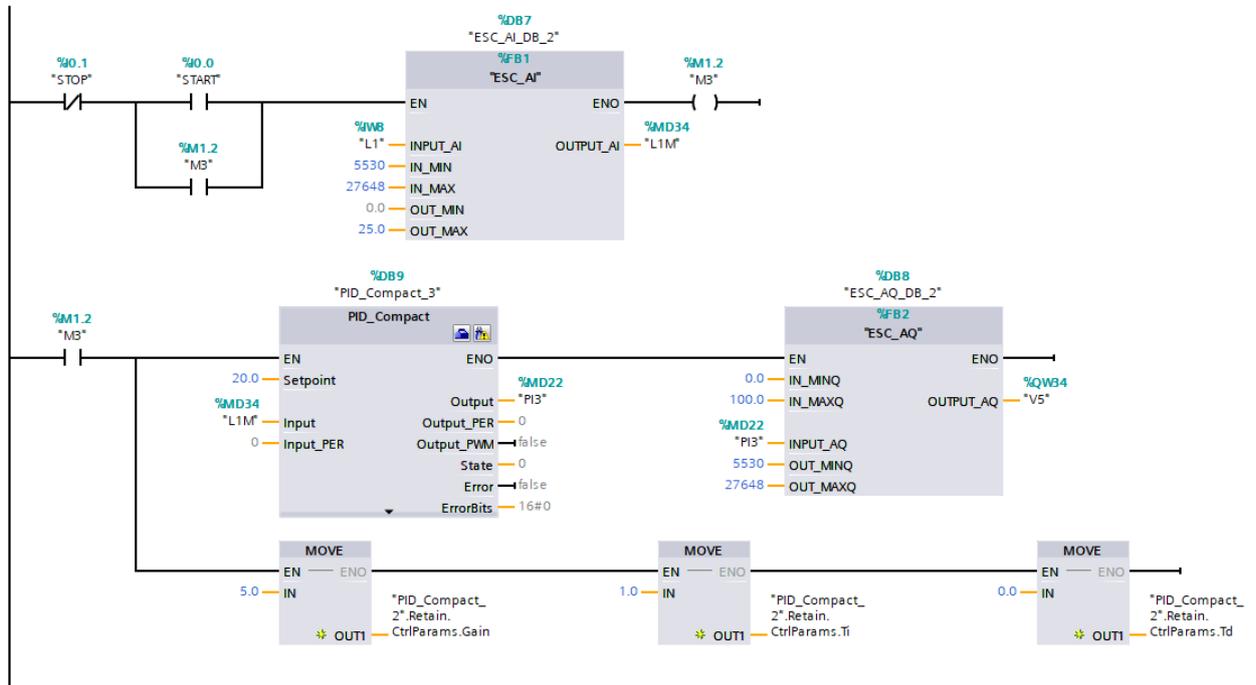


Figura B4

Control de temperatura del sistema

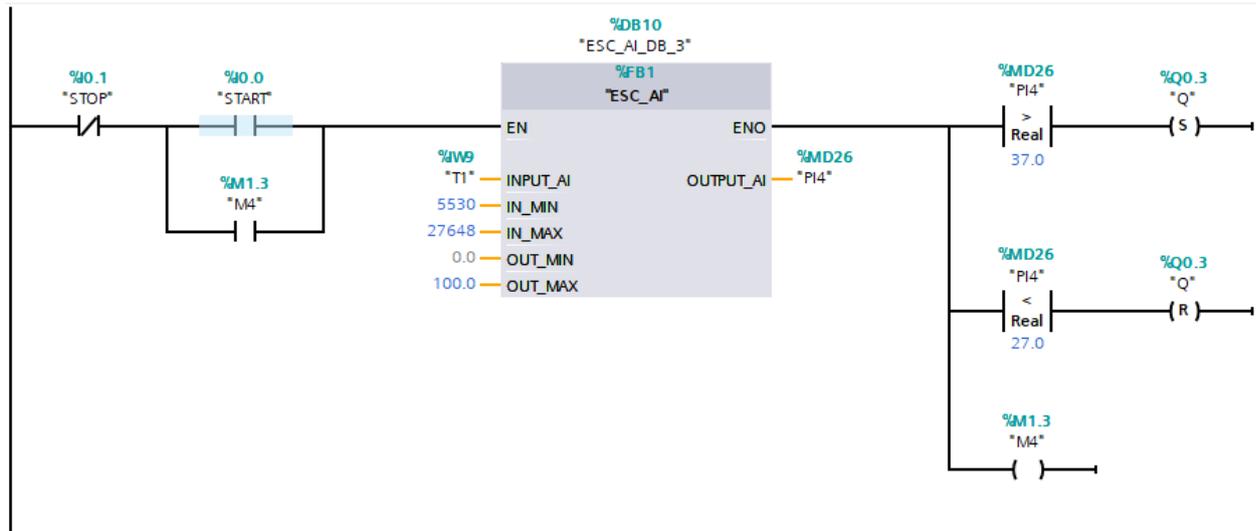


Figura B5

Control con switches para las válvulas V001, V004 y V006

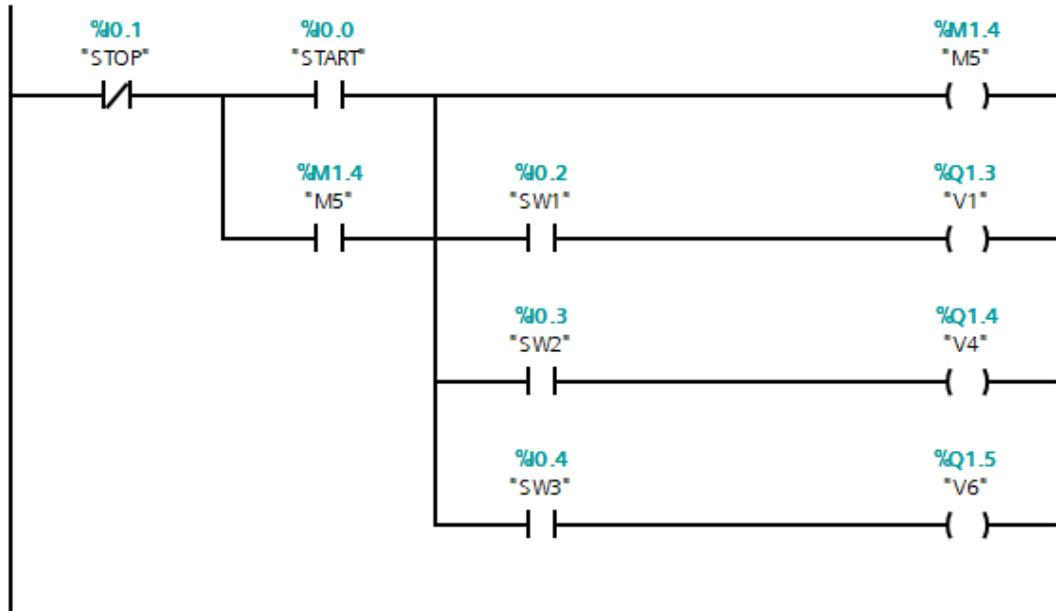


Figura B6

Bloque de función que transforma y escala la señal analógica de entrada en tipo de variable entero a real

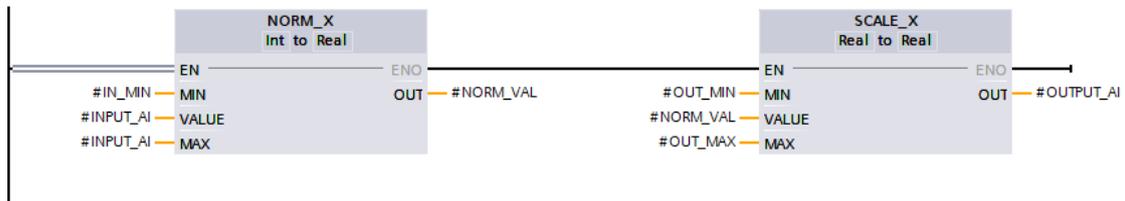
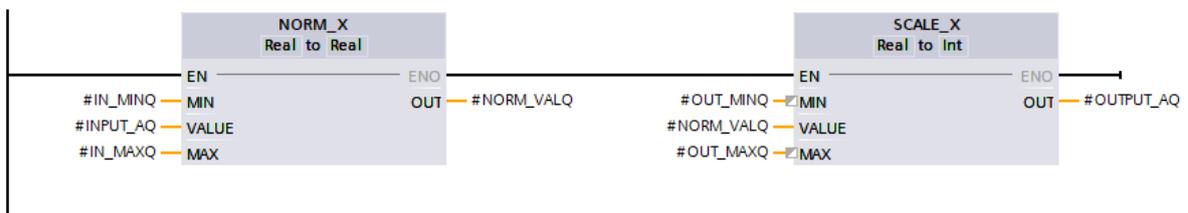


Figura B7

Bloque de función que transforma y escala la señal de salida a tipo de variable real



Desde la Figura B1 hasta la Figura B7 se muestra el esquema de programación en un lenguaje de bloques de funciones (Function Block Diagram, FBD) para un PLC (Controlador Lógico Programable), en este caso diagrama de escalera (Ladder Diagram, LD). Este tipo de lenguaje se utiliza para representar gráficamente la lógica de control en sistemas automatizados y es estándar según la norma IEC 61131-3.

Apéndice C – Diagramas eléctricos y de control en CadeSimu

Figura C1

Diagrama eléctrico y de control del motor del sistema con arranque estrella-triángulo

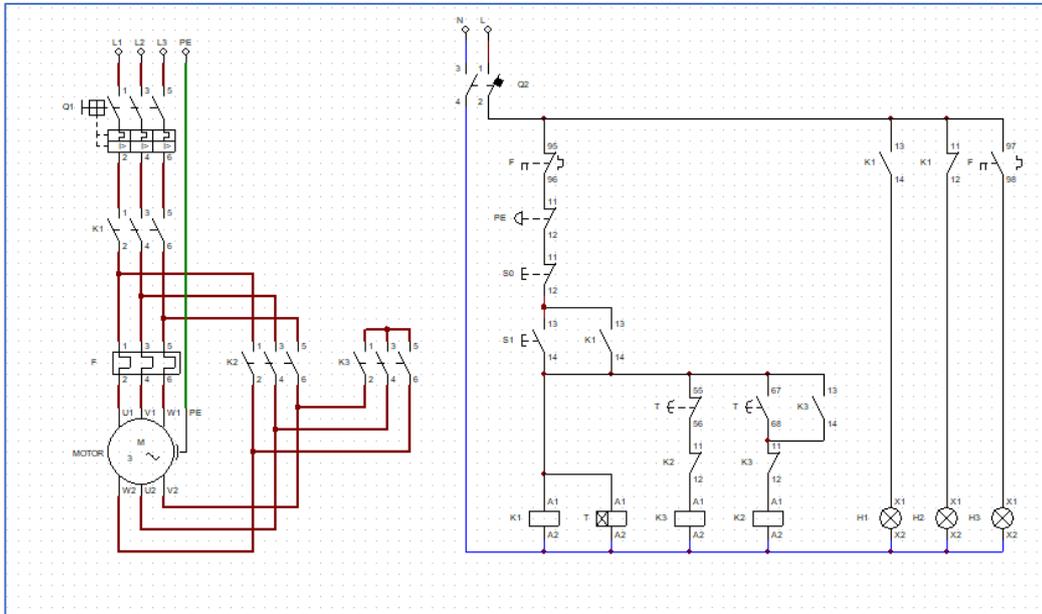


Figura C2

Diagrama 3D del motor del sistema con arranque estrella-triángulo

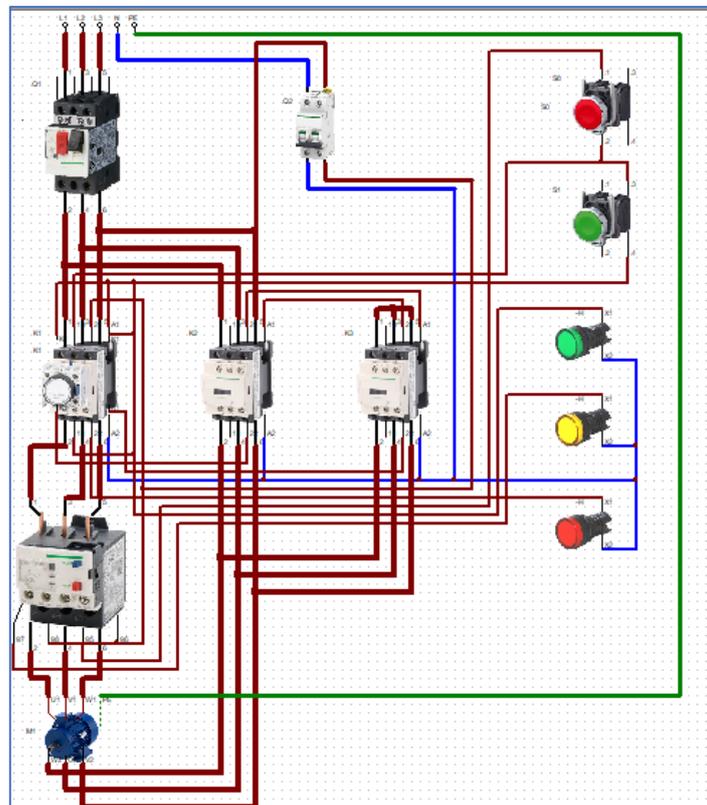


Figura C3

Diagrama de control y potencia de motor trifásico con tres terminales en CadeSimu

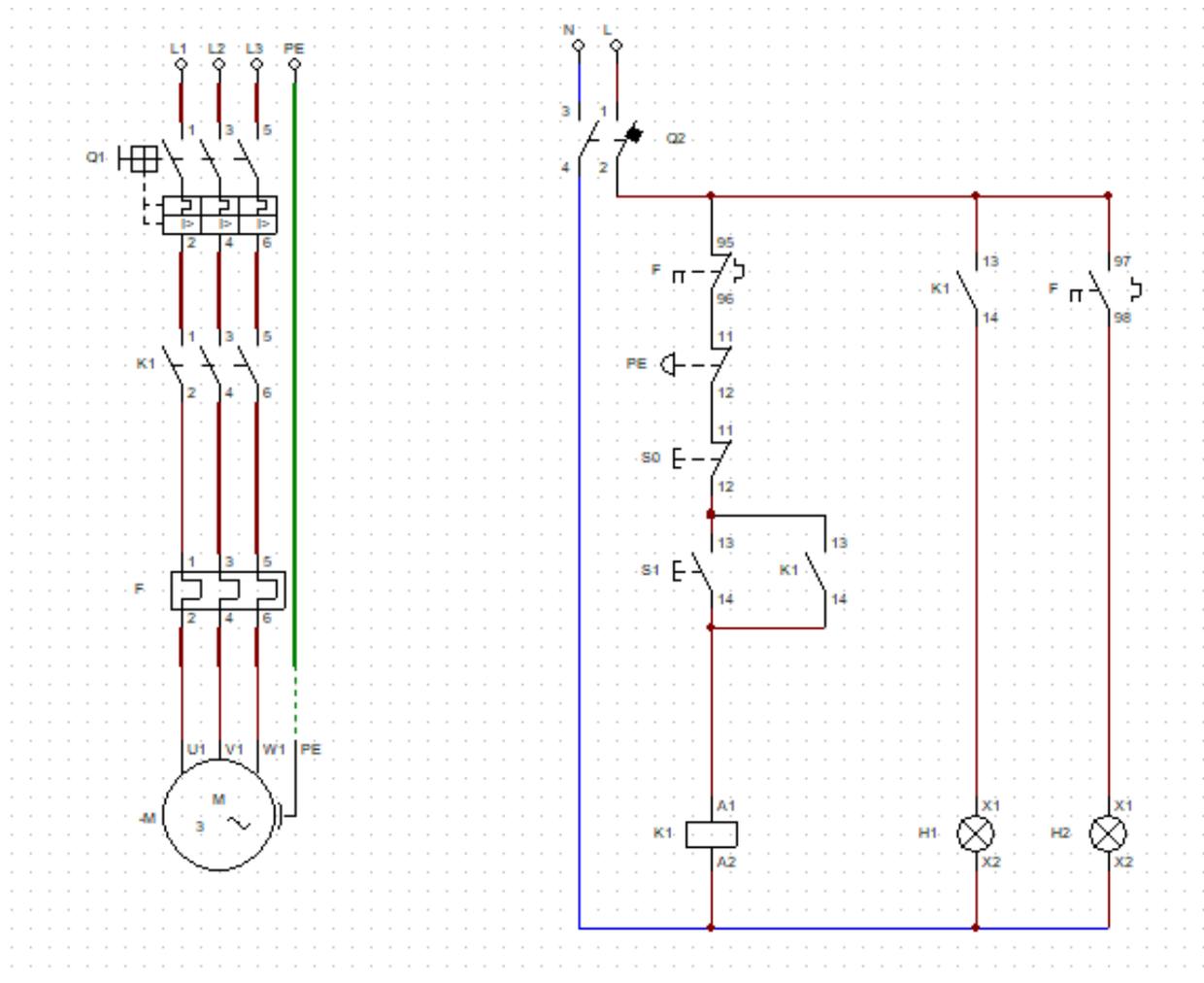


Figura C4

Diagrama 3D de control y potencia de motor trifásico con tres terminales en CadeSimu

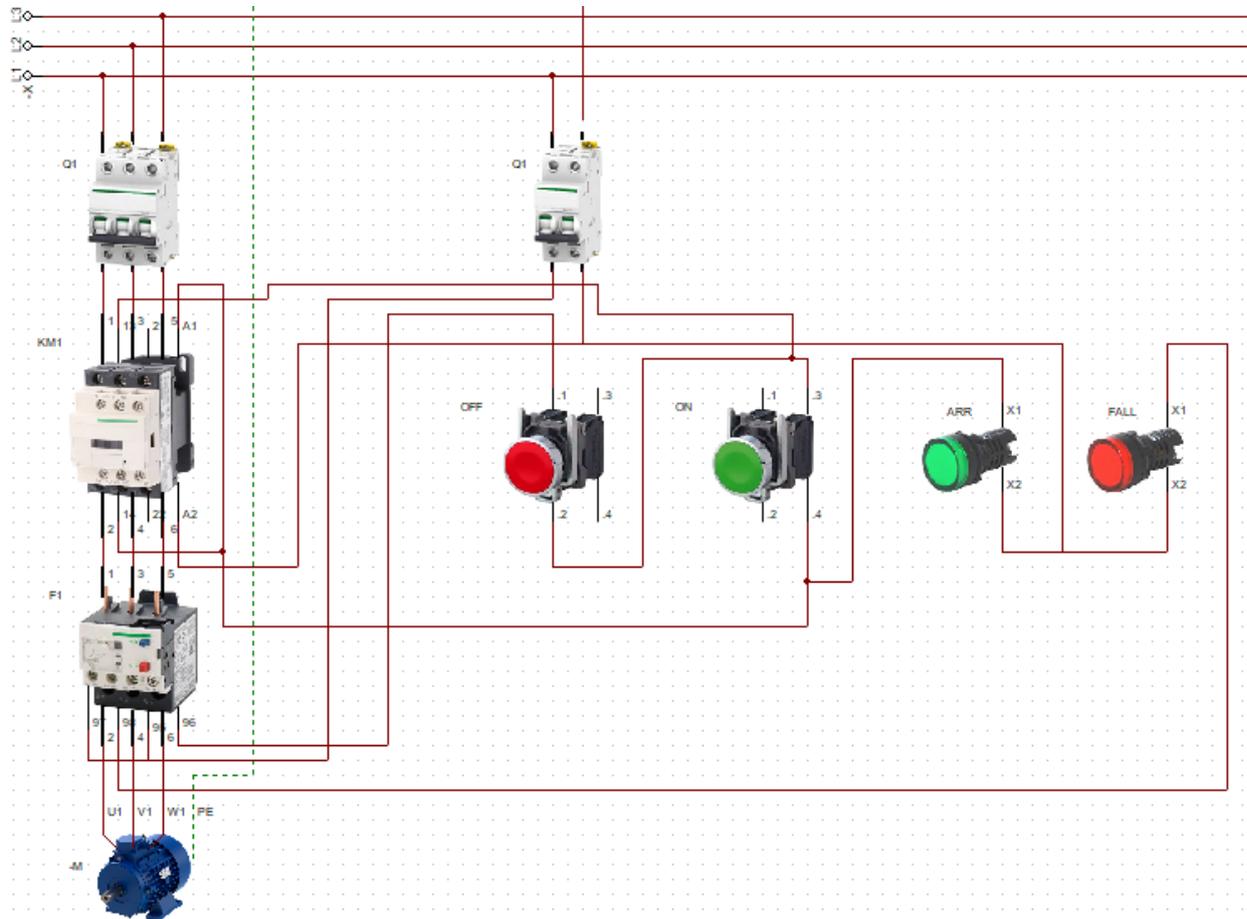


Figura C5

Diagrama de control y potencia de motor trifásico con seis terminales en CadeSimu

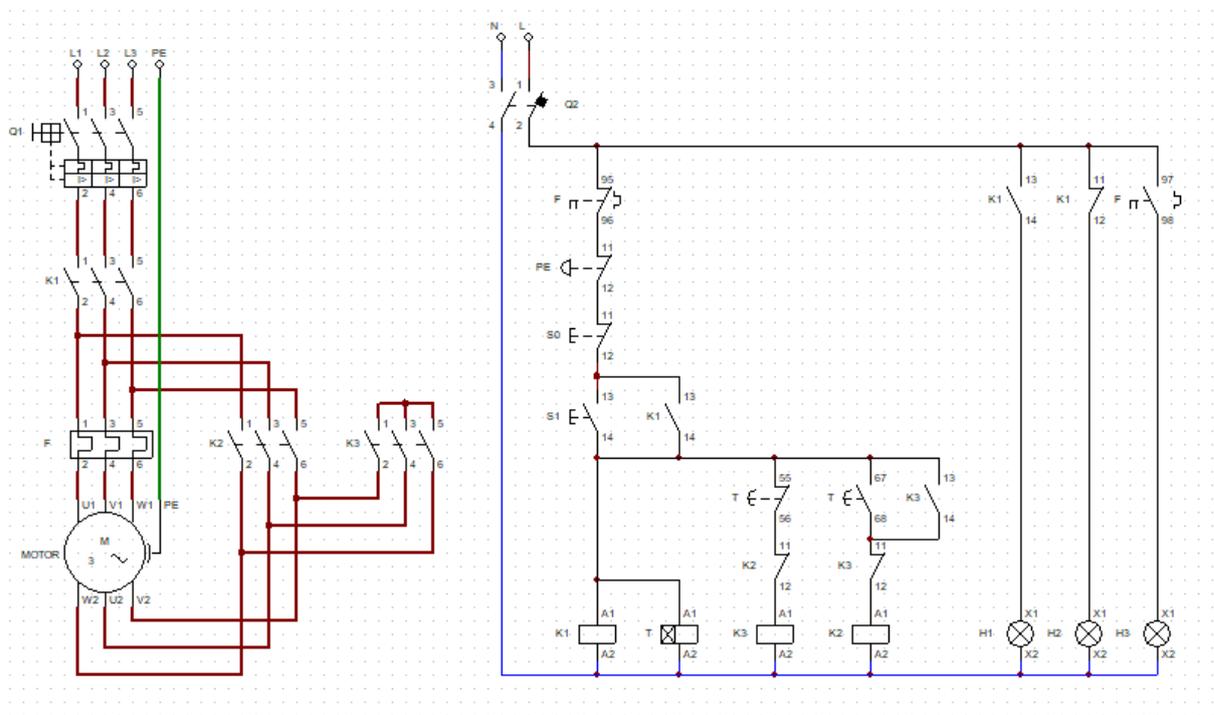
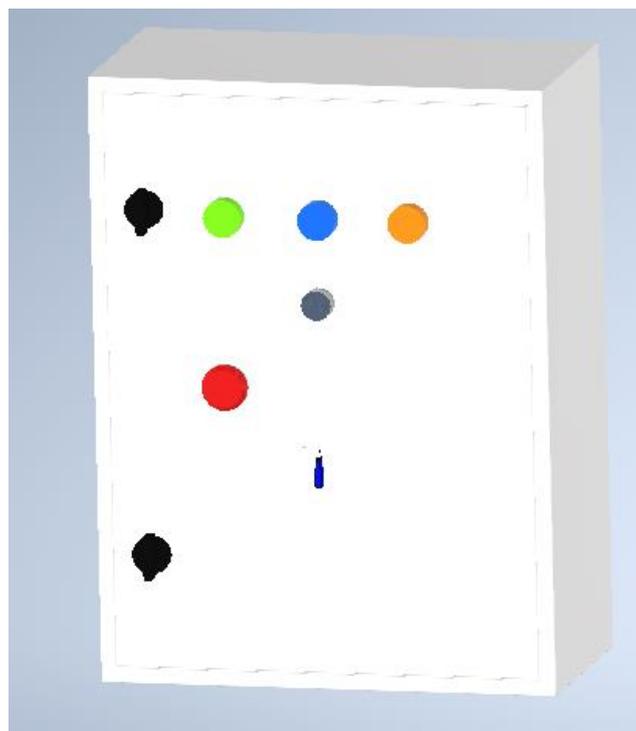


Figura C6

Diseño del panel de control en Inventor



Apéndice D – Modelado del sistema de cavitación a diferentes presiones de entrada

Presión de entrada: 7 bares

Figura D1

Gráfica de velocidad del fluido dado una presión de entrada constante 7 bares

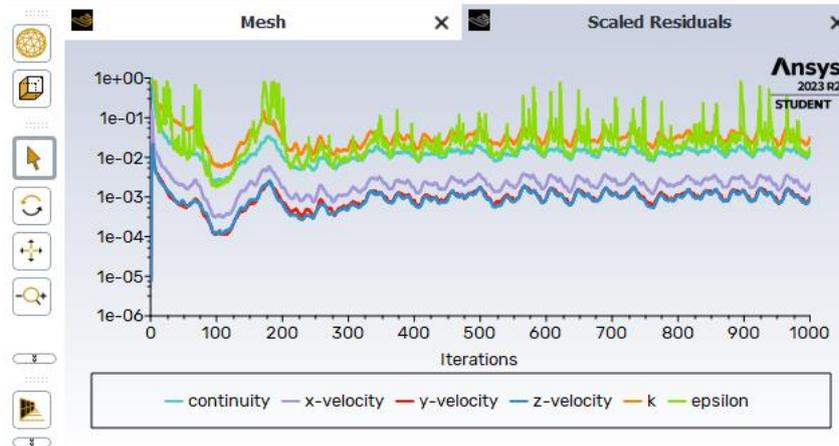


Figura D2

Gráfica de perfiles de velocidad dada una presión de entrada constante 7 bares

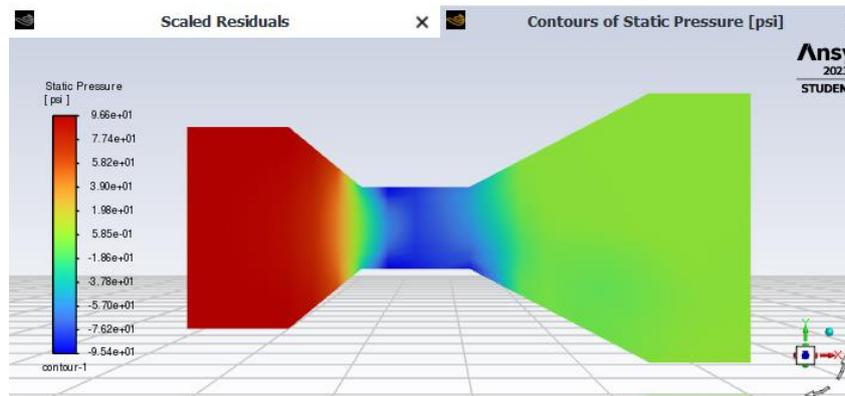


Figura D3

Gráfica de perfiles de presión dada una presión de entrada constante 7 bares

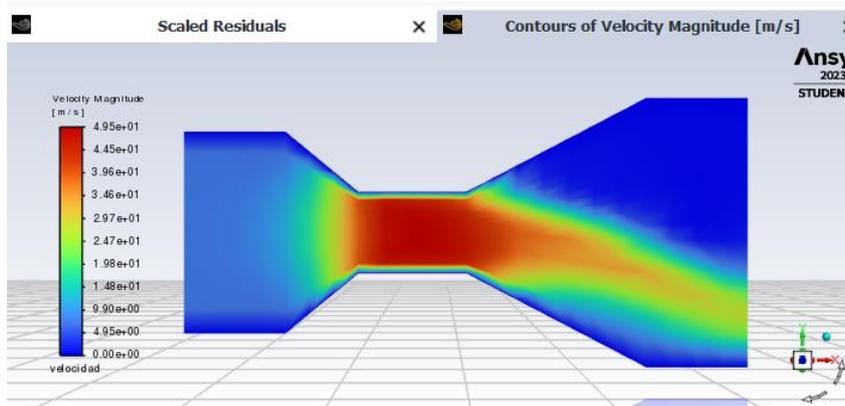


Figura D4

Gráfica de vectores de velocidad dado una presión de entrada constante 7 bares

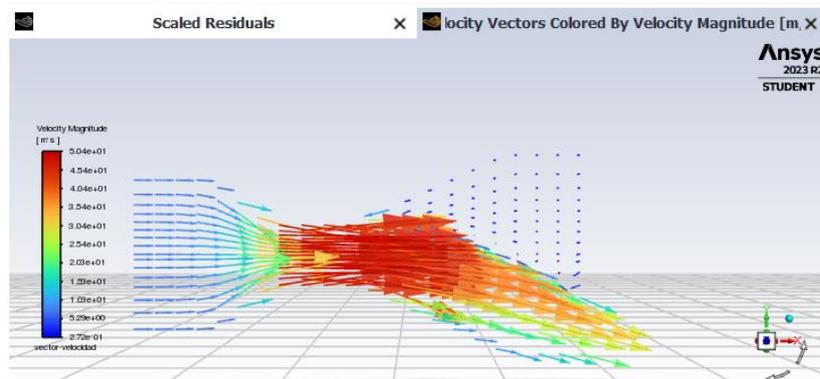


Figura D5

Gráfica de vectores de presión dada una presión de entrada constante 7 bares

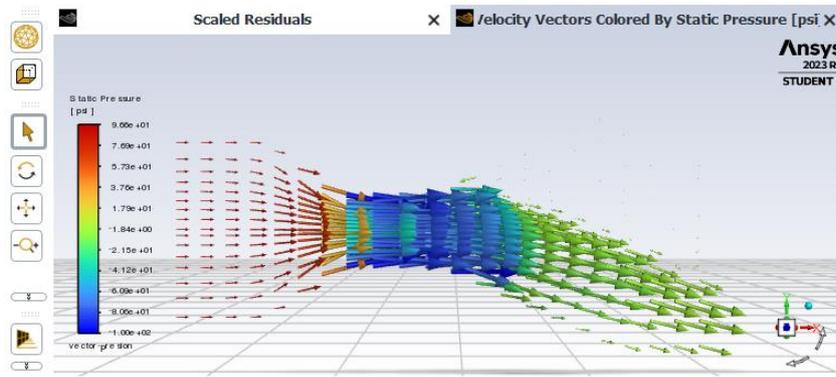


Figura D6

Gráfica curva de velocidad en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 7 bares

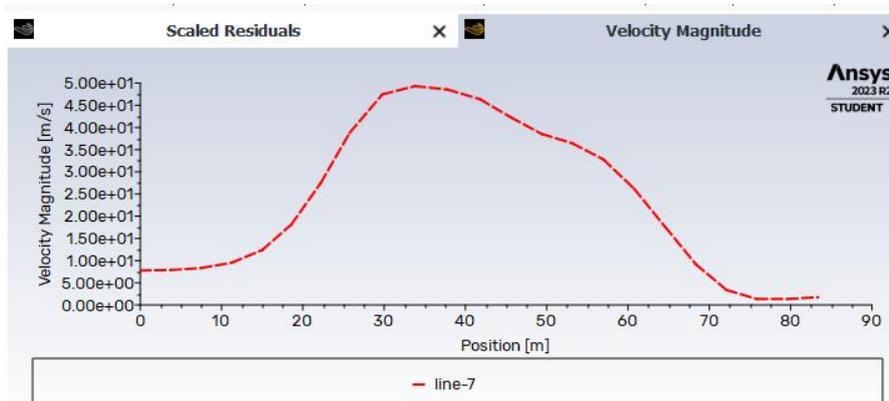
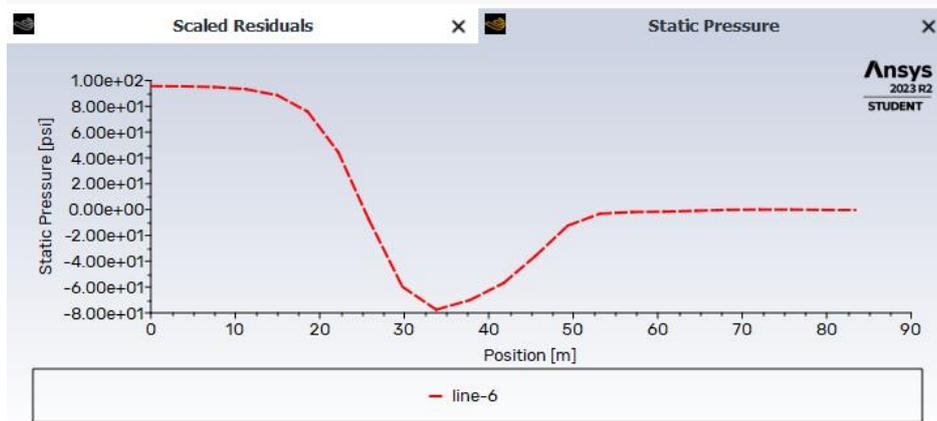


Figura D7

Gráfica curva de presión en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 7 bares



Presión de entrada: 8 bares

Figura D8

Gráfica de velocidad del fluido dado una presión de entrada constante 8 bares

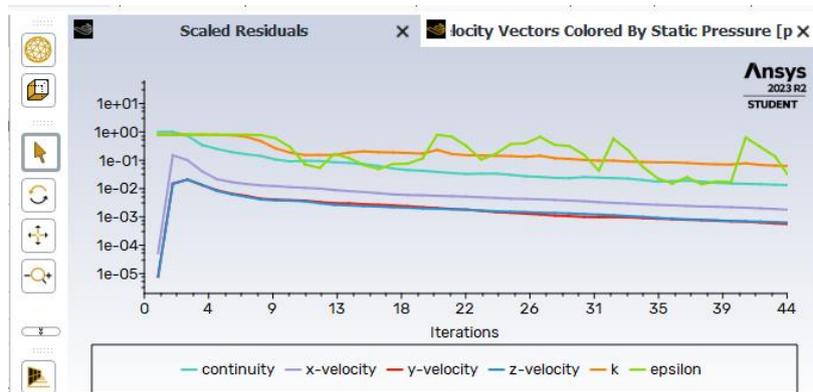


Figura D9

Gráfica de perfiles de velocidad dada una presión de entrada constante 8 bares

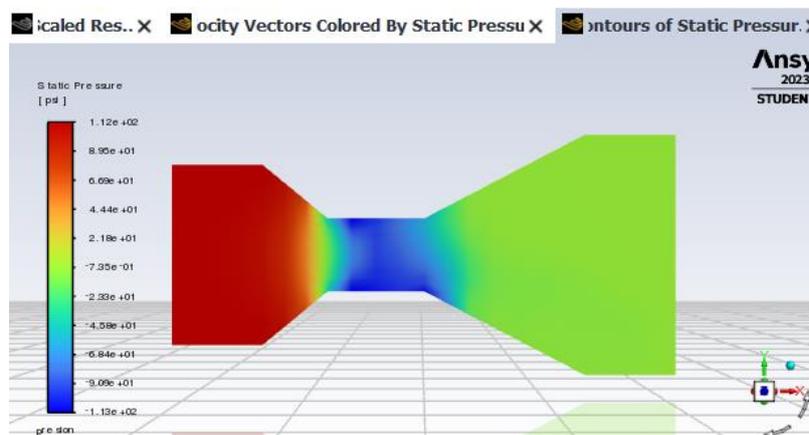


Figura D10

Gráfica de perfiles de presión dada una presión de entrada constante 8 bares

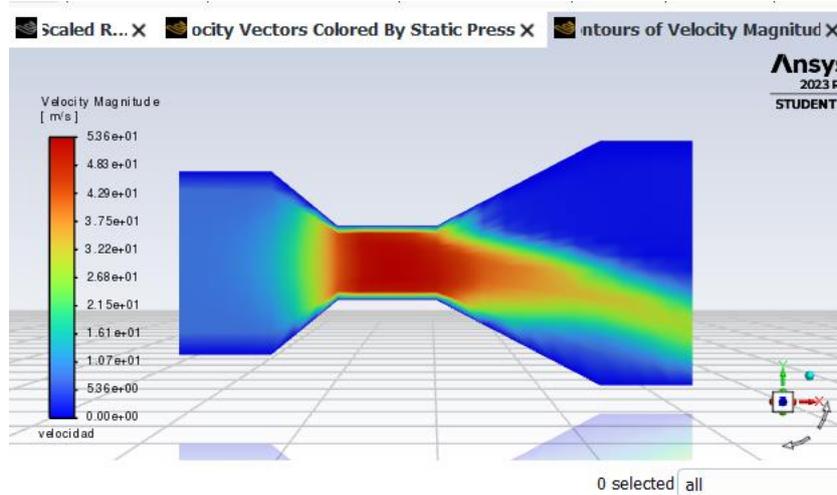


Figura D11

Gráfica de vectores de velocidad dado una presión de entrada constante 8 bares

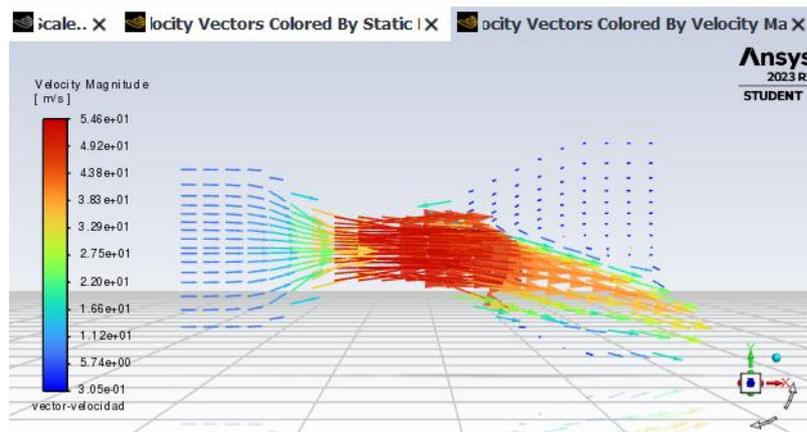


Figura D12

Gráfica de vectores de presión dada una presión de entrada constante 8 bares

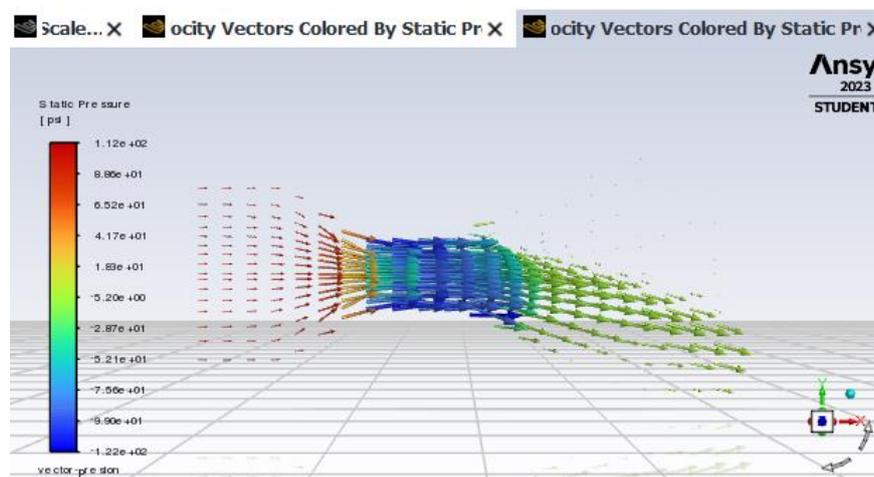


Figura D13

Gráfica curva de velocidad en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 8 bares

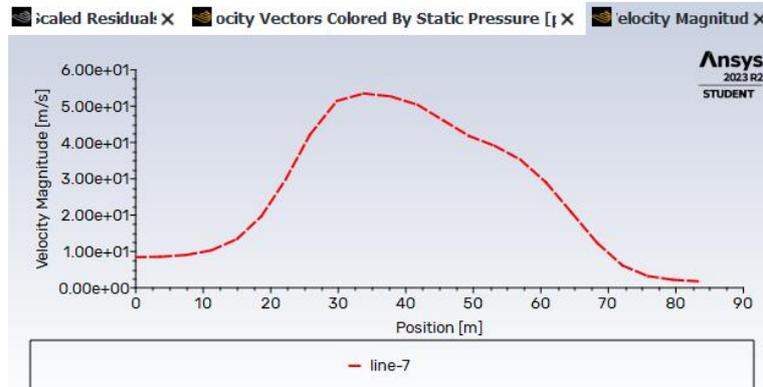
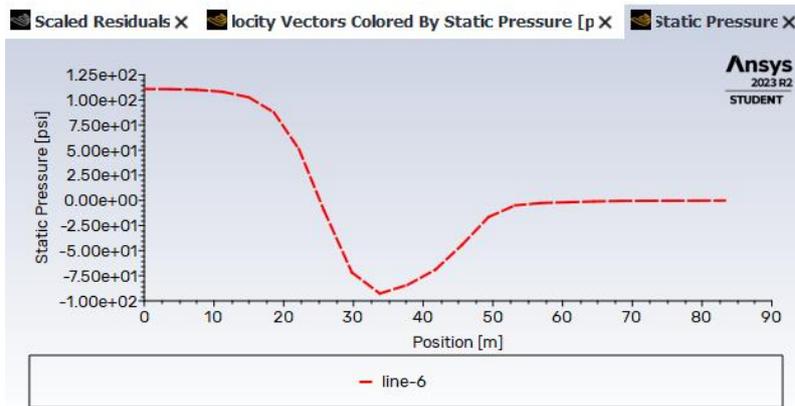


Figura C14

Gráfica curva de presión en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 8 bares



Presión de entrada: 9 bares

Figura D15

Gráfica de velocidad del fluido dado una presión de entrada constante 9 bares

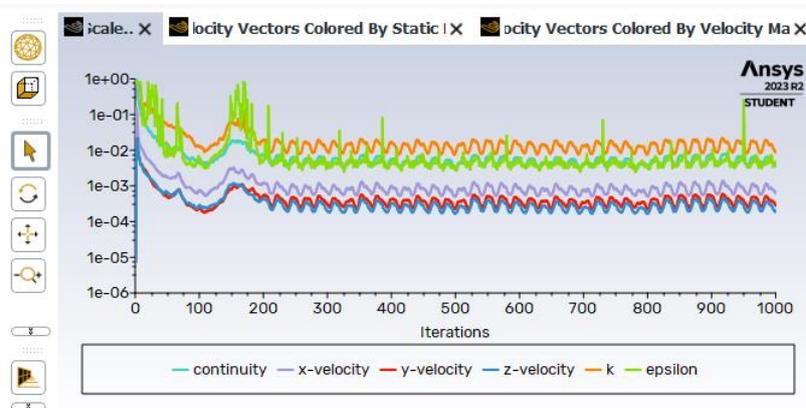


Figura D16

Gráfica de perfiles de velocidad dada una presión de entrada constante 9 bares

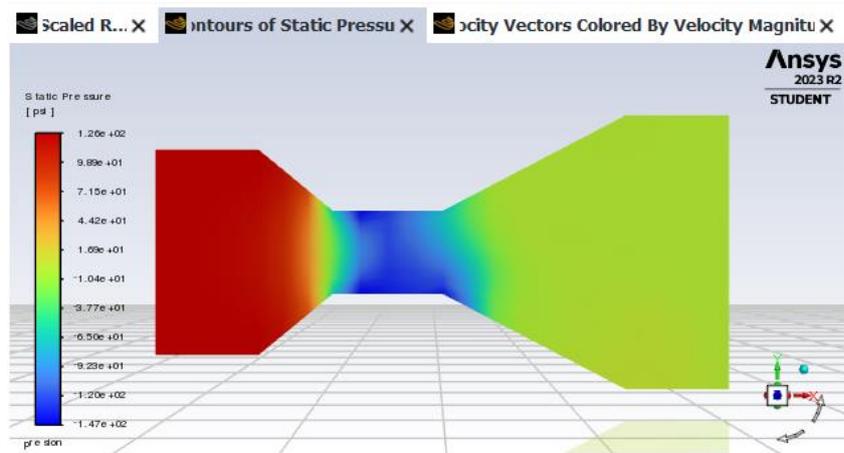


Figura D17

Gráfica de perfiles de presión dada una presión de entrada constante 9 bares

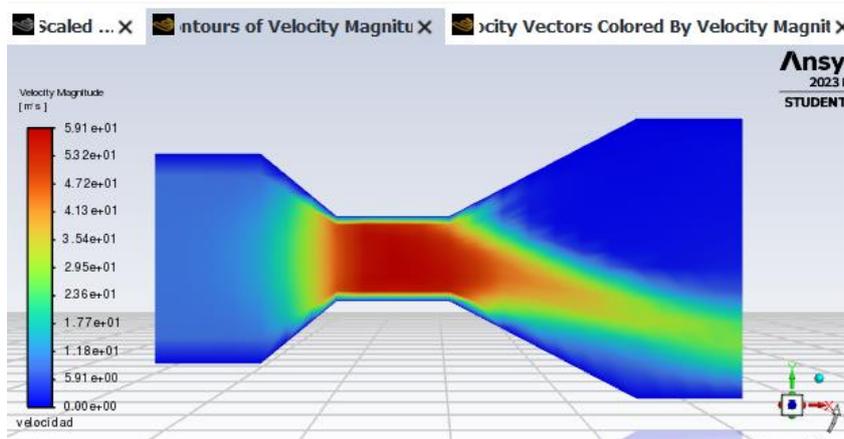


Figura D18

Gráfica de vectores de velocidad dado una presión de entrada constante 9 bares

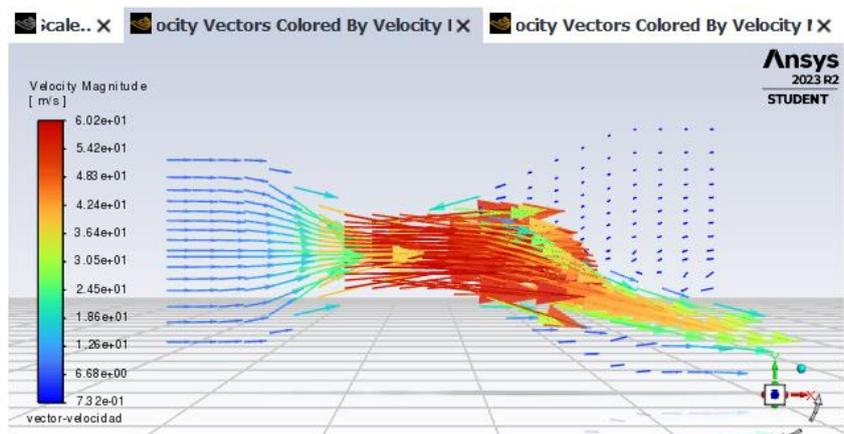


Figura D19

Gráfica de vectores de presión dada una presión de entrada constante 9 bares

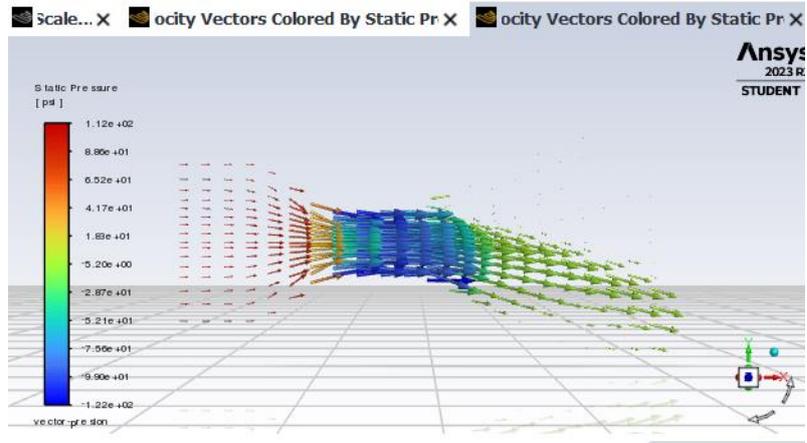


Figura D20

Gráfica curva de velocidad en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 9 bares

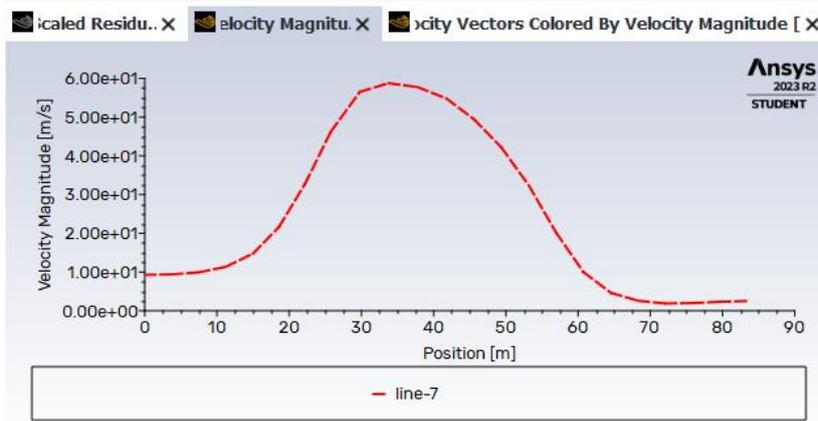
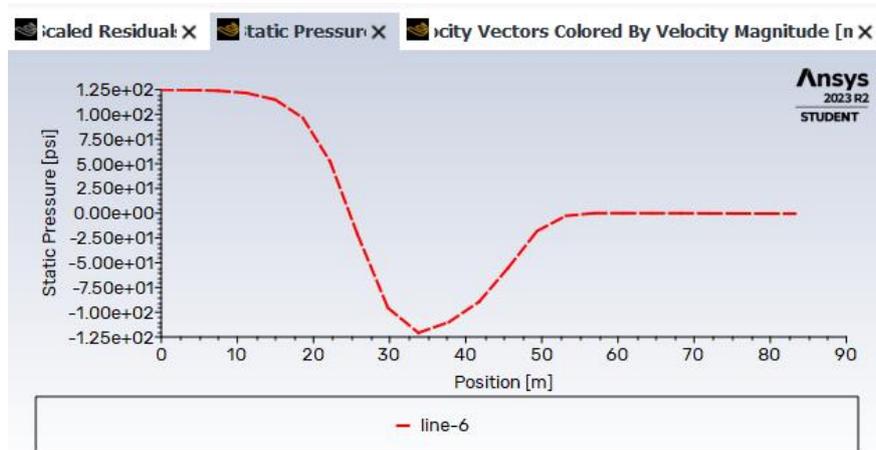


Figura D21

Gráfica curva de presión en el centro del dispositivo de cavitación dada una presión de entrada constante 9 bares



Apéndice E – Detalle de los componentes del sistema

Motor eléctrico: este componente es esencial para el funcionamiento del sistema. Es un motor eléctrico trifásico con una velocidad de 2 000 rpm, diseñado para operar con una tensión de 220 voltios en corriente alterna y una frecuencia de 60 Hz.

Sistema de transmisión de potencia: Para reducir la velocidad de 2 000 rpm a 1 000 rpm, para que el sistema de cavitación funcione adecuadamente se eligió un sistema de bandas en V compuesto por una banda de la marca SKF del modelo SPZ1400, una polea grande la marca SKF del modelo SPZ400 y una polea pequeña la marca SKF del modelo SPZ140 cumpliendo con los requerimientos del sistema.

Bomba centrífuga de eje libre: la bomba centrífuga conectada al sistema de bandas en v y al motor permitirá la circulación del fluido en el sistema. En este caso, se especifica que es de eje libre, con conexiones de $\frac{3}{4}$ " y 1" que serán del mismo tamaño de las tuberías con las que debe conectarse.

Tanque de acero: el tanque estará fabricado con acero según la norma ASTM A53, el cual almacenará el efluente y cumple con estándares específicos de resistencia y durabilidad.

Tuberías: se incluye el suministro e instalación del sistema de tuberías, asegurando que estén fabricadas con el material ASTM A53, las cuales se encargaran del transporte del fluido en el sistema.

Tubo de Venturi: el tubo de Venturi deberá ser fabricado con las especificaciones técnicas requeridas para que se genere la máxima cavitación.

Caja metálica: la caja metálica se fabricará para albergar y proteger componentes eléctricos y electrónicos del sistema, proporcionando un espacio seguro y organizado.

Interruptor termo magnético tripolar: este interruptor termomagnético tripolar de 10 amperios se utiliza para la protección motor eléctrico.

Interruptor termomagnético monopolar: Similar al anterior, este interruptor monopolar con capacidad de 2 amperios proporciona protección para el sistema de control donde estarán las luces pilotos y los pulsadores.

Contactador trifásico: el contactador trifásico se utilizará para controlar el flujo de corriente en el motor eléctrico. Este modelo opera con una tensión de 220 voltios y una frecuencia de 60 hertzios.

Relé térmico trifásico: el relé térmico trifásico proporciona protección contra sobrecargas térmicas en el sistema eléctrico protegiendo al motor eléctrico. El modelo especificado es el NR2-25-10, indicando sus características técnicas.

Apéndice F – Acción de control

La correlación entre la salida del controlador, representada como $u(t)$, y la señal de error, denotada como $e(t)$, se expresa mediante la ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (\text{F1})$$

O lo que en su transformada de Laplace sería:

$$U(s) = K_p E(s) \quad (\text{F2})$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (\text{F3})$$

K_p representa la ganancia proporcional. El controlador proporcional funciona efectivamente como un amplificador cuya ganancia puede ser ajustada. Al utilizar un controlador de este tipo, el error en estado estacionario no se elimina completamente, ya que la actividad de control requiere la presencia continua de esta señal de error.

El objetivo de la acción de control integral es anular el error en estado estacionario, el cual persiste en el caso del control proporcional. En un sistema de control integral, la tasa de cambio de la salida del controlador $u(t)$ se modifica proporcionalmente en relación con la señal de error $e(t)$. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \quad (\text{F4})$$

Es decir, la salida del controlador es proporcional a la integral del error:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (\text{F5})$$

En donde K_i representa una constante que se puede ajustar, y la función de transferencia del controlador integral se define como:

$$U(s)s = K_i E(s) \quad (\text{F6})$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (\text{F7})$$

La respuesta generada por el control integral se combina con la del control proporcional con el objetivo de lograr una respuesta del sistema que sea estable y libre de errores en estado

estacionario. Un controlador que emplea acciones tanto proporcionales como integrales corresponde a la integración de estos dos tipos de control, y se caracteriza mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{F8})$$

Donde, finalmente, la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot e(t) \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (\text{F9})$$

En donde K_p representa la ganancia proporcional y T_i es el tiempo integral, siendo ambos parámetros modificables. El tiempo integral es el que controla la acción del control integral, mientras que la ganancia proporcional influye tanto en el componente integral como en el proporcional del sistema. La ganancia K_i se calcula dividiendo la ganancia proporcional por el tiempo integral.

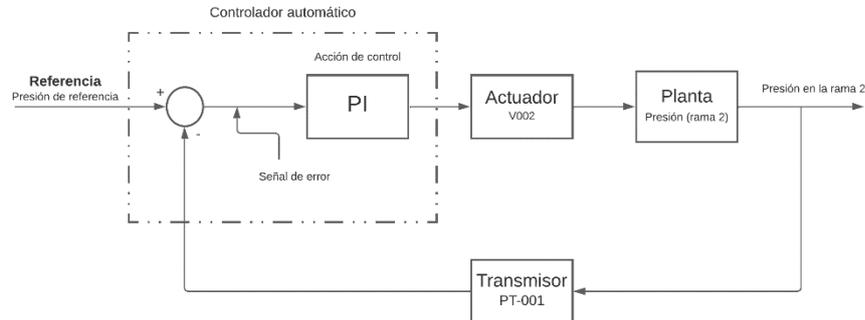
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (\text{F10})$$

Diagrama de bloques de control

La figura F1 muestra el sistema de control automático de lazo cerrado para regular la presión a la entrada del primer tubo de Venturi. Utiliza un controlador Proporcional-Integral (PI) que ajusta la presión en respuesta a la señal de error, la cual es la diferencia entre la presión de referencia y la presión actual medida por un transmisor en la rama 2 del sistema. El actuador, la válvula de control V002, ejecuta los cambios necesarios para alcanzar la presión deseada a la entrada del primer tubo de Venturi, asegurando así la estabilidad y la precisión del proceso de control de la presión.

Figura F1

Diagrama de bloques del control de presión a la entrada del primer tubo de Venturi



La ecuación para el control de la presión en la entrada del primer tubo de Venturi en un sistema de cavitación hidrodinámica, utilizando un controlador PI, sería de la forma:

$$P_{control} = K_p \cdot (P_{referencia} - P_{planta}) + K_i \int (P_{referencia} - P_{planta}) dt \quad (F11)$$

Donde:

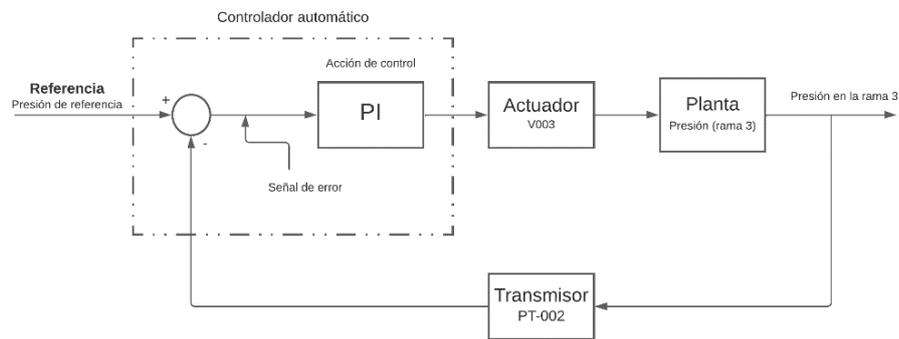
- $P_{control}$ es la salida del controlador, que determinará la acción a realizar para ajustar la presión (el ajuste en una válvula).
- K_p es la ganancia proporcional, que determina la reacción del controlador ante el error actual entre la presión deseada y la presión medida.
- $P_{referencia}$ es la presión objetivo o punto de ajuste.
- P_{planta} es la presión actual medida en la entrada del tubo de Venturi.
- K_i es la ganancia integral, que acumula el error de presión a lo largo del tiempo, ayudando a corregir errores persistentes.
- $\int (P_{referencia} - P_{planta}) dt$ representa la integración del error de presión a lo largo del tiempo.

La figura F2, similar al diagrama de bloques anterior, muestra el diagrama de bloques de un sistema de control automático diseñado para mantener la presión a la entrada del segundo tubo de Venturi, en la línea identificada como 'rama 3'. El sistema utiliza un controlador Proporcional-

Integral (PI) que recibe una señal de error, la cual es la diferencia entre la presión deseada ('Presión de referencia') y la presión actual medida por el transmisor PT-002. La señal de error es procesada por el controlador PI, que a su vez envía una señal a la válvula V003 para ajustar la presión y alcanzar el valor de referencia.

Figura F2

Diagrama de bloques del control de presión a la entrada del segundo tubo de Venturi



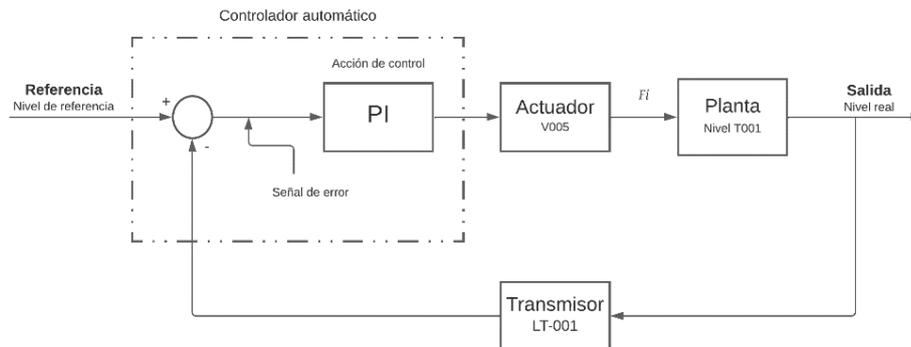
La ecuación para el control de la presión en la entrada del segundo tubo de Venturi en un sistema de cavitación hidrodinámica, utilizando un controlador PI, sería de la forma:

$$P_{control} = K_p \cdot (P_{referencia} - P_{planta}) + K_i \int (P_{referencia} - P_{planta}) dt \quad (F12)$$

La figura F3 ilustra el diagrama de bloques del sistema de control automático diseñado para regular el nivel de un líquido en el tanque del sistema. Utiliza un controlador Proporcional-Integral (PI) para ajustar el nivel en respuesta a una señal de error, que es la diferencia entre el nivel de referencia deseado y el nivel real medido por el transmisor LT-001. La señal de error es procesada por el controlador PI, que luego envía una señal a la válvula V005 y ajusta el flujo de líquido entrante para mantener el nivel del tanque en el objetivo establecido.

Figura E3

Diagrama de bloques del control de nivel del tanque



La ecuación del controlador regulará la acción de control (la apertura de una válvula) para mantener el nivel del líquido en el tanque en un punto de ajuste deseado. La ecuación básica del controlador PI para esta aplicación sería:

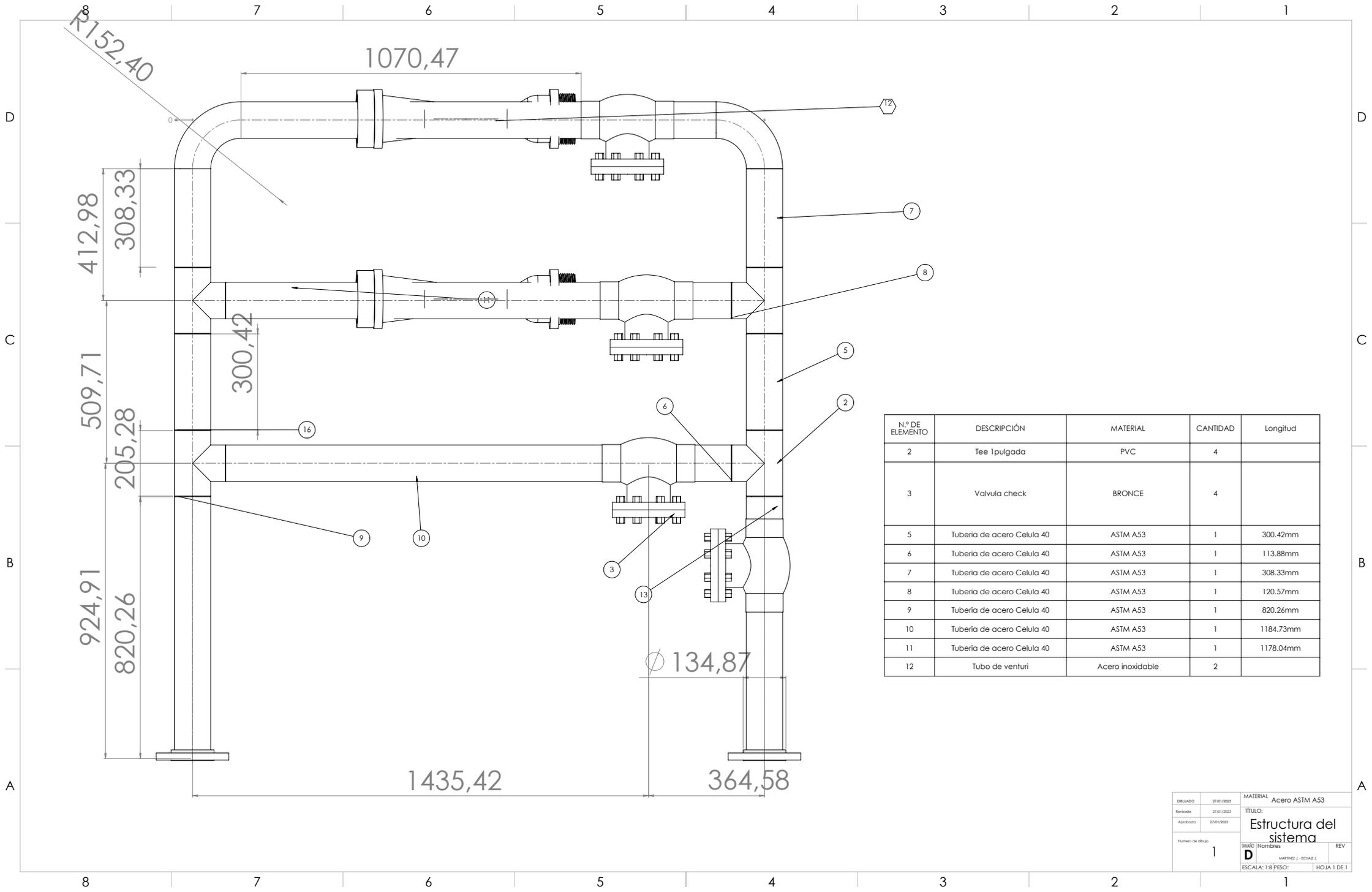
$$N_{control} = K_p \cdot (N_{referencia} - N_{planta}) + K_i \int (N_{referencia} - N_{planta}) dt \quad (F13)$$

Donde:

- $N_{control}$ es la salida del controlador, el grado de apertura de la válvula de entrada de líquido del tanque.
- K_p es la ganancia proporcional, que determina la respuesta inmediata del controlador al error actual (la diferencia entre el nivel deseado y el nivel actual del líquido).
- $N_{referencia}$ es el nivel deseado del líquido en el tanque (el punto de ajuste).
- N_{planta} es el nivel actual del líquido medido en el tanque.
- K_i es la ganancia integral, que acumula el error de nivel a lo largo del tiempo, ayudando a eliminar el error residual o estacionario.
- $\int (N_{referencia} - N_{planta}) dt$ representa la integración del error de nivel a lo largo del tiempo.

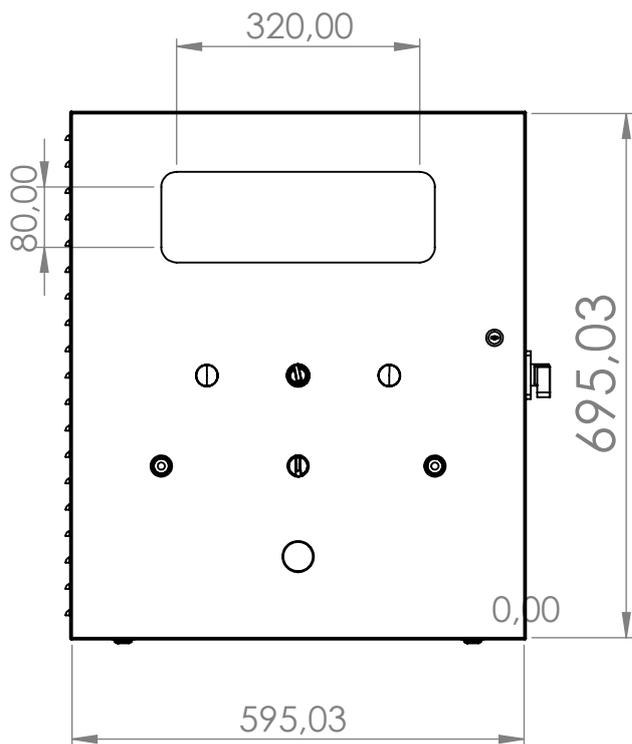
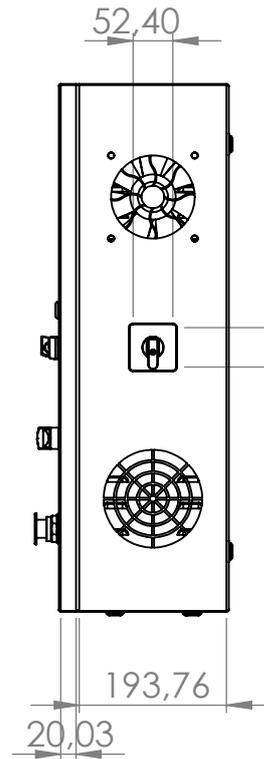
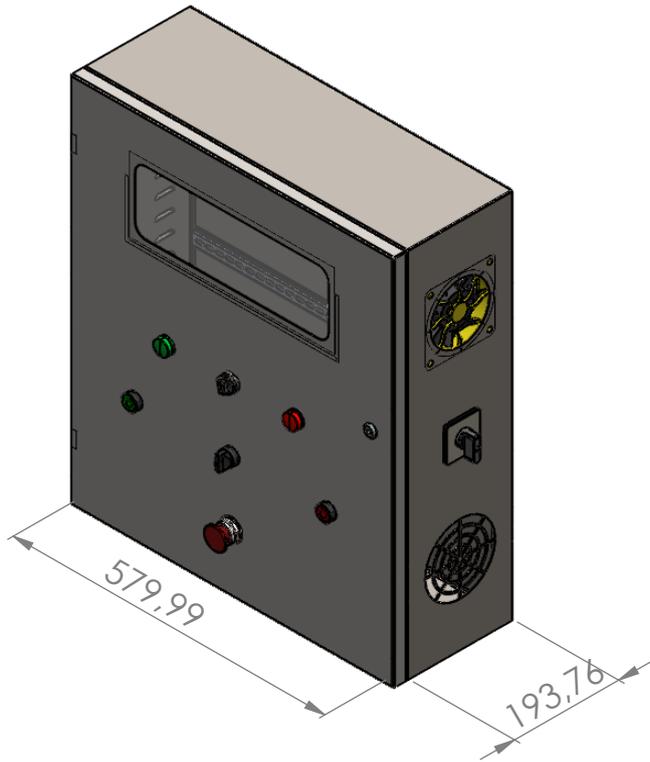
Apéndice G – Planos mecánicos

A continuación, se mostrará los planos de los diseños mecánicos realizados en software de modelado (enumerados del 1 al 4).



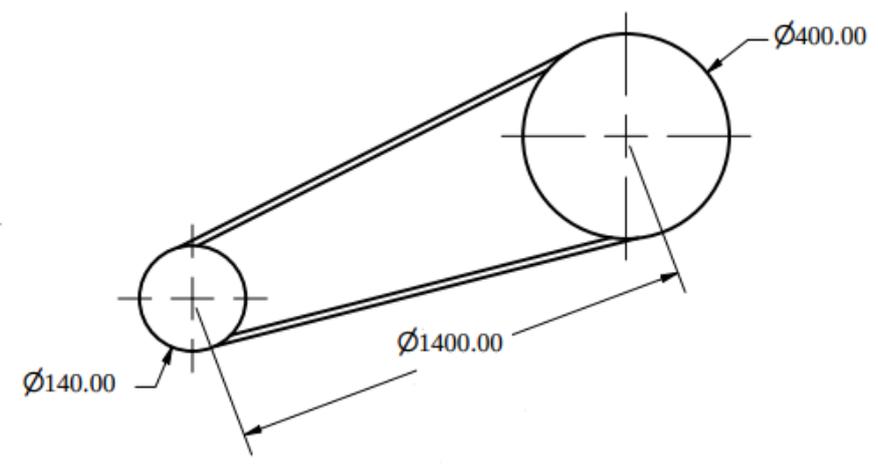
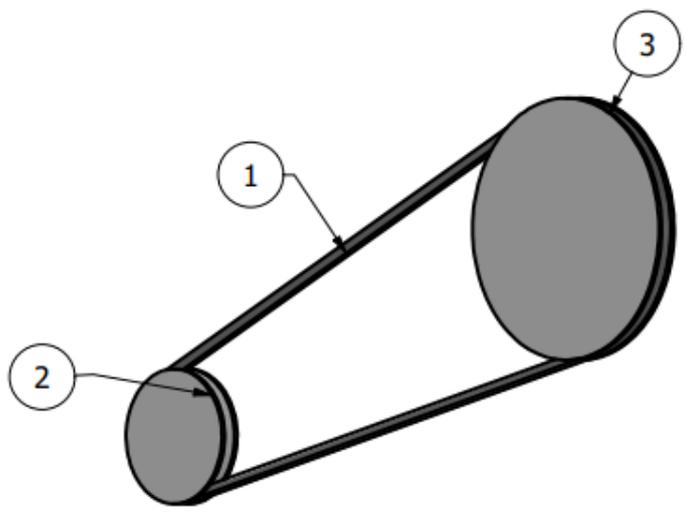
N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	Longitud
2	Tee 1 pulgada	PVC	4	
3	Valvula check	BRONCE	4	
5	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	300,42mm
6	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	113,88mm
7	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	308,33mm
8	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	120,57mm
9	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	820,26mm
10	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	1184,73mm
11	Tubería de acero Celula 40	ASTM A53	1	1178,04mm
12	Tubo de venturi	Acero inoxidable	2	

DIBUJADO	27/01/2023	MATERIAL	Acero ASTM A53
Revisado	27/01/2023	TÍTULO:	Estructura del sistema
Aprobado	27/01/2023	Autores	Nombre
Numero de dibujo	1	ESCALA:	1:8 PESO: HOJA 1 DE 1



DIBUJADO	27/01/2023
Revisada	27/01/2023
Aprobada	27/01/2023
Numero de dibujo	2

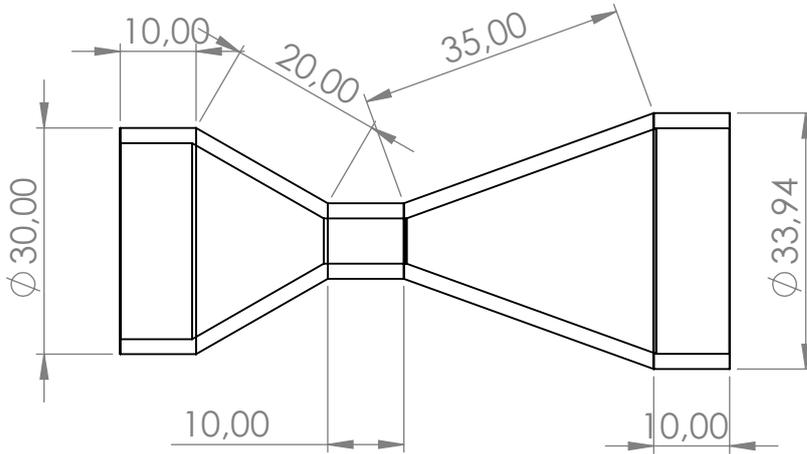
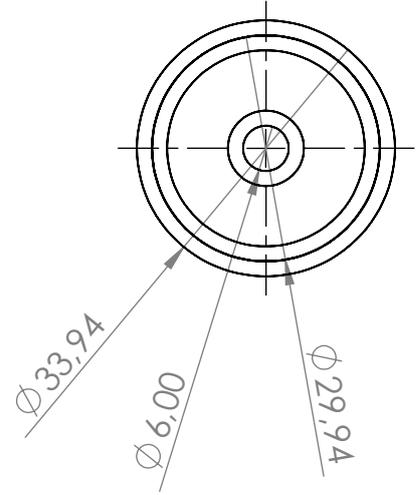
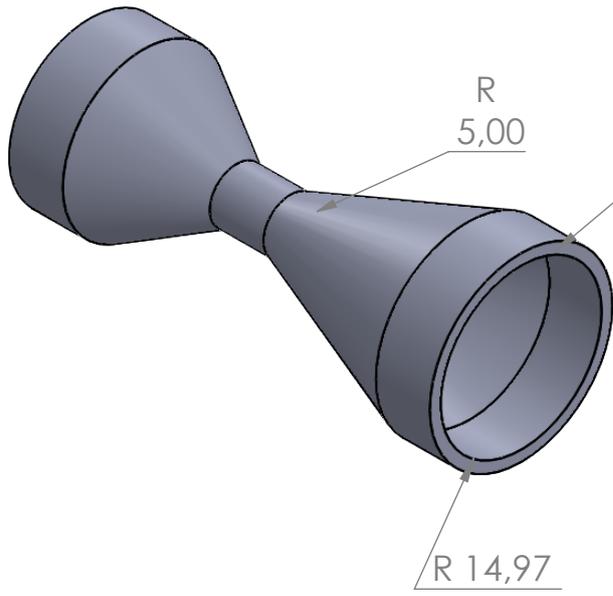
MATERIAL		Metalico	
TÍTULO:		Tablero electrico del sistema	
TAMAÑO	Nombres	REV	
	MARTINEZ J. - ECHAIZ J.		
ESCALA: 1:10		HOJA 1 DE 1	



PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Banda en V SKF-SPZ
2	1	Polea pequeña
3	1	Polea grande

DIBUJADO	27/01/2023
Revisada	27/01/2023
Aprobada	27/01/2023
Numero de dibujo	3

MATERIAL	Metalico	
TÍTULO:	Sistema de transmision de potencia	
TAMAÑO	Nombres	REV
	MARTINEZ J. - ECHAIZ J.	
ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1	



DIBUJADO	27/01/2023	MATERIAL Acero inoxidable	
Revisada	27/01/2023	TÍTULO: tubo de venturi	
Aprobada	27/01/2023		
Numero de dibujo		TAMAÑO	REV
4		Nombres MARTINEZ J. - ECHAIZ J.	
		ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1