

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Generador de calor por cavitación

David Fernando Altamirano Jaramillo

Jennifer Paola Cando Betancourt

Paulo Sebasthian León Aguirre

Carlos Antonio Puente Ruiz

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito para la
obtención del título de

INGENIERO MECÁNICO

Quito, 20 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Generador de calor por cavitación

David Fernando Altamirano Jaramillo

Jennifer Paola Cando Betancourt

Paulo Sebasthian León Aguirre

Carlos Antonio Puente Ruiz

Nombre del profesor, Título Académico

Alfredo Valarezo, PhD

Firma del profesor

Quito, 20 de diciembre de 2024

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Así mismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y Apellidos: David Fernando Altamirano Jaramillo

Código: 00321996

Cédula de Identidad: 1727180448

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2024

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Así mismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y Apellidos: Jennifer Paola Cando Betancourt

Código: 00213917

Cédula de Identidad: 1722258975

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2024

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Así mismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y Apellidos: Paulo Sebastian León Aguirre

Código: 00201168

Cédula de Identidad: 1720598885

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2024

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Así mismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y Apellidos: Carlos Antonio Puente Ruiz

Código: 00213630

Cédula de Identidad: 0604807966

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbmynet al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbmynet al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, David y Ana, por confiar en mí. Gracias por enseñarme los valores de la responsabilidad y la perseverancia, así como la virtud del esfuerzo. Su sacrificio, amor y apoyo incondicional me han dado la fortaleza necesaria para cumplir esta meta. Este logro no sería posible sin ustedes; también les pertenece.

A mis queridos hermanos, que son mis compañeros de vida, apoyo incondicional y fuente de motivación. Gracias por estar siempre a mi lado, por su comprensión y por su amor.

A mis amigos, por su apoyo y confianza. Gracias por las risas, momentos y motivación. Gracias por estar presentes en cada paso de este camino.

A mis maestros, por su aprecio y enseñanzas. Gracias por su confianza en mis capacidades y por el ejemplo de pasión y excelencia que demuestran día a día.

A la Universidad San Francisco de Quito, que me brindó la oportunidad de crecer, desarrollar mis conocimientos y habilidades. Gracias por brindarme un entorno estimulante para ser una mejor persona, con valores sólidos y una visión amplia del mundo.

(David Fernando Altamirano Jaramillo)

AGRADECIMIENTOS

Con gran aprecio, deseo aprovechar este espacio para expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi hermano, pilares fundamentales en mi vida, quienes, con su apoyo y amor incondicional, han sido mi mayor fortaleza a lo largo de este camino. Gracias por permitirme cumplir mis sueños y ser parte de ellos.

A mi tía y abuelitos, quienes, siempre han estado pendientes de mí a pesar de la distancia, brindándome su apoyo incondicional. Sus palabras de aliento, amor y motivación constante me han impulsado a seguir adelante y a esforzarme por cumplir lo propuesto.

A mis amigos, quienes han sido una compañía indispensable en cada etapa de mi carrera. Su apoyo incondicional y su presencia en los momentos más difíciles me dieron la fuerza necesaria para no rendirme. Gracias por cada instante compartido, por cada sonrisa y por cada palabra de aliento que me impulso a seguir adelante. Como estudiante foráneo, ustedes se convirtieron en mucho más que amigos: se transformaron en mi familia. Les agradezco de todo corazón por permitirme ser parte de sus vidas y por ser una parte tan importante de la mía.

A mis profesores, por ser una guía invaluable a lo largo de mi carrera. Su dedicación, paciencia y enseñanzas han dejado una huella en mi desarrollo profesional. Gracias por inspirarme a superar desafíos y por motivarme a pensar en grande, sin conformarme con pequeños resultados. Llevaré siempre conmigo su ejemplo y sabiduría.

(Jennifer Paola Cando Betancourt)

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Carlos y Macarena, por ser mi apoyo incondicional en todo lo que hago, por enseñarme a tomar mis propias decisiones, y por ser mi mayor ejemplo a seguir en la vida personal y profesional. Gracias por darme todas las herramientas necesarias para cumplir mis metas.

A mis abuelos, por ser, al igual que mis padres, mi ejemplo de lo valioso que es el esfuerzo, tanto en la vida como en la profesión. Gracias por respaldarme siempre.

A mis tíos, por siempre haber estado pendientes de mí, y acogerme como a un hijo más en todos estos años de estudio en Quito. Gracias por cada invitación a una buena comida, cada paseo de fin de semana, y por el gran cariño que me han hecho llegar en todo momento; ha sido una gran motivación para mantenerme con ganas de seguir siempre hacia adelante.

A mis amigos, por ser lo más valioso de las relaciones humanas que he formado en la universidad. Gracias por hacerme sentir en casa incluso estando lejos de la mía, por acompañarme en aquellos días en que nos desvelamos estudiando y terminando tareas, por ser mis compañeros de aventuras, y por ser mi apoyo en todo momento; se convirtieron en la familia que yo elegí.

A mis profesores, por lograr que siempre estuviese seguro de querer estudiar esta carrera, por estar siempre dispuestos a darme una mano cuando tenía un problema, y por mantener vivo mi entusiasmo de cuestionarlo todo y resolverlo científicamente. Gracias por su paciencia, amabilidad, y por inspirarme a ser un buen profesional, pero sobre todo, una buena persona.

A la USFQ, por darme la oportunidad de entrar en una comunidad que aprecia lo que más valoro: la libertad. Gracias por hacer que ir a la universidad sea una oportunidad para aprender muchas cosas más que las que uno aprende en su carrera.

(Carlos Antonio Puente Ruiz)

Contenidos

1. Introducción	16
1.1. Declaración del problema y especificación del proyecto	16
1.2. Revisión literaria	17
1.3. Búsqueda de patentes	21
2. Objetivo	26
3. Concepto y selección de diseño	28
4. Gestión del proyecto	29
5. Estándares ingenieriles	35
6. Materiales y métodos	37
6.1. Selección de materiales y componentes	37
6.2. Alternativas de diseño	38
7. Plan de manufactura	41
7.1. Tecnologías de fabricación	41
7.2. Componentes a fabricar/ensamblar	42
7.3. Hojas de trabajo del proceso	42
7.4. Plan de verificación de tolerancias y dimensionamiento de fabricación . .	45
7.5. Equipos de medición utilizados	46
7.6. Procedimiento estándar	46
8. Resultados y discusiones	48
8.1. Análisis ingenieril	48
8.1.1. Mecánica de fluidos	48
8.1.2. Diseño Mecánico	57
8.2. Balance de energía	64

9. Simulación	67
9.1. Estadísticas de mallado	68
9.2. Condiciones iniciales	69
10.Experimentos	81
10.1. Plan de pruebas del prototipo	81
10.2. Seguridad a través del diseño	82
11.Resultados y discusión	89
11.1. Matriz de pruebas	89
11.2. Curvas de Temperatura vs. Tiempo	90
12.Conclusiones	94
13.Trabajo futuro	96
 APÉNDICE A: Planos de ingeniería	
 APÉNDICE B: Reporte de diseño	
 APÉNDICE C: Manual de usuario	

Índice de figuras

1.	Calentador de tipo rotor para jacuzzi, Mosalev Sergej Mikhajlovich, RU N:2290573	22
2.	Bomba de cavitación, Smith et al., US 11,213,793 B2	23
3.	Dispositivo de cavitación con presión hidrostática balanceada, Hudson et al., US 7,360,755 B2	24
4.	Esquema para la aplicación del dispositivo de cavitación, Hudson et al., US 7,360,755 B2	25
5.	Gastos por categoría	29
6.	Diagrama de Gantt	32
7.	Hoja de proceso de fabricación del rotor	43
8.	Hoja de proceso de fabricación del eje	44
9.	Hoja de proceso de fabricación de la carcasa	45
10.	Variación de presión y cavitación en una tubería de sección variable . . .	49
11.	Configuración de presiones en los agujeros del rotor (Li et al., 2023) . . .	52
12.	Modelo de transición de fase en uno de los agujeros (Li et al., 2023) . . .	54
13.	Esquema del eje	57
14.	Diagrama de fuerza cortante (V)	58
15.	Diagrama de momento flector (M)	59
16.	Datos estandarizados para la resistencia del material (Budynas y Nisbett, 2015, tabla A22)	60
17.	Factor de confiabilidad (Budynas y Nisbett, 2015)	62
18.	Datos de acabado superficial (Budynas y Nisbett, 2015)	62
19.	Sensibilidad a la muesca (Budynas y Nisbett, 2015)	63
20.	Factor de concentración del esfuerzo (Budynas y Nisbett, 2015)	63
21.	Estadísticas de malla	68
22.	Estadísticas de malla	69
23.	Vectores de velocidad dentro del cavitador	72
24.	Plano de contorno de presión, vista isométrica	73

25.	Plano de contorno de presión, vista frontal	73
26.	Plano de temperatura estática, vista isométrica	76
27.	Plano de temperatura estática, vista frontal	76
28.	Imagen 3D de la fracción volumétrica de vapor en el rotor	78
29.	Imagen 3D de la fracción volumétrica de vapor en el rotor	78
30.	Planos de fracción volumétrica de vapor dentro del rotor, vista isométrica	78
31.	Planos de fracción volumétrica de vapor dentro del rotor, vista frontal . .	79
32.	Plan de pruebas del prototipo	82
33.	Riesgos del sistema	83
34.	Escala de riesgos	83
35.	Temperatura vs. Tiempo a 3450 RPM	90
36.	Temperatura vs. Tiempo a 3000 RPM	91
37.	Temperatura vs. Tiempo a 2500 RPM	92
38.	Temperatura máxima vs. Caudal vs. Velocidad	93
39.	Modelo CAD completo de la máquina	102
40.	Componentes principales	103
41.	Rotor de acero inoxidable	103
42.	Eje de acero inoxidable	104
43.	Carcasa de acero inoxidable	105
44.	Tapa de acero inoxidable	105
45.	Subcomponentes mecánicos	106
46.	Procesos de fabricación y mecanizado	108

Índice de tablas

1.	Gastos por categoría	29
2.	Detalle de gastos	30
3.	Calendario de fabricación	33
4.	Opciones de diseño de la carcasa	38
5.	Ponderación de opciones de diseño de la carcasa	39
6.	Opciones de diseño del rotor	39
7.	Ponderación de opciones de diseño del rotor	40
8.	Opciones de diseño del sistema de circulación de agua	41
9.	Ponderación de opciones de diseño del sistema de circulación de agua	41
10.	Tolerancias	46
11.	Lista de verificación de tolerancias	47
12.	Términos de las ecuaciones y su significado	55
13.	Matriz de pruebas	82
14.	Instrucciones de operación y mantenimiento	87
15.	Resultados de matriz de pruebas	89

1. Introducción

La cavitación es el fenómeno de la formación de burbujas de vapor en las regiones de baja presión de un líquido que ha sido acelerado a altas velocidades, manteniendo una temperatura constante, como ocurre en bombas, turbinas y propulsores. De acuerdo con el principio de Bernoulli, cuando la velocidad de un fluido aumenta, su presión disminuye. En 1894, Osborne Reynolds demostró que, cuando un líquido fluye lo suficientemente rápido a través de una tubería de Venturi, la presión baja hasta el mínimo posible y comienza a hervir. Durante mucho tiempo, la cavitación ha sido estudiada como un fenómeno negativo, dado que el colapso de las burbujas formadas como consecuencia de la baja presión en los líquidos puede dañar los equipos y la maquinaria, principalmente erosionando sus superficies y provocando ruido y vibraciones. Sin embargo, la gran cantidad de energía disipada ha llevado a que la cavitación se estudie como un fenómeno útil y no siempre como uno destructivo. (Kuimov et al., 2023).

1.1. Declaración del problema y especificación del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y construir un generador de calor por cavitación del tipo rotor-estator, propulsado por un motor eléctrico, capaz de calentar agua y validar su principio de funcionamiento. Para ello, se analizará un modelo matemático, se realizarán simulaciones de CFD (fluidodinámica computacional, por sus siglas en inglés) y se medirán sus principales características, como la temperatura alcanzada, el consumo eléctrico, la velocidad de rotación y la presión. El prototipo debe ajustarse a las especificaciones técnicas provistas por el cliente, tales como calentar el agua a una temperatura específica y ser construido en acero inoxidable. Adicionalmente, se deben realizar un análisis de costos y un detalle de los procesos de manufactura.

El cliente es The Elenes Springs Cía. Ltda. Esta empresa, situada en la ciudad de Guano, en la provincia de Chimborazo. Esta empresa se dedica a la producción de agua embotellada de vertiente, y a la producción agrícola, por lo que está situada en una zona rural. En sus instalaciones se requiere calentar la misma agua de las vertientes, para

limpieza de maquinaria, y limpieza de áreas sanitarias. El enfoque de la compañía es ser lo más amigables con la naturaleza posible, por lo que busca reducir al mínimo el uso de combustibles fósiles y tecnologías contaminantes. Como sabemos, una de las formas más comunes para calentar el agua en nuestro país es la utilización de gas licuado de petróleo (GLP), que es barato y de alto rendimiento; no obstante, conlleva una gran cantidad de emisiones a la atmósfera si es que tomamos en cuenta que la mayoría de los hogares e industrias lo utilizan (Samaniego-Ojeda et al., 2016).

Por esto, el generador de calor por cavitación se presenta como una alternativa innovadora y poco contaminante para el fin de calentar un fluido. En este proyecto se analizará qué tan conveniente es respecto a las tecnologías más usadas actualmente para el calentamiento de agua, como los calefones. Además, se busca validar el principio de cavitación como método de calentamiento de agua como algo poco conocido, pero con potencial de hacerlo en mayor escala que un prototipo.

1.2. Revisión literaria

Varios autores se han centrado en aprovechar la cavitación para calentar un fluido transportado a través de un sistema. Por ejemplo, Gostiša et al. (2021) evaluaron un generador de cavitación rotativo en un entorno a escala piloto y realizaron diferentes análisis experimentales sobre la eficacia de estos dispositivos para calentar sistemas hidráulicos. Enfocado en abordar los crecientes problemas de contaminación del agua, el estudio examina cómo las características geométricas—como el diámetro, el número y la forma de las clavijas del rotor, junto con el tamaño del espacio entre el rotor y el estator—afectan la generación de cavitación. Los autores desarrollaron un dispositivo a escala de laboratorio capaz de medir simultáneamente las fluctuaciones de presión y realizar visualizaciones de alta velocidad, permitiendo cuantificar la magnitud de la cavitación. Los resultados mostraron que la modificación del número de clavijas del rotor tiene un impacto significativo en la dinámica de la cavitación, mientras que el estrangulamiento del lado de alta presión tiene un efecto comparativamente menor. La metodología de la investigación incluyó pruebas de 17 configuraciones de rotor-estator bajo diversas condiciones opera-

tivas, revelando mecanismos fundamentales de la cavitación y destacando posibles vías para futuras investigaciones en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

Otro estudio realizado por los mismos autores mencionados (2021) analiza el desempeño hidrodinámico de un novedoso generador de cavitación rotativo con disco de clavijas en comparación con una variante de disco dentado, a escala piloto, enfocándose en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. Los investigadores encontraron que la configuración con disco de clavijas generaba una cavitación más intensa debido a números de cavitación más bajos y mayores fluctuaciones de presión, mientras requería menos energía para su funcionamiento. Los experimentos clave incluyeron la medición de los efectos mecánicos y químicos en muestras reales de aguas residuales, mostrando una notable reducción en el tamaño promedio de partículas y mejores tasas de eliminación de TOC (Total Organic Carbon), COD (Chemical Oxygen demand), BOD (Biological Oxygen demand), indicadores de calidad del agua, a lo largo de múltiples pases de cavitación. Destacadamente, en condiciones óptimas, el disco de clavijas logró una capacidad de eliminación de COD (Chemical Oxygen demand) de un 310 % mayor que su contraparte dentada, consumiendo un 65 % menos de energía por kilogramo de COD eliminado, lo que representa un avance significativo en la eficiencia y efectividad de las tecnologías de cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales. En otra aplicación en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, como se ha demostrado en el estudio de Cerecedo et al. (2018), la cavitación inducida en el flujo del agua residual tiene un efecto perjudicial sobre la microflora patógena, como *E. coli* y *E. faecalis*, y puede descomponer contaminantes persistentes, como clorofenoles, clorobenceno y pesticidas.

Nikolsky et al., 2017 proporcionan información sobre un generador de calor basado en cavitación y un método de control para mejorar su eficiencia, basados en la publicación de Zaporozhets et al. (2004) que estimó la eficiencia del calentamiento de un fluido por efectos de cavitación, los autores del estudio utilizaron las ecuaciones propuestas para analizar, por medio de la termodinámica y la mecánica de fluidos, la eficiencia de un cavitador del tipo rotor-carcasa. La ecuación más relevante en este estudio es la del principio de Bernoulli, que explica los rápidos cambios de presión del fluido entre el rotor

y los orificios que se encuentran perforados sobre su geometría cilíndrica. También es relevante el balance energético que permite determinar la temperatura de calentamiento en un periodo de tiempo. Adicionalmente, este estudio proporciona valiosa información sobre la presión y energía acumuladas durante la formación de las burbujas de cavitación de distintos tamaños.

Dos estudios, de Yadav et al. (2019) y Shetty (2015), destacan el potencial de un sistema de calentamiento basado en cavitación, discutiendo el uso de materiales y procesos de manufactura. Ambas investigaciones demostraron que los sistemas eran más efectivos que los dispositivos tradicionales basados en combustibles fósiles, como calentadores de agua o termostatos. En el estudio realizado por Shetty (2015), los autores construyeron y realizaron pruebas en un dispositivo cavitador fabricado de aluminio. De igual forma, el rotor perforado con agujeros alrededor fue colocado dentro de una carcasa cilíndrica, donde el agua ingresa al sistema por gravedad. Lo más relevante de este estudio es que los autores obtienen datos de temperatura y corriente respecto al tiempo y la velocidad del motor eléctrico, que impulsa al cavitador. Sin embargo, no es suficiente, pues los autores no presentan un análisis de las condiciones de funcionamiento ni el posible daño generado por la cavitación. El estudio está limitado al funcionamiento del equipo en una condición fija.

En otro estudio realizado, Samani et al. (2021), investigan el uso de un reactor de cavitación hidrodinámica tipo rotor-estator en la producción de biodiesel, usando como materia prima aceite de cártamo. Este fenómeno se produce cuando el fluido se somete a varios cambios de presión extrema, formándose burbujas que colapsan violentamente, produciendo áreas localizadas de alta presión y temperatura. Este fenómeno se aprovecha para intensificación de reacciones químicas y procesos de mezclas, en la producción de biodiésel. El biodiesel es una opción de energía renovable que tiene diferentes ventajas sobre los combustibles fósiles comunes, como menores emisiones y capacidad de usarse en motores de diésel sin grandes modificaciones. Su producción tiene varias dificultades de eficiencia, debido a que los métodos convencionales requieren tiempos prolongados y gastos elevados de operación. La cavitación hidrodinámica es un método factible para

lograr superar estas limitaciones. Los autores utilizaron un enfoque experimental basado en cuatro factores principales, donde se incluye el tiempo de reacción, la concentración del catalizador, relación molar de alcohol a aceite y separación del rotor y estator del reactor, optimizando el proceso de producción de biodiesel. La concentración del catalizador y la relación molar alcohol-aceite estuvieron entre los factores que tuvieron un impacto significativo en el proceso, aunque en menor grado. Se encontró que el reactor de cavitación hidrodinámica tenía un tiempo de reacción de 63,88 segundos, una concentración de catalizador de 0,94, una relación molar de alcohol-aceite de 1:8,36 y una distancia de reacción de 1,53 cm entre el rotor y el estator, lo que resulta en un reactor óptimo rendimiento de 89,11 biodiesel. A pesar de que el enfoque de este proyecto no está en el biodiesel, los hallazgos del estudio mencionado son útiles puesto que hablan del mismo fenómeno cavitatorio que se desea estudiar.

Una investigación titulada “Experimental testing of the heating performance of a rotor-type dissipative liquid heater” (Bespalko et al., 2021) se centra en el estudio de tecnologías para el calentamiento de líquidos sin contacto directo, aprovechando el efecto disipativo en un dispositivo rotor-estator hidrodinámico. Al medir parámetros como la potencia de calentamiento, el consumo eléctrico y la eficiencia térmica, el estudio concluye que el calentamiento disipativo es más eficiente que un sistema bifásico agua-vapor, con una eficiencia máxima del 91.6 %. También establece que el calentamiento disipativo ocurre cuando la fricción viscosa en un fluido en movimiento provoca un aumento en su temperatura y entalpía. Este fenómeno es más común en flujos de alto gradiente, como el flujo de Couette. Las posibles aplicaciones industriales para esta tecnología son señaladas por estos autores, específicamente, el calentamiento de líquidos orgánicos en las industrias farmacéutica, alimentaria y petroquímica, como fórmulas infantiles, aceites minerales y soluciones químicas; la pasteurización de líquidos comestibles, por ejemplo, leche en miniplantas lácteas, cuando el uso de calderas convencionales para la pasteurización resulta poco rentable.

Otros estudios sobre estos sistemas han mostrado que la eficiencia térmica puede alcanzar el 94 % (Kwon y Yoon, 2013). Sin embargo, se han observado problemas de

durabilidad en algunos diseños, específicamente en los rotores, con un desempeño óptimo limitado a periodos cortos de tiempo. Posteriormente, se llevaron a cabo investigaciones para mejorar la estabilidad de los rotores de cavitación, logrando una eficiencia del 82.18 % en condiciones de operación prolongadas. En términos de costos, un estudio determinó que el calor producido por una bomba de calor por cavitación podría alcanzar un costo mínimo de 0.07481 USD/kWh, con una eficiencia cercana al 98.8 %, sin incluir el consumo eléctrico de una bomba de recirculación eléctrica (Tahmid et al., s.f.)

A pesar de los avances realizados en las investigaciones señaladas en esta sección, aún quedan muchas áreas por explorar, la eficiencia del diseño no se ha estudiado en entornos industriales específicos, como la industria de alimentos y bebidas, donde se calienta agua para limpieza y procesamiento, a pesar de la existencia de prototipos. No se conocen bien los efectos a largo plazo de la cavitación en los materiales utilizados en los generadores de calor, pues los estudios realizados hasta ahora sobre el tema contemplan termodinámica y mecánica de fluidos, más no desgaste y falla. Se ha estudiado la resistencia de ciertos materiales, como el acero inoxidable y el aluminio, pero la cuestión de si estos materiales pueden soportar el desgaste producido por la cavitación a largo plazo y su durabilidad sigue siendo un importante problema de investigación. La viabilidad de implementar estos sistemas en áreas rurales con acceso limitado a infraestructura energética no se ha explorado completamente, a pesar del reconocimiento de su potencial en entornos urbanos. La investigación sobre cavitación en Ecuador podría estar en sus etapas iniciales o limitada a ciertos sectores académicos o industriales sin una amplia difusión. Esto presenta una oportunidad para explorar esta tecnología en el contexto ecuatoriano, especialmente en industrias como la de alimentos y bebidas, donde el calentamiento de agua es un proceso clave.

1.3. Búsqueda de patentes

Rotor-type whirl heater

Calentador de tipo rotor para jacuzzi

Número de patente: RU2352872

Fecha de la patente: 4 de junio de 2007

Mikhailovich et al., 2007 propone un *calentador de rotor tipo vórtex* caracterizado por su diseño eficiente e innovador. Su estructura principal incluye una cavidad cilíndrica de mayor diámetro, que está coaxialmente conectada a cavidades cilíndricas de menor diámetro en ambos lados. El rotor se presenta como un disco de mayor diámetro, equipado con dos impulsores de menor diámetro. Estos impulsores son cruciales para crear la presión requerida.

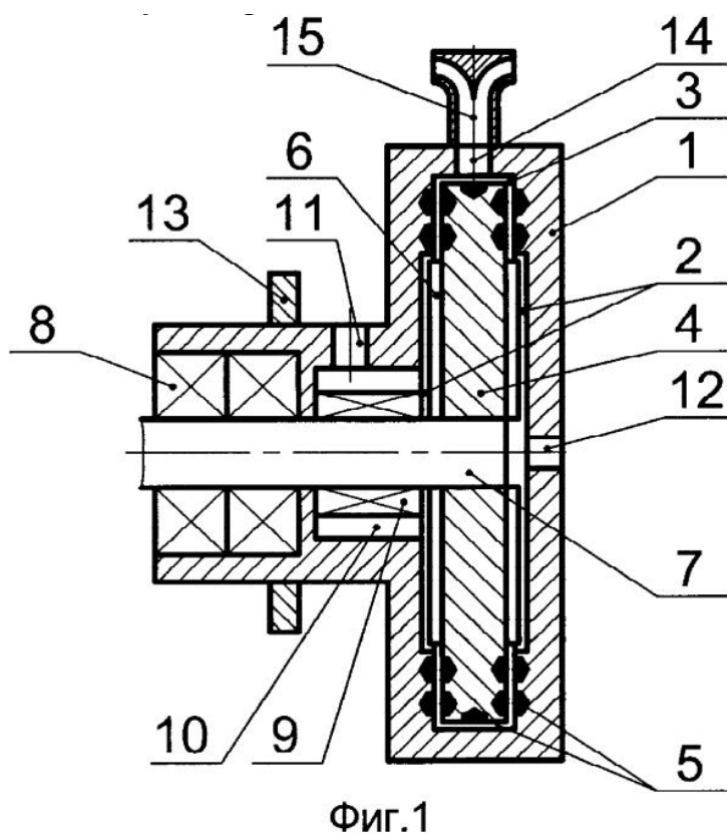


Figura 1: *Calentador de tipo rotor para jacuzzi*, Mosalev Sergej Mikhajlovich, RU N:2290573

Relevancia para el proyecto: El uso de un *rotor tipo vórtex* ofrece varios beneficios notables. Su diseño provoca la generación de energía térmica altamente eficiente, lo que reduce el consumo de energía en comparación con otros métodos de calentamiento. La durabilidad del calentador está garantizada por su diseño innovador y materiales resistentes, minimizando la necesidad de mantenimiento y reemplazo. El rotor y el impulsor

pueden mezclar diferentes capas de temperatura en el líquido, logrando un calentamiento más rápido y uniforme.

Cavitation Pump

Bomba de cavitación

Número de patente: US11213793B2

Fecha de la patente: 4 de enero de 2022

Smith y Fair (2022) proponen un dispositivo de calentamiento y mezcla en una sola unidad. Describen cómo un líquido puede ser sometido a turbulencia severa al pasar a través de las cavidades mecanizadas en el rotor, lo que, consecuentemente, transmite el calor al líquido. La cavitación es un fenómeno violento, pero el proceso dentro de este dispositivo es de bajo impacto en comparación con los dispositivos que emplean impulsores, como una bomba centrífuga.

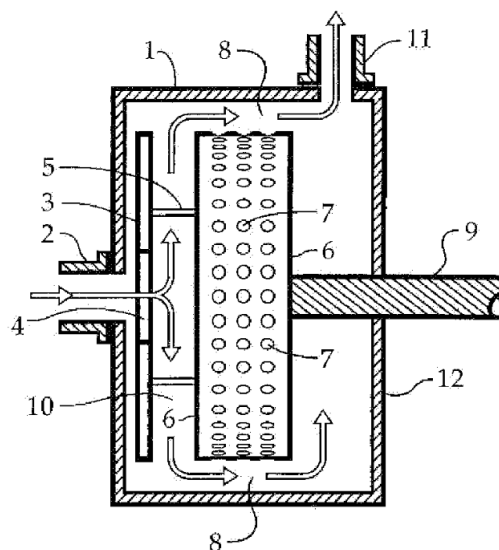


Figura 2: Bomba de cavitación, Smith et al., US 11,213,793 B2

Relevancia para el proyecto: Este invento es un generador de cavitación de tipo rotor, con el añadido de un disco que funciona como una especie de bomba para hacer fluir el líquido a través del dispositivo de cavitación. El diseño muestra una manera simple de construir un generador de calor por cavitación de tipo rotor-estator para calentar líquidos. Básicamente, se enfoca en la mezcla del líquido a lo largo del proceso para

asegurar un calentamiento uniforme, tal como la invención de Mikhailovich descrita en las líneas previas.

Cavitation Device With Balanced Hydrostatic Pressure

Dispositivo de cavitación con presión hidrostática balanceada

Número de patente: US7360755B2

Fecha de la patente: 22 de abril de 2008

Esta invención, de Hudson y Kazem (2008), es un dispositivo de cavitación rotativo utilizado para mezclar fluidos, específicamente un gas y un líquido. Está construido con la misma forma que un generador de cavitación rotor-estator, donde el rotor tiene cavidades mecanizadas alrededor de su superficie. La cavitación ayuda a reducir al menos uno de los fluidos a unidades más pequeñas y a distribuirlos a través de la mezcla.

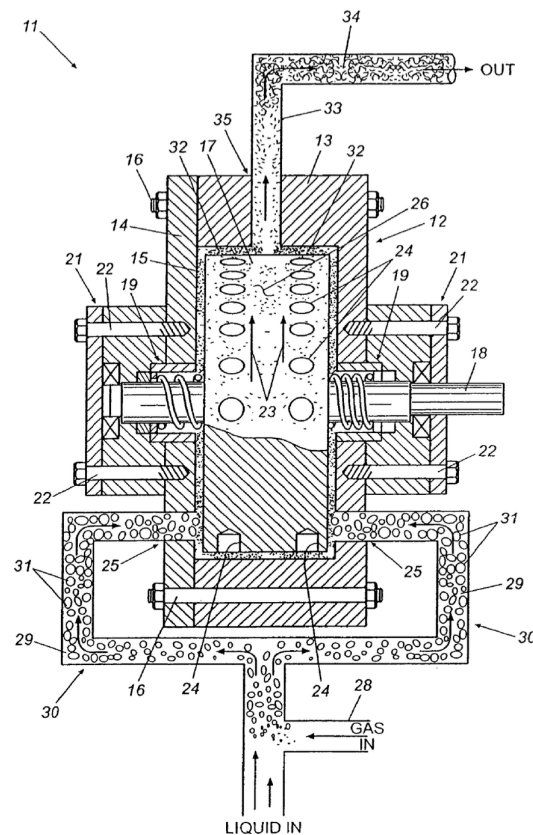


Figura 3: Dispositivo de cavitación con presión hidrostática balanceada, Hudson et al., US 7,360,755 B2

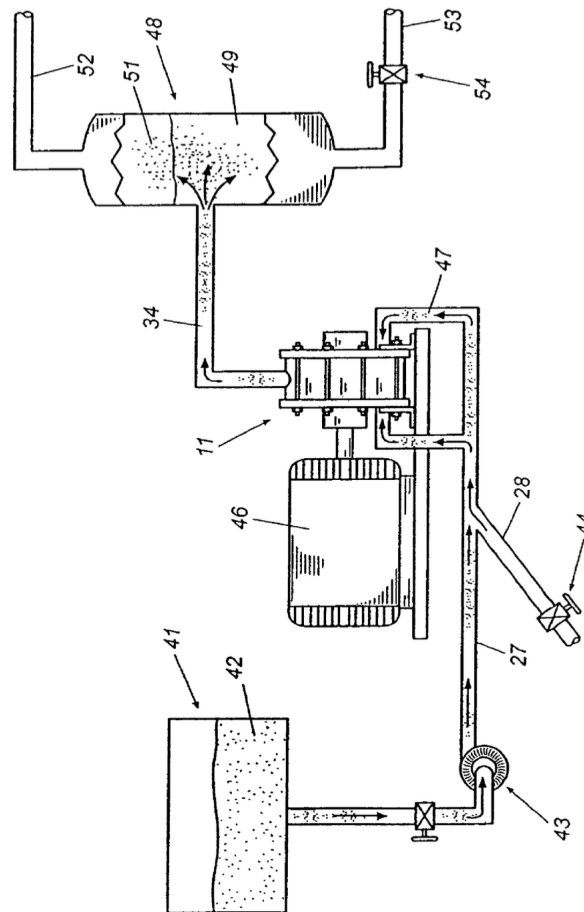


Figura 4: Esquema para la aplicación del dispositivo de cavitación, Hudson et al., US 7,360,755 B2

Relevancia para el proyecto: Aunque este dispositivo de cavitación se utiliza para mezclar fluidos y no se menciona su capacidad de calentamiento, es útil analizar el diseño de todo el sistema, como se muestra en la *Figura 4*. La forma en que el líquido recircula es de interés para este proyecto.

2. Objetivo

A pesar de los avances en el estudio de la cavitación, su aplicación como método controlado para la generación de calor sigue siendo un campo relativamente poco explorado. El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño y construcción de un dispositivo capaz de generar calor a través del fenómeno de cavitación, específicamente para calentar agua. El enfoque del estudio estará en optimizar el rendimiento calórico del dispositivo, minimizando el desgaste mecánico de los componentes involucrados. El tamaño del prototipo será del de un banco de pruebas, de aproximadamente 1x1.4 metros, en el que quepan un motor eléctrico y el generador de cavitación, una bomba de recirculación y un recipiente de almacenamiento de agua. Este bastidor cumplirá la función de base y panel de control.

Debido a la naturaleza impredecible de la cavitación, este proyecto requiere un análisis ingenieril detallado para diseñar un sistema que controle adecuadamente este fenómeno, con el fin de garantizar un funcionamiento eficiente y duradero. Se pretende obtener datos precisos sobre el comportamiento del equipo, tales como temperatura alcanzada, caudal, consumo energético y eficiencia máxima, lo que permitirá establecer las condiciones de operación óptimas bajo las cuales el dispositivo funcionará de la mejor manera posible.

La implementación de un sistema de calentamiento de agua basado en el fenómeno de la cavitación en procesos industriales, como el procesamiento de alimentos y bebidas, puede reducir significativamente el consumo energético en comparación con los métodos tradicionales de calentamiento. Este sistema permitirá optimizar y validar parámetros operativos clave, como la velocidad de rotación y la temperatura, mientras se estudian los principios fundamentales de la termodinámica y la mecánica de fluidos.

Se espera que el sistema de calentamiento por cavitación diseñado en este proyecto demuestre una eficiencia térmica superior a la de los métodos convencionales, como los calentadores eléctricos o de gas. Esta eficiencia se logrará mediante la conversión efectiva de la energía mecánica en calor a través del control del fenómeno de cavitación. Se anticipa una contribución a la reducción de la huella de carbono y una promoción de los objetivos de sostenibilidad industrial. Además, se espera que el diseño innovador del rotor y la

selección de materiales minimicen el desgaste mecánico de los componentes internos, prolongando la vida útil del sistema y reduciendo la necesidad de mantenimiento. Los resultados experimentales deberían confirmar que el equipo puede mantener temperaturas estables y óptimas para procesos industriales, reduciendo los tiempos de calentamiento y mejorando la consistencia en la generación de calor.

Por otro lado, se espera que la implementación de esta tecnología no solo mejore la eficiencia energética en entornos industriales, sino que también tenga un impacto social positivo en áreas con acceso limitado a energía, proporcionando una alternativa de calentamiento más ecológica y económica. El éxito del proyecto podría impulsar futuras investigaciones en el campo de la cavitación aplicada, fomentando innovaciones que beneficien tanto a la academia como a la industria.

3. Concepto y selección de diseño

Para la fabricación de un generador de calor por cavitación se ha tomado en cuenta el diseño de un sistema rotor-estator. Este diseño está ampliamente documentado en las referencias bibliográficas descritas hasta ahora. Además, para solucionar el problema del calentamiento de agua, y validar el principio de cavitación, este tipo de diseño es relativamente simple de fabricar. A parte del rotor y estator, se requiere fabricar tapas, eje, acoples y bastidor; estas partes están sujetas a distintos tipos de procesos de mecanizado y ajuste mecánico. Para esto, se consideran los siguientes conceptos:

- El proyecto tiene una escala de prototipo, y en cuanto a dimensiones, no debe superar las de un banco de pruebas que permita verificar su funcionamiento, con la posibilidad de hacer cambios y realizar tests.
- El prototipo debe construirse, dentro de lo posible, con materiales y equipos que no superen un presupuesto establecido. Sin embargo, hay partes y materiales que superan ciertos costos inicialmente asumidos, pero la meta es mantenerlos lo más bajos posibles, sin que eso implique reducir la calidad o la seguridad. El presupuesto está sujeto a cambios.
- El prototipo debe tener la característica de ser operado de forma funcional, práctica y segura, dado que incluye partes eléctricas y mecánicas que pueden provocar accidentes. Deben tomarse todas las precauciones necesarias.

4. Gestión del proyecto

La Universidad San Francisco de Quito asigna un presupuesto de USD\$400 para los proyectos de titulación. No obstante, existió la necesidad de incurrir en gastos que superaron este presupuesto, debido a ajustes de diseño y situaciones inesperadas en la etapa de construcción. El detalle de los gastos se hace a continuación:

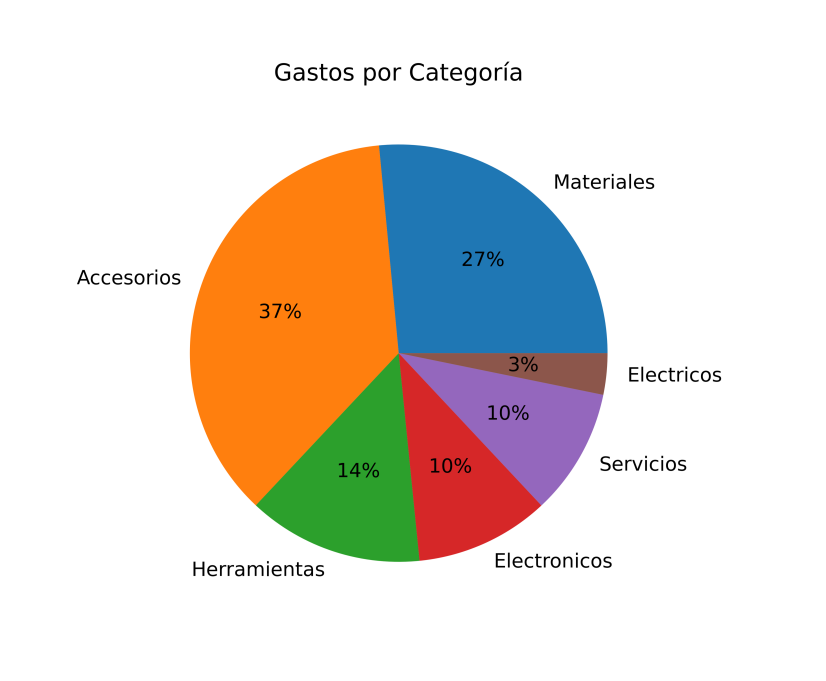


Figura 5: Gastos por categoría

Tabla 1: Gastos por categoría

Categoría	Costo
Materiales	\$ 197.04
Accesorios	\$ 271.37
Herramientas	\$ 100.98
Implementos electrónicos	\$ 77.18
Servicios externos	\$ 73.00
Implementos eléctricos	\$ 23.83
Total	\$ 743.40

Esta descripción de gastos está hecha de forma general. Un resumen detallado se hace a continuación:

Tabla 2: Detalle de gastos

#	Descripción	Fecha	Costo	Categoría	Reembolsable
1	Eje 1", eje 3z tubo 4"	Sep 24	\$ 64,00	Materiales	SÍ
2	Rodamientos	Oct 23	\$ 42,00	Accesorios	SÍ
3	Broca	Oct 23	\$ 8,61	Herramientas	SÍ
4	Sellos mecánicos	Oct 24	\$ 11,00	Accesorios	SÍ
5	Varilla para chaveta	Nov 01	\$ 0,50	Materiales	NO
6	Eje roscado, rodela	Nov 02	\$ 27,90	Materiales	SÍ
7	Tuercas de seguridad	Nov 02	\$ 4,80	Accesorios	SÍ
8	Termocupla para Arduino	Nov 24	\$ 12,00	Electrónicos	SÍ
9	Fresa cilíndrica 1/2"	Nov 05	\$ 18,56	Herramientas	NO
10	Neplos 3/4"	Nov 06	\$ 5,30	Accesorios	SÍ
11	Pulimento y disco de felpa	Nov 06	\$ 17,68	Herramientas	SÍ
12	Sueldas	Nov 06	\$ 50,00	Servicios	NO
13	Eje acople	Nov 06	\$ 7,59	Materiales	SÍ
14	Machuelo 3/4z fresa cónica 5/16"	Nov 11	\$ 44,63	Herramientas	NO
15	Lijas y WD-40	Nov 13	\$ 8,30	Herramientas	SÍ
16	Tubo cuadrado	Nov 14	\$ 17,95	Materiales	SÍ
17	Chaveteros	Nov 14	\$ 23,00	Servicios	SÍ
18	Vigas y tubos	Nov 15	\$ 71,10	Materiales	SÍ
19	Pernos y vinchas	Nov 16	\$ 40,00	Accesorios	NO
20	Discos de corte	Nov 18	\$ 3,20	Herramientas	NO
21	Tornillos y antideslizantes	Nov 20	\$ 5,57	Accesorios	SÍ
22	Implementos electrónicos para Arduino	Nov 21	\$ 17,45	Electrónicos	SÍ

#	Descripción	Fecha	Costo	Categoría	Reembolsable
23	Implementos electrónicos para Arduino	Nov 21	\$ 34,21	Electrónicos	SÍ
24	Enchufe y terminales eléctricos	Nov 21	\$ 9,43	Eléctricos	SÍ
25	Artículos varios de ferretería	Nov 22	\$ 7,66	Accesorios	NO
26	Artículos varios de ferretería	Nov 28	\$ 75,50	Accesorios	NO
27	Pernos y arandelas	Nov 29	\$ 8,00	Materiales	NO
28	Artículos varios de ferretería	Nov 30	\$ 10,79	Accesorios	NO
29	Artículos varios de ferretería	Dec 01	\$ 2,97	Accesorios	NO
30	Artículos varios de ferretería	Dec 02	\$ 5,67	Accesorios	NO
31	Rodamiento	Dec 02	\$ 21,00	Accesorios	NO
32	Artículos varios de ferretería	Dec 09	\$ 16,36	Accesorios	NO
33	Artículos varios de ferretería	Dec 09	\$ 13,49	Accesorios	NO
34	Switch pulsador	Dec 09	\$ 14,40	Eléctricos	NO
35	Artículos varios de ferretería	Dec 10	\$ 9,26	Accesorios	NO
36	Termocuplas + Envío	Dec 11	\$ 13,52	Electrónicos	NO
Total				\$ 743,40	

Cabe notar que en esta tabla de gastos no se contempla el costo del motor eléctrico, de

marca WEG, trifásico, de 3 hp de potencia (USD\$295.00), y del variador de frecuencia y demás implementos de la caja de control (USD\$414.52). Estos equipos fueron adquiridos por la Universidad San Francisco de Quito, para uso en el presente proyecto, pero también para uso futuro en otros proyectos de titulación.

De igual manera, se realizó un cronograma de tareas para la construcción del prototipo, como se detalla en el siguiente diagrama de Gantt. Sin embargo, en el camino surgieron situaciones inespereadas que retrasaron la ejecución de algunas tareas.

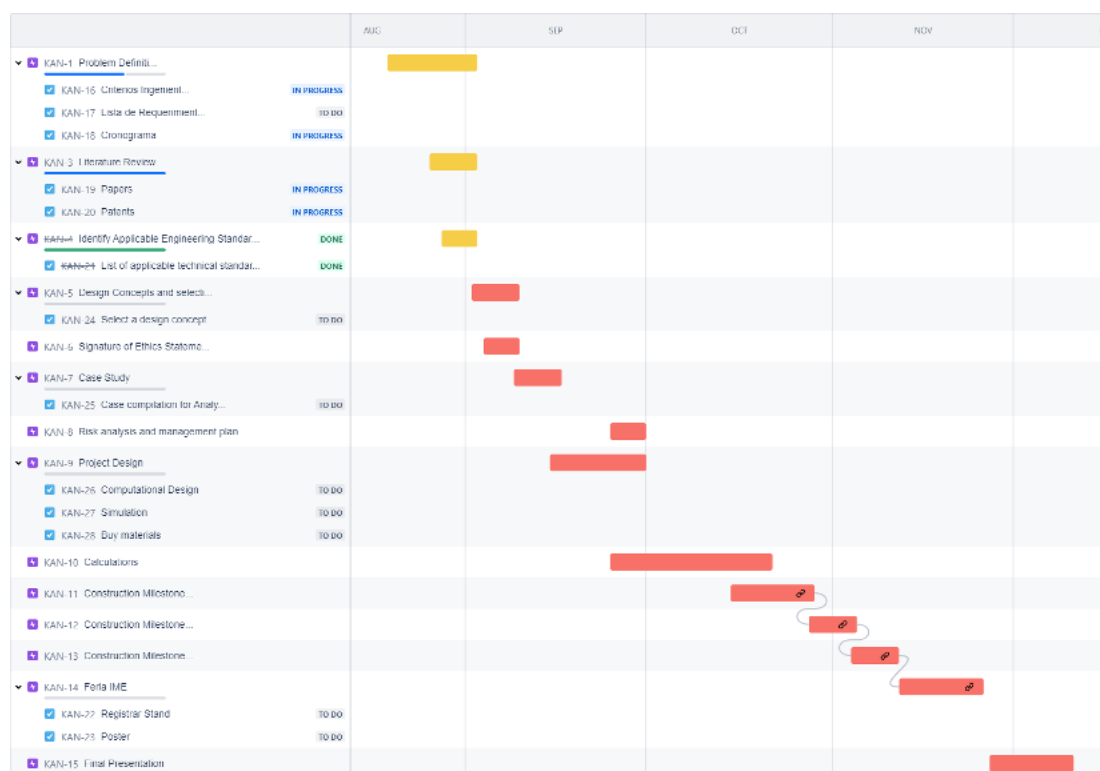


Figura 6: Diagrama de Gantt

Tabla 3: Calendario de fabricación

Parte/ Pieza	Fecha específica	Duración (días)	Responsable	Indicador de desempeño
Eje	21 oct-28 oct	7	Carlos Puente	■ Resistencia a la fatiga ■ Desalineación máxima permitida
Rotor	29 oct-5 nov	7	Carlos Puente	■ Capacidad de generar cavitación ■ Resistencia a la corrosión
Carcasa	29 oct-5 nov	7	Paulo León	■ Tolerancia ■ Ausencia de rozamiento
Tapas	5 nov-12 nov	7	Paulo León	■ Ausencia de fugas ■ Resistencia a la corrosión
Pernos	n/a	n/a	Jennifer Cando	■ Resistencia a la tracción

Parte/ Pieza	Fecha específica	Duración (días)	Responsable	Indicador de desempeño
Arandelas planas y de presión	n/a	n/a	Jennifer Cando	■ Resistencia a la tracción ■ Durabilidad bajo cargas cíclicas
Rodamientos	n/a	n/a	David Altamirano	■ Vida útil ■ Capacidad de carga dinámica
Sellos mecánicos	n/a	n/a	David Altamirano	■ Resistencia a la corrosión ■ Vida útil ■ Capacidad de sellado ■ Resistencia a la temperatura

5. Estándares ingenieriles

Los estándares que aplican para este proyecto son:

1. Norma INEN de dibujo técnico (Ecuador) (INEN, 1989)

Para el diseño del generador de cavitación es necesario elaborar los planos, correctamente dibujados y acotados. Afortunadamente, se dispone de software como Autodesk Inventor que permite hacer diseño CAD en 3D, y directamente obtener las vistas para los planos. No obstante, es responsabilidad del autor seguir una norma de dibujo técnico, en este caso, la Norma INEN de Dibujo Técnico del Ecuador, basada en las normas internacionales ISO. En esta norma se presentan todos los lineamientos e instrucciones para un correcto dibujo e interpretación de los planos de diseño, tales como sistema de vistas, cotas, rotulado, tolerancias, escala, entre otros parámetros. En este proyecto, los aspectos más relevantes son las cotas, puesto que de eso depende, en el proceso de fabricación, que el producto final sea igual al del diseño. Además, en esta norma se detallan los procesos de fabricación que deben incluirse en un dibujo; esto es clave en este proyecto, ya que se incluye, principalmente, torneado y taladrado. Después, esta norma servirá también para elaborar un plano de conjunto, donde se puedan observar las partes y elementos del equipo completo del generador de cavitación. El adecuado uso de una norma de dibujo técnico sirve para que el proyecto se replique a futuro, por lo que cualquier otro profesional debe entender claramente el plano. De lo contrario, podrían surgir confusiones en cuanto a la fabricación del equipo.

Esta norma fue utilizada para la elaboración de los planos de taller en el proceso de fabricación. Es importante mantener un estándar adecuado en la forma en que se hacen y se acotan los planos, para que el proceso sea repetible y comprobable.

2. OSHA para el control de riesgos eléctricos (OSHA, 2002)

El generador de cavitación funciona, por su puesto, con agua como fluido de trabajo, pero también incluye un sistema eléctrico que alimenta y controla un motor eléctrico

como fuente de movimiento para el equipo. Por esto, es importante tomar todas las precauciones necesarias al momento de realizar las instalaciones eléctricas, tanto para proteger los equipos como para proteger a las personas que se encargarán de operarlos. En esta norma de la OSHA de los Estados Unidos (Occupational Safety and Health Administration, por sus siglas en inglés) se detallan todos los riesgos y consecuencias de un buen y mal manejo de la electricidad. Explica, por ejemplo, como suceden los shocks eléctricos y maneras de prevenirlos. Señala el comportamiento del agua como conductor eléctrico y sugiere métodos de protección, aislamiento e instalación de protecciones eléctricas.

En este proyecto, al tener un voltaje de trabajo de 220V para los equipos eléctricos, y al estar en la necesidad de realizar todas las instalaciones eléctricas necesarias para su funcionamiento, esta norma es importante para descartar riesgos que podrían poner en peligro la integridad física de los operarios.

3. ISO 12100 (Seguridad mecánica)

Esta norma ISO contiene reglamentos relacionados con el uso y operación de máquinas y herramientas. Detalla varios aspectos de seguridad como superficies a altas temperaturas, ruido, distancias seguras, dispositivos a presión, entre otros, que son relevantes para este proyecto. El objetivo de esta norma es ayudar a identificar y reducir los riesgos relacionados con la operación de máquinas y herramientas mecánicas. Además, propone distintos sistemas de control para prevenir accidentes. Para este proyecto, hay que considerar todos los aspectos de seguridad aplicables, ya que se espera que en el futuro el prototipo sea seguro de utilizar y replicable.

El presente proyecto no presenta riesgos significativos en términos de altas presiones o ruido. Sin embargo, si existen altas temperaturas y altas velocidades de rotación. Por esto, es importante mantener presentes las indicaciones de esta norma para mantener todas las precauciones debidas al momento de trabajar en un taller, operar los equipos, y trabajar con herramientas.

6. Materiales y métodos

6.1. Selección de materiales y componentes

Tomando en cuenta que el generador de calor por cavitación tendrá agua como fluido de trabajo, el material más adecuado es el acero inoxidable. Además, se ha seleccionado este material por tener una resistencia superior a la cavitación que otros materiales. El acero seleccionado es AISI 304. El acero inoxidable 304 es una aleación austenítica que combina cromo (alrededor del 18 al 20 por ciento) y níquel (del 8 al 10.5 por ciento), con un contenido bajo de carbono (máximo 0.08 %). Esta composición otorga al material una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC), característica de los aceros austeníticos. La presencia de cromo es fundamental, ya que forma una capa pasiva de óxido de cromo, lo que proporciona una excelente resistencia a la corrosión, mientras que el níquel estabiliza la fase austenítica y mejora su ductilidad y tenacidad.

Propiedades mecánicas y físicas:

El acero inoxidable 304 presenta una resistencia a la tracción mínima de 515 MPa y un límite elástico de 205 MPa, lo que lo convierte en un material fuerte y versátil. Posee excelente ductilidad, permitiendo que sea mecanizado y trabajado en frío sin perder sus propiedades esenciales. Además, debido a su dureza moderada (máximo 92 HRB en la escala Rockwell B), resiste el desgaste en aplicaciones de carga ligera a moderada. Su buen rendimiento a bajas temperaturas lo diferencia de otras aleaciones, ya que mantiene su tenacidad y no experimenta fragilidad cuando se somete a condiciones criogénicas (por debajo de -196 °C).

Aplicaciones y uso práctico:

Gracias a su combinación de resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas y facilidad de fabricación, el acero inoxidable 304 es ampliamente utilizado en la industria química, alimentaria y en la fabricación de componentes mecánicos como ejes, tanques, bombas y cavitadores. Su capacidad para resistir la acción del agua, fluidos químicos débiles y temperaturas moderadas lo convierte en una opción ideal para equipos de procesos industriales.

En conclusión, el acero inoxidable 304, debido a su composición y estructura, muestra una resistencia excepcional a la corrosión y mantiene su fase austenítica en un amplio rango de temperaturas. El uso de diagramas de fase como Schäffler permite predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones térmicas y composicionales, asegurando un rendimiento óptimo en aplicaciones mecánicas e industriales.

6.2. Alternativas de diseño

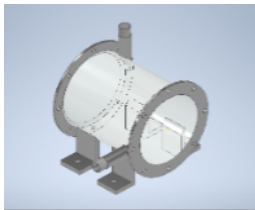
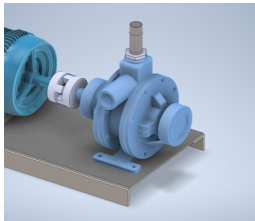
1. Estator

Problema: Diseño del cuerpo estructural (carcasa)

Solución:

- A: Estator fabricado con tubo de acero inoxidable de cédula 40 AISI 304
- B: Estator fabricado con acrílico transparente
- C: Carcasa de bomba de agua centrífuga, reciclada como estator

Tabla 4: Opciones de diseño de la carcasa

Solución A	Solución B	Solución C
		

Criterios:

1. Costo de fabricación
2. Tiempo de construcción
3. Mantenimiento
4. Balance y alineación del dispositivo

5. Hermeticidad

Ponderación

Tabla 5: Ponderación de opciones de diseño de la carcasa

	Producto Criterio 1	Producto Criterio 2	Producto Criterio 3	Producto Criterio 4	Producto Criterio 5	Suma de los productos	Prioridad
Solución A	0.167	0.028	0.017	0.067	0.069	0.35	1
Solución B	0.111	0.056	0.017	0.067	0.069	0.32	3
Solución C	0.056	0.083	0.033	0.133	0.028	0.33	2

Discusión: Tras realizar la correspondiente ponderación de los criterios y las soluciones, se obtiene como resultado a la solución A más conveniente, que indica fabricar el estator con tubo de acero inoxidable AISI 304 CED 40. Específicamente, es ideal porque tiene facilidad del mantenimiento, garantiza mayor hermeticidad y el balanceo-alineación del dispositivo en funcionamiento.

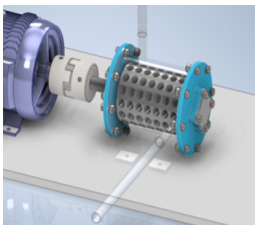
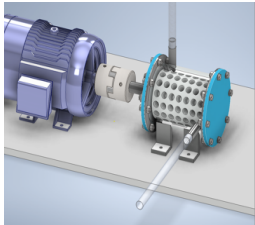
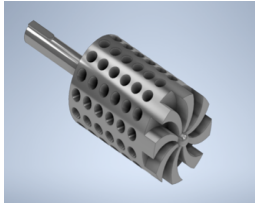
2. Rotor

Problema: Diseño del rotor

Solución:

- A: Rotor con dos apoyos
- B: Rotor con apoyo de un lado
- Rotor con succión y apoyo de un lado

Tabla 6: Opciones de diseño del rotor

Solución A	Solución B	Solución C
		

Criterios:

1. Costo de fabricación
2. Tiempo de construcción
3. Mantenimiento
4. Balance y alineación del eje (es más difícil balancear y alinear un eje desde cero)
5. Facilidad de desmontaje

Ponderación

Tabla 7: Ponderación de opciones de diseño del rotor

	Producto Criterio 1	Producto Criterio 2	Producto Criterio 3	Producto Criterio 4	Producto Criterio 5	Suma de los productos	Prioridad
Solución A	0.150	0.056	0.033	0.150	0.028	0.417	1
Solución B	0.100	0.083	0.017	0.075	0.083	0.358	2
Solución C	0.050	0.028	0.017	0.075	0.056	0.225	3

Discusión: De acuerdo con los criterios establecidos y la ponderación realizada, la solución A es la mejor opción porque tiene la mayor suma ponderada, es la que mejor cumple con los criterios establecidos. Se debe garantizar la alineación del eje en altas revoluciones ya que de esta forma se garantiza el funcionamiento del equipo sin inconvenientes, pues las vibraciones que se generan pueden afectar el funcionamiento de este.

3. Circulación de agua

Problema: : Garantizar la entrada y salida del flujo de agua al equipo de cavitación.

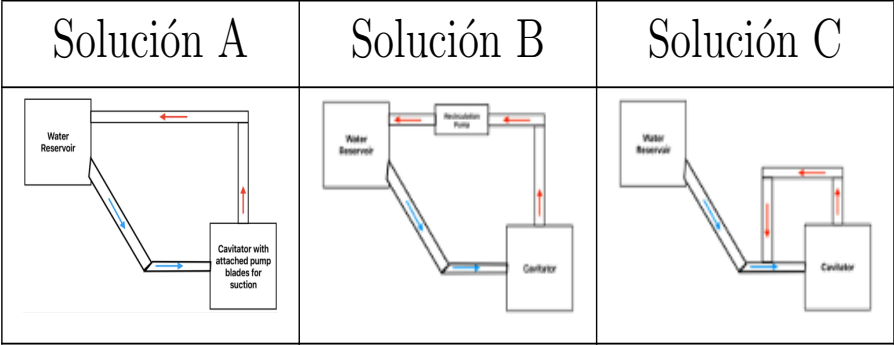
Solución:

- A: Impulsar el agua por gravedad
- B: Utilizar una bomba de recirculación
- C: Recirculación por *bypass* entre la entrada y la salida de agua del cavitador

Criterios:

1. Costo de fabricación

Tabla 8: Opciones de diseño del sistema de circulación de agua



- 2. Tiempo de construcción
- 3. Capacidad de bombeo
- 4. Eficiencia energética
- 5. Mantenimiento

Tabla 9: Ponderación de opciones de diseño del sistema de circulación de agua

	Producto Criterio 1	Producto Criterio 2	Producto Criterio 3	Producto Criterio 4	Producto Criterio 5	Suma de los productos	Prioridad
Solución A	0.167	0.048	0.050	0.067	0.063	0.365	1
Solución B	0.056	0.097	0.100	0.022	0.022	0.297	3
Solución C	0.111	0.121	0.050	0.044	0.011	0.338	2

7. Plan de manufactura

7.1. Tecnologías de fabricación

- **Mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado):** Tecnología de gran importancia para la fabricación de componentes de alta precisión, permite realizar los agujeros y ranuras específicas en el rotor permitiendo cumplir con el principio de cavitación (Groover, 2012).
- **Torno y fresado CNC (Haas):** Permite torneear y fresar con precisión, se puede mecanizar el eje cilíndrico y por la alta velocidad se pueden crear geometrías complejas (Haas Automation, 2024).

7.2. Componentes a fabricar/ensamblar

- **Rotor con agujeros:**
 - **Rotor:** Eje de acero inoxidable AISI 304 de 5 in de diámetro
 - **Agujeros del rotor:** 12mm de diámetro y 15mm de profundidad
- **Eje:** Acero inoxidable AISI 304 de 1in de diámetro
- **Estator:** Tubo de acero inoxidable AISI 304 ced. 40 de 5 in de diámetro
- Soportes y rodamientos
- Sellos y juntas
- **Ensamblaje:** Requiere una alineación precisa del eje con el rotor y el estator. Los rodamientos y sellos se ensamblan en el eje para prevenir fugas y asegurar el libre movimiento.

7.3. Hojas de trabajo del proceso

1. Rotor

Hoja de proceso					
Pieza N°	1	Descripción	Rotor	Control	
Material	Eje de acero inoxidable AISI 304			Tipo	Herramienta
Tareas		Herramientas			
Torneado		Torno		Diámetro correcto	Calibrador
Perforación de agujeros		Torno		Diámetro correcto	Calibrador
Perforación para eje		Torno		Diámetro correcto	Calibrador
Chavetero		Fresa		Longitud y diámetro correctos	Calibrador
Medición		Calibrador y flexómetro		Longitud y diámetro correctos	Calibrador y flexómetro

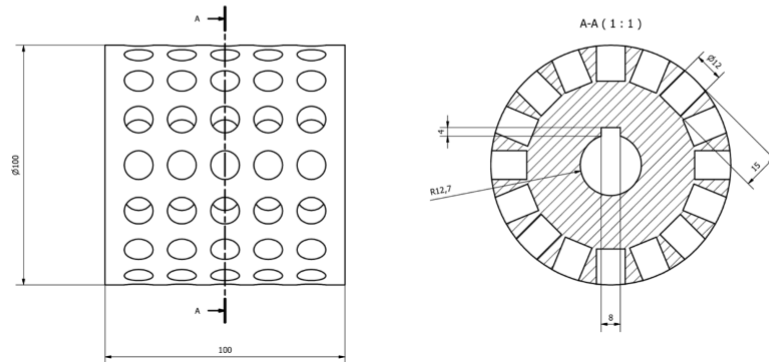


Figura 7: Hoja de proceso de fabricación del rotor

Aquí se muestra la hoja de procesos del rotor. Se detallan los procesos de fabricación y de ajuste mecánico que se deben seguir. Esta es la pieza más complicada, dado el número de agujeros. Además, cada uno de esos agujeros debe ser homogéneo en profundidad, diámetro y separación, para garantizar un buen balance de la pieza durante el funcionamiento.

2. Eje

Hoja de proceso					
Pieza N°	2	Descripción	Eje	Control	
Material	Eje de acero inoxidable AISI 304			Tipo	Herramienta
Tareas		Herramientas			
Medición y trazado		Flexómetro, rotulador y calibrador		Longitud correcta	Flexómetro
Corte		Amoladora		Longitud correcta	Flexómetro
Torneado		Torno		Diámetro correcto	Calibrador
Roscado		Torno		Diámetro y paso correctos	Calibrador
Chavetero		Fresa		Diámetro y longitud correctos	Calibrador
Medición		Calibrador		Diámetro y longitud correctos	Calibrador

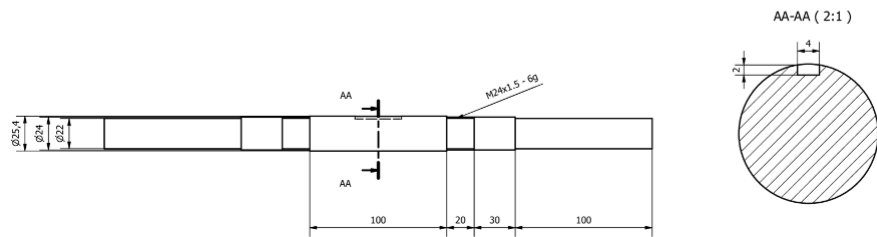


Figura 8: Hoja de proceso de fabricación del eje

Aquí se muestra la hoja de procesos de fabricación del eje. Cabe notar que este eje contiene un roscado a cada lado de donde irá colocado el rotor, para evitar, junto con el chavetero y chaveta, que se desplace de lado a lado.

3. Carcasa

Hoja de proceso			
Pieza N°	3	Descripción	Carcasa
Material	Tubo de acero inoxidable AISI 304		Control
Tareas	Herramientas	Tipo	Herramienta
Medición y trazado	Flexómetro, calibrador y rotulador	Longitud correcta	Flexómetro
Corte	Amoladora	Longitud correcta	Flexómetro
Perforación de agujeros	Torno	Diámetro correcto	Calibrador
Ajuste diámetro interno	Torno	Diámetro correcto	Calibrador
Medición	Calibrador	Diámetro correcto	Calibrador

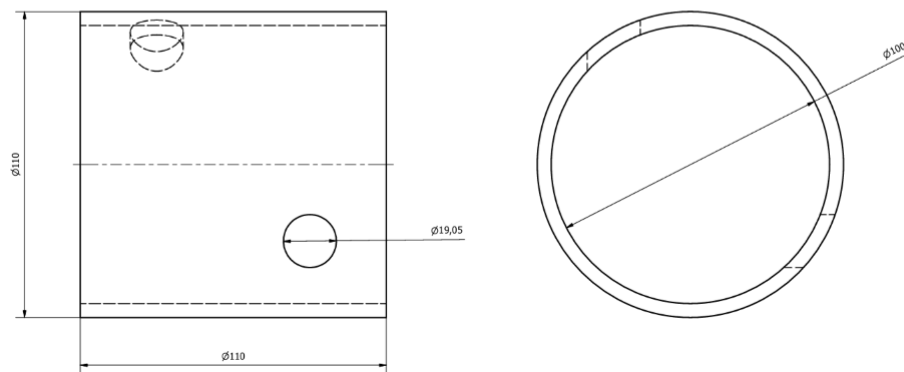


Figura 9: Hoja de proceso de fabricación de la carcasa

Aquí se muestra la hoja de proceso de fabricación de la carcasa o estator. Esta es probablemente la pieza más simple, dado que se trata de una tubería de acero inoxidable a la que solamente se le deben hacer perforaciones, una para la entrada y otra para la salida del agua, respectivamente. Además, se deberá ajustar el diámetro interno, de acuerdo con las medidas del rotor.

7.4. Plan de verificación de tolerancias y dimensionamiento de fabricación

El objetivo de esta sección es establecer un estándar para la verificación de las dimensiones y tolerancias en el proceso de fabricación del eje del generador de cavitación. Con esto, se garantiza la conformidad con las especificaciones de diseño y asegurar el ensamblaje adecuado con todas las piezas. Para esto, se debe hacer lo siguiente:

- Medición de dimensiones críticas

- Verificación de tolerancias geométricas y dimensionales
- Registro y análisis de datos de medición
- Identificación de puntos de interferencia y ajustes de componentes

Tabla 10: Tolerancias

Dimensión	Valor Nominal	Tolerancia	Equipo de Medición
Longitud total del eje	200 mm	± 0.1 mm	Calibrador Vernier
Diámetro exterior del eje	150 mm	± 0.05 mm	Micrómetro de exteriores
Concentricidad entre diámetros	0.02 mm	-	Medidor de concentricidad
Redondez del eje	150 mm	± 0.01 mm	Calibre de anillos
Rectitud del eje	0.03 mm	-	Medidor de rectitud

7.5. Equipos de medición utilizados

- **Calibrador Vernier:** Rango de medición 0-200 mm, precisión 0.01 mm
- **Micrómetro de exteriores:** Rango de medición 0-50 mm, precisión 0.001 mm
- **Medidor de concentricidad:** Rango de medición 0-50 mm, precisión 0.002 mm
- **Calibre de anillos:** Tolerancia de ± 0.005 mm
- **Medidor de rectitud:** Rango de medición 0-300 mm, precisión 0.001 mm

7.6. Procedimiento estándar

1. Preparación del equipo de medición:

- Verificar el estado de calibración del equipo según los certificados de calibración vigentes.
- Limpiar las superficies de contacto y calibrar el equipo antes de iniciar la medición.

2. Preparación de la pieza:

- Limpiar la superficie de la pieza con un paño.

- Revisar visualmente la pieza para identificar posibles defectos de fabricación que puedan afectar la medición.

3. Procedimiento de medición:

- Asegurar que la pieza esté adecuadamente posicionada y asegurada en el dispositivo de sujeción.
- Realizar mediciones según los puntos críticos especificados en la lista anterior, siguiendo el orden numérico de las dimensiones.
- Registrar cada medición en el formato de lista de verificación.

4. Registro de resultados:

- Utilizar el documento de lista de verificación. Para cada dimensión verificada, registrar el valor medido y marcar con “OK” si está dentro de la tolerancia permitida, o “NO OK” si está fuera de tolerancia.
- En caso de no conformidad, anotar las observaciones correspondientes y proponer acciones correctivas.

5. Análisis de resultados:

- Analizar los datos de medición para detectar tendencias fuera de tolerancia.
- Revisar los registros cada semana para identificar desviaciones significativas que puedan indicar problemas en el proceso de fabricación.

Tabla 11: Lista de verificación de tolerancias

Número de Parte	Dimensión/Tolerancia	Valor Nominal	Valor Medido	Tolerancia	Resultado (OK/NO OK)	Responsable	Observaciones
#001	Longitud eje	200 mm	X mm	± 0.1 mm	OK	-	-
#002	Díámetro externo eje	150 mm	X mm	± 0.05 mm	OK	-	-

Nota: La tabla puede expandirse a discreción del operario y/o diseño.

8. Resultados y discusiones

8.1. Análisis ingenieril

En esta sección se presentan algunos cálculos que explican algunos de los principios físicos presentes en este proyecto.

8.1.1. Mecánica de fluidos

■ El Principio de Bernoulli

La ecuación principal de Bernoulli tiene la siguiente forma:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constant along a streamline}$$

Generalmente, un aumento en la velocidad de un fluido está acompañado por una reducción de presión. Uno de los ejemplos más claros es el del ala de un avión, donde la velocidad del aire que fluye en su superficie superior es más alta que la que fluye en la superficie inferior, consecuentemente, haciendo que la fuerza aplicada en la superficie inferior sea, en promedio, mayor, generando sustentación.

Si la diferencia de velocidad es apreciable, el diferencial de presión también puede serlo. En los líquidos, esto conduce al fenómeno de **cavitación** que, se produce cuando la presión del líquido es reducida hasta su presión de vapor, a temperatura constante.

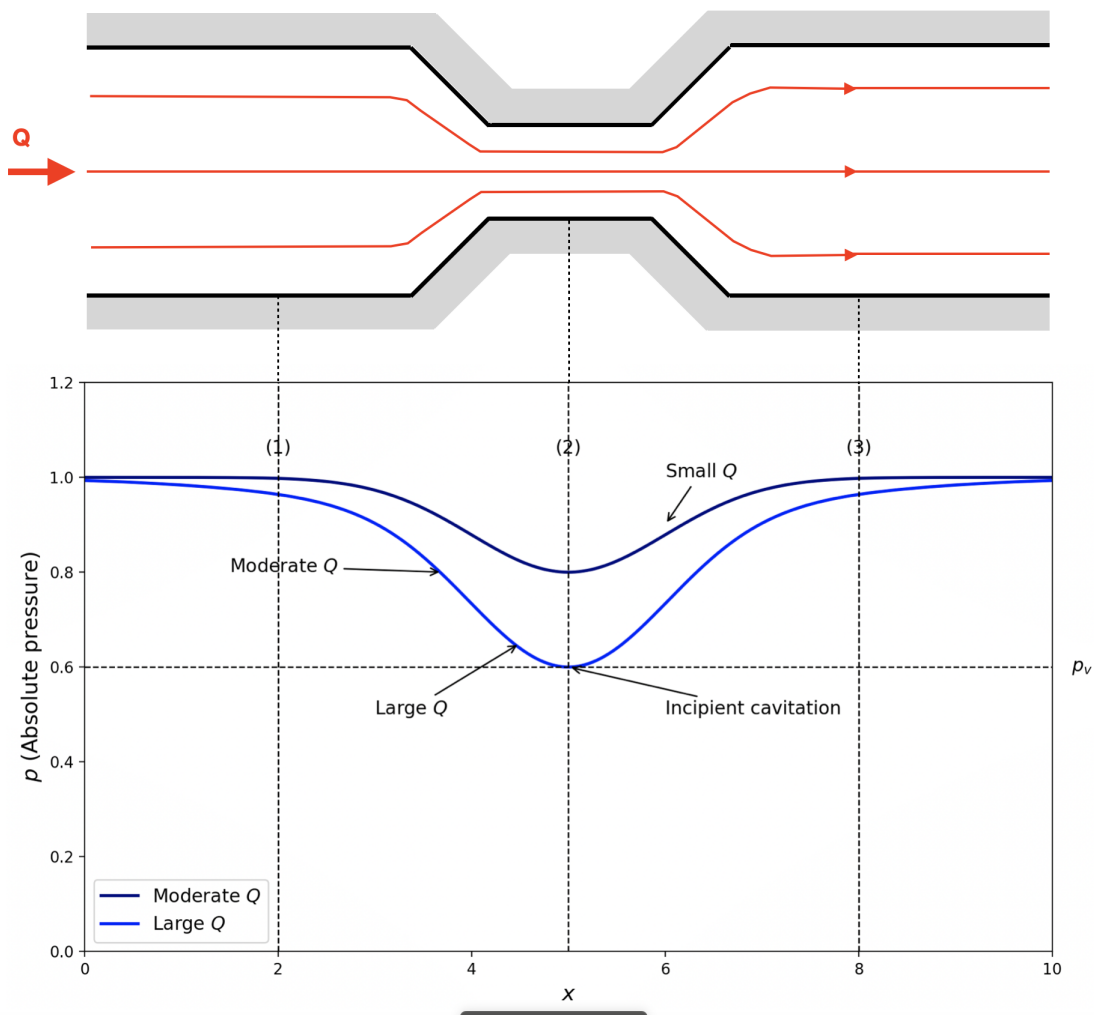


Figura 10: Variación de presión y cavitación en una tubería de sección variable

Como se aprecia en la figura, la reducción en el área de la tubería provocaría que su velocidad aumente, por consiguiente, la presión se reduce. Esta caída de presión, necesaria para acelerar el fluido en la reducción, podría ser lo suficientemente grande para que la presión del líquido baje hasta la presión de vapor p_v (Gerhart et al., 2015).

Utilizando la ecuación:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Donde:

$$h_1 = h_2$$

Se puede determinar el flujo, o las velocidades v_1 y v_2 , mediante la ecuación de continuidad:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

El objeto de mostrar el Principio de Bernoulli de esta manera es ilustrar el comportamiento del líquido bajo condiciones de alta velocidad. Esta es una de las maneras de explicar, matemáticamente, la ocurrencia de cavitación en un fluido.

En mecánica de fluidos, existen tres ecuaciones fundamentales:

1. La ecuación de continuidad: Conservación de la masa.

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\vec{A}$$

Consideraciones:

- En estado estable: $\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV = 0$
- Fluido incompresible: $\rho_1 = \rho_2$

2. La ecuación de momento: Básicamente, la Segunda Ley de Newton, que describe las fuerzas que actúan en el flujo de un fluido.

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \vec{v} dV + \int_{CS} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\vec{A}$$

Consideraciones:

- En estado estable: $\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV = 0$
- Fluido incompresible: $\rho_1 = \rho_2$

3. La ecuación de conservación de la energía: De acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica, la energía no puede ser creada ni destruida, solo transformada. De acuerdo con esto, podemos establecer que:

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta E$$

Donde:

- ΔQ es el cambio en el calor neto añadido al sistema (por ejemplo, desde una fuente de calor)
- ΔW es el cambio en el trabajo neto realizado sobre el sistema (por ejemplo, trabajo mecánico)
- ΔE es el cambio en la energía al interior del sistema en términos de masa

El balance energético puede derivarse en varias formas, manteniendo el enfoque termodinámico. De hecho, la ecuación de Bernoulli, descrita al inicio de esta sección, es una de las formas que puede adquirir la ecuación del balance de energía si se lo expresa en términos de cambio de energías potencial y cinética en un flujo, bajo condiciones de estado estable (suponiendo que no existe trabajo mecánico en el sistema) (Gerhart et al., 2015).

Pero hay algo que falta para describir completamente un flujo. Las ecuaciones descritas anteriormente son capaces de describir flujos de fluidos incompresibles, descartando la viscosidad. De hecho, uno de los requisitos para aplicar la ecuación de Bernoulli, es considerar al flujo como no viscoso; esta suposición funciona bien para fluidos newtonianos. Sin embargo, en 1821 el ingeniero francés Claude-Louis Navier introdujo la viscosidad en las ecuaciones propuestas por el matemático suizo Leonhard Euler, con el objetivo de acercarse lo más posible a la realidad. Más tarde, a mediados del siglo XIX, el físico y matemático británico Sir George Gabriel Stokes expandió el trabajo de Navier, pero las soluciones obtenidas para las ecuaciones fueron obtenidas para flujos simples en dos dimensiones. Estas son las ecuaciones de Navier-Stokes, que son capaces de describir cualquier flujo de un fluido incompresible tomando en cuenta las tres fuerzas que típicamente actúan sobre un fluido: el gradiente de presión, la viscosidad (fricción), y la gravedad.

■ Las ecuaciones de Navier-Stokes

Componente radial

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right)$$

Componente tangencial

$$\rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right)$$

Componente en el eje z

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu (\nabla^2 u_z)$$

Operador Laplaciano

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

De acuerdo con Li et al. (2023), puede hacerse una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener la presión en la superficie de los agujeros del rotor, de acuerdo con la siguiente configuración:

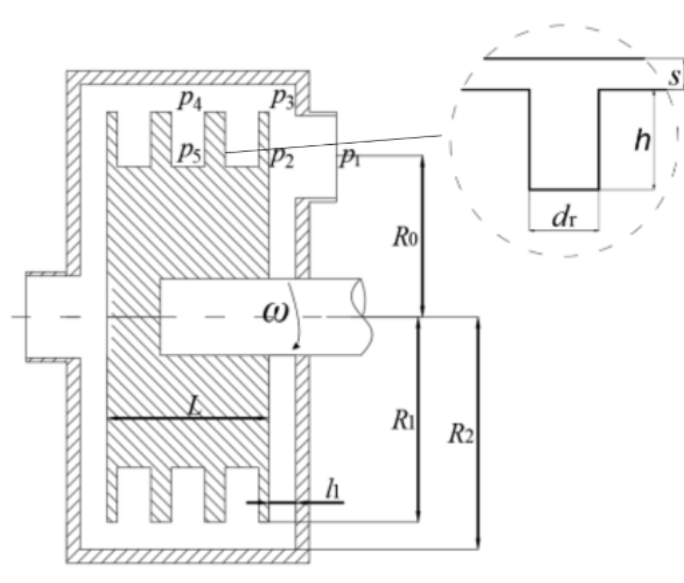


Figura 11: Configuración de presiones en los agujeros del rotor (Li et al., 2023)

En donde:

- p_1 = Presión de entrada al cavitador
- p_2 = Presión en el rotor
- p_3 = Presión en el espacio entre el rotor y el estator
- p_4 = Presión en la superficie del agujero
- p_5 = Presión al fondo del agujero

Los diferenciales de presión de interés son:

- $\Delta p_1 = p_1 - p_2$ Presión desde la entrada al cavitador hasta la pared del rotor
- $\Delta p_2 = p_2 - p_3$ Diferencia de presión debido a la rotación del rotor
- $\Delta p_3 = p_3 - p_4$ Diferencia de presiones en el espacio entre el rotor y el estator
- $\Delta p_4 = p_4 - p_5$ Causada por la fuerza centrífuga de la rotación del rotor

La ecuación propuesta por los autores es la siguiente, para la presión p_4 :

$$p_4 = p_1 - \rho \frac{V_1^2}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) - h_{P1-2} - \frac{6\mu q_c}{\pi r l_1^3} \ln \frac{R_1}{R_0} - \frac{3\rho\omega^2}{20} \rho \omega^2 (R_1^2 - R_0^2) - \frac{q_c^2}{2g} \frac{1}{(\nu A_c)^2}$$

Para obtener esta ecuación como resultado de la simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes en el eje radial, se toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- **Fluido incompresible:** Densidad constante, se eliminan los términos relacionados con variaciones de densidad en las ecuaciones de Navier-Stokes.
- **Fluido newtoniano:** Se asume que el fluido es newtoniano, expresando el término que describe la viscosidad como $\mu \nabla^2 u$
- **Estado estable:** Las derivadas parciales de variables dependientes del tiempo son 0. $\frac{\partial u_r}{\partial t} = 0$
- **Flujo axisimétrico:** : No hay variación en el eje tangencial (θ). Todas las derivadas de variables dependientes de θ son 0. $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$
- **Fuerzas de cuerpo despreciables:** Sabiéndose como fuerzas de cuerpo las fuerzas externas al elemento de fluido, se desprecia la aceleración de la gravedad.

- **Flujo radial dominante:** Se desprecian los flujos tangenciales y en el eje z , dejando solamente el gradiente de presión en el eje radial $\frac{\partial p}{\partial r}$

Esta presión es de interés, puesto que con esta podemos luego obtener el diferencial de presión entre p_4 y p_5 . p_5 representa la presión en el fondo del agujero, que es donde se espera que el líquido empiece a cavitarse, como una consecuencia de un efecto de *succión* desde p_4 .

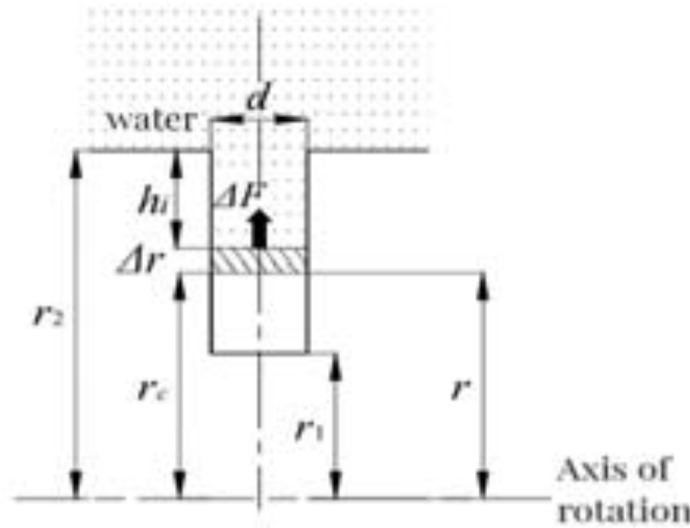


Figura 12: Modelo de transición de fase en uno de los agujeros (Li et al., 2023)

$$p_5 = p_4 - \frac{1}{2}\rho A r \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)$$

Cuando la presión p_5 es menor que la presión de vapor p_v , la cavitación ocurre ($p_5 < p_v$).

Cada término en las ecuaciones significa lo siguiente:

Tabla 12: Términos de las ecuaciones y su significado

Término	Significado
p_4	Presión en la superficie del agujero
p_1	Presión de entrada al sistema
ρ	Densidad del fluido
$\frac{V^2}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right)$	Diferencia de presión dinámica debido a los cambios de velocidad entre la entrada y la posición del rotor. Considera la diferencia en las áreas transversales A_1 y A_2 .
h_{p1-2}	Pérdida de presión local entre la entrada y la posición del rotor. Representa las pérdidas de energía debido a la fricción y la turbulencia.
$\frac{6\mu q_c}{\pi r_1^3 l_1} \ln \frac{R_1}{R_0}$	Pérdida de presión radial debido a los efectos viscosos en el flujo radial. Derivado de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo en un espacio estrecho.
$\frac{3\rho\omega^2}{20} (R_1^2 - R_0^2)$	Incremento de presión debido a la fuerza centrífuga generada por la rotación del rotor. Este término depende de la velocidad angular ω y la distancia radial $R_1 - R_0$.
$\frac{q^2}{2g\xi A_c^2}$	Pérdida por arrastre debido a la resistencia al flujo en el espacio entre el rotor y el estator. Considera las pérdidas de energía causadas por la turbulencia y la fricción.

Término	Significado
$\ln \frac{R_1}{R_0}$	Logaritmo natural del cociente entre el radio exterior (R_1) y el radio interior (R_0). Representa el efecto geométrico del camino del flujo radial sobre la caída de presión.
μ	Viscosidad dinámica del fluido
q_c	Caudal que pasa por el sistema
r	Posición radial. Representa la distancia desde el centro del rotor hasta el punto de interés.
l_1	Longitud axial del agujero interno. Representa la longitud del camino del flujo en la dirección radial.
R_1	Radio exterior del rotor. Representa la distancia radial máxima en el sistema.
R_0	Radio interior del rotor. Representa la distancia radial mínima en el sistema.
ω	Velocidad angular del rotor
g	Aceleración de la gravedad
ξ	Coeficiente de resistencia al flujo. Representa la resistencia al flujo en el espacio entre el rotor y el estator.
A_c	Área transversal del espacio. Representa el área a través de la cual fluye el fluido en el espacio entre el rotor y el estator.

El objetivo de mostrar estas ecuaciones es dar a conocer que existe una forma de describir matemáticamente el fenómeno de cavitación en un rotor con agujeros. Además, las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones gobernantes en los software de fluidodinámica computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para realizar aproximaciones numéricas del comportamiento de un flujo, que es lo que se explica en la sección de Simulación.

8.1.2. Diseño Mecánico

■ Diseño del eje

Velocidad de giro, $\omega = 3450 \text{ rpm}$

Potencia del motor = 3 hp

Denominación de los rodamientos: 62204

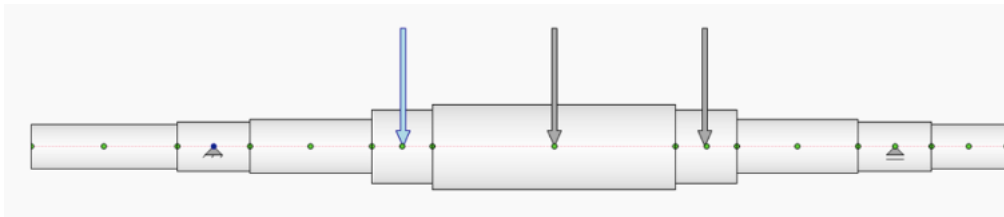


Figura 13: Esquema del eje

Muestra el eje con dos apoyos (A y B) y una carga W aplicada en el centro entre dos secciones del eje.

Equilibrio de fuerzas:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{A_y} + R_{B_y} - W - w_1 - w_2 = 0$$

Equilibrio de momentos:

$$\sum M_A = 0$$

$$-w_1 \cdot y + R_{B_y}(y + z) = 0$$

Despejando R_{B_y}

$$R_{B_y} = \frac{(W \cdot y) + (w_1 \cdot x) + (w_2 \cdot z)}{a}$$

$$W = 38.05 \text{ N}$$

$$w_1 = 2.23 \text{ N}$$

$$w_2 = 2.23 \text{ N}$$

$$x = 53 \text{ mm}$$

$$y = 115 \text{ mm}$$

$$z = 178 \text{ mm}$$

$$a = 233 \text{ mm}$$

Entonces:

$$R_{B_y} = 21 \text{ N}$$

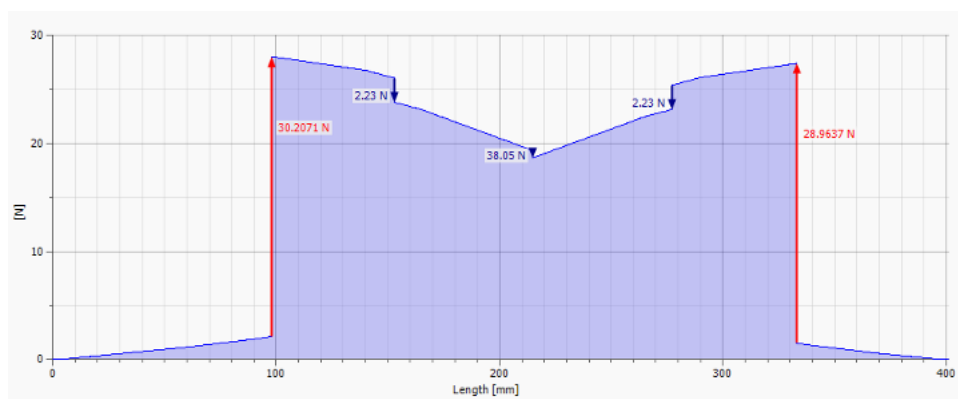


Figura 14: Diagrama de fuerza cortante (V)

Este diagrama representa la variación de la fuerza cortante a lo largo del eje debido a la carga aplicada W. Muestra un aumento positivo hasta W Y una disminución de W en otra sección del eje.

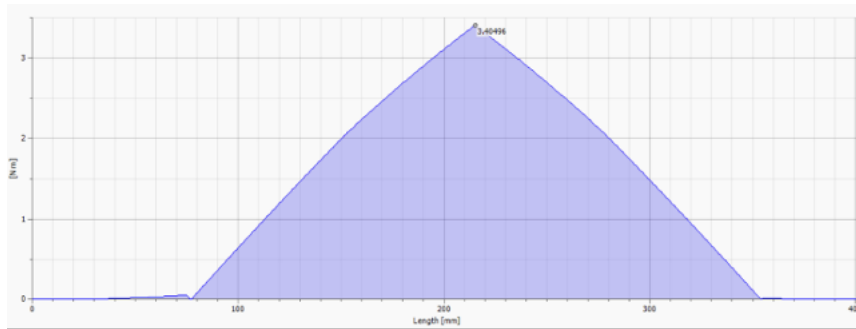


Figura 15: Diagrama de momento flector (M)

Este diagrama representa cómo el momento flector varía a lo largo del eje. El momento máximo se presenta en el centro del eje y disminuye hacia los extremos. El momento crítico se encuentra en el cambio de sección en donde se acopla el rotor, específicamente en el par 3.4 Nm a una distancia de 165 mm desde el 0 mm del eje. Además, se tiene una ranura para la chaveta del rotor por lo que se asume como punto crítico

$$K_t = 2.5$$

Torque

El torque **T** se puede calcular utilizando la fórmula que relaciona potencia **P** y velocidad angular ω .

$$T = \frac{P}{\omega}$$

La potencia P en caballos de fuerza (hp) se convierte a watts (W):

Factor de conversión: 1 hp

$$P = 3 \text{ hp}$$

$$P = 3 \cdot 745.7 = 2237.1 \text{ W}$$

La velocidad angular ω en rpm se convierte a radianes por segundo:

$$\omega = (2\pi \text{ rad/rev}) \cdot (1 \text{ rev/60 s}) \cdot \text{rpm}$$

$$\omega = (2\pi/60) \cdot (3400)$$

$$\omega = 356.18 \text{ rad/s}$$

Ahora, se calcula el torque:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{2237.1}{356.18}$$

$$T = 6.28 \text{ Nm}$$

Consideraciones para el cálculo de esfuerzos sobre el eje

El rotor está balanceado, las fuerzas centrífugas son uniformes y no causan variaciones en los esfuerzos del eje. Aquí, el esfuerzo es estático y medio. El motor no induce vibraciones cíclicas al eje. Gracias al acoplamiento fijo no se genera alguna excentricidad o desalineación, que podría causar esfuerzos alternantes en el eje.

Esfuerzos en el eje

Number	Material	Condition	Strength (Tensile)					Strain Strength, Exponent m	Fracture Strain ϵ_f
			Yield S_y MPa (kpsi)	Ultimate S_u MPa (kpsi)	Fracture, σ_f MPa (kpsi)	Coefficient σ_a MPa (kpsi)			
1018	Steel	Annealed	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) [†]	620 (90.0)		0.25	1.05
1144	Steel	Annealed	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) [†]	992 (144)		0.14	0.49
1212	Steel	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) [†]	758 (110)		0.24	0.85
1045	Steel	Q&T 600°F	1520 (220)	1580 (230)	2380 (345)	1880 (273) [†]		0.041	0.81
4142	Steel	Q&T 600°F	1720 (250)	1930 (280)	2340 (340)	1760 (255) [†]		0.048	0.43
303	Stainless steel	Annealed	241 (35.0)	601 (87.3)	1520 (221) [†]	1410 (205)		0.51	1.16
304	Stainless steel	Annealed	276 (40.0)	568 (82.4)	1600 (233) [†]	1270 (185)		0.45	1.67

Figura 16: Datos estandarizados para la resistencia del material (Budynas y Nisbett, 2015, tabla A22)

Los esfuerzos a los que está sometido un eje pueden ser divididos en esfuerzo flector (debido al momento flector) y esfuerzo torsional (debido al torque).

1. Esfuerzo alterno debido a la flexión:

$$\sigma_{a,f} = \frac{32 \cdot M_a}{\pi \cdot d^3} = 0$$

2. Esfuerzo medio debido a la flexión:

$$\sigma_{m,f} = \frac{32 \cdot M_m}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot 3.4 \text{ Nm}}{\pi \cdot (35 \times 10^{-3})^3} = 0.80 \text{ MPa}$$

3. Esfuerzo alterno debido a la torsión:

$$\tau_a = \frac{16 \cdot T_a}{\pi \cdot d^3} = 0$$

4. Esfuerzo medio debido a torsión:

$$\tau_m = \frac{16 \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 6.28 \text{ Nm}}{\pi \cdot (35 \times 10^{-3})^3} = 0.74 \text{ MPa}$$

Combinación de esfuerzos

Para combinar los esfuerzos de flexión y torsión se utiliza la teoría de fallas de von Mises:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_m)^2 + 3 \cdot (\tau_m)^2}$$

$$\sigma_{vm} = 1.51 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_m} = \frac{270 \text{ MPa}}{1.51 \text{ MPa}} = 178$$

Eje a fatiga

Factor de diseño:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Donde:

k_a : Factor de superficie

k_b : Factor de tamaño

k_c : Factor de carga

k_d : Factor de temperatura

k_e : Factor de confiabilidad

$k_f = 1$ sin tratamiento de corrosión

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad (S_{ut} < 1400 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 284 \text{ MPa} \text{ Límite de fatiga modificado}$$

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 17: Factor de confiabilidad (Budynas y Nisbett, 2015)

$$k_e = 0.89 \text{ confiabilidad del } 99\%$$

$$k_d = 1$$

Temperatura de operación menor a 450°C

$$k_c = 1 \text{ carga solo a flexión } k_b = 0.84$$

$$k_a = 0.84$$

Acabado superficial	Factor a		Exponente
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	b
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265

Figura 18: Datos de acabado superficial (Budynas y Nisbett, 2015)

$$S_{ut} = 568 \text{ MPa}$$

Acabo superficial: maquinado

Entonces:

$$S_e = 0.84 \cdot 0.84 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 284 \text{ MPa}$$

$$S_e = 180 \text{ MPa}$$

Fórmula para los radios de acuerdo:

$$k_f = q \cdot (k_t - 1) + 1$$

$$k_f = 2.2$$

Figura 6-20

Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio forjado UNS A92024-T, sometidos a flexión inversa de cargas axiales inversas. Para radios de muesca más grandes, use los valores de q correspondientes a la ordenada $r = 0.16$ pulg (4 mm). [De George Sines y J.L. Waisman (eds.), *Metal Fatigue*, McGraw-Hill, Nueva York, Copyright© 1969 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.]

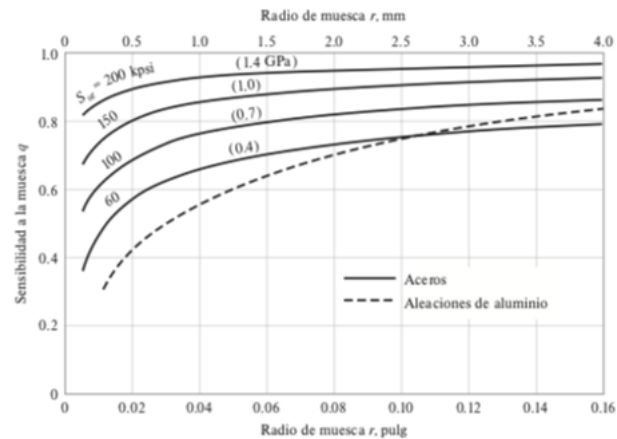


Figura 19: Sensibilidad a la muesca (Budynas y Nisbett, 2015)

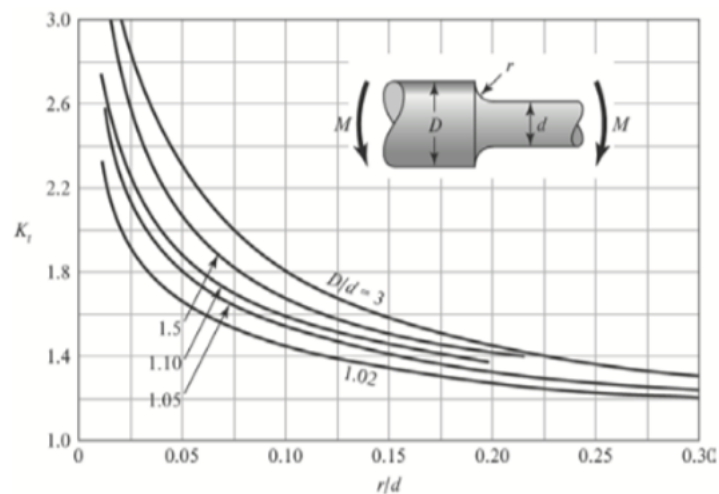


Figura A-15-9

Eje redondo con filete en el hombro en flexión. $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.

Figura 20: Factor de concentración del esfuerzo (Budynas y Nisbett, 2015)

Del gráfico, $k_t = 2.5$

Esfuerzo

$$\sigma_{rev} = \frac{32 \cdot M_m}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma_{rev} = \frac{32 \cdot 2.4 \text{ Nm}}{\pi \cdot (35 \times 10^{-3})^3}$$

$$\sigma_{rev} = 0.57 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$\eta = \frac{S_e}{k_f \cdot \sigma_{rev}} = \frac{181 \text{ MPa}}{2.2 \cdot 57 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 144$$

8.2. Balance de energía

Cálculo de la eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia, se utilizará la siguiente expresión (Nikolsky et al., 2017):

$$\eta = \frac{E_{generada}}{E_{consumida}}$$

Cantidad de energía térmica para calentar el líquido:

$$Q_B = m_B c_B (t_{final} - t_{inicial}) = E_{consumida}$$

Donde:

- Q_B es la energía térmica [kJ][kWh]
- m_B masa del agua [kg]
- c_B calor específico del agua $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$
- t_{final} temperatura final [$^\circ\text{C}$]
- $t_{inicial}$ temperatura inicial [$^\circ\text{C}$]

Datos:

$$t_{final} = 35 ^\circ\text{C}$$

$$t_{final} = 20 ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{agua} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{agua} = 7.5 \text{ gal} = 0.0284 \text{ m}^3$$

$$m = 28.4 \text{ kg}$$

$$c_{B@20^{\circ}C} = 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$T = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$$

Reemplazando:

$$Q_B = 28 \text{ kg} \cdot 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot (35 - 20) ^{\circ}\text{C}$$

$$Q_B = 1755.6 \text{ kJ}$$

Para encontrar la potencia utilizada en el proceso se realiza el siguiente proceso:

Se utiliza un motor trifásico de 3 hp

$$P_{\text{activa}} = 3V I \eta \cdot \cos \phi$$

$$\text{Energía consumida} = 3V I \eta T \cdot \cos \phi$$

Donde:

- V: Voltaje (220V)
- I: Corriente en amperios (según especificación del motor)
- $\cos \phi$: Factor de potencia (usualmente entre 0.8 y 0.95 para motores trifásicos)
- η : Eficiencia (usualmente entre 85 y 95 %)

Datos:

$$\text{Voltaje} = 110 \text{ V}$$

$$\text{FP} = 0.9$$

$$\text{Corriente} = 5.5 \text{ A}$$

$$t = 1800 \text{ s}$$

$$\text{Energía consumida} = V \cdot I \cdot \cos \phi \cdot t$$

$$E_2 = 110 \text{ V} \cdot 5.5 \text{ A} \cdot 0.9 \cdot 1800 \text{ s}$$

$$E_2 = 980 \text{ kJ}$$

Se obtiene la eficiencia:

$$\eta_c = \frac{E_{generada}}{E_{consumida}}$$

$$\eta_c = \frac{1755.6 \text{ kJ}}{3369 \text{ kJ}}$$

$$\eta_c = 52 \%$$

9. Simulación

Para el análisis numérico de la cavitación en el diseño del rotor, se ha utilizado un enfoque de simulación dividido en dos partes principales. La primera parte de la simulación es un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) con flujo monofásico. Este paso inicial tiene como objetivo principal observar el comportamiento del fluido en el interior del rotor, sin considerar los efectos de la cavitación. En esta etapa, se simula el comportamiento del fluido en condiciones ideales para obtener una visión general de las características del flujo, tales como la distribución de velocidad y presión en el interior del rotor. Esta simulación proporciona datos fundamentales para la comprensión del flujo básico que posteriormente será afectado por el proceso de cavitación.

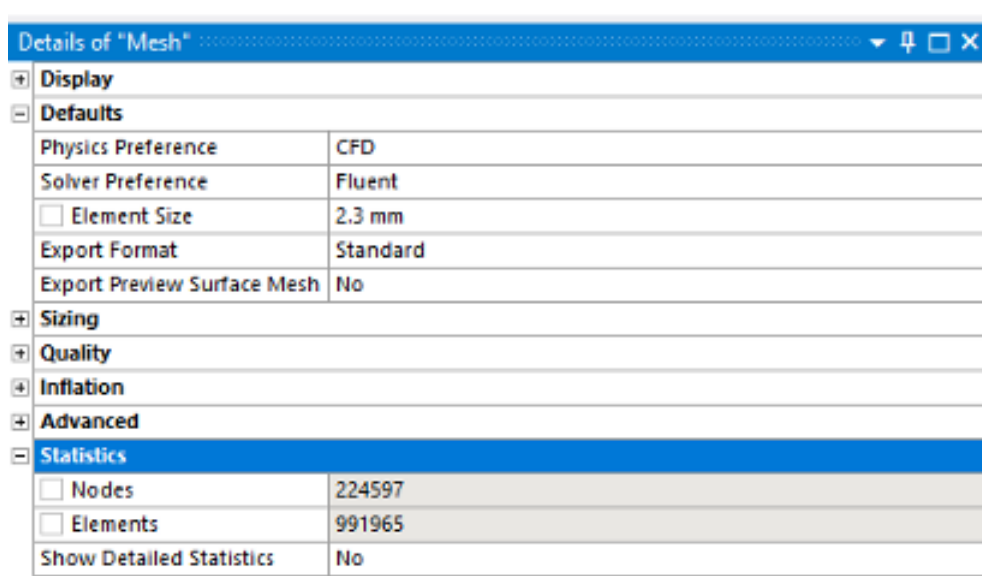
En la segunda parte de la simulación, se incorpora el modelo multifásico de cavitación Schnerr y Sauer para estudiar los efectos de la cavitación en el rotor. El modelo Schnerr y Sauer es ampliamente utilizado debido a su robustez y estabilidad numérica, y es capaz de predecir la formación de burbujas de vapor y su interacción con el flujo de agua. Este modelo permite evaluar el comportamiento del fluido cuando se produce cavitación, analizando la evolución del volumen de vapor y las variaciones en la presión y temperatura dentro del rotor. El uso de este modelo es esencial para comprender cómo la cavitación afecta al rendimiento del rotor y su diseño, permitiendo optimizar las condiciones operativas y evitar daños potenciales por cavitación.

Es importante destacar que para ambas simulaciones (monofásica y multifásica), se han utilizado las mismas estadísticas de la malla y condiciones iniciales. Esto asegura la consistencia y comparabilidad entre los resultados obtenidos en ambos enfoques, permitiendo una evaluación precisa de cómo la cavitación influye en el comportamiento del flujo. El objetivo de dividir el enfoque de simulación en estas dos partes es proporcionar una visión detallada y precisa de las condiciones del fluido tanto antes como después de la cavitación. En primer lugar, al estudiar el flujo monofásico, se pueden identificar las condiciones iniciales y obtener un panorama general del comportamiento del fluido. Posteriormente, al aplicar el modelo Schnerr y Sauer, se incorporan los efectos de la cavitación, proporcionando resultados más realistas y completos sobre el impacto de este fenómeno

en el diseño del rotor. Esta metodología asegura una evaluación precisa y detallada de los parámetros clave que afectan al rendimiento de la máquina.

9.1. Estadísticas de mallado

Para la simulación, se utilizó una malla estructurada compuesta por elementos triangulares, con un tamaño de elemento de 2.3 mm, que es el valor más pequeño permitido por la licencia educativa de ANSYS. Esta resolución de malla fue seleccionada cuidadosamente para garantizar la precisión de los resultados sin comprometer significativamente el tiempo de cálculo. La malla contiene un total de 224,597 nodos y 991,965 elementos, todos ellos de forma triangular, lo que permite una discretización adecuada y flexible, especialmente en las regiones de alta complejidad geométrica, como el rotor. La densidad de la malla es suficiente para simular con precisión los gradientes de velocidad, presión y temperatura que se producen en el flujo, factores clave para analizar la dinámica del fluido en los diferentes modelos de cavitación.



Details of "Mesh"	
+	Display
-	Defaults
	Physics Preference: CFD
	Solver Preference: Fluent
☐	Element Size: 2.3 mm
	Export Format: Standard
	Export Preview Surface Mesh: No
+	Sizing
+	Quality
+	Inflation
+	Advanced
-	Statistics
☐	Nodes: 224597
☐	Elements: 991965
	Show Detailed Statistics: No

Figura 21: Estadísticas de malla

Es importante destacar que la resolución de la malla es un factor crítico en las simulaciones de cavitación, ya que influye directamente en la precisión y estabilidad numérica de los resultados. Una malla demasiado gruesa podría no captar las variaciones de las propiedades del fluido con la resolución requerida, mientras que una malla más fina, aunque

más precisa, aumentaría considerablemente los tiempos de simulación. Con el tamaño de elemento de 2.3 mm y las estadísticas de malla mencionadas, se logró un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional, asegurando que los resultados obtenidos fueran tanto confiables como adecuados para los objetivos de este estudio.

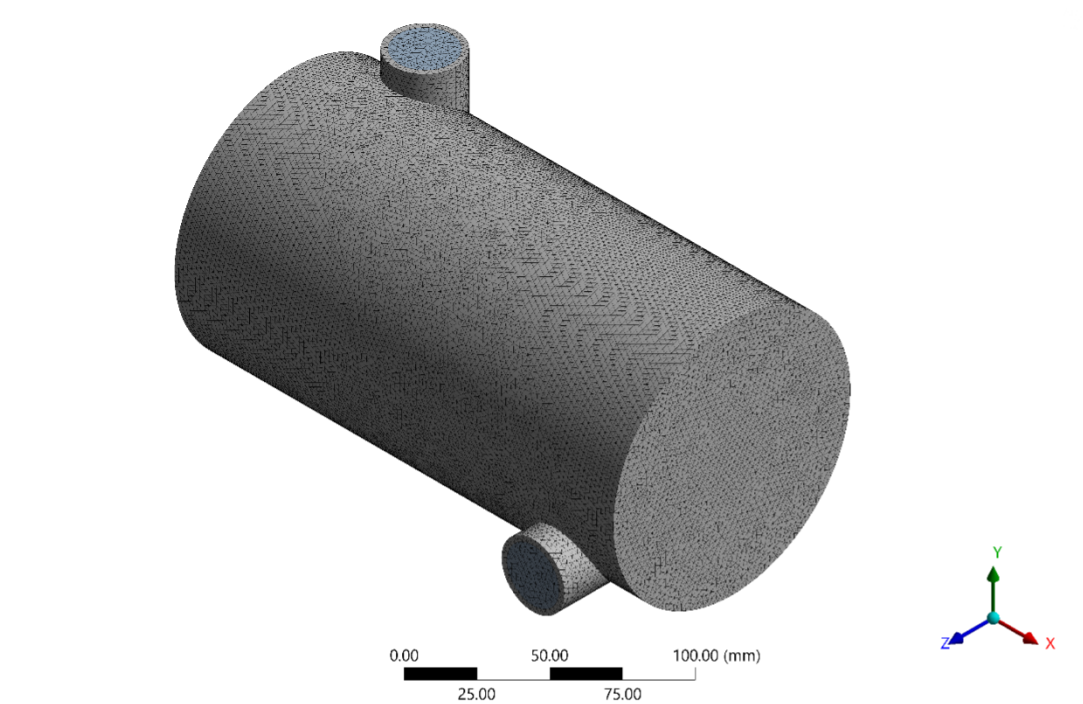


Figura 22: Estadísticas de malla

9.2. Condiciones iniciales

En esta simulación, se utilizaron condiciones iniciales que aseguran una buena representación del comportamiento del flujo en el sistema, tomando en cuenta que el análisis se realizó bajo un enfoque de estado estacionario. Esto significa que se asume que las variables de flujo, como la velocidad, la presión y la temperatura, no cambian con el tiempo, lo que simplifica el modelo sin perder precisión en la evaluación de las condiciones operativas del cavitador. Las condiciones iniciales definidas incluyen un flujo de entrada con una presión de 0 Pa, lo que establece un punto de referencia para el análisis del comportamiento del fluido a lo largo del sistema. Esta condición inicial facilita la simetría del modelo, asegurando que las soluciones sean representativas de un estado equilibrado. Además, la simulación fue ejecutada durante 500 iteraciones con el objetivo

de garantizar la convergencia adecuada de los valores simulados. El número de iteraciones es crucial para lograr resultados precisos y estables en simulaciones de este tipo, ya que un número insuficiente de iteraciones podría resultar en soluciones no convergentes o imprecisas. El proceso de convergencia asegura que los valores de los parámetros clave, como la velocidad, la presión y la temperatura, se estabilicen y no presenten fluctuaciones significativas entre las iteraciones. Este enfoque contribuye a la fiabilidad de los resultados obtenidos y permite una comparación sólida con las simulaciones posteriores bajo el modelo multiphásico de cavitación.

A. Simulación CFD monofásica

En esta sección, se presenta la simulación CFD monofásica realizada para analizar el comportamiento del fluido en el sistema sin considerar los efectos de la cavitación. El objetivo principal de esta simulación fue obtener una comprensión detallada de los perfiles de velocidad y presión dentro del cavitador, permitiendo observar cómo fluye el líquido a través de la geometría del rotor en condiciones normales de operación. Al realizar esta simulación, se establecieron las bases para entender el comportamiento del fluido antes de introducir los efectos de la cavitación, proporcionando una referencia importante para la comparación posterior con los resultados obtenidos bajo el modelo multiphásico de cavitación Schnerr y Sauer. Para esta simulación, se eligió una velocidad de rotor de 2000 RPM, ya que los resultados obtenidos a 3450 RPM, que es el valor real, no mostraron la consistencia esperada. Esta elección permitió obtener resultados más estables y representativos. Además, se utilizó una configuración de presión en la entrada y salida de 0 Pa. Esta configuración se adoptó para simplificar el modelo y simular un entorno ideal, sin la influencia de gradientes de presión externos que pudieran complicar la interpretación de los resultados. Al fijar la presión en 0 Pa, se facilita el análisis de cómo se comporta el fluido en el sistema sin considerar los efectos de cavitación, proporcionando una base sólida para evaluar la dinámica del flujo en las siguientes etapas de la simulación:

1. Análisis de velocidad del flujo

En esta sección se presenta el análisis del campo de velocidades dentro del cavitador, uno de los aspectos más importantes para comprender el comportamiento del fluido en el sistema. Los resultados obtenidos muestran que la velocidad del fluido es considerablemente mayor en la sección del rotor, especialmente en la zona media del cavitador, donde se encuentran ubicados los orificios. Esta área, al estar directamente influenciada por la rotación del rotor, experimenta un aumento significativo en la velocidad del fluido debido a la acción centrífuga generada por el movimiento del rotor. Es en este lugar donde se concentra la mayor parte de la energía cinética del fluido, lo que puede tener un impacto directo en los efectos de cavitación que se analizarán en etapas posteriores.

El valor máximo de las velocidades alcanzadas en la simulación es de 9,60 m/s con una rotación de 2000 RPM, lo cual se presenta en la región central del rotor, coincidiendo con la zona de los orificios. Esta alta velocidad es indicativa de la aceleración del fluido debido al diseño geométrico del cavitador y la rotación del rotor. El aumento de velocidad en esta área juega un papel crucial en la formación de posibles burbujas de vapor en condiciones de cavitación, ya que una velocidad elevada del fluido genera un descenso en la presión local, lo que puede llevar a la nucleación del vapor. Este comportamiento se analiza de manera más profunda en el modelo multifásico de cavitación Schnerr y Sauer, donde se consideran los efectos de la cavitación y cómo influyen en el rendimiento global del sistema.

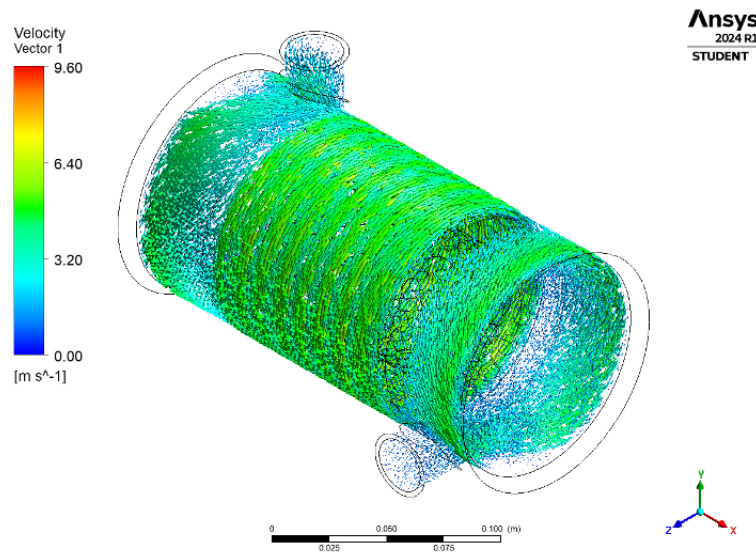


Figura 23: Vectores de velocidad dentro del cavitador

2. Análisis de la distribución de presión

En esta sección, se presenta el análisis de la distribución de presión dentro del cavitador, un parámetro clave para entender cómo se comporta el fluido en el sistema. Los resultados obtenidos revelan una distribución de presión altamente variable a lo largo de la geometría del rotor. En la región inferior de los orificios del rotor, se alcanza el valor mínimo de presión, que es de 3120 Pa. Esta disminución de presión se debe al incremento de la velocidad del fluido en esa zona, generado por la acción centrífuga del rotor. La reducción de la presión en estos puntos es crítica, ya que puede favorecer la formación de burbujas de vapor en condiciones de cavitación. Estos valores de presión tan bajos en la zona de los orificios son un indicio de la dinámica del fluido antes de que se considere el fenómeno de la cavitación.

Por otro lado, en la parte exterior del rotor en rotación, los valores de presión alcanzan su máximo, con un valor de hasta 932000 Pa. Esta alta presión en la periferia del rotor se debe a la compresión del fluido causada por la acción centrífuga y la aceleración del fluido hacia la salida. Para facilitar la visualización de estos resultados, se cortó la geometría utilizando un plano, lo que permitió observar mejor la distribución de presión a lo largo de los orificios.

Esta representación facilita la identificación de los puntos críticos donde las variaciones de presión pueden inducir la cavitación y cómo estas fluctuaciones afectan al rendimiento global del sistema. Este análisis de la distribución de presión proporciona información valiosa que se complementará con los resultados obtenidos bajo el modelo multifásico en las siguientes secciones.

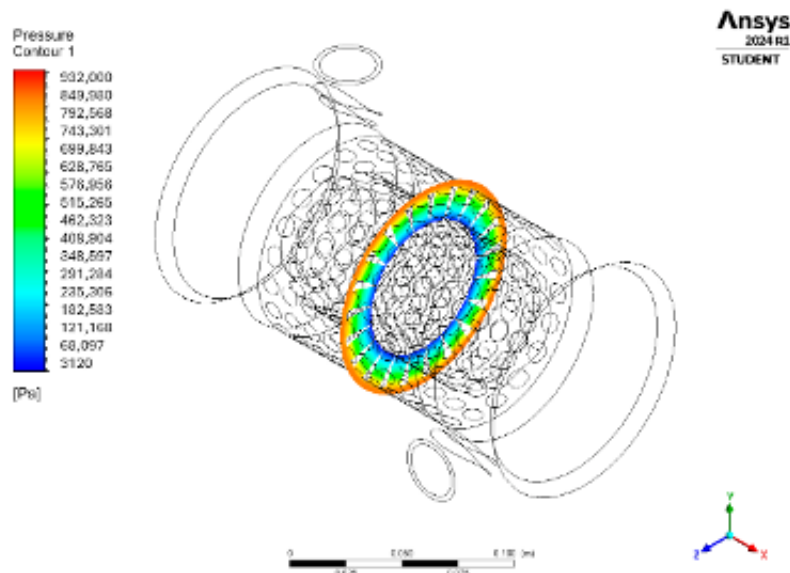


Figura 24: Plano de contorno de presión, vista isométrica

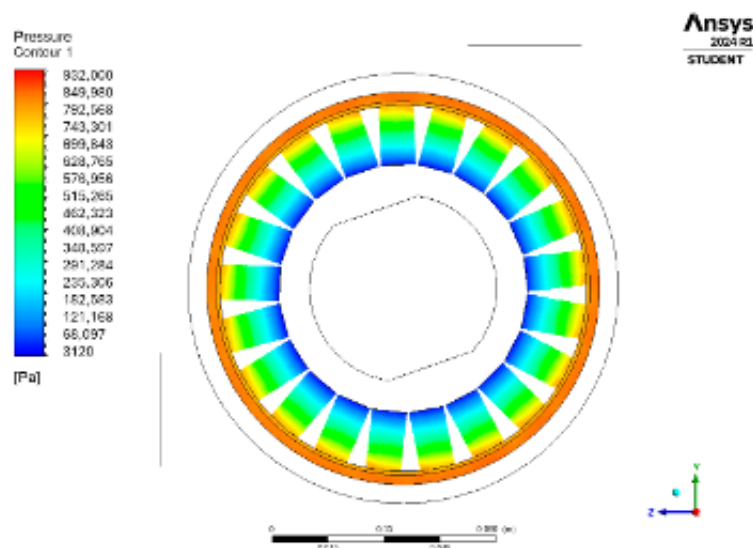


Figura 25: Plano de contorno de presión, vista frontal

B. Simulación modelo multifásico de cavitación Schnerr y Sauer El modelo

de cavitación de Schnerr y Sauer es ampliamente utilizado en simulaciones de cavitación debido a su capacidad para predecir el comportamiento de la fase de vapor dentro de un flujo líquido. Este modelo se basa en la relación entre las fases líquidas y de vapor, considerando el cambio de fase y la formación de burbujas de vapor cuando la presión local del fluido cae por debajo de la presión de saturación del líquido. La principal ventaja de este modelo es su habilidad para proporcionar una descripción detallada de la cavitación sin necesidad de modelar directamente la formación y el colapso de las burbujas de vapor, lo que lo convierte en una opción ideal para simulaciones en sistemas complejos como el que se estudia en este trabajo.

La ecuación fundamental del modelo de Schnerr y Sauer está basada en la fracción volumétrica de vapor α que depende de la presión local P_y la presión de vapor P_v . Esta fracción volumétrica de vapor se calcula utilizando las siguientes dos ecuaciones de Reynolds para las fases líquida y de vapor:

$$Re_e = \frac{\rho v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \left(\frac{2}{3} R_B \right) \sqrt{\frac{(P_v - P)}{\rho_l}}$$

$$Re_c = \frac{\rho v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \left(\frac{2}{3} R_B \right) \sqrt{\frac{(P - P_v)}{\rho_l}}$$

La primera ecuación, Re_e , se refiere a la fase de vapor, mientras que Re_c describe la fase líquida. La variable α representa la fracción volumétrica de vapor, que varía a lo largo del flujo y depende de la diferencia entre la presión local y la presión de saturación. Los términos ρ y ρ_l corresponden a la densidad del fluido y la densidad del líquido, respectivamente, mientras que R_B es el radio de las burbujas de vapor. Este modelo se eligió para nuestra simulación debido a su capacidad para modelar con precisión el comportamiento de la cavitación en sistemas de flujo no lineales, como los que se encuentran en las cavitaciones inducidas por un rotor en una geometría compleja. La elección del modelo de Schnerr y Sauer se debió a su fiabilidad y simplicidad en comparación con otros modelos más complejos, lo que nos permitió obtener resultados representativos sin sacrificar la precisión.

La ecuación mostrada, que involucra la fracción de vapor, se utiliza para calcular la cavitación en las regiones donde la presión local es más baja que la presión de vapor.

Este análisis de cavitación es esencial para identificar las áreas del flujo donde se puede esperar que se forme vapor y, por lo tanto, posibles daños por cavitación o ineficiencias en el rendimiento del sistema.

1. Análisis de Temperatura usando el modelo multifásico de cavitación Schnerr y Sauer

En esta simulación, se analizó la distribución de la temperatura estática en el interior del rotor, específicamente en la región de los orificios donde ocurre la mayor aceleración del fluido. Los resultados muestran un aumento significativo de temperatura en uno de los orificios, que alcanza valores máximos cercanos a los 1261°C, según se observa en la imagen de contornos de temperatura. Aunque la visualización muestra un calentamiento predominante en un solo orificio, este comportamiento en realidad ocurre en todos los orificios de la geometría debido a la naturaleza del fenómeno estudiado y a las condiciones de simulación establecidas.

Este comportamiento puede explicarse por el uso de una simulación en estado estacionario (steady state), donde las temperaturas tienden a estabilizarse y alcanzar valores similares en toda la geometría a lo largo del tiempo. En una simulación de cavitación, la rápida caída de presión en los orificios del rotor, asociada al aumento de velocidad del fluido, provoca la evaporación localizada del líquido y, por lo tanto, la generación de burbujas de vapor. A medida que estas burbujas colapsan, liberan energía que se disipa en forma de calor, lo que genera un aumento localizado de temperatura en las zonas de cavitación. Sin embargo, debido al modelo de estado estacionario utilizado en esta simulación, la transferencia de calor dentro del sistema tiende a homogenizarse, haciendo que las temperaturas en los diferentes orificios se comporten de manera similar. Este resultado es significativo, ya que evidencia que la cavitación no solo provoca una caída de presión y formación de vapor, sino también un aumento de temperatura que puede tener un impacto considerable en el rendimiento térmico y mecánico del sistema. La identificación de estas zonas críticas es

fundamental para evaluar posibles efectos de desgaste térmico y optimizar el diseño del rotor, con el objetivo de minimizar el riesgo de daños debido a la acumulación de calor en condiciones de operación reales. En una simulación transitoria, este fenómeno podría analizarse con mayor precisión para visualizar la evolución temporal del aumento de temperatura en cada orificio.

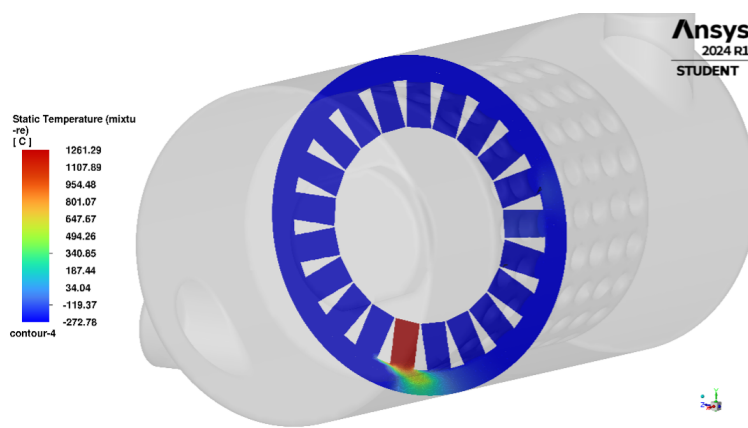


Figura 26: Plano de temperatura estática, vista isométrica

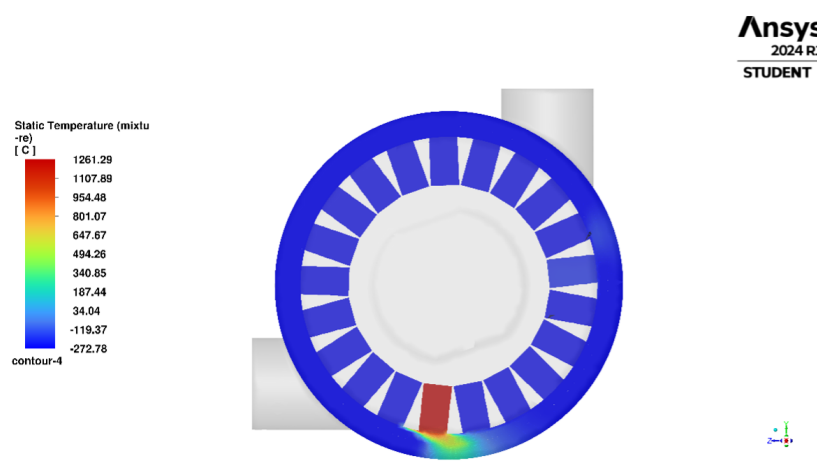


Figura 27: Plano de temperatura estática, vista frontal

2. Análisis de la fracción volumétrica de vapor

El análisis de la fracción volumétrica de vapor es uno de los resultados más importantes obtenidos en esta simulación, ya que confirma la generación de cavitación dentro del cavitador diseñado. Los resultados muestran claramente que la fracción volumétrica de vapor alcanza un valor máximo de 0.97 en

la parte inferior de los orificios del rotor. Este fenómeno ocurre debido a la caída de presión localizada generada por el aumento de velocidad del fluido en estas regiones críticas, un comportamiento típico en sistemas donde el flujo experimenta aceleraciones y cambios geométricos importantes. La alta fracción de vapor en el fondo de los orificios valida el diseño del rotor, demostrando que se logra inducir la cavitación de manera controlada.

Un aspecto relevante que se puede observar en los contornos de fracción volumétrica de vapor es la dirección de rotación del rotor, la cual queda evidenciada en la distribución de las zonas de cavitación. La asimetría en las regiones de vapor indica cómo el fluido se ve afectado por la rotación, generando cavitación de manera predominante en las zonas donde la presión alcanza su mínimo. Esto concuerda con la teoría del fenómeno de cavitación, donde las caídas de presión generan nucleación y crecimiento de burbujas de vapor, especialmente en las zonas de mayor aceleración, como sucede en los orificios del rotor.

Este resultado es crucial porque confirma que el diseño del cavitador cumple con su propósito: inducir cavitación en zonas específicas del flujo donde ocurre la mayor liberación de energía debido al colapso de las burbujas. La fracción de vapor tan cercana a 1 (0.97) indica que, efectivamente, el líquido ha cambiado de fase en estas regiones, validando la aplicación del modelo Schnerr y Sauer para capturar con precisión este comportamiento multifásico. Además, la visualización de las zonas de cavitación permite identificar los puntos críticos donde el fenómeno ocurre de manera más intensa, información que resulta fundamental para optimizar el diseño geométrico y mejorar el rendimiento del sistema.

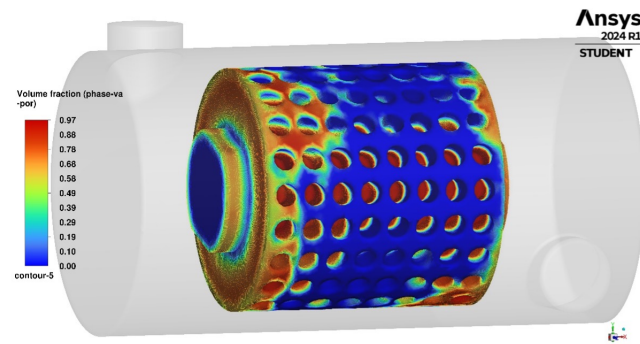


Figura 28: Imagen 3D de la fracción volumétrica de vapor en el rotor

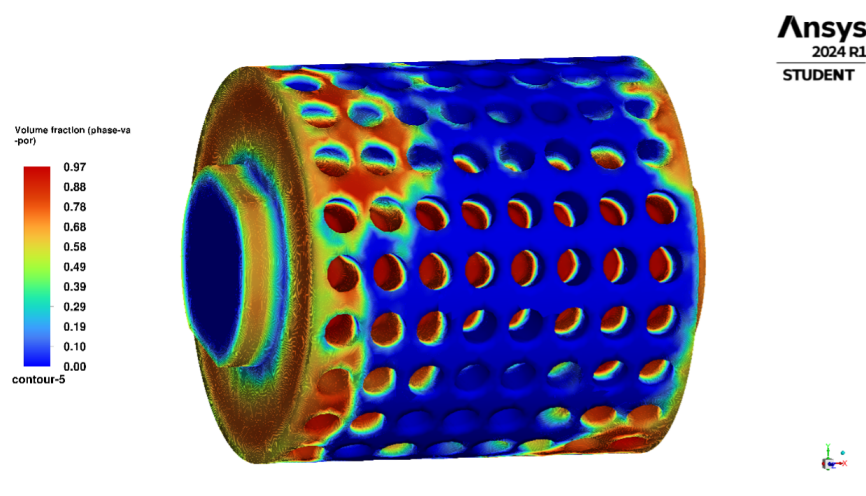


Figura 29: Imagen 3D de la fracción volumétrica de vapor en el rotor

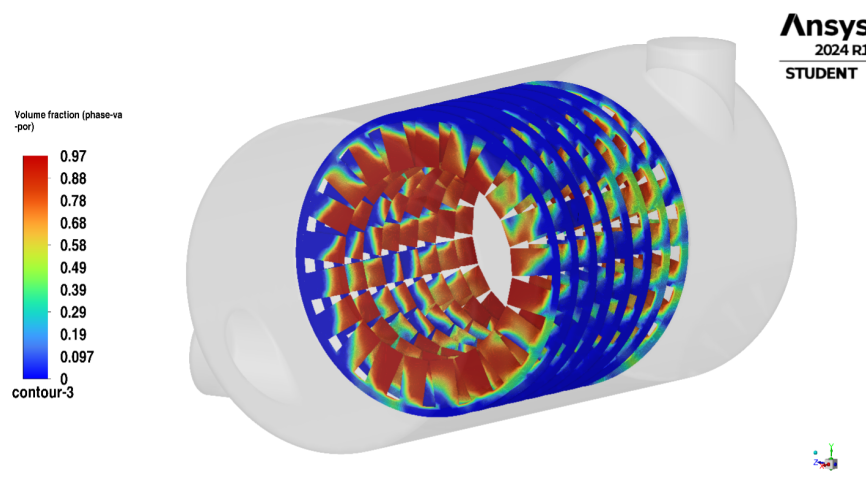


Figura 30: Planos de fracción volumétrica de vapor dentro del rotor, vista isométrica

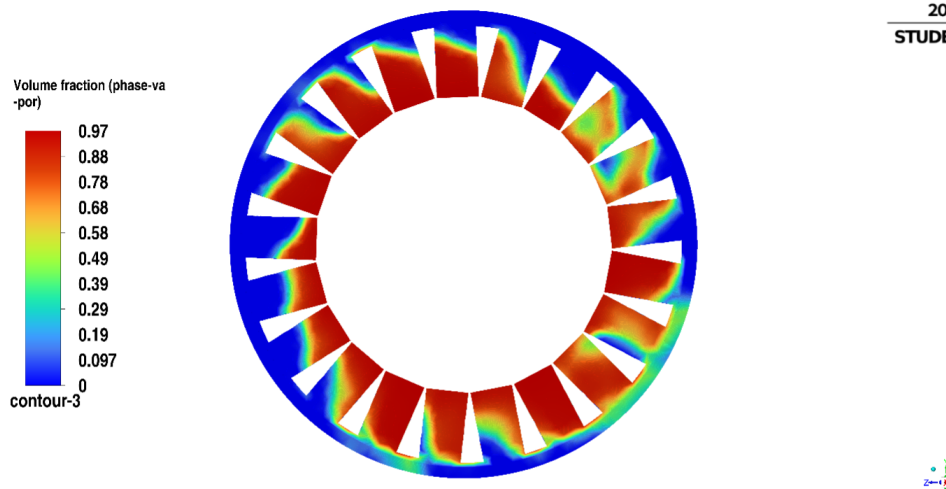


Figura 31: Planos de fracción volumétrica de vapor dentro del rotor, vista frontal

La realización de las simulaciones en este estudio ha permitido obtener resultados precisos y detallados sobre el comportamiento del flujo y la cavitación en el cavitador diseñado. A través del análisis en dos etapas, primero con la simulación CFD monopásica y luego con el modelo multifásico de cavitación Schnerr y Sauer, se ha logrado entender cómo la velocidad, la presión y la fracción volumétrica de vapor interactúan en las zonas críticas del sistema. La primera fase, sin efectos de cavitación, proporcionó una referencia clara del comportamiento del flujo bajo condiciones ideales, mostrando la distribución de velocidad y presión en toda la geometría del cavitador.

La incorporación del modelo de cavitación Schnerr y Sauer permitió visualizar de manera detallada las zonas donde ocurre la cavitación, específicamente en el fondo de los orificios del rotor, donde la fracción volumétrica de vapor alcanzó valores máximos de 0.97. Estos resultados confirman la eficacia del diseño del rotor para inducir cavitación de manera controlada, logrando la formación de burbujas de vapor en las áreas esperadas. Además, el análisis de temperatura estática reveló un aumento localizado de temperatura en estas mismas regiones, lo cual, valida la relación directa entre la caída de presión, la formación de vapor y la disipación de energía térmica en el sistema.

Un hallazgo importante de esta simulación es la necesidad de reubicar la salida del agua en el centro del cilindro, justo en la región donde ocurre la cavitación y se concentran las partículas calentadas. Esta zona presenta las mayores concentraciones de energía debido a la interacción del fluido con la geometría del rotor, y aprovechar esta salida central permitiría extraer el agua caliente de manera más eficiente. Esta optimización no solo mejoraría el rendimiento térmico del sistema, sino que también garantizaría una mayor eficiencia en la transferencia de calor, reduciendo pérdidas y maximizando la utilidad del fenómeno de cavitación.

En conjunto, los resultados obtenidos no solo validan el modelo teórico utilizado, sino que también demuestran la utilidad de las herramientas computacionales para el análisis y optimización de sistemas complejos como este. La capacidad de identificar y cuantificar parámetros críticos, como la distribución de presión, velocidad y temperatura, permite realizar ajustes informados en el diseño, con el objetivo de maximizar el rendimiento y prevenir efectos adversos asociados a la cavitación, como el desgaste mecánico. Finalmente, esta sección proporciona una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el diseño del cavitador, incluyendo estudios más detallados bajo simulaciones transitorias para capturar la evolución temporal del fenómeno. La reubicación de la salida del fluido, propuesta como resultado directo de estas simulaciones, representa un paso clave hacia un diseño más eficiente y funcional, destacando la importancia de aplicar métodos numéricos avanzados para resolver problemas complejos en el campo de la ingeniería mecánica y la dinámica de fluidos.

10. Experimentos

Con el prototipo construido, se realizaron varios experimentos, y también se elaboró un plan de pruebas que consistió en variar el caudal y la velocidad del motor eléctrico, con el fin de tomar datos de la temperatura alcanzada bajo distintas condiciones de funcionamiento. Las temperaturas que se toman en cuenta son:

- **A la entrada de la bomba**, es decir, a la salida del tanque. Se posiciona una termocupla por debajo del nivel de agua del reservorio.
- **A la salida del cavitador**, es decir, a la entrada del tanque. Se posiciona otra termocupla que mide la temperatura directamente en el flujo de agua de entrada al reservorio.

Para poder medir las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del sistema, se utilizaron termocuplas tipo K, conectadas a un Arduino Uno, que a su vez fue conectado a una computadora para leer y almacenar los datos. Para almacenar los datos y realizar gráficas de temperatura y caudal versus tiempo, se elaboró un programa en Python. La manera en que esto sucede está debidamente detallada en la sección ***Data Taking del Manual de Usuario en el Anexo B***. Los datos obtenidos de temperaturas y tiempo son los que permitieron el cálculo de la eficiencia del dispositivo, junto con los datos de consumo de corriente eléctrica.

Consideraciones:

1. Las termocuplas no deben sumergirse por completo en el agua. Debe sumergirse solamente la punta de la probeta.
2. Los sensores son propensos a tener ruido; para esto, se aplicó un filtro de Hodrick-Prescott que suaviza los picos en las curvas (Blöchl y Flaig, 2014).

10.1. Plan de pruebas del prototipo

Para las pruebas, se hizo un cronograma con hitos de preparación del prototipo:

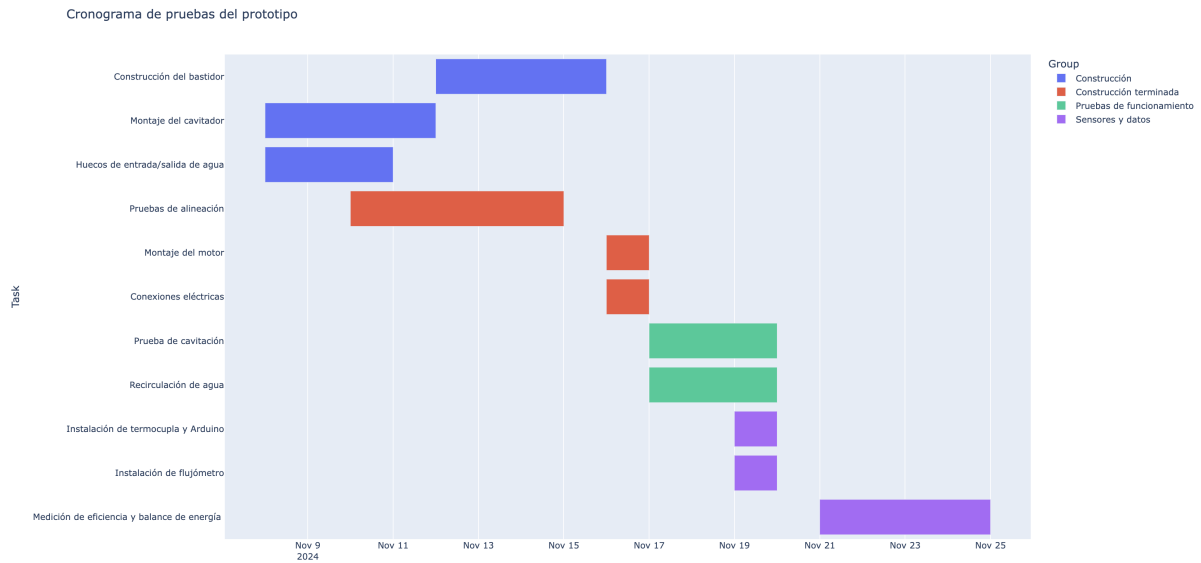


Figura 32: Plan de pruebas del prototipo

El plan de pruebas es una matriz de 3x3 en la que se toman datos de temperaturas en determinadas velocidades y caudales.

Tabla 13: Matriz de pruebas

Velocidad [RPM]	2500	3000	3600
Caudal [L/min]	Temperatura Máxima [°C]		
9	T5	T4	T3
12	T6	T7	T2
15	T8	T9	T1

En esta matriz, la referencia es el valor de temperatura que resulte de la operación en máximo caudal y máxima velocidad, en un tiempo total 30 minutos. A partir de ahí, se toman datos en las demás condiciones. Las temperaturas se presentan en la sección de resultados.

10.2. Seguridad a través del diseño

La seguridad en el diseño es uno de los aspectos fundamentales para la ingeniería, esto permite identificar y mitigar riesgos desde las primeras etapas de un proyecto. Esta sección tiene como objetivo aplicar un enfoque en la toma de decisiones en base a los

riegos presentes en el proyecto, haciendo énfasis en la seguridad como una parte integral del proceso del diseño. Buscando que las soluciones propuestas no solo cumplan con una función, además incorporen medidas de seguridad esenciales para cada caso. Para ello se han identificado ocho riesgos principales que podrían existir en el sistema y su clasificación:

Unique ID	Risk Description	Caused by & Consequences	Risk Owner(s) Name and Role	Category	Probability	Impact	Risk Rating
1	Ruptura del eje	Causa: Carga excesiva Consecuencia: Vibraciones significativas, ruptura de componentes, desacople de piezas	David Altamirano	Mecánico	Unlikely	Catastrophic	5
2	Falla del acople	Causas: Mal ajuste Consecuencias: Vibraciones significativas	Jennifer Cando	Mecánico	Rare	Major	8
3	Falla de las tapas	Causas: Mal ajuste Consecuencias: Fugas de agua, vibraciones	Carlos Puente	Mecánico	Possible	Insignificant	3
4	Desalineamiento de los rodamientos	Causa: Mal ajuste Consecuencia: El eje se puede salir del rodamiento, vibrar junto con el rotor y romper o causar daños en otras piezas	David Altamirano	Mecánico	Possible	Catastrophic	15
5	Incremento en el costo del proyecto	Causa: Prototipo no funcional Consecuencia: Urgente rediseño y modificación del prototipo	Carlos Puente	Financiero	Possible	Minor	6
6	Accidente en operación del equipo	Causa: Construcción deficiente/Falta de EPP Consecuencia: Cortes, quemaduras, electrocución	Todos los miembros del grupo	Mecanico	Possible	Minor	6
7	Vibración excesiva	Causa: Desbalance del rotor/ancaje del bastidor Consecuencia: Componentes se aflojan, puede causar fugas	Paulo León	Mecanico	Likely	Major	16
8	Sobrecarga del motor	Causa: Carga excesiva o mal cableado Consecuencia: Motor averiado o inutilizable	Todos los miembros del grupo	Mecánico/Financiero	Rare	Catastrophic	10

Figura 33: Riesgos del sistema

Probability		Unlikely	Rare	Possible	Likely	Certain
Impact	Insignificant	1	2	3	4	5
	Minor	2	4	6	8	10
	Medium	3	6	9	12	15
	Major	4	8	12	16	20
	Catastrophic	5	10	15	20	25

Figura 34: Escala de riesgos

1. Ruptura del eje

El riesgo de falla del eje, identificado como Ruptura del eje, es una preocupación importante en el proyecto. Este riesgo surge por una carga excesiva, lo que puede conllevar graves consecuencias, como vibraciones significativas, rotura de componentes y desconexión de piezas. David Altamirano es responsable de gestionar este riesgo, que se clasifica dentro de la categoría Mecánica. La probabilidad de que ocurra se considera Improbable debido a las consideraciones de diseño. Sin embargo, si llegase a suceder, el impacto sería catastrófico, ya que podría provocar la falla total del sistema. La calificación de riesgo es 5, lo que resalta un escenario de alto riesgo. Para mitigar este riesgo, es esencial apagar inmediatamente el motor y establecer un perímetro de seguridad, además de realizar inspecciones periódicas de la integridad del eje. Abordar proactivamente las evaluaciones de carga durante el diseño ayudará enormemente a minimizar este riesgo.

2. Falla del acople

El segundo riesgo se relaciona con la falla del acople causada por un ajuste incorrecto, lo que puede resultar en vibraciones perjudiciales. Esta falla generalmente surge del desalineamiento durante la instalación, lo que provoca importantes interrupciones mecánicas. La responsabilidad de este riesgo recae en Jennifer Cando. Se clasifica como un riesgo mecánico y se considera raro en términos de probabilidad. Si este riesgo se materializa, puede causar impactos Mayores en el rendimiento del sistema. La calificación de riesgo es 8, lo que indica una preocupación moderada a alta. El apagado inmediato del motor y el realineamiento adecuado del acople son controles necesarios para abordar este riesgo. La implementación de estrictas medidas de control de calidad durante la instalación reducirá significativamente su probabilidad.

3. Falla de las tapas

El riesgo de Falla de las tapas implica la falla de las cubiertas debido a ajustes defectuosos, lo que provoca fugas operativas y vibraciones. Este problema surge

por una instalación inadecuada o desgaste con el tiempo, lo que resulta en fugas de agua y alteraciones en la estabilidad operativa. Carlos Puente, supervisa este riesgo, que también se clasifica como Mecánico. La probabilidad de ocurrencia es Posible, lo que indica una probabilidad moderada. El impacto de este riesgo se considera Insignificante, aunque aún requiere monitoreo, resultando en una calificación de riesgo de 3. Las inspecciones regulares de los sellos hidráulicos y los elementos de fijación deben llevarse a cabo para mantener la integridad del sistema. Asegurar procedimientos de ensamblaje adecuados puede minimizar significativamente el riesgo.

4. Desalineamiento de los rodamientos

Este riesgo analiza la posibilidad de desalineación de los rodamientos, lo que puede llevar a graves interrupciones mecánicas. Generalmente causado por una instalación incorrecta, este riesgo puede resultar en que los rodamientos no retengan el eje, provocando daños potenciales a los componentes circundantes. David Altamirano, es responsable de gestionar este riesgo, clasificado bajo la categoría mecánica. La probabilidad de este riesgo es Posible, lo que resalta la necesidad de medidas preventivas. Su potencial impacto Catastrófico requiere atención, reflejado en una calificación de riesgo de 15. Las revisiones exhaustivas en la instalación de los rodamientos son cruciales para garantizar que estén debidamente anclados. El mantenimiento proactivo y las inspecciones frecuentes pueden detectar signos tempranos de desalineamiento.

5. Prototipo no funcional

El riesgo de tener un prototipo no funcional puede generar esfuerzos inesperados de rediseño y contratiempos en el proyecto. Este problema puede surgir de diseños defectuosos o pruebas inadecuadas, lo que resulta en modificaciones costosas y retrasos en el cronograma. El departamento financiero supervisa este riesgo, siendo responsable de la gestión del presupuesto. Se clasifica como un riesgo Financiero y se considera Posible en términos de probabilidad. Aunque su impacto se califica

como Menor, puede escalar si no se aborda de manera oportuna, llevando a una calificación de riesgo de 6. La colaboración continua entre los miembros del equipo y los protocolos de prueba metódicos pueden reducir enormemente este riesgo. Un proceso sólido de validación de ingeniería es crítico para la identificación temprana de fallos de diseño.

6. Accidente en operación del equipo

Este riesgo se refiere a accidentes durante la operación del equipo debido a estándares de construcción deficientes o al uso inadecuado de equipos de protección personal (EPP). Tales incidentes pueden resultar en cortes, quemaduras o electrocución si no se cumplen los protocolos de seguridad. Todos los miembros del grupo comparten la responsabilidad de este riesgo, que se clasifica dentro de la categoría Mecánica. La probabilidad se considera Posible, lo que indica la necesidad de estrategias preventivas. Aunque se clasifica como Menor en impacto, el potencial de escalada requiere vigilancia, reflejada en una calificación de riesgo de 6. La estricta adherencia a las normas de seguridad y la capacitación exhaustiva en el uso de EPP son medidas de control clave. Los simulacros de seguridad regulares pueden mejorar la seguridad y preparación en el lugar de trabajo.

7. Vibración excesiva

Este riesgo involucra vibraciones excesivas resultantes de un desequilibrio del rotor o un anclaje deficiente del bastidor. Esta situación puede interrumpir significativamente las operaciones y provocar fallas de componentes debido al desgaste excesivo. Paulo León es responsable de monitorear este riesgo, que se clasifica bajo la categoría Mecánica. La probabilidad de ocurrencia se considera Probable, lo que indica una probabilidad significativa de que ocurra. El impacto se califica como Mayor, afectando la eficiencia operativa, lo que produce una calificación de riesgo de 16. El balanceo regular del rotor y la mejora en el anclaje del bastidor son controles esenciales para mitigar este riesgo. El uso de técnicas de mecanizado de precisión puede ayudar a reducir la probabilidad de que ocurra este problema.

8. Sobrecarga del motor

Finalmente, este riesgo aborda la sobrecarga potencial del motor, ya sea por una carga excesiva o un cableado defectuoso, lo que plantea importantes preocupaciones operativas. Este riesgo puede llevar a que el motor se vuelva inoperable, lo que resultaría en pérdidas económicas para el proyecto. Los equipos Mecánico y Financiero comparten la responsabilidad de este riesgo, que se clasifica en las categorías Mecánica y Financiera. En términos de probabilidad, se califica como Raro, pero las consecuencias, si ocurren, son graves. El impacto se clasifica como Catastrófico, lo que requiere atención con una calificación de riesgo de 10. La instalación de mecanismos de seguridad como relés térmicos y disyuntores es crítica para gestionar este riesgo. Las inspecciones regulares de los sistemas eléctricos son esenciales para garantizar la fiabilidad y prevenir fallas.

Para cada uno de los riesgos se han detallado instrucciones de seguridad tanto en operación y mantenimiento:

Tabla 14: Instrucciones de operación y mantenimiento

Riesgo	Operación	Mantenimiento
Ruptura de eje	Monitorear vibraciones, apagar el motor si hay irregularidades, conservar la distancia.	Reemplazar el eje dañado, inspeccionar con regularidad y lubricarlo.
Falla de acople	Verificar el ajuste del acople previo a operar.	Ajustar correctamente el acople y reemplazarlo en caso que sea necesario.

Riesgo	Operación	Mantenimiento
Falla de las tapas	Inspeccionar tapas y sellos antes de operar, detener al observar fugas.	Revisar y ajustar pernos, tuercas. O reemplazar las tapas.
Desalineamiento de rodamientos	Monitorear vibraciones, detener al escuchar ruidos extraños.	Revisar y alinear rodamientos, cambiar forma de alineación.
Accidente de operación	Usar EPP en cualquier momento.	Cambiar componentes defectuosos. Incluir capacitación de primeros auxilios.
Desbalance del rotor	Monitorear vibración, detener al ser excesivos.	Balancear el rotor, mejorar el anclaje en el bastidor o a su vez el diseño del mismo.
Sobrecarga del motor	Supervisar temperatura del motor, no exceder la máxima.	Instalar relés térmicos y contactores, revisar todas las conexiones.

11. Resultados y discusión

11.1. Matriz de pruebas

Tabla 15: Resultados de matriz de pruebas

Velocidad [RPM]	2500	3000	3600
Caudal [L/min]	Temperatura Máxima [°C]		
9	32.46	31.28	35.24
12	31.56	32.51	36.20
15	31.47	32.78	33.86

En esta tabla se pueden apreciar las temperaturas máximas alcanzadas por el sistema, en un tiempo de 1900 segundos (aproximadamente 32 minutos) de funcionamiento, a distintas velocidades, y distintos caudales fluyendo a través del cavitador.

Lo que se esperaba ver en esta matriz de resultados es que, a mayor velocidad, y menor caudal, la temperatura aumente. Sin embargo, esto solo sucedió para el caso en que la velocidad es mínima (2500 RPM). No obstante, sí se puede apreciar que, a mayores velocidades, mayores son las temperaturas alcanzadas.

Se tomó como hipótesis de trabajo que, al aumentar la velocidad y disminuirse el caudal, el rotor podía alcanzar a calentar mejor el agua, debido a que un menor flujo le permitiría calentar mejor el fluido. Hasta cierto punto, esto sí sucede, pero no de forma lineal conforme se varía el caudal a velocidad constante.

Al analizar el por qué de este comportamiento, se concluye que, mientras menor es el caudal y mayor es la velocidad, los agujeros del rotor no alcanzan a llenarse de agua por completo, cosa que es necesaria para que la cavitación pueda ocurrir. El aumento significativo de la temperatura a altas velocidades puede deberse a que, a pesar de estar cavitando en menor medida, el sistema de recirculación permite que un mayor gradiente suceda en un menor tiempo. Como se menciona anteriormente, esto hace que sí exista un aumento de temperatura, pero no es lineal, a excepción de cuando la velocidad es mínima (2500 RPM).

11.2. Curvas de Temperatura vs. Tiempo

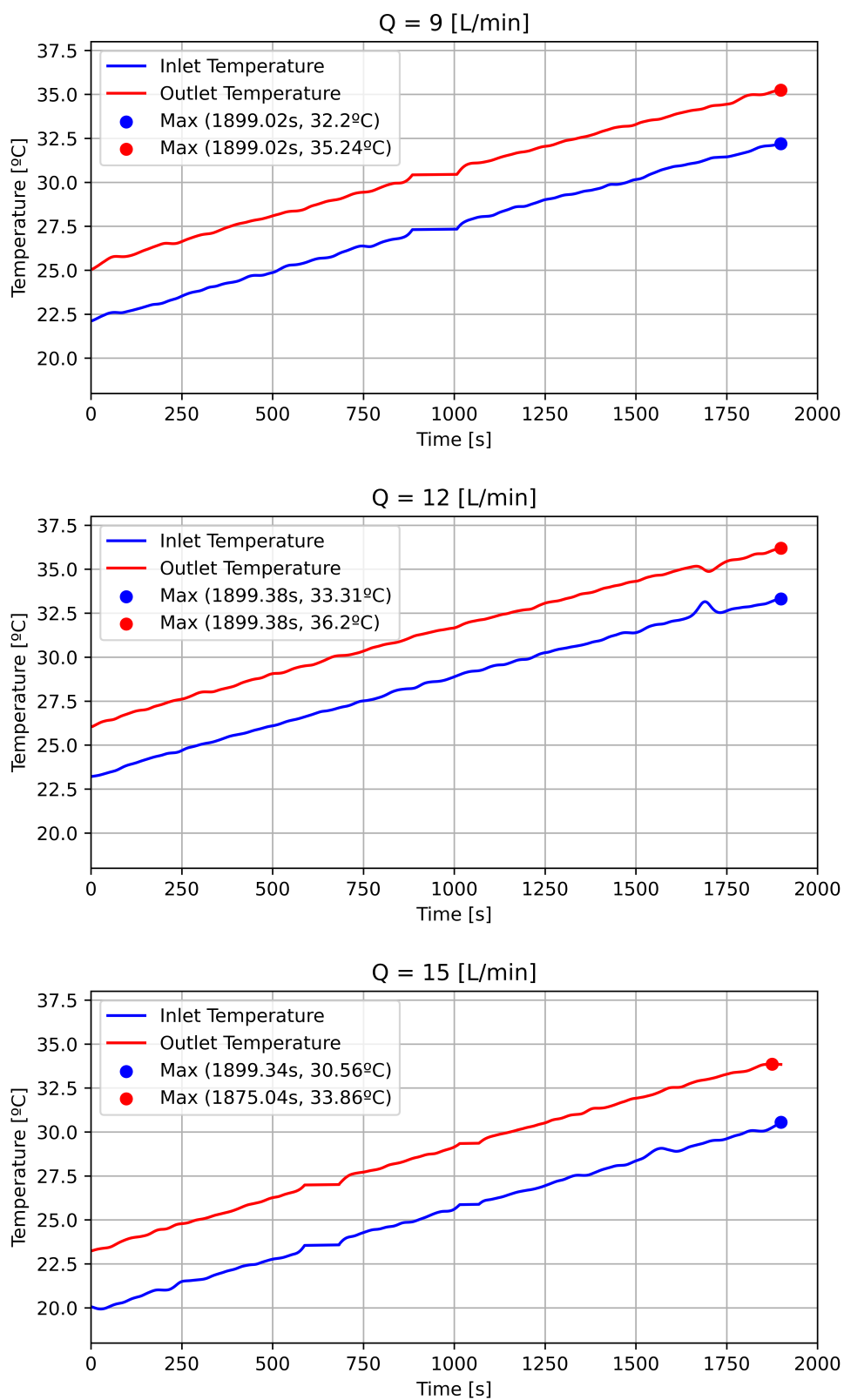


Figura 35: Temperatura vs. Tiempo a 3450 RPM

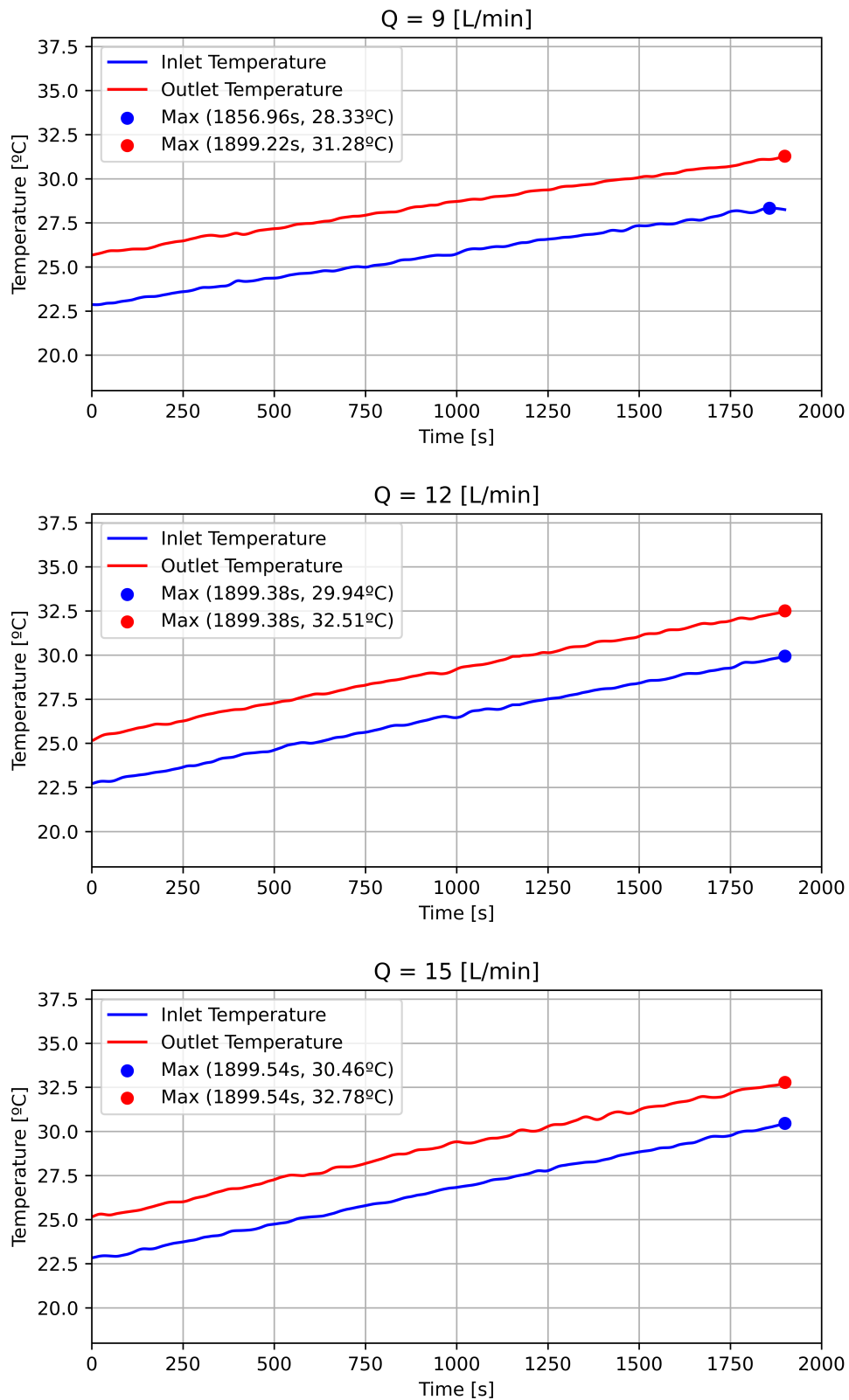


Figura 36: Temperatura vs. Tiempo a 3000 RPM

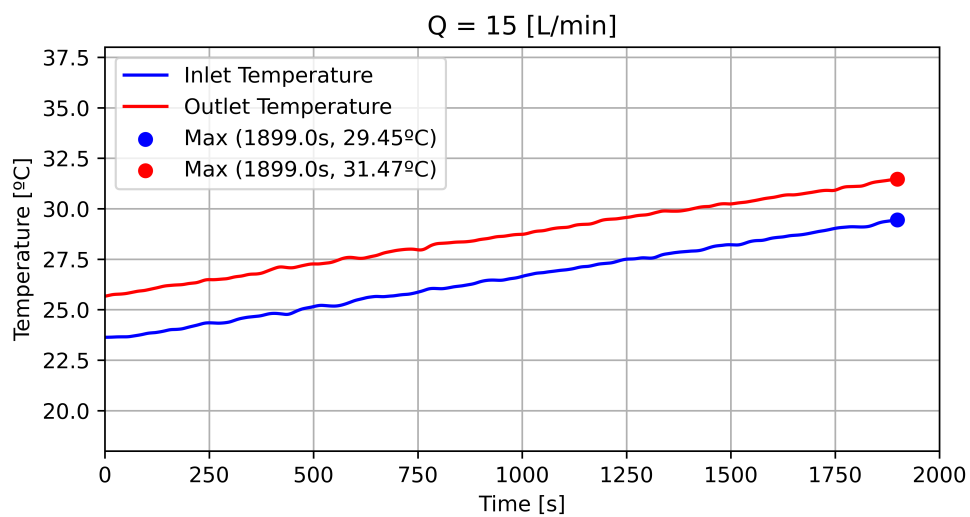
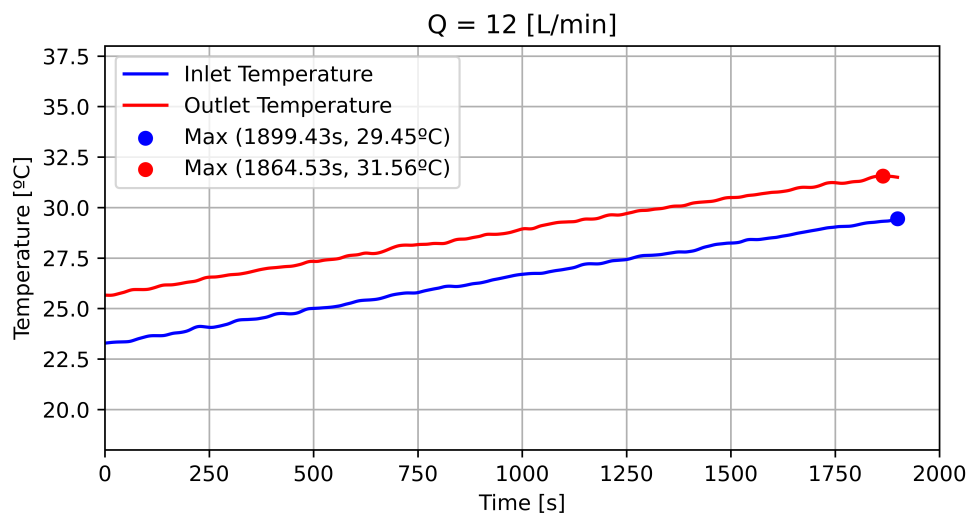
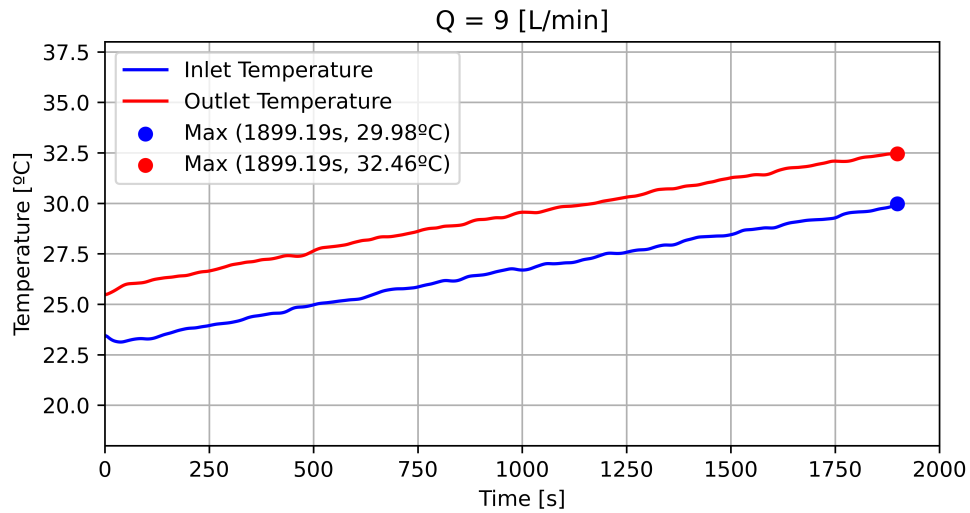


Figura 37: Temperatura vs. Tiempo a 2500 RPM

Como se observa en las gráficas de Temperatura vs. Tiempo, el comportamiento del generador de calor por cavitación es lineal, en cada caso de variación de caudal a velocidad constante. El sistema de recirculación permite que las temperaturas de entrada y de salida del cavitador aumenten a la par. Eventualmente, ambas curvas deberían llegar a un punto de estabilidad en el que se encuentren, pero esto requeriría un tiempo de funcionamiento mucho mayor al tomado en el protocolo de pruebas. Ahora bien, este comportamiento del sistema de recirculación indica que el equipo es útil para calentar agua que se encuentre almacenada en un reservorio, en donde se pueda mantener minimizando las pérdidas de calor al ambiente.

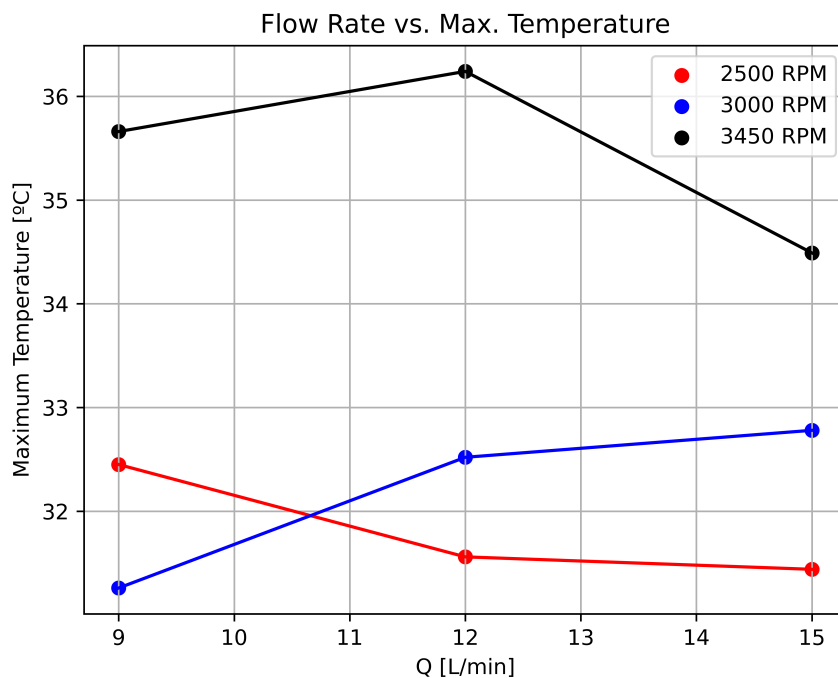


Figura 38: Temperatura máxima vs. Caudal vs. Velocidad

En esta última gráfica se puede ver la relación que existe entre la temperatura máxima alcanzada por el sistema, el caudal, y la velocidad de giro del rotor. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento no es significativamente concluyente, pero el haber observado el comportamiento esperado al mantener la velocidad de rotación al mínimo establecido en la matriz de pruebas, da una pauta del trabajo a realizarse en el futuro.

12. Conclusiones

Los cálculos realizados para explicar el funcionamiento del cavitador son relevantes para la investigación. El principio de Bernoulli y el modelo matemático descrito mediante las ecuaciones de Navier-Stokes son de interés para explicar lo que sucede en el rotor durante su funcionamiento. Adicionalmente, la selección de materiales y procesos de fabricación de las piezas es importante para obtener la mejor calidad posible, tanto estética como funcionalmente. Para esto, el análisis de alternativas de diseño fue útil para decidir la manera en que se debe construir el prototipo. Las normas y estándares aplicables a este proyecto sirven como guía para garantizar la funcionalidad del prototipo, pero también la seguridad de quienes lo utilizarán.

El análisis del comportamiento del generador de calor por cavitación ha resaltado el intrincado equilibrio entre la dinámica de fluidos, la termodinámica y el diseño mecánico necesario para optimizar la eficiencia. Utilizando el principio de Bernoulli, se exploró la relación entre presión y velocidad, destacando cómo estos factores influyen en la cavitación dentro del sistema. Los cálculos realizados demostraron los umbrales críticos en los cuales el líquido transita a un estado de cavitación, enfatizando la importancia de mantener buenas condiciones de funcionamiento para minimizar daños.

Las consideraciones de diseño mecánico para el eje, incluyendo la evaluación de fuerzas y momentos, fueron abordadas a través de cálculos rigurosos. La aplicación de la ecuación de Goodman modificada proporcionó información sobre el análisis de esfuerzos requerido para un diseño robusto, asegurando la fiabilidad bajo cargas operativas. Además, los cálculos de eficiencia revelaron el potencial significativo de transferencia de energía térmica, permitiendo una comprensión más profunda de las capacidades de rendimiento del sistema.

Al analizar el estado del equipo de cavitación, se comprueba que, hasta el momento, y luego de realizar todas las pruebas del prototipo por varias horas, el desgaste de los elementos mecánicos es prácticamente inexistente. Como se explicó en la sección introductoria, el sistema de rotor-estator de este cavitador es completamente diferente al de una bomba o turbina, ergo, el impacto de la cavitación en el desgaste es despreciable. Las

inspecciones visuales y el continuo buen comportamiento del dispositivo nos indica que el impacto del fenómeno es positivo, tal como se planteó al inicio del proyecto.

El armado del circuito eléctrico demostró la utilización de conocimientos esenciales sobre los circuitos de potencia, guiando iteraciones futuras del diseño para mejorar el rendimiento sin comprometer la eficiencia. Este enfoque multifacético no solo identifica áreas cruciales de optimización, sino que también establece una comprensión básica para futuras investigaciones en tecnologías de generación de calor por cavitación. Además, estos conocimientos son básicos para un ingeniero mecánico dentro de la industria, donde siempre se utilizan equipos eléctricos para el funcionamiento de maquinaria.

Finalmente, se concluye que el prototipo es funcional, y bajo las condiciones de funcionamiento establecidas en este proyecto, el cliente puede utilizarlo para la aplicación requerida. El principal hallazgo es que, dado el tamaño y condiciones de operación actuales, es necesario un sistema de recirculación del agua para poder disminuir el tiempo en que se desea calentar un volumen definido de agua.

13. Trabajo futuro

El desarrollo de este proyecto a largo plazo podría enfocarse en la optimización del diseño del generador de calor por cavitación en aplicaciones industriales más grandes, como el procesamiento de alimentos y bebidas, donde disponer de agua caliente es indispensable. Esto conlleva la implementación de materiales avanzados con una mayor resistencia al desgaste por cavitación. De la misma forma, se debe realizar un análisis de durabilidad a largo plazo bajo condiciones operativas constantes y de largos períodos. Además, se podrían implementar estudios más extensos y minuciosos para evaluar el impacto de diferentes geometrías, tanto del rotor como de sus agujeros.

Es importante tomar en cuenta la literatura revisada, tanto de investigaciones como de patentes, siendo de interés varias el tamaño del equipo, por ende, su capacidad en términos de volumen por unidad de tiempo. Esto tendría el fin de analizar la posibilidad de realizar una mayor inversión en un equipo, por ejemplo, de mayor tamaño, a cambio de lograr un mayor gradiente de temperatura en un menor tiempo. Como queda demostrado que el equipo funciona, es iterable y su diseño repetible y variable. Además, como ya se cuenta con un prototipo funcional, poder realizar comparaciones en términos reales es muy apreciable.

Otra área de investigación futura es la integración de tecnología de monitoreo y control en tiempo real, sensores avanzados y sistemas de automatización. Esto que permitiría mejorar las condiciones de operación del generador, garantizando un buen rendimiento, seguro, y automático. Se podría estudiar la viabilidad de implementar este sistema en comunidades rurales que tiene acceso limitado a infraestructura energética, encontrando una solución sostenible y económica para el calentamiento de agua.

Referencias

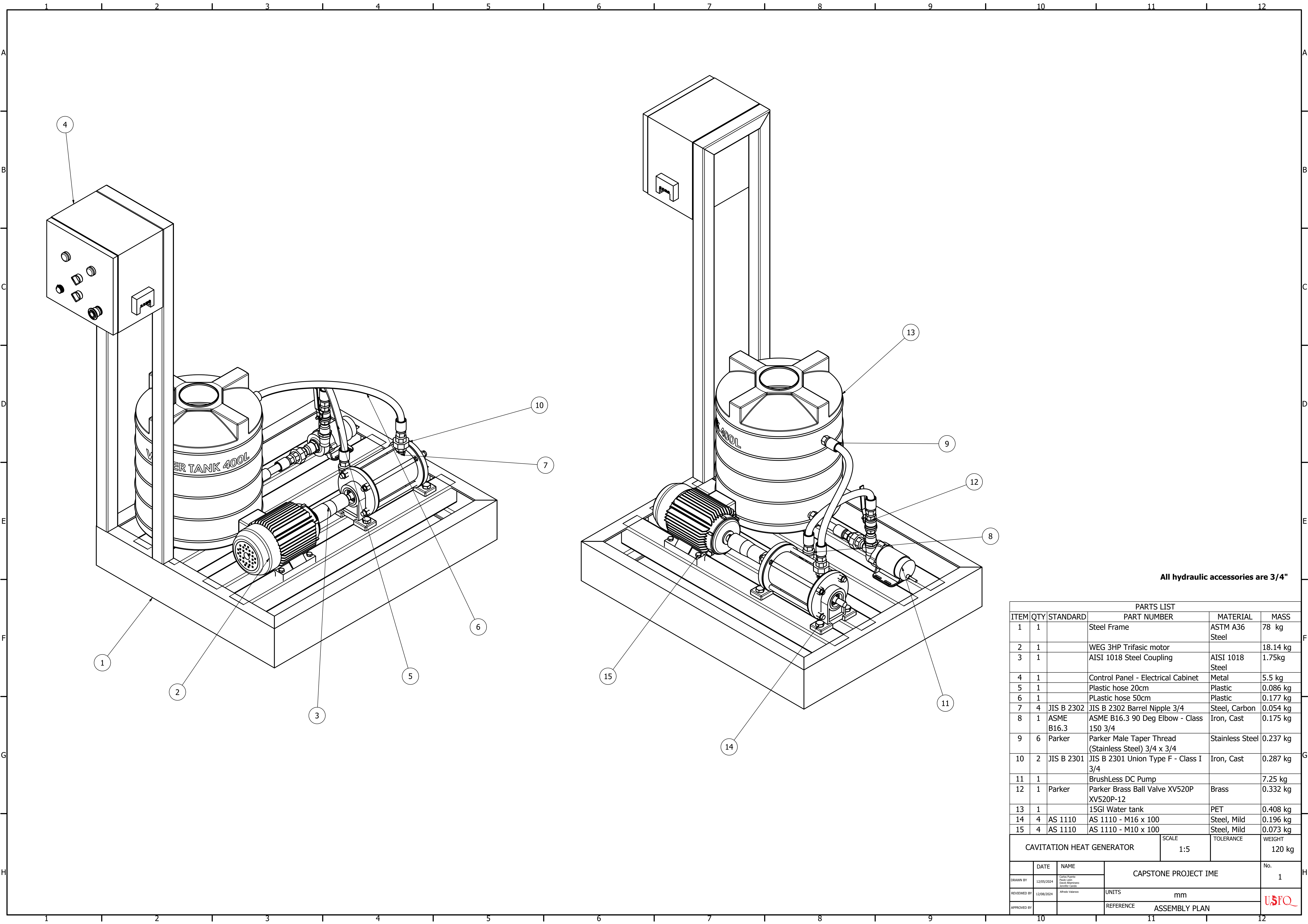
- Bespalko, S., Halychy, O., Yovchenko, A., Plakhotnyi, O., Poliakov, S., Kaleinikov, G., Roha, M., Fenko, I., Bespalko, S. A., Halychii, O., Yovchenko, A. V., Plakhotnyi, O. P., Polyakov, S. P., Kaleynikov, G. Y., Roga, M. P., & Fenko, I. I. (2021). Experimental testing of the heating performance of a rotor-type dissipative liquid heater. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12, 39-54.
- Blöchl, A., & Flaig, G. (2014). The Hodrick-Prescott Filter with a Time-Varying Penalization Parameter. An Application for the Trend Estimation of Global Temperature. The Hodrick-Prescott Filter with a Time-Varying Penalization Parameter. An Application for the Trend Estimation of Global Temperature. www.RePEc.org
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (M. H. Education, Ed.; 10.^a ed.).
- Cerecedo, L. M., Dopazo, C., & Gomez-Lus, R. (2018). Water disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
- Gerhart, P. M., Gerhart, A. L., & Hochstein, J. I. (2015). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Wiley, Ed.; 8.^a ed.).
- Gostiša, J., Širok, B., Repinc, S. K., Levstek, M., Stražar, M., Bizjan, B., & Zupanc, M. (2021). Performance evaluation of a novel pilot-scale pinned disc rotating generator of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105431>
- Groover, M. (2012). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. Wiley. <https://books.google.com.ec/books?id=iUN-uQAACAAJ>
- Haas Automation. (2024). Haas. <https://www.haascnc.com/index.html>
- Hudson, K., & Kazem, B. (2008, abril). Cavitation Device With Balanced Hydrostatic Pressure.
- INEN. (1989). Norma INEN de Dibujo Técnico. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Kuimov, D., Minkin, M., Yurov, A., & Lukyanov, A. (2023, junio). Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid

- Petroleum Products—Review and Proposals for Further Research. <https://doi.org/10.3390/fluids8060172>
- Kwon, W. C., & Yoon, J. Y. (2013). Experimental study of a cavitation heat generator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 227, 67-73. <https://doi.org/10.1177/0954408912451535>
- Li, D., Wen, J., Ge, N., Han, G., Zhu, Y., & Wang, C. (2023). Study of the Mechanism of Cavitation in Inner-Hole Rotating Cavitators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2660. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012038>
- Mikhailovich, M. S., Ivanovich, N. V., & Pavlovich, S. V. (2007). Rotor type whirl heater.
- Nikolsky, V., Oliynyk, O., Lipeev, O., & Ved, V. (2017). Examining a cavitation heat generator and the control method over the efficiency of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 22-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580>
- OSHA. (2002). Controlling Electrical Hazards. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/osha3075.pdf>
- Samani, B. H., Behruzian, M., Najafi, G., Fayyazi, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. (2021). The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. *Fuel*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821>
- Samaniego-Ojeda, C., Hernández, O. H. Á., & Correa, J. M. (2016). Emissions from LPG combustion heaters from the city of Loja and possible relationship with acute respiratory diseases. *Revistas UNL*.
- Shetty, N. P. (2015). Design and Fabrication of Externally Driven Liquid Cavitation Heating System. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Smith, K. W., & Fair, J. (2022). Cavitation Pump.
- Tahmid, S., Gill, B., Park, K., Ryu, Y., & Lee, S. (s.f.). Optimization and testing of a first generation cavitation heat pump. *2013 ASEE Annual Conference and Exposition Proceedings*, 23.948.1-23.948.11. <https://doi.org/10.18260/1-2--22333>

- Yadav, S., Yadav, V., Gupta, N., & Students, U. G. (2019). Design and Fabrication of Cavitation Water Heater". *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Zaporozhets, E. P., Kholpanov, L. P., Zibert, G. K., & Artemov, A. V. (2004). Vortex and Cavitation Flows in Hydraulic Systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 38, 225-234. <https://doi.org/10.1023/B:TFCE.0000032183.27669.15>

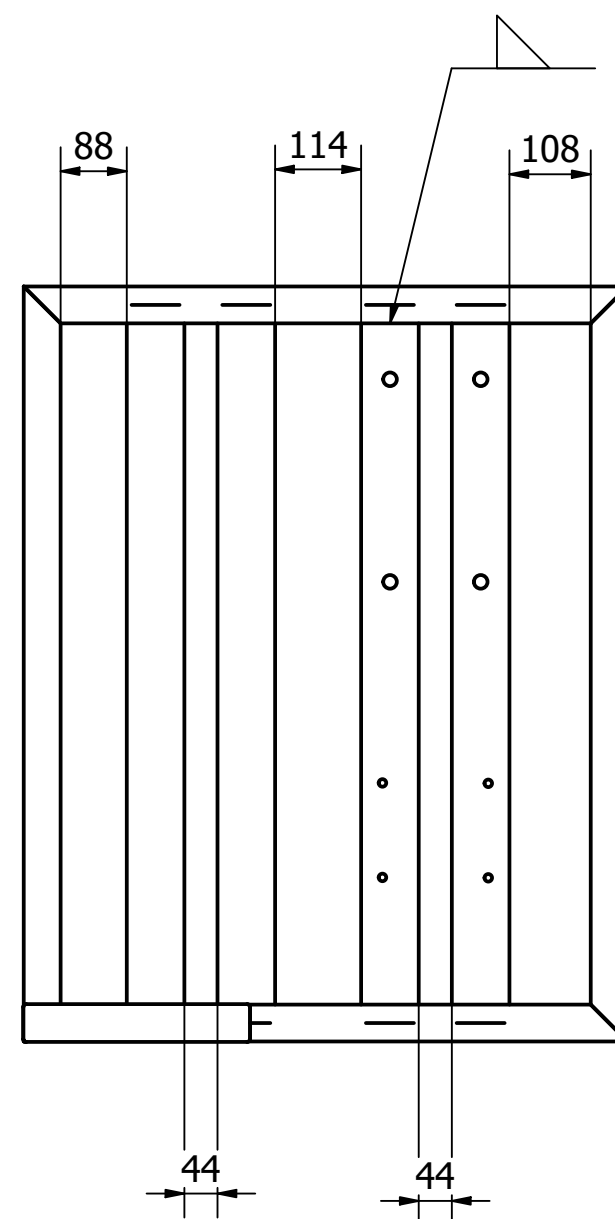
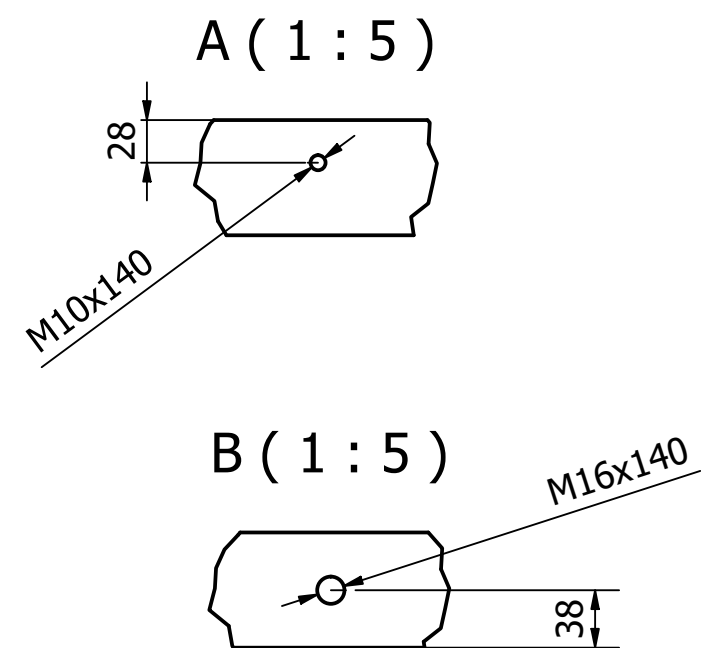
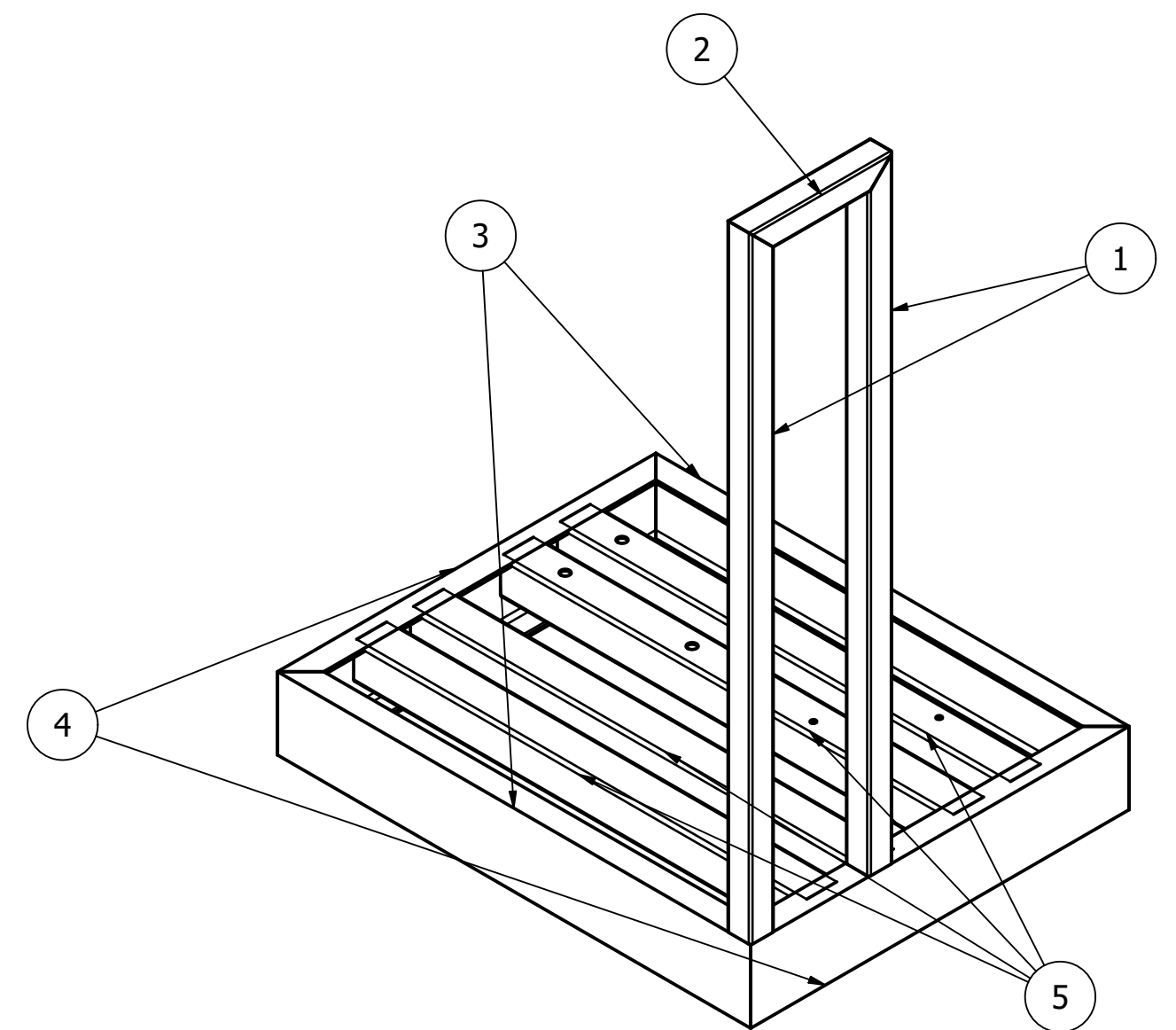
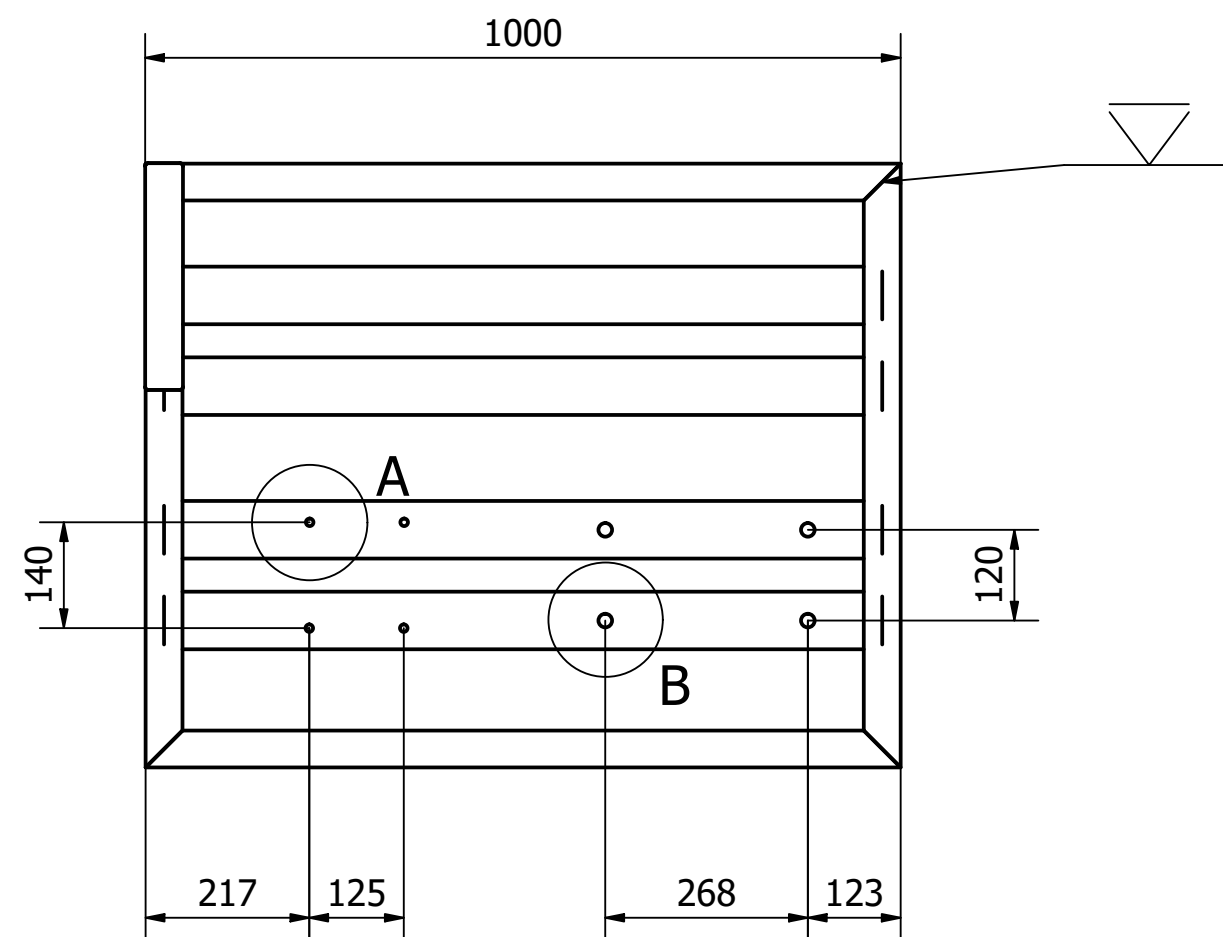
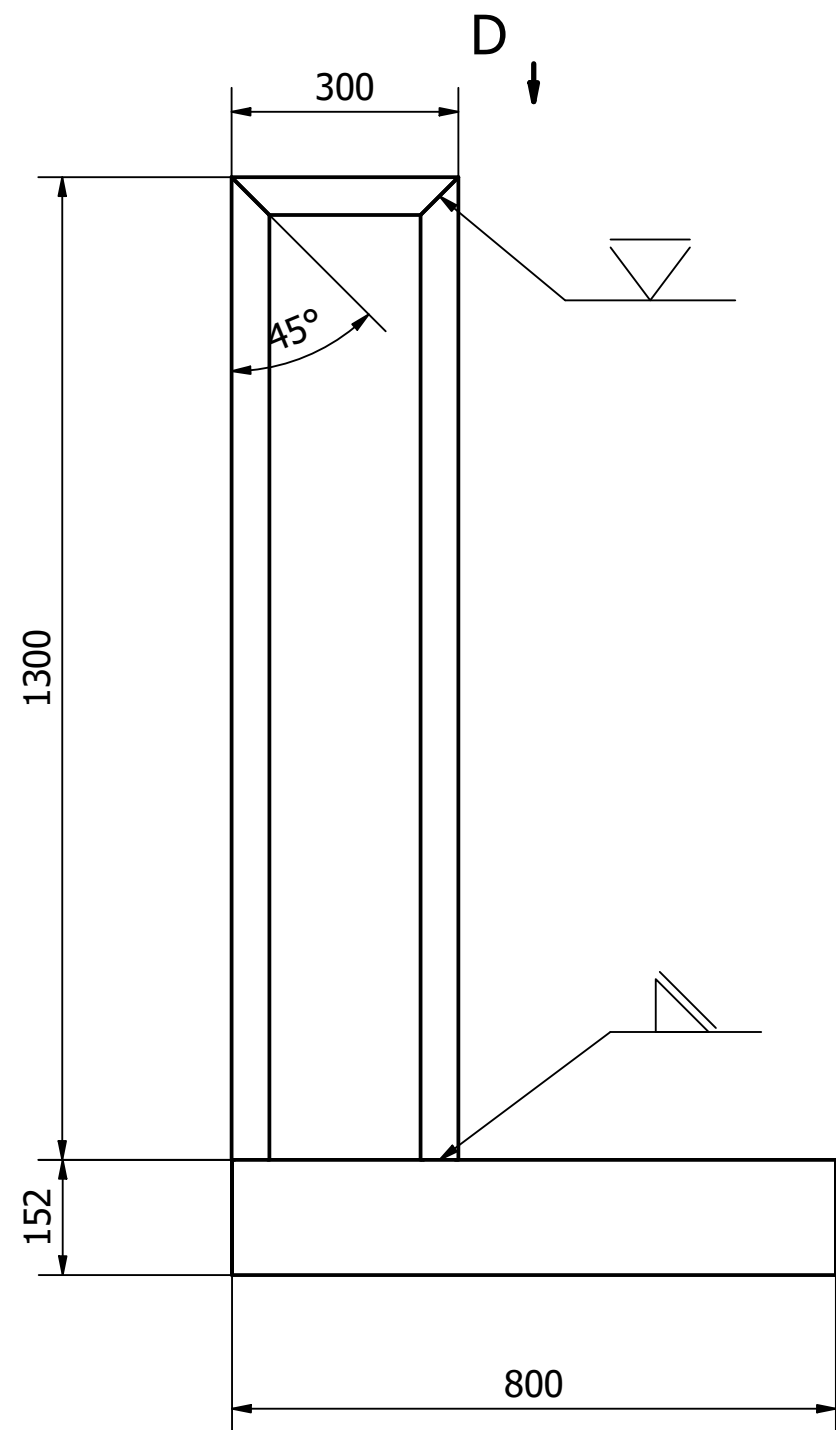
APÉNDICE A

Planos de ingeniería



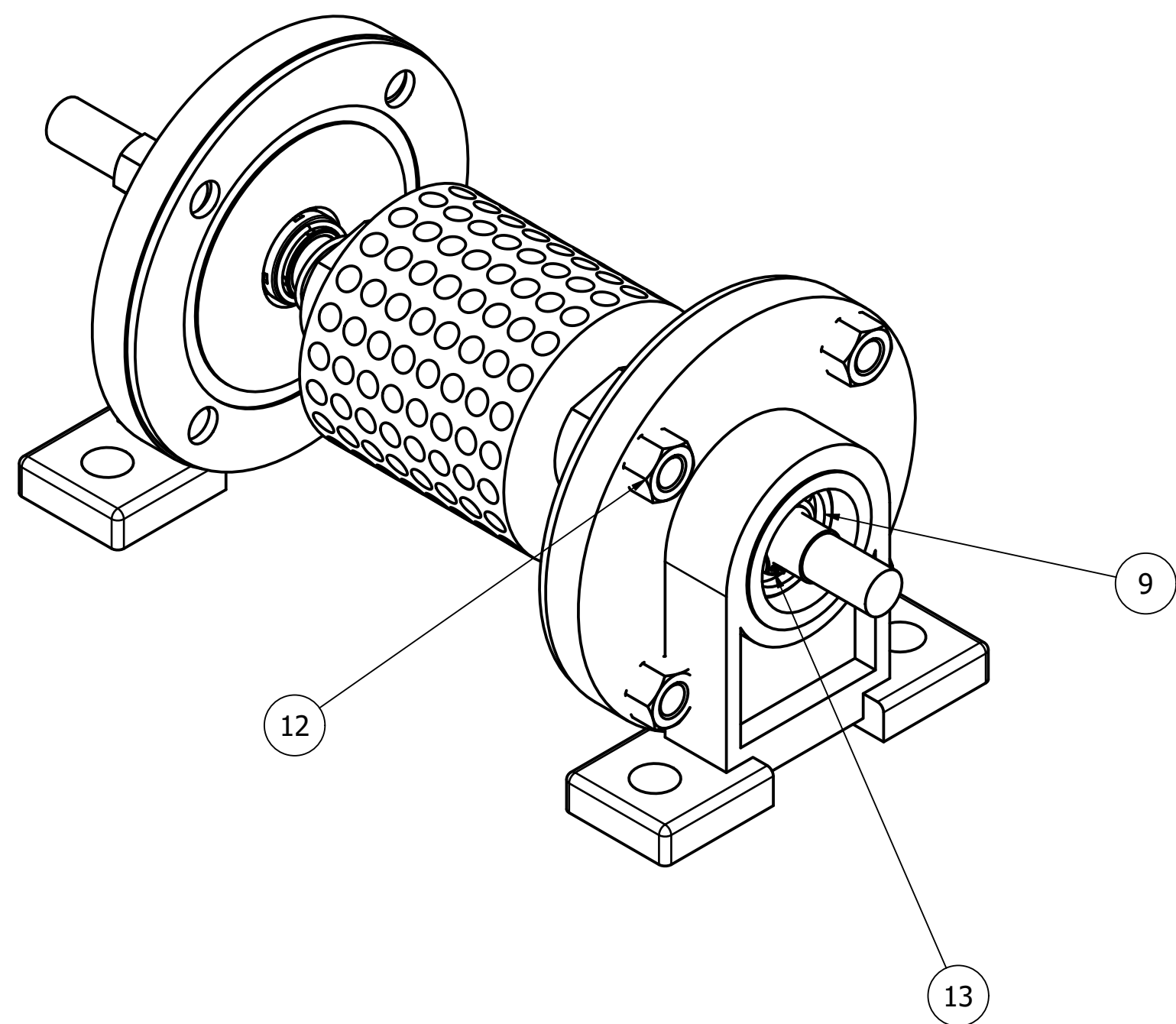
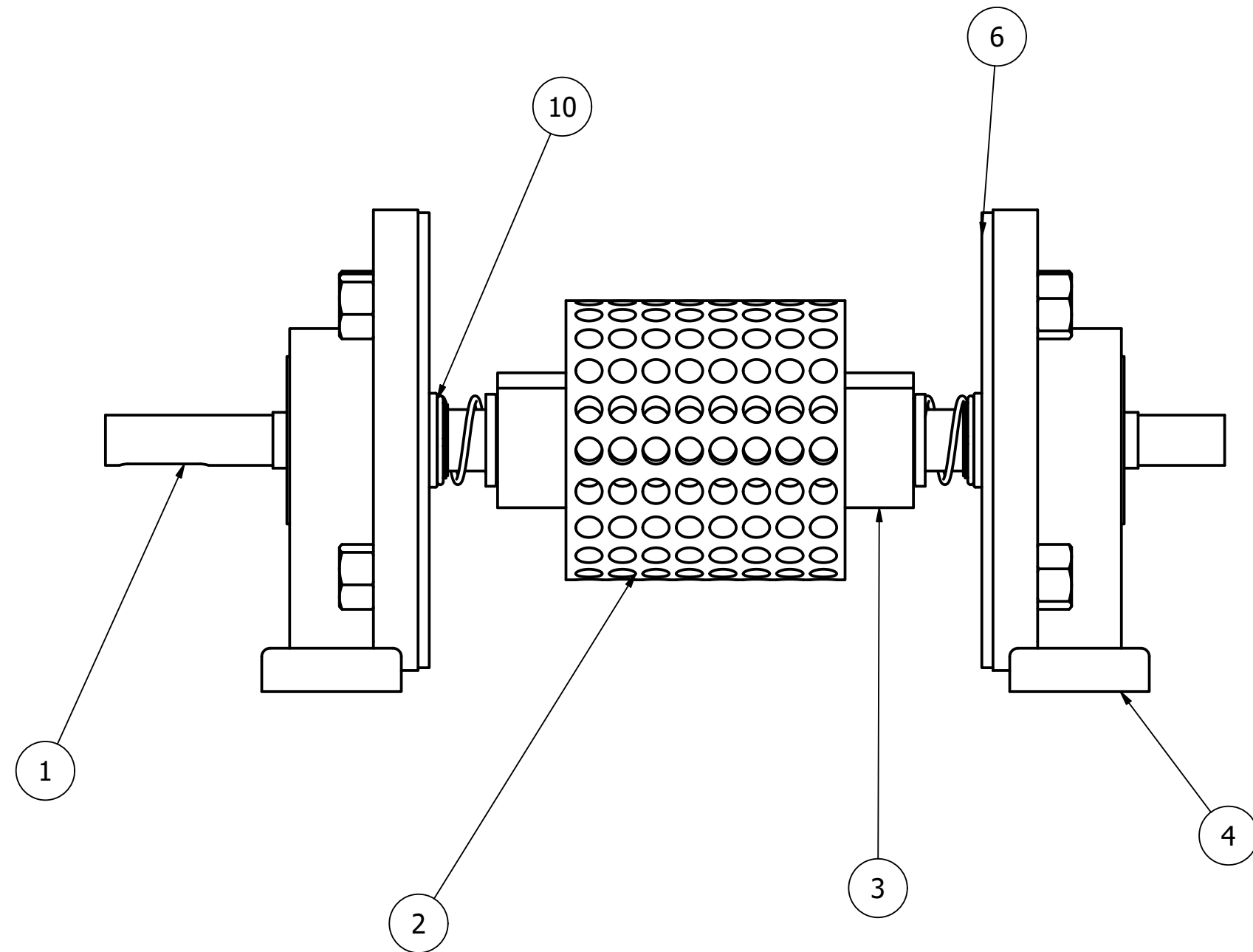
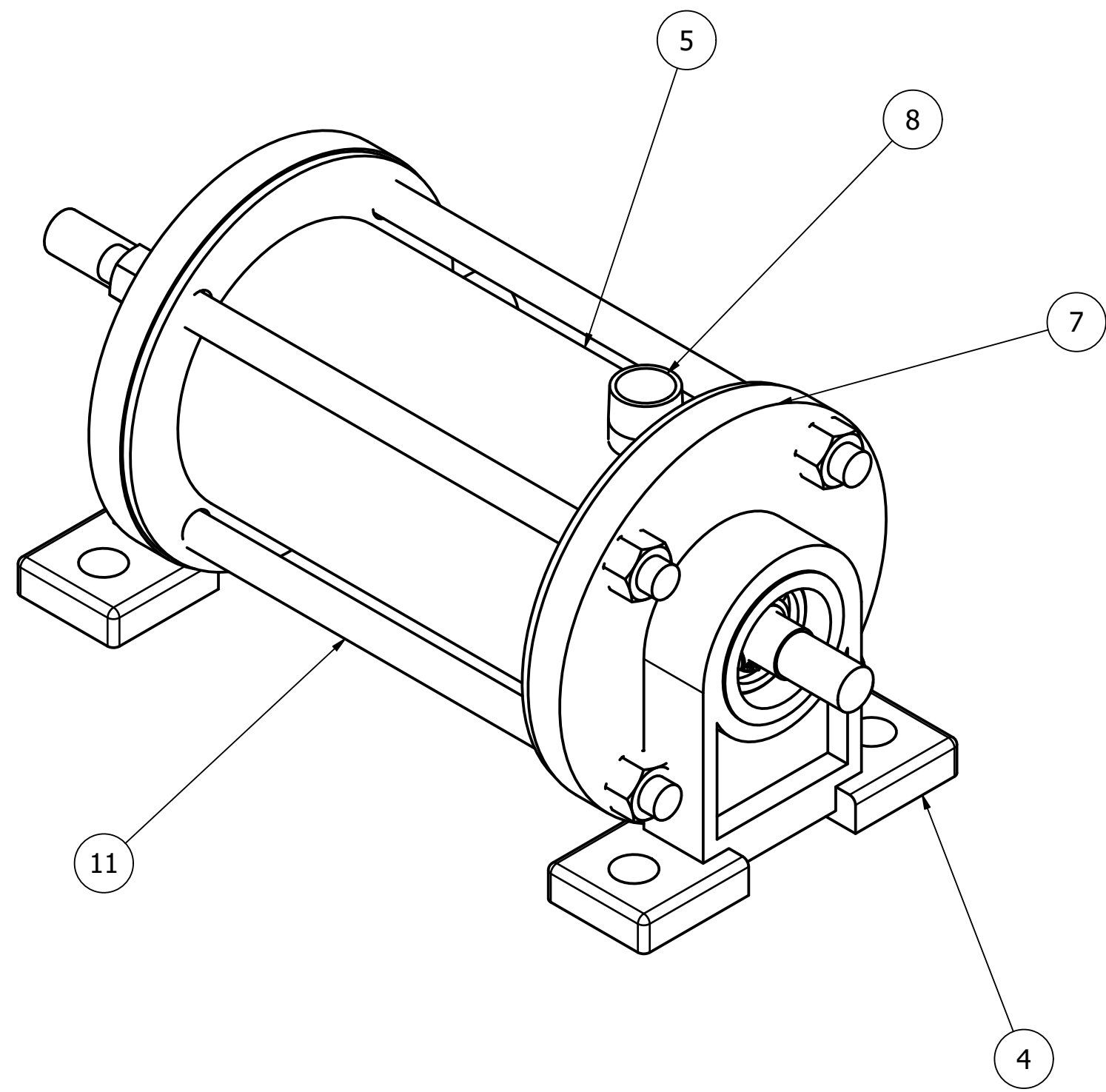
All hydraulic accessories are 3/4"

PARTS LIST					
ITEM	QTY	STANDARD	PART NUMBER	MATERIAL	MASS
1	1		Steel Frame	ASTM A36 Steel	78 kg
2	1		WEG 3HP Trifasic motor		18.14 kg
3	1		AISI 1018 Steel Coupling	AISI 1018 Steel	1.75kg
4	1		Control Panel - Electrical Cabinet	Metal	5.5 kg
5	1		Plastic hose 20cm	Plastic	0.086 kg
6	1		PLastic hose 50cm	Plastic	0.177 kg
7	4	JIS B 2302	JIS B 2302 Barrel Nipple 3/4	Steel, Carbon	0.054 kg
8	1	ASME B16.3	ASME B16.3 90 Deg Elbow - Class 150 3/4	Iron, Cast	0.175 kg
9	6	Parker	Parker Male Taper Thread (Stainless Steel) 3/4 x 3/4	Stainless Steel	0.237 kg
10	2	JIS B 2301	JIS B 2301 Union Type F - Class I 3/4	Iron, Cast	0.287 kg
11	1		BrushLess DC Pump		7.25 kg
12	1	Parker	Parker Brass Ball Valve XV520P XV520P-12	Brass	0.332 kg
13	1		15Gl Water tank	PET	0.408 kg
14	4	AS 1110	AS 1110 - M16 x 100	Steel, Mild	0.196 kg
15	4	AS 1110	AS 1110 - M10 x 100	Steel, Mild	0.073 kg
CAVITATION HEAT GENERATOR			SCALE 1:5	TOLERANCE	WEIGHT 120 kg
DRAWN BY	DATE	NAME	CAPSTONE PROJECT IME		No. 1
	12/05/2024	Carlos Puentes David Salas David Alvarado David Alvarado			
	REVIEWED BY	12/08/2024	UNITS	mm	USFQ
APPROVED BY			REFERENCE	ASSEMBLY PLAN	

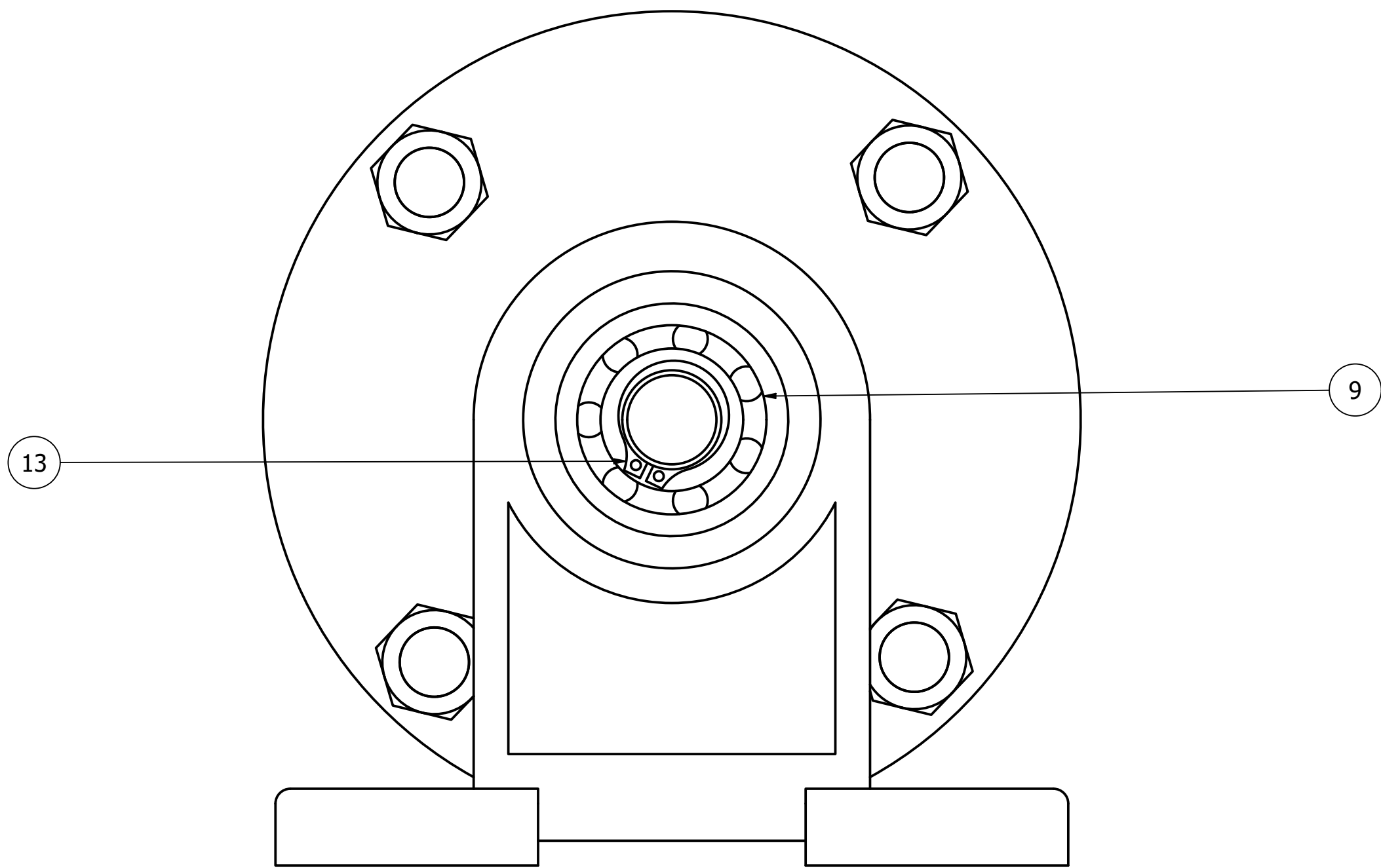


PARTS LIST						
ITEM	ITEM QTY	LENGTH	PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL	MASS
1	2	1300 mm	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 1300	Structural steels - Cold-formed, welded, structural square hollow sections	Steel, Mild	3.740 kg
2	1	300 mm	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 300	Structural steels - Cold-formed, welded, structural square hollow sections	Steel, Mild	0.733 kg
3	2	1000 mm	AISC - C 6 x 8.2 - 39.322	U-Shape	Steel, Mild	11.843 kg
4	2	800 mm	AISC - C 6 x 8.2 - 31.448	U-Shape	Steel, Mild	9.403 kg
5	4	1000 mm	AISC - 3 x 3 x 1/8 - 37.402	Square Tube	Steel, Mild	6.713 kg
ASTM A36 STEEL FRAME				SCALE 1:10	TOLERANCE ± 1	WEIGHT 78 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No. 2
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valenzuela	UNITS mm			
APPROVED BY			REFERENCE SUBASSEMBLY PLAN			

Material: ASTM A36 Steel
MIG Welding
Black exterior Spray paint



SCALE 1:1



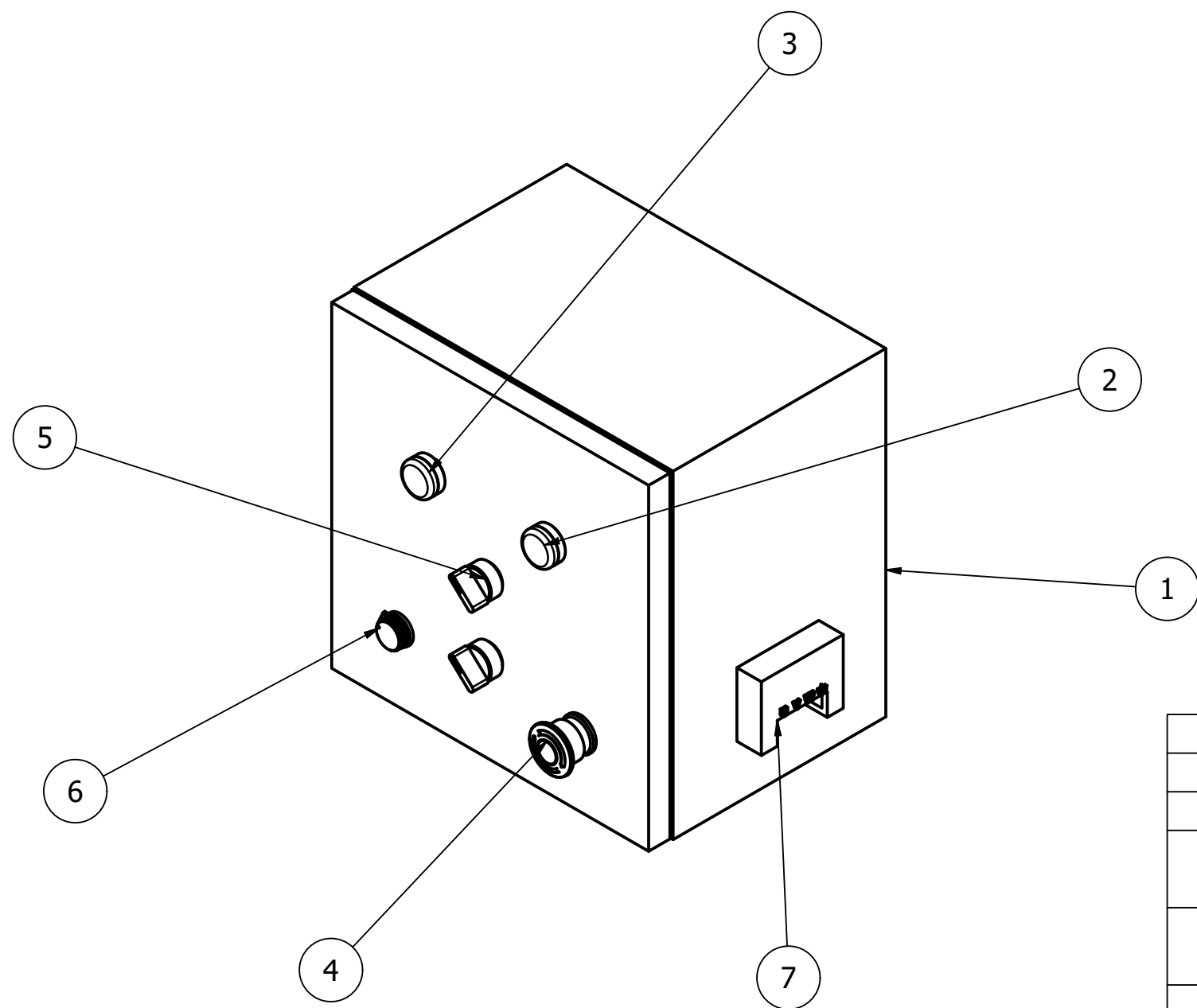
Ensure the specified torque is applied

Refer to Manual for assembly and configuration

PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL
1	1	Main Shaft	Rotating shaft for torque transmission.	AISI 304 Stainless Steel
2	1	Stainless Steel Rotor	Rotor for generating cavitation.	AISI 304 Stainless Steel
3	2	Main Shaft Nut	Nuts for securing shaft components.	AISI 304 Stainless Steel
4	2	Rowlock	Supports and aligns rotating parts.	ASTM A36 Steel
5	1	4,5 in Hollow Pipe	Hollow pipe for fluid flow.	AISI 304 Stainless Steel
6	2	Stainless Steel Cap Section	Caps for sealing sections.	AISI 304 Stainless Steel
7	2	A36 Steel Cap Section	Steel caps for structural support.	ASTM A36 Steel
8	2	JIS B 2302 Barrel Nipple 3/4	Nipple	Steel, Carbon
9	2	BS 292 Part 1 - 6204 - 20 x 47 x 14	Rolling bearings: ball bearings cylindrical	Steel, Mild
10	2	Hydraulic seal 20mm	Mechanical Hydraulic Seal	Ceramic
11	4	Threaded Shaft M14	M14x300	AISI 304 Stainless Steel
12	8	AS 1112 - M14 Type 10	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts	Steel, Mild
13	2	ANSI B 27.7M - 3AMI-20	American National Standard Metric Tapered Retaining Rings - Basic External Series - 3AMI	Steel, Mild

CAVITATION GENERATOR			SCALE	TOLERANCE	WEIGHT
			1:2		22,35 kg
		DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR	
DRAWN BY		12/05/2024	Carlos Romero Pablo Gallo David Alvarado Alejandro Cordero	No 3	
REVIEWED BY		12/08/2024	Alfredo Valdeso	UNITS mm	
APPROVED BY				REFERENCE SUBASSEMBLY PLAN	



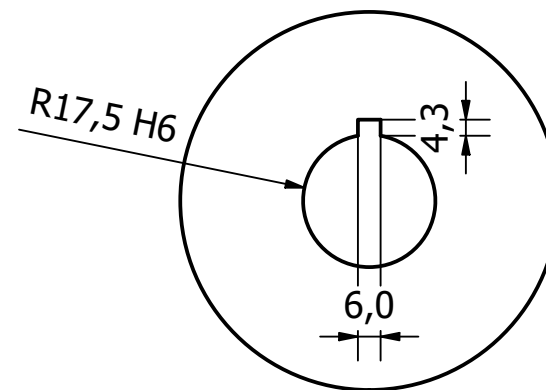
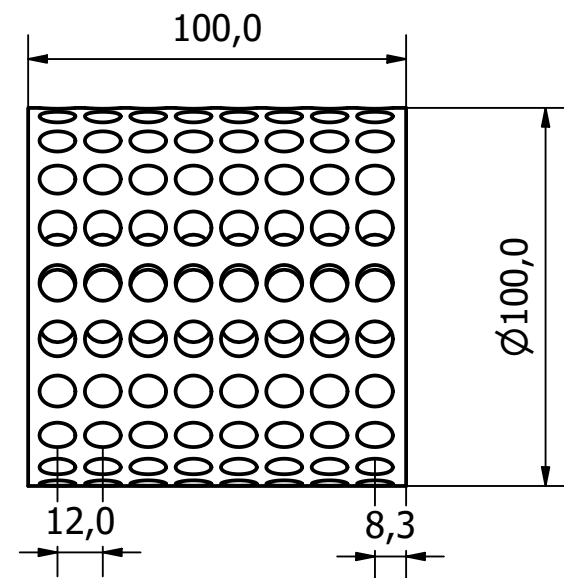


Power Supply: 220V

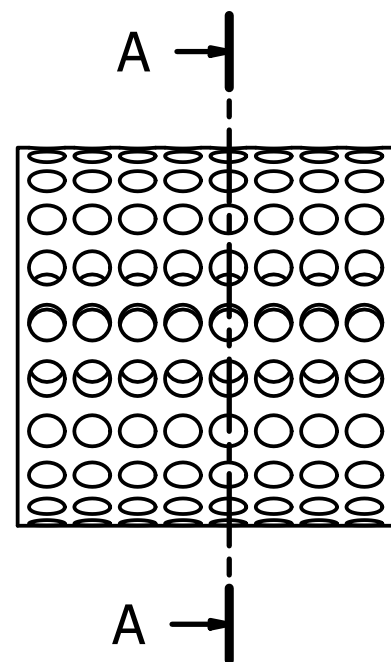
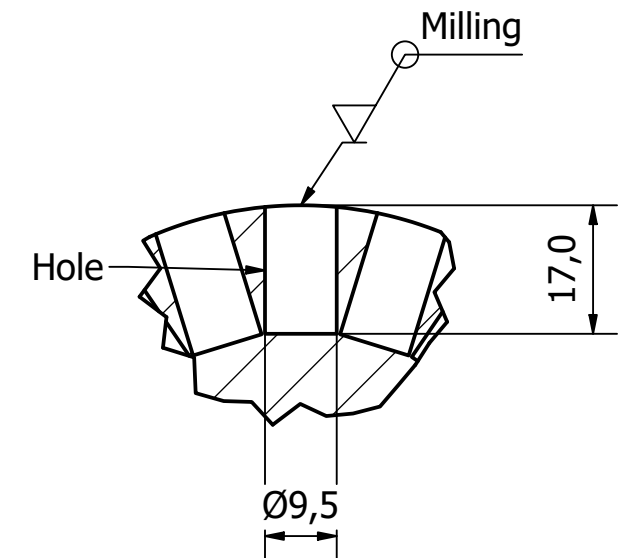
The Electrical Cabinet must be well grounded

Refer to Manual for assembly and configuration

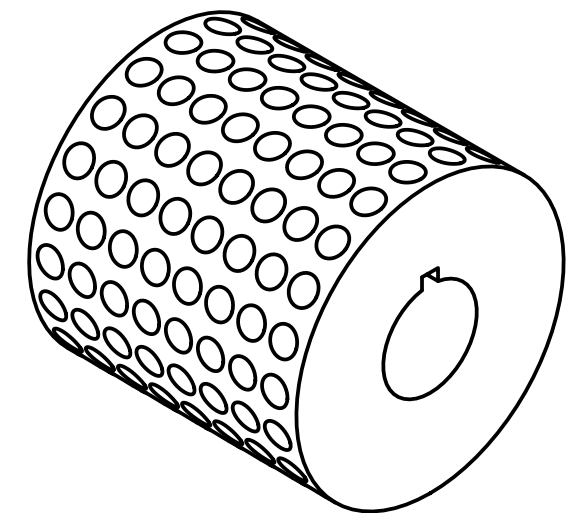
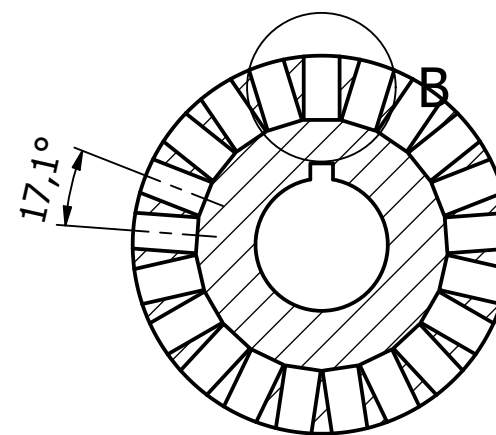
PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER		DESCRIPTION
1	1	Electrical Cabinet		30x30x20 Isolated Cabinet
2	1	Green Pilot Light		Indicates the ON function for the Engine
3	1	Red Pilot Light		Indicates the OFF function for the Engine
4	1	Stop Button		Emergency Stop Button for the Engine
5	2	Selector		Turns the Cavitator Engine - Pump ON/OFF
6	1	Potentiometer		Regulates the Cavitator Engine Speed
7	1	Engine Terminal Box		U, V, W and Ground Terminals for the Engine
CONTROL PANEL - ELECTRICAL CABINET			SCALE 1:2	TOLERANCE WEIGHT 22,35 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR	
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando		
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm	
APPROVED BY			REFERENCE SUBASSEMBLY PLAN	
				No 4
				USFQ



DETAIL B (1 : 1)



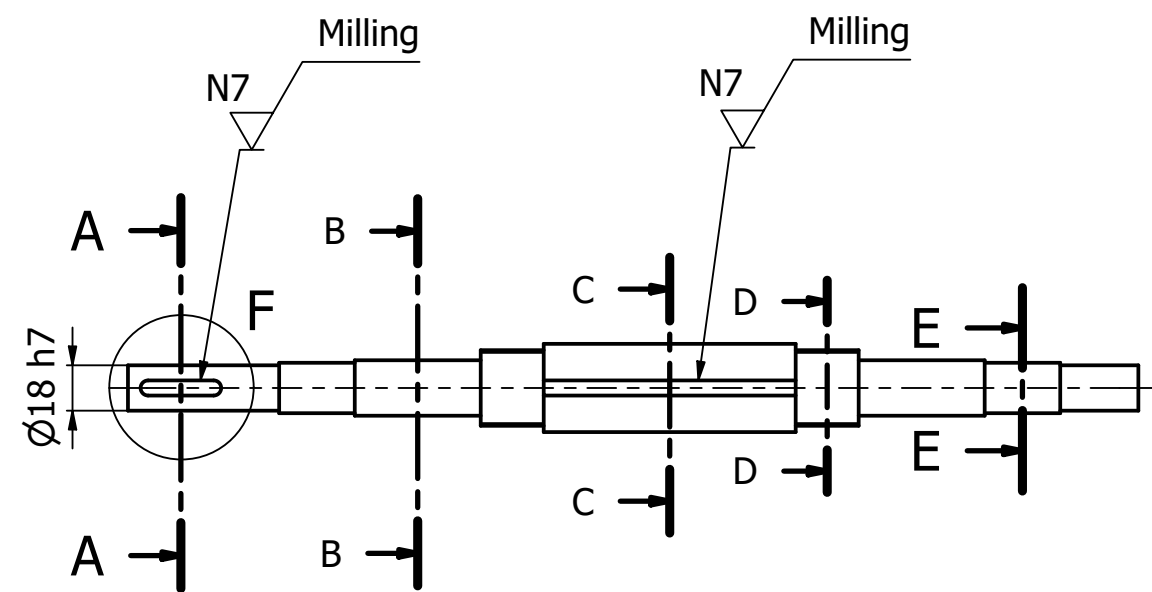
A-A (1 : 2)



Material: AISI 304 Stainless Steel
Original Dimensions: Cylinder
Ø100x100

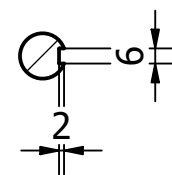
CNC Turning
Of Parts: 1

AISI 304 STAINLESS STEEL ROTOR				SCALE 1:2	TOLERANCE ± 0,05	WEIGHT 3,88 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No. 5
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				
REVIEWED BY	12/09/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm			USFQ
APPROVED BY			REFERENCE ASSEMBLY PLAN			

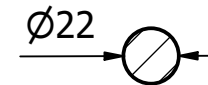


N6

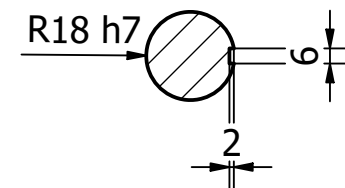
A-A (1:3)



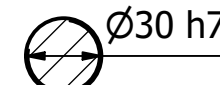
B-B (1:3)



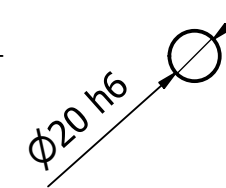
C-C (1:3)



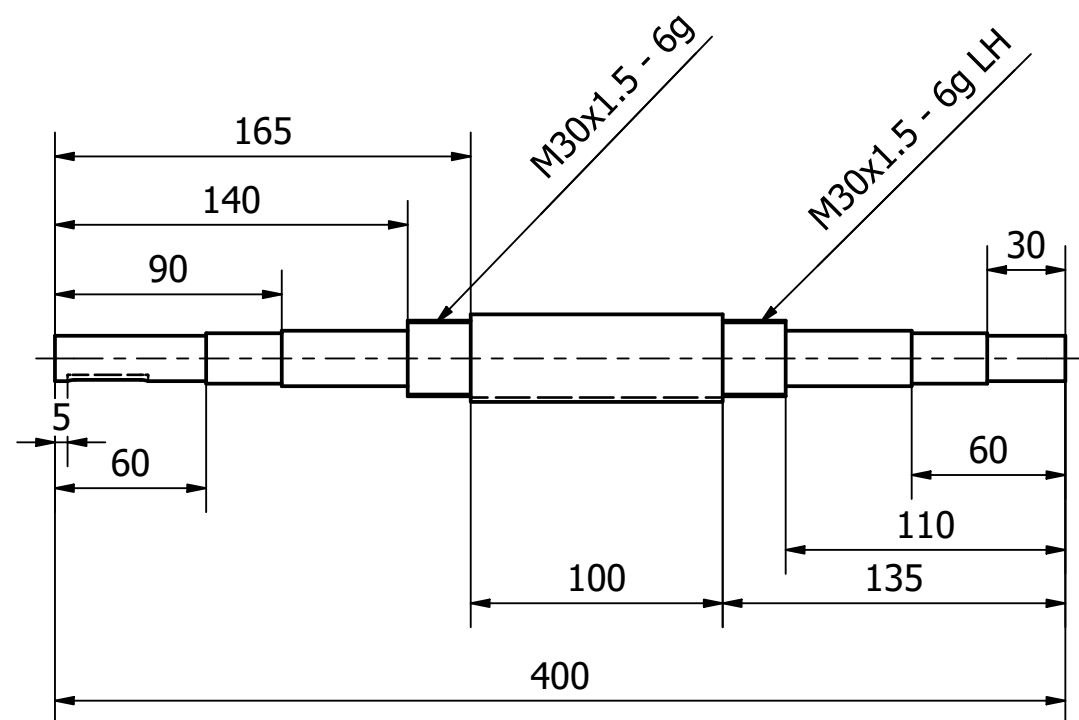
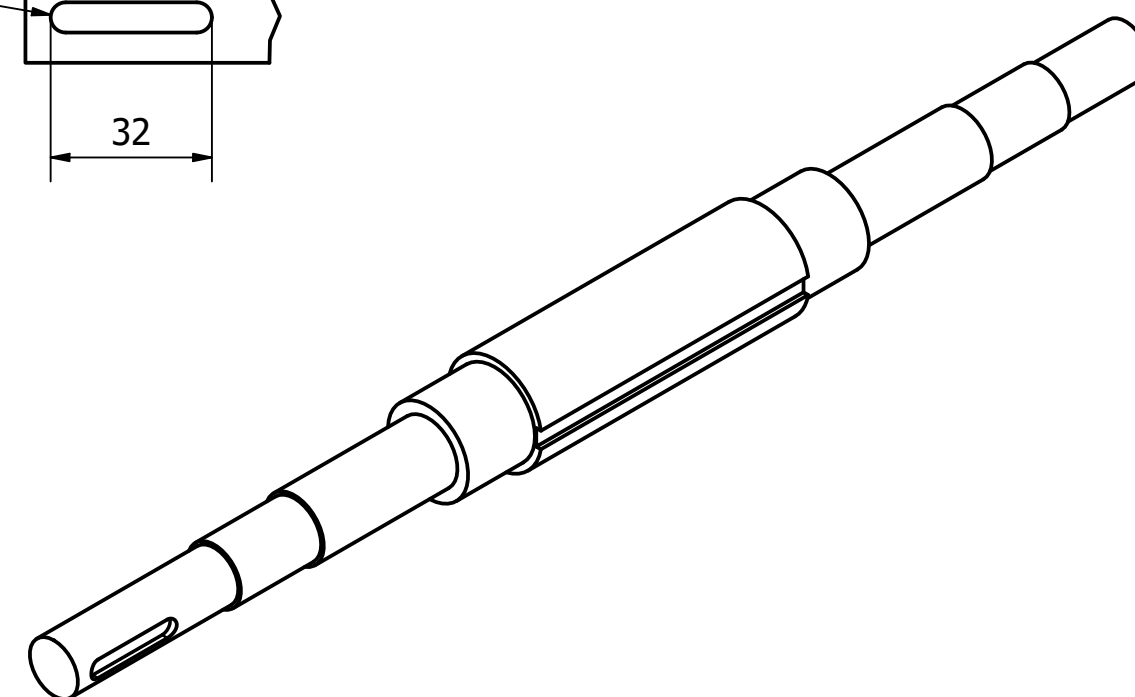
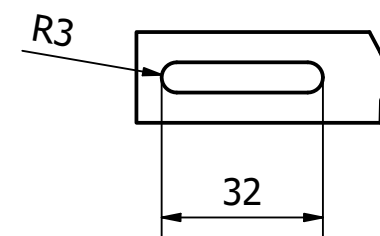
D-D (1:3)



E-E (1:3)

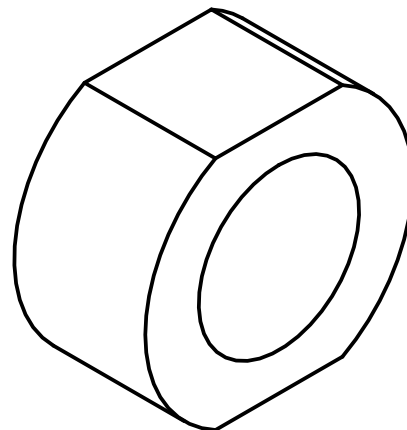
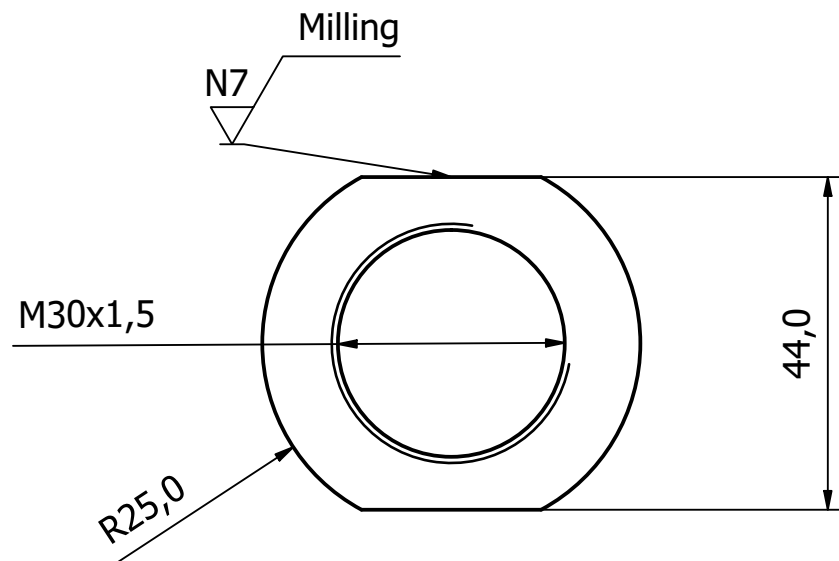


F (2:3)



Material: AISI 304 Stainless Steel
Original Dimensions: Cylinder Ø40x420
CNC Turning
CNC Milling
Of Parts: 1
Fillets: 1mm

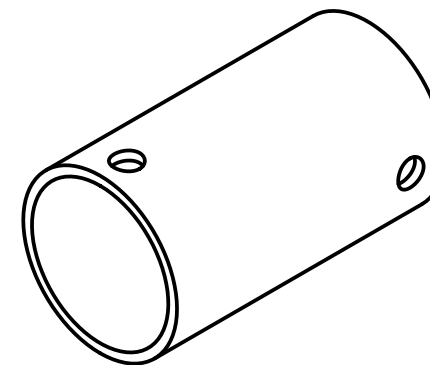
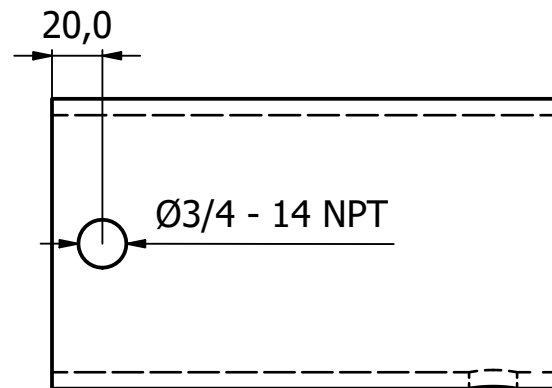
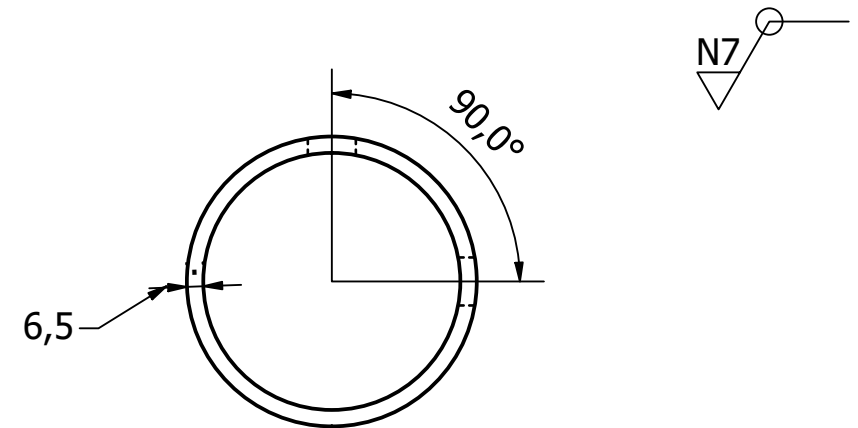
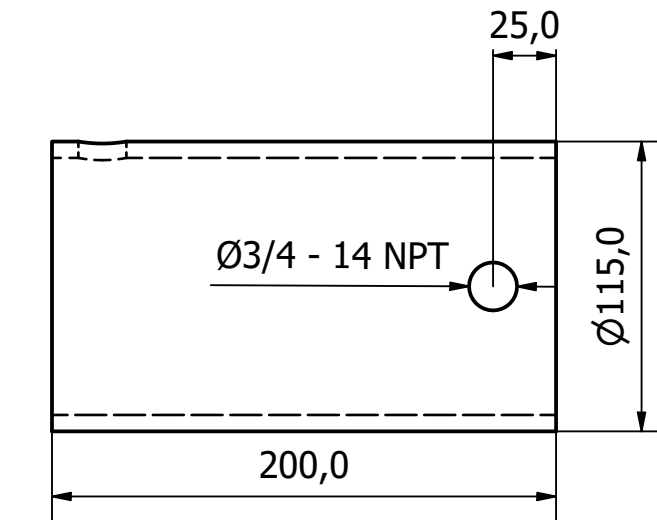
MAIN SHAFT				SCALE 1:3	TOLERANCE ± 0,015	WEIGHT 1,68 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No.
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				6
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm			USFQ
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN			



Material: AISI 304 Stainless Steel
Original Dimensions: Cylinder
 Ø50x100

CNC Turning
Of Parts: 2

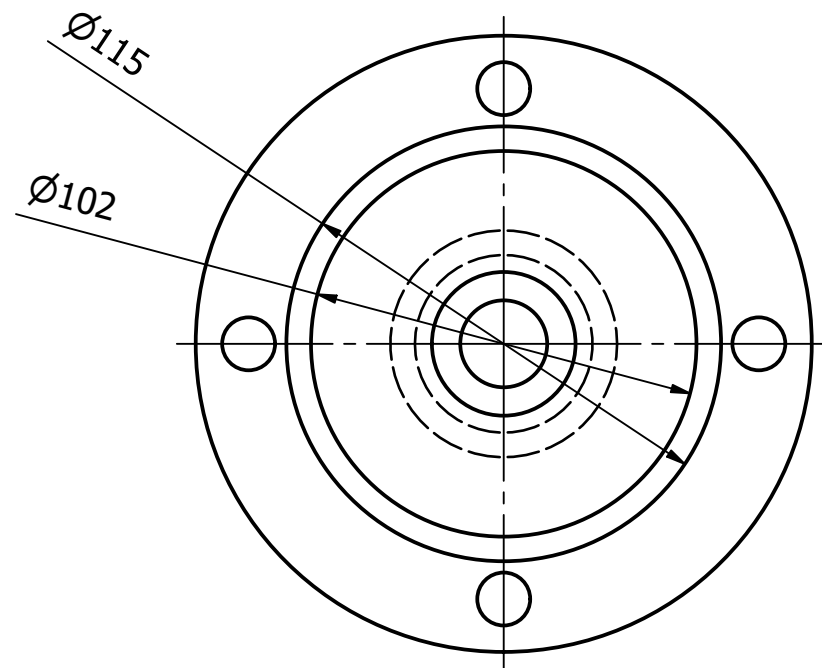
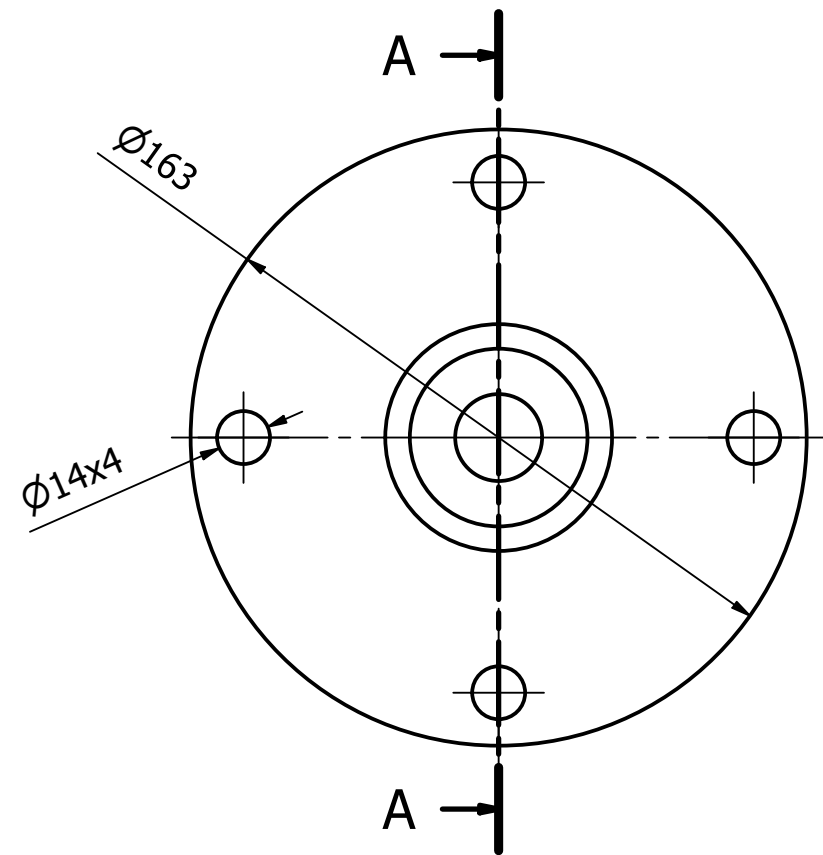
MAIN SHAFT NUT				SCALE 1:1	TOLERANCE ± 0,05	WEIGHT 0,227 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No. 7
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm			USFQ
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN			



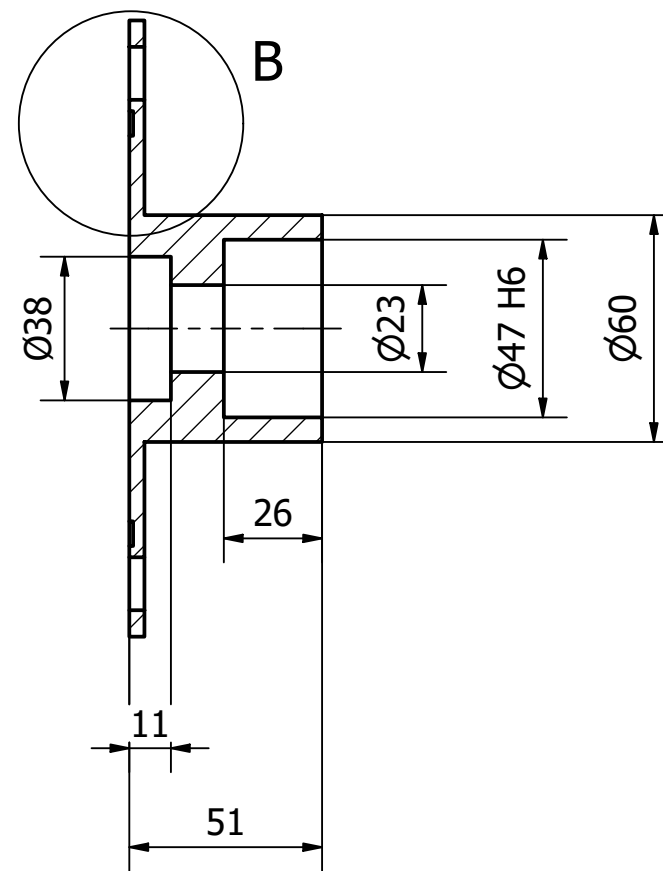
Material: AISI 304 Stainless Steel
Original Dimensions: Hollow
 Pipe 4,5in x 8in

CNC Milling
Of Parts: 1

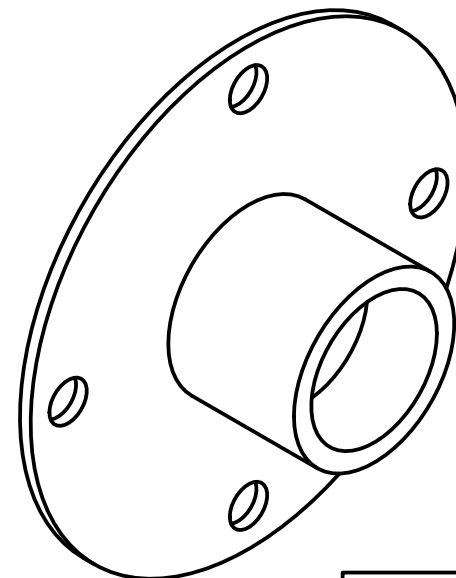
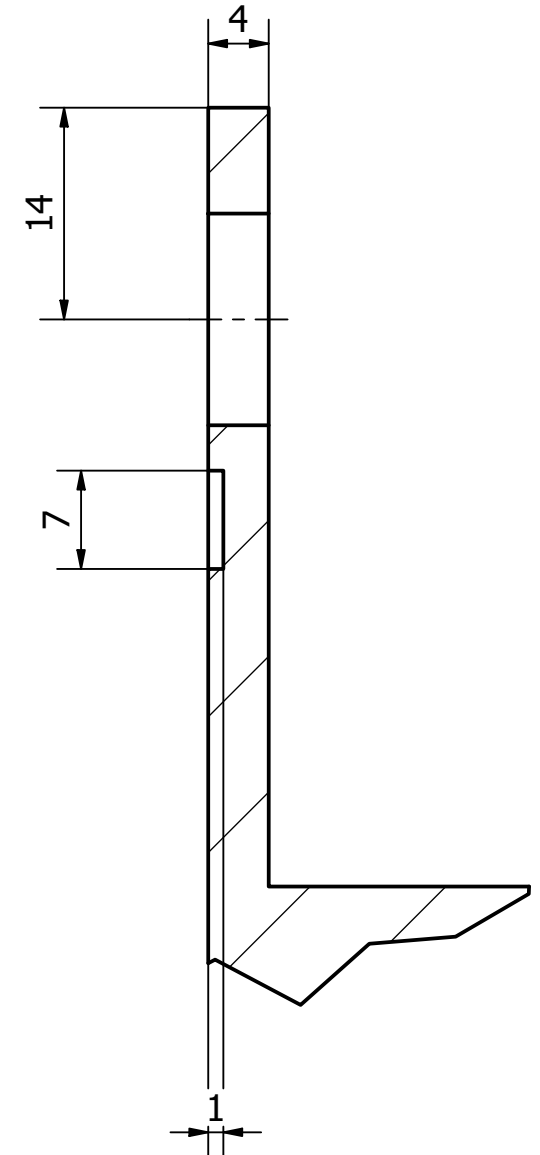
STAINLESS STEEL PIPE				SCALE 1:3	TOLERANCE ± 0,05	WEIGHT 3,5 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No. 8
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm			USFQ
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN			



A-A (1 : 2)

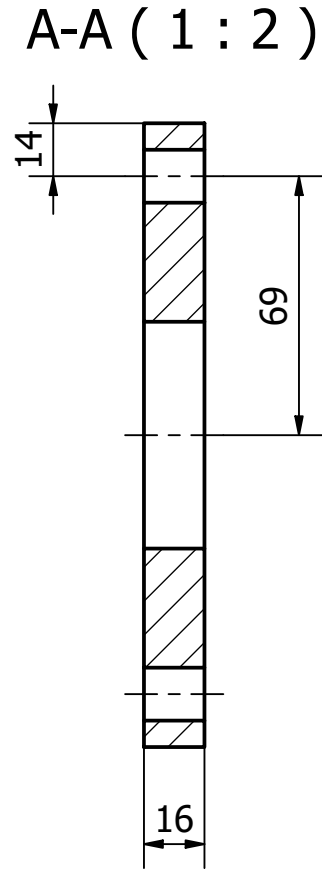
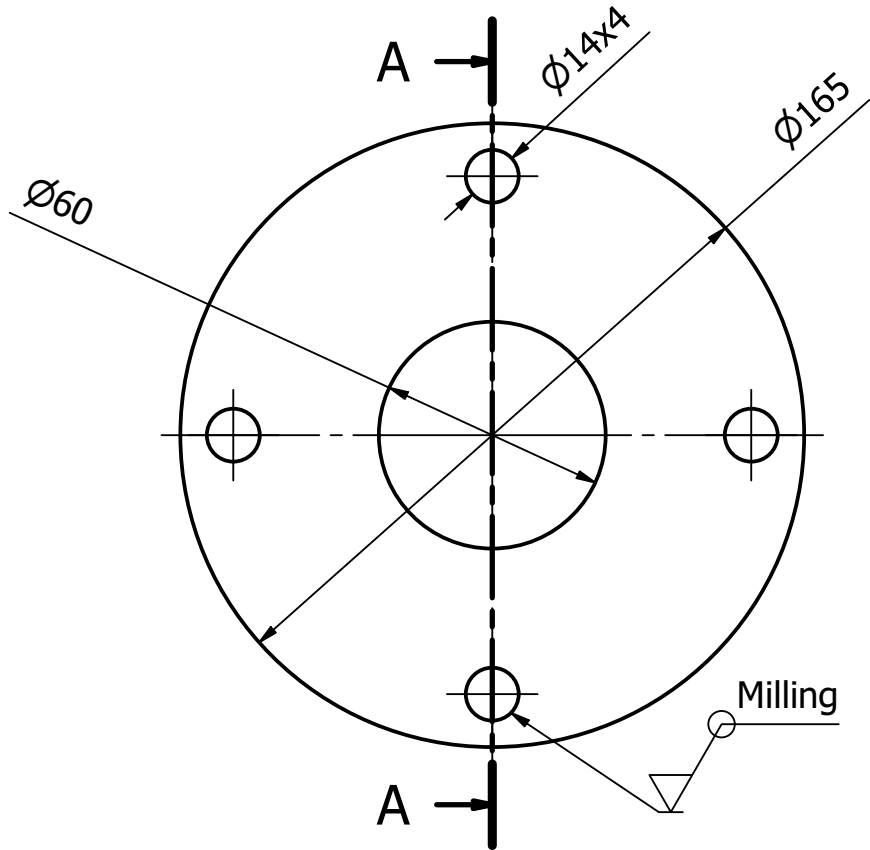


B (2 : 1)

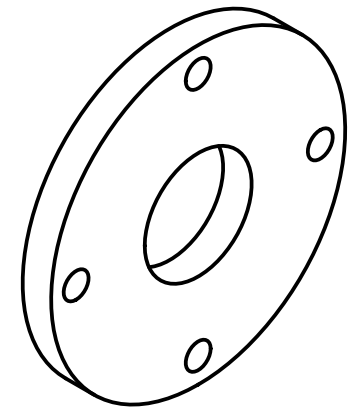


Material: AISI 304 Stainless Steel
Original Dimensions: Cylinder
 $\varnothing 180 \times 60$
CNC Turning
CNC Milling
Of Parts: 2

STAINLESS STEEL CAP SECTION				SCALE 1:2	TOLERANCE ± 0.05	WEIGHT 1,18 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR			No. 9
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando				
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm			USFQ
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN			



Scale 1:3

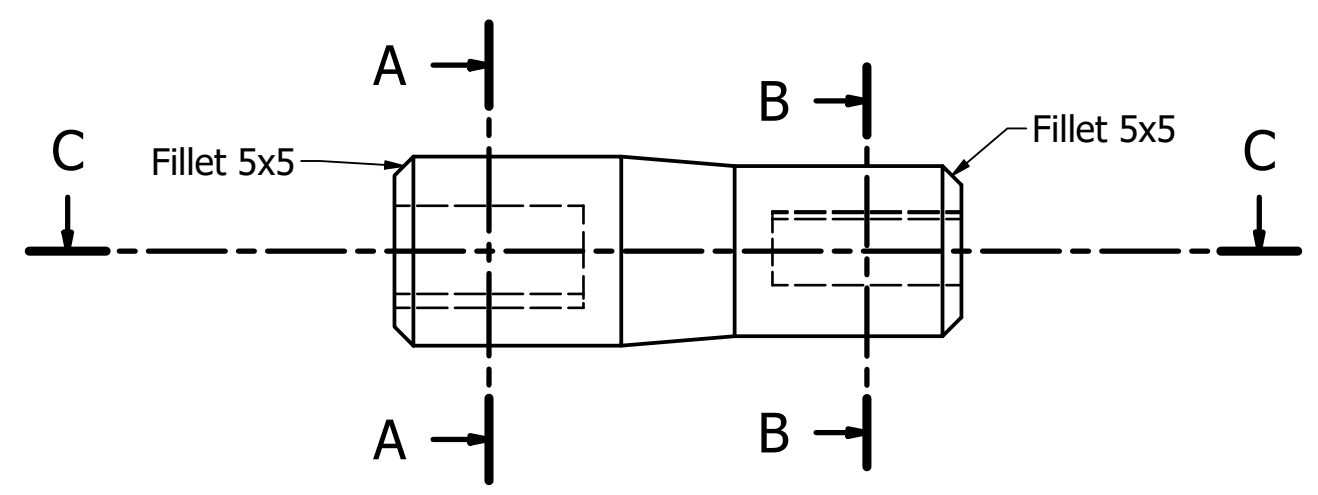
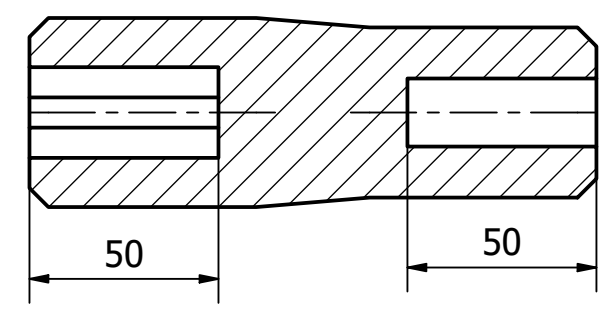


Material: ASTM A36 Steel
Original Dimensions: Cylinder
 Ø180x20

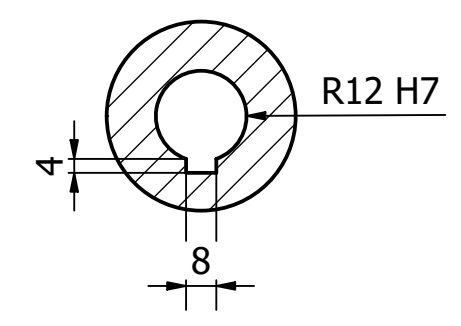
CNC Turning
Of Parts: 2

A36 STEEL CAP SECTION			SCALE 1:2	TOLERANCE ± 0,05	WEIGHT 2,05 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR		
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando			
REVIEWED BY	12/08/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm		
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN		
					No. 10
					USFQ

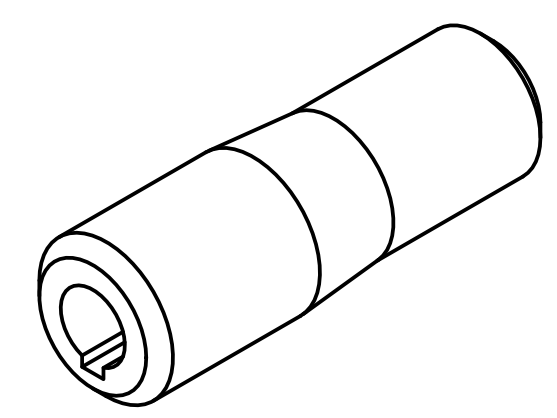
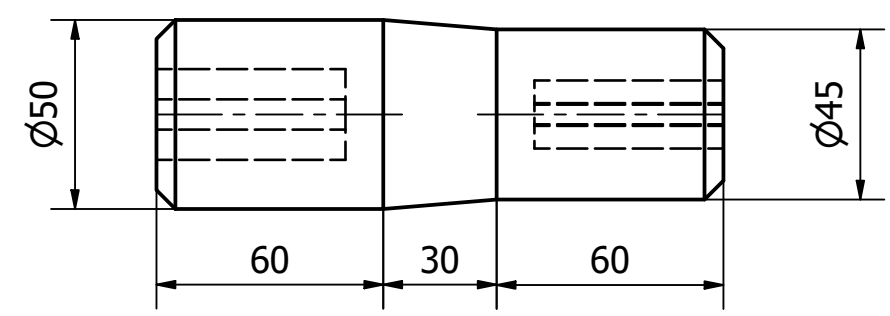
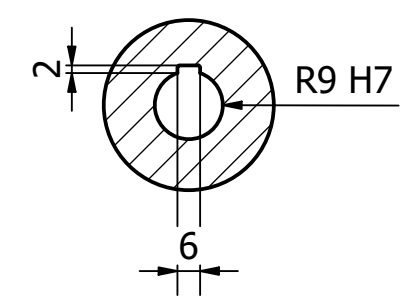
C-C (1 : 2)



A-A (1 : 2)



B-B (1 : 2)



Material:1018 Steel
Original Dimensions: Cilinder
Ø60x200
CNC Turning
Of Parts: 1

AISI 1018 STEEL COUPLING			SCALE 1:2	TOLERANCE ± 0,05	WEIGHT 1,75 kg
	DATE	NAME	CAVITATION HEAT GENERATOR		No. 11
DRAWN BY	12/05/2024	Carlos Puente Paulo León David Altamirano Jennifer Cando			
REVIEWED BY	12/09/2024	Alfredo Valarezo	UNITS mm		USFQ
APPROVED BY			REFERENCE WORKSHOP PLAN		

APÉNDICE B

Reporte de diseño

El informe de diseño detalla las dimensiones y especificaciones de cada componente y subcomponente del sistema. Esta sección proporciona las bases técnicas necesarias para comprender el diseño integral de la máquina y facilita la fase de diseño detallado. Al identificar los desafíos en el diseño y la fabricación, es posible asegurar el éxito en el desarrollo del proyecto, destacando cómo cada componente está diseñado para optimizar la cavitación y el manejo eficiente de fluidos.



Figura 39: Modelo CAD completo de la máquina

Además, este documento actúa como guía para futuras iteraciones y mejoras del diseño. Proporciona una visión clara del ensamble y de los componentes individuales, lo que permite evaluar y modificar el diseño según sea necesario, lo cual es vital para mantener la integridad del diseño a lo largo del tiempo y adaptarlo a nuevas tecnologías o requisitos operativos que puedan surgir. Esta sección se enfoca en presentar los componentes principales del cavitador, enfatizando la importancia de la precisión en la fabricación para el funcionamiento efectivo del sistema.

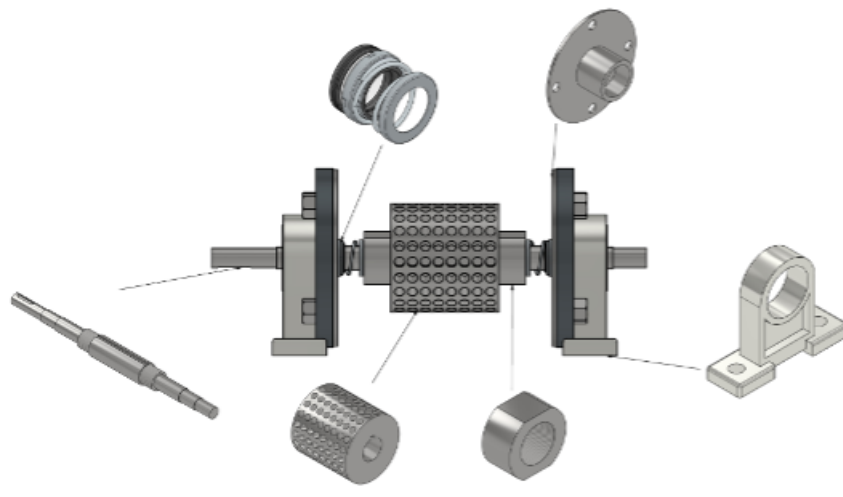


Figura 40: Componentes principales

Diseño y especificaciones de fabricación

1. Rotor

El rotor, fundamental en el proceso de cavitación, se fabrica de acero inoxidable AISI 304. Este componente se caracteriza por tener agujeros precisos, esenciales para la eficiencia del proceso de cavitación. El mecanizado CNC permite una manufactura exacta de agujeros con un diámetro de 12 mm y una profundidad de 15 mm, garantizando la precisión necesaria para las operaciones de fluidos. La correcta ejecución de estas perforaciones es crítica; cualquier desviación en las dimensiones puede afectar significativamente el rendimiento del sistema.

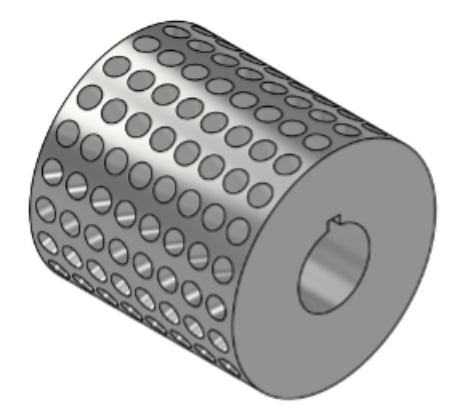


Figura 41: Rotor de acero inoxidable

2. Eje

El eje, fabricado en acero inoxidable AISI 304, es una pieza clave en la transmisión de potencia desde el motor hasta el rotor. Las operaciones de torneado y fresado CNC se emplean para garantizar que el eje tenga las dimensiones precisas y el acabado superficial necesario para un funcionamiento eficiente. La fabricación del eje involucra procesos críticos de mecanizado para asegurar que las roscas y los chaveteros estén perfectamente dimensionados y posicionados, lo que es esencial para la alineación y montaje con el rotor y los rodamientos. Los desafíos incluyen mantener la tolerancia necesaria a lo largo de todo el eje y asegurar que la superficie esté libre de defectos para evitar fallos prematuros.

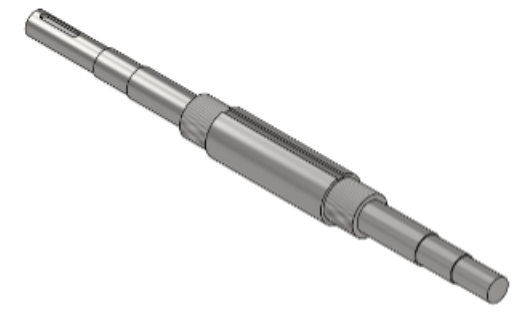


Figura 42: Eje de acero inoxidable

3. Carcasa

La carcasa, también construida de acero inoxidable AISI 304, es esencial para proteger los componentes internos y mantener la integridad del sistema de cavitación. El proceso de fabricación de la carcasa incluye cortes precisos y mecanizado para asegurar que el ajuste con el rotor sea exacto, minimizando así las pérdidas de flujo y maximizando la eficiencia. El reto en la fabricación de la carcasa radica en lograr un equilibrio entre la resistencia estructural y la precisión en las dimensiones internas, que son críticas para el correcto funcionamiento del rotor dentro de la misma.



Figura 43: Carcasa de acero inoxidable

4. Tapas

Las tapas de acero inoxidable AISI 304 juegan un papel crucial en el sellado del ensamble, asegurando que la presión necesaria para la cavitación se mantenga dentro del dispositivo. Estas son fabricadas con técnicas de corte y fresado de alta precisión para asegurar que todas las perforaciones y ranuras estén correctamente alineadas con la carcasa y el rotor. Los desafíos en la fabricación de las tapas incluyen garantizar un sellado hermético y mantener la alineación precisa con los orificios de montaje para evitar fugas y desalineaciones.

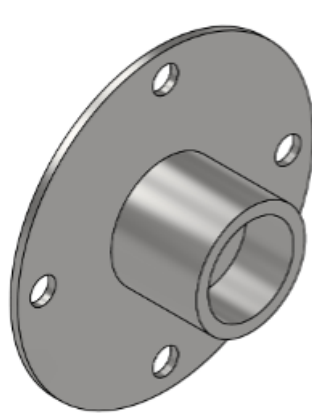


Figura 44: Tapa de acero inoxidable

Subcomponentes mecánicos

Para garantizar la funcionalidad y durabilidad del sistema, diversos subcomponentes mecánicos fueron seleccionados cuidadosamente, cada uno cumpliendo un rol específico dentro del ensamble general. Los sellos hidráulicos y anillos O-ring son esenciales para

mantener la integridad y eficiencia operativa del sistema. Se eligieron por su capacidad para soportar las altas presiones y mantener su funcionalidad bajo variadas condiciones, evitando fugas y garantizando una operación segura y continua. Los anillos O-ring, en particular, aseguran un sellado efectivo entre la carcasa y las tapas, siendo fundamentales para prevenir el escape de fluidos y mantener la presión necesaria para la cavitación.

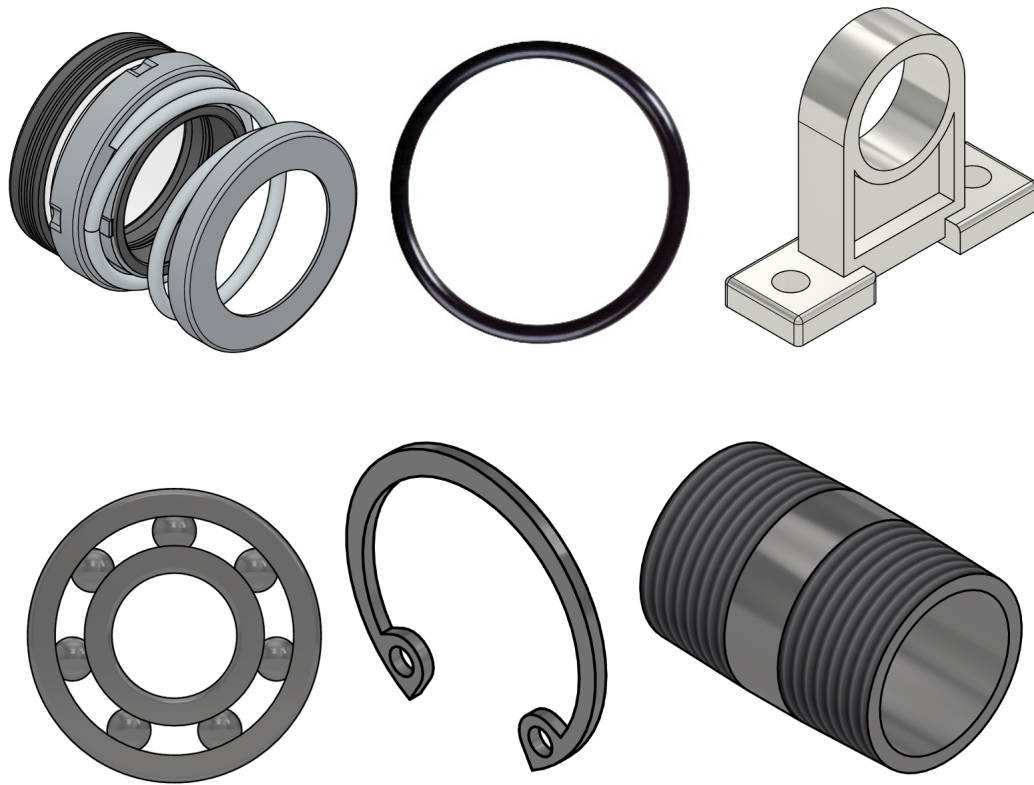


Figura 45: Subcomponentes mecánicos

La estabilidad y el soporte mecánico del eje se logran a través de rodamientos y chumaceras diseñadas para soportar cargas radiales y axiales, manteniendo el alineamiento y reduciendo el desgaste mecánico. Los clips para rodamiento son vitales para mantener los rodamientos en su lugar, evitando desplazamientos que podrían causar fallos mecánicos. Además, los neplós de 3/4 facilitan conexiones hidráulicas robustas y seguras para las entradas y salidas, diseñados para soportar las presiones específicas del sistema. Estos componentes son cruciales para el ensamble general, garantizando su operación eficiente y prolongando la vida útil del proyecto, mientras facilitan el mantenimiento y ajustes

necesarios durante la operación.

Desafíos en el diseño

Uno de los desafíos más significativos fue la gestión del espacio entre el rotor y la carcasa. Inicialmente, se dejó un espacio de 1 mm, pero las simulaciones en ANSYS demostraron que un mayor espacio podría mejorar la cavitación y reducir la fricción entre las piezas. Tras varias iteraciones, ajustando el diámetro del rotor mediante torneado adicional, se estableció un espacio final de 6 mm, lo que se comprobó que era la mejor configuración para maximizar la reducción de presión en los agujeros del rotor. Este proceso iterativo de diseño, respaldado por simulaciones detalladas, fue crucial para optimizar la cavitación dentro del dispositivo.

El proceso de perforación en acero inoxidable AISI 304 presentó retos adicionales debido a la dureza inherente del material, que exige métodos específicos de mecanizado para evitar daños tanto en las herramientas como en las piezas trabajadas. Para manejar eficazmente este desafío, se optó por un enfoque gradual donde se utilizaron brocas de varios tamaños para incrementar progresivamente el diámetro de los agujeros. Esta técnica de aumentar el tamaño de las brocas paso a paso no solo protege el material de deformaciones o fracturas indeseadas, sino que también preserva la integridad de las brocas, reduciendo significativamente la posibilidad de fallos durante el proceso. Este método meticuloso fue esencial para lograr la precisión requerida en los agujeros del rotor, asegurando que cada uno cumpliera con las especificaciones exactas para facilitar el fenómeno de cavitación optimizado. Este proceso de fabricación meticuloso, documentado en el siguiente collage de imágenes, ilustra la complejidad y la precisión requeridas en cada paso del mecanizado del rotor.



Figura 46: Procesos de fabricación y mecanizado

APÉNDICE C

Manual de usuario

Cavitation Heat Generator

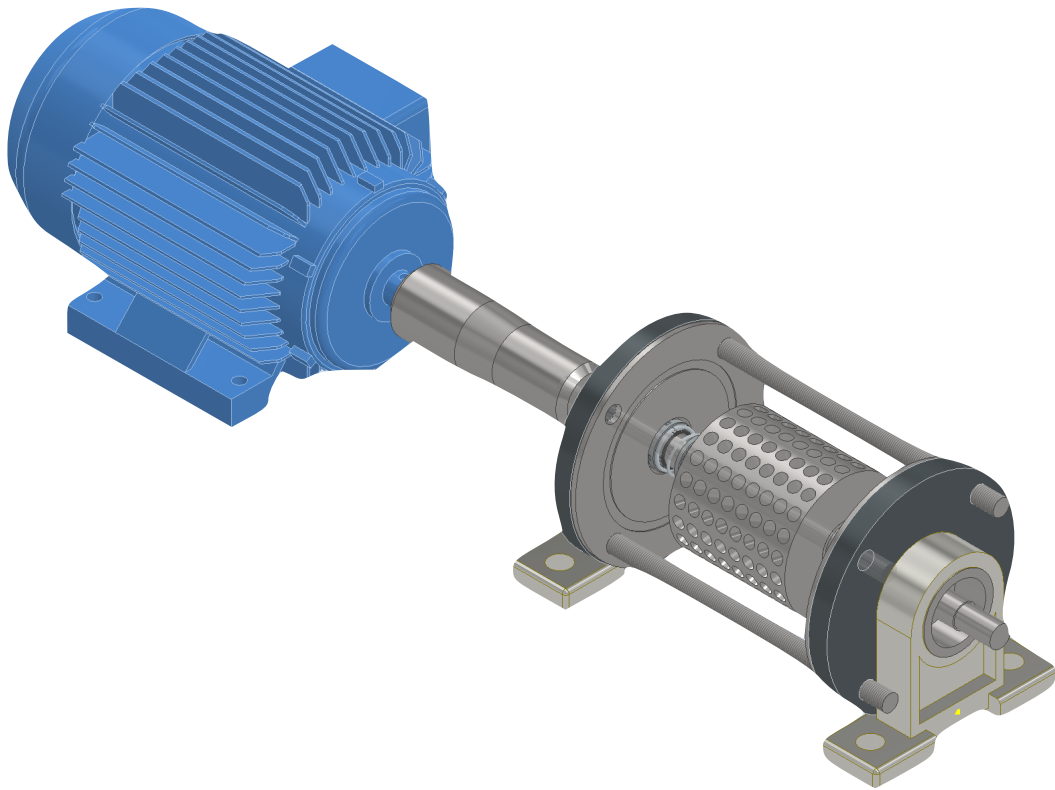
Operation and Maintenance Manual

v1.0

Language: English

December 11, 2024

Carlos Puente, David Altamirano, Paulo León, Jennifer Cando



Introduction	3
Safety and Maintenance	4
Safety Operation	4
Maintenance Instruction	4
A. Check the condition of elements such as pipes and electrical connections.	4
B. Inspect equipment like the pump, motor, and cavitator, for wear or debris.	4
C. Regularly clean components with non-corrosive products to protect materials.	4
D. Ensure the pipes are free of any debris.	4
E. Calibrate temperature and flow sensors for accurate data readings. Regularly lubricate moving parts.	4
Identified Risks and Safety Operation	5
Usage and Components	6
Parts and Assembly	6
Assembly Steps	7
Step-by-Step Operation Instructions	7
Electrical Connections	8
AC Drive main loop circuit terminals description	8
Control Circuit	9
Hydraulic Connections	11
Data Taking	12
The Control Panel	12
Electronics and Sensors Connection	12
Arduino	13
Python	13
Github Repository	15

Introduction

It is important that anyone operating the Cavitation Heat Generator reads this manual before usage. Otherwise, the designers will not be responsible for any personal injury, damage, or mechanical failure, caused by improper operation of the device.

All the information in this document is based on the latest version of the product at the time of publication. We reserve the right of modification at any moment without notice or obligation.

This manual describes basic operation and maintenance instructions of the Cavitation Heat Generator. If you have any questions, or want further information about the device, please contact the manufacturers.

Carlos Puente

carlos.puente.r@outlook.com

Jennifer Cando

jcando791@gmail.com

David Altamirano

davidaltamiranojr@gmail.com

Paulo León

leonpaulo@hotmail.com

Safety and Maintenance

Safety Operation

1. Pre-Inspection:

- A. Verify that the system components, such as the pump, valves, sensors, and others, are correctly installed and in good condition.
- B. Ensure there are no water leaks in the pipe connections or cavitator covers.
Confirm that the electrical systems are properly connected.
- C. Check the correct water level for the system.

2. Protective Equipment:

- A. Use gloves resistant to high temperatures and heat.
- B. Wear hearing protection if the system generates high noise levels.
Use non-slip safety shoes.

3. Environmental conditions:

- A. Ensure the system is connected to the correct power sources, in this case, the 220V motor and the 110V pump, with overload protection.

4. Constant Monitoring:

- A. Monitor water pressure and temperature using sensors.
- B. Observe the equipment's behavior to detect issues in time. Ensure there are no water leaks during operation.
- C. Avoid touching the cavitator surfaces, as they heat up during operation.

5. Emergency Procedure:

- A. In case of leaks or overheating, stop the system using the emergency button.

- B. If an electrical failure occurs, disconnect the system from the power source before any handling.
- C. Completely turn off the equipment when the system finishes its procedure.
Allow the system to cool down before any cleaning or inspection.
If the system will not be used for an extended period, drain all the water.

Maintenance Instruction

1. Preventive maintenance:

- A. Check the condition of elements such as pipes and electrical connections.
- B. Inspect equipment like the pump, motor, and cavitator, for wear or debris.
- C. Regularly clean components with non-corrosive products to protect materials.
- D. Ensure the pipes are free of any debris.
- E. Calibrate temperature and flow sensors for accurate data readings.
Regularly lubricate moving parts.

Corrective maintenance:

- A. Replace damaged seals and O-rings when leaks are detected.
- B. Replace any damaged components, such as the pump, sensors, motor, or valves.

- C. Ensure replacement parts are of the same type and model.
- D. Perform tests after any replacement to confirm the system operates correctly and safely.

- B. Use personal protective equipment, such as safety glasses, gloves, and non-slip footwear, during maintenance.
- C. Perform maintenance tasks as a team in case of emergencies.
- D. Record maintenance activities to keep track of completed tasks and pending ones.

Safety measures during maintenance:

- A. Disconnect equipment from the power source and drain the water before performing any maintenance.

Identified Risks and Safety Operation

Eight main risks have been identified in the system. Follow these instructions during both operation and maintenance.

Risk	Cause	Consequence	Operation	Maintenance
Shaft Breakage	Excessive load	Significant vibrations, component detachment, component breakage.	Monitor vibrations, stop the motor if irregularities are detected, maintain distance.	Replace the damaged shaft, inspect regularly, and lubricate.
Coupling Failure	Improper adjustment	Significant vibrations.	Verify coupling adjustment before operation.	Properly adjust the coupling and replace it if necessary.
Cover Failure	Improper adjustment	Water leakage.	Inspect covers and seals before operation, stop if leaks are observed.	Check and adjust bolts, nuts, or replace covers.
Misalignment	Improper adjustment	Shaft may dislodge from bearings.	Monitor vibrations, stop if unusual noises are heard.	Inspect and align bearings, change alignment method.
Operational Accident	Poor construction	Cuts, burns, crushing.	Use PPE at all times.	Replace defective components. Include first aid training.
Rotor Imbalance	Rotor imbalance or frame anchoring	Excessive vibration.	Monitor vibration, stop if excessive.	Balance the rotor, improve frame anchoring or its design.
Motor Overload	Excessive load or improper wiring	Motor damaged or unusable.	Monitor motor temperature, do not exceed the maximum.	Install thermal relays and contactors, check all connections.
Mechanical Seal Failure	Improper adjustment of seal in the shaft	Metal-to-metal contact and liquid filtration.	Check for liquid filtration at the bearing ends.	Disassemble the cavitation device to check for seals' wear or disengagement.

Note: Mechanical seals are prone to failure if assembled improperly. Make sure they are correctly attached to the shaft before closing the caps. In the seal, the rubber part must touch the ceramic piece.

Usage and Components

The cavitation heat generator, together with the 3HP electric motor, forms a high-precision system designed for applications that require efficiency and reliability. Its operation depends on proper electrical and hydraulic installation, as well as appropriate handling to ensure safety and performance. This manual provides the necessary guidelines for connecting, operating, and maintaining the cavitator under the required technical standards, minimizing risks and optimizing its performance. The implementation of this equipment must be carried out with special attention to local electrical regulations and under the supervision of technical personnel.

Parts and Assembly

Structure

The base structure of the water cavitator has been designed to ensure stability, durability, and safety during operation. This fundamental component supports the motor, auxiliary systems, and hydraulic elements, providing a robust assembly that minimizes vibrations and ensures proper alignment of the equipment. Correct installation and maintenance are essential to prevent structural damage and ensure optimal machine performance under demanding working conditions.

Cavitator

The cavitator is a device designed to generate controlled cavitation, enabling its application in various industrial and experimental processes. Its efficient operation depends on the proper adjustment of operating parameters, such as flow, pressure, and motor rotation speed, to ensure optimal results and extend the system's lifespan. Safe and precise handling of the cavitator is essential to maximize its performance and

avoid potential damage to the equipment or the working environment.

Included parts

Below is the list of parts and components included in the equipment:

- 1 Structure
- 1 Cavitator
- 3 HP electric motor
- 1 ½ HP hydraulic pump
- 1 Control panel box
- 1 Arduino
- 2 thermocouples
- 1 3/4" flow meter sensor
- 1 Storage tank
- Hoses and pipe fittings
- 2 ASTM A36 steel and AISI 304 stainless steel caps
- Assembled stainless steel shaft and rotor
- 1 stainless steel pipe (case) ø115mm x 200mm
- 2 bearings 62204 2RS
- 2 rubber o-rings ø115mm
- 2 mechanical seals
- 4 threaded shafts M14 x 310
- 4 M14 nuts and washers

All parts are made from high-quality materials to ensure durability, precision, and reliable performance under various operating conditions.

Required Tools for Assembly

- Set of combination wrenches
- Set of long sockets and ¾-inch ratchet handle
- Rubber hammer
- 90° bent E-Type snap ring pliers
- Screwdrivers

Note: The user may need some additional tools according to their own necessities. It is advised to use the right tool for the right component to avoid damage.

Assembly Steps

Cavitator Assembly

1. Place each bearing, rubber O-ring, and seal piece into the corresponding cover by applying pressure.
2. Position the mechanical seals on the shaft and rotor.
3. Place the concentric tube over the shaft.
4. Mount the covers on each side, then insert the threaded shaft into each of the holes.
5. Tighten the pressure nuts in a crisscross pattern to ensure proper alignment of the covers.
6. Place the snap rings on the shaft to secure the bearings.
7. Attach the covers to each support bearing housing.

Mounting Equipment on the Structure

1. Attach the coupling to the motor.
2. Position the motor and secure it with the base bolts.
3. Tighten the base bolts.
4. Mount the cavitator on the free side and connect it to the coupling.
5. Adjust the position of the cavitator according to the bearing housings and tighten the bolts.
6. Position the water pump, then secure and tighten the base bolts.
7. Mount the water tank onto the base.

Hydraulic Accessories Connections

1. Connect the hoses from the tank to the pump, from the pump to the cavitator inlet, and then from the cavitator outlet back to the tank.

Note: Be sure to use teflon tape and tighten the pipe connections.

Important: If you encounter any issues during assembly, consult with a professional. Do not force the parts to avoid damage.

Step-by-Step Operation Instructions

Hydraulic System

1. Verify that all parts are correctly assembled.
2. Fill the water tank.
3. Fully open the ball valve.
4. Turn on the water pump.
5. Check for any leaks in the hydraulic system.

Electrical System

1. Verify the electrical connections of the equipment.
2. Connect the power sources according to the electrical connection manual (detailed later in this manual).

Startup

1. Set the motor speed control potentiometer to zero by turning it fully counterclockwise.
2. Turn the main switch on the control panel to power on the device.
3. Wait for the indicator lights to show that the system is ready.
4. Turn the potentiometer knob clockwise until it reaches the desired limit.

Operation

1. Use the cavitator's feed valve to regulate the flow.
2. Adjust the motor speed if needed.
3. Monitor the data obtained from the sensors.

Shutdown

1. Turn the potentiometer knob counterclockwise until it reaches the limit.
2. Turn off the main switch on the control panel.
3. Turn off the water pump.
4. Close the feed valves.

Electrical Connections

To ensure the safe and efficient operation of the cavitation generator, it is important to perform the electrical connections in accordance with technical requirements and local safety standards. This equipment may require an electrical supply of either 220V or 110V, depending on the configuration of the motor and auxiliary systems.

Power Supply at 220V

- **Electric Motor:** The 3HP motor generally requires a 220V power supply to operate efficiently. It is recommended to use an appropriately sized cable, typically 10 AWG or larger, to support the motor's load. The connection must include a grounding system to protect against electrical faults.

Power Supply at 110V

- **Bomba de agua:** La bomba de agua del equipo requiere alimentación de 110V para operar eficientemente. Es necesario utilizar un cable de calibre adecuado, generalmente de 10 AWG o superior u utilizar un enchufe tipo A o tipo B.

Electrical Control and Distribution Panel

The control panel integrated into the equipment is of high quality and ensures proper control and operation through the following features:

- **Protection System:** Prevents the risk of electrical shocks.

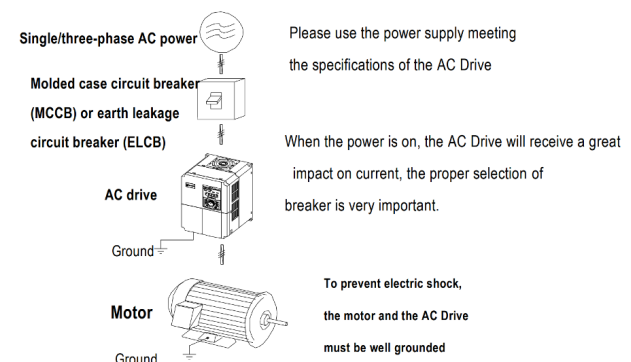
- **Control Buttons:** Facilitates the operation of the equipment by allowing adjustments to specific settings and ensuring the safe monitoring of electrical circuits.
- **Frequency Converter:** Regulates the speed of the electric motor to optimize the cavitator's performance and reduce energy consumption.

Sensors

The equipment is equipped with sensors that allow it to validate its efficiency and operation. Specifically, it includes temperature and water flow sensors:

- **Temperature Sensor:** Measures the temperature in real time and sends the data to Arduino. It is recommended not to touch the sensors to avoid noise in the final data files.
- **Flow Sensor:** Measures the water flow at the equipment's outlet. It is recommended not to touch the sensor.

Peripheral Electrical Devices and System Configuration



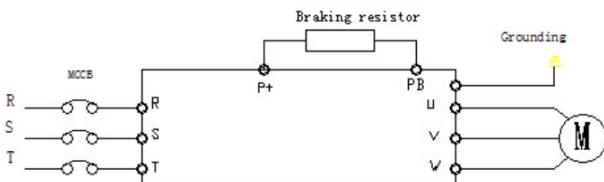
AC Drive main loop circuit terminals description

Power Circuit Terminals

P+	PB	R	S	T	U	V	W	⏏
----	----	---	---	---	---	---	---	---

Terminal mark	Name	Description
R T	Single phase power input terminal	Connecting 220V power supply
U V W	AC drive output terminal	Connecting 3 phase motor
P+ P-	DC bus positive/negative terminal	DC bus common input terminal
P+ PB	Braking resistor connecting terminal	Connecting braking resistor
PE ()	Grounding terminal	AC drive grounding terminal

Power circuit diagram



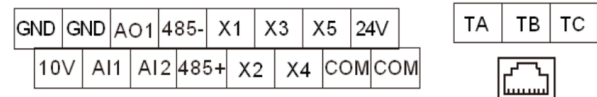
Wiring precautions

1. Input Terminals (R, T): The AC drive's input power supply terminals do not require a specific phase sequence for connection.
2. DC Bus Terminals (P+ and P-): Be cautious of residual voltage between the P+ and P- terminals even after the power has been turned off. Before handling, ensure the LED indicator is off and confirm that the measured voltage is below 36V to avoid electric shock.
3. Output Terminals (U, V, W): Capacitors or surge suppressors must not be connected to the output terminals, as this can result in severe damage to the AC drive. Long motor cables can cause electrical resonance due to distributed capacitance, potentially harming motor insulation or increasing leakage currents, which may trigger overcurrent protection on the AC drive. For motor cables exceeding 100 meters, install an AC output reactor near the AC drive to mitigate these risks.
4. Grounding (PE Terminal): The PE terminal must be securely connected to the main grounding system to ensure safety and proper functioning

of the AC drive. Failure to do so may lead to electric shock, operational malfunctions, or damage to the equipment. It is critical not to connect the PE terminal to the neutral line.

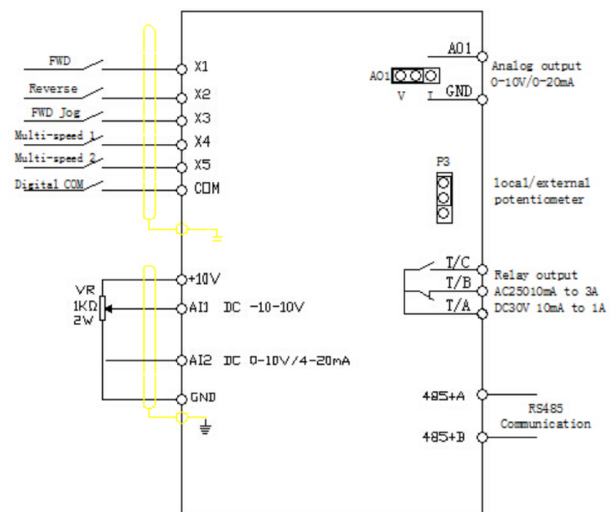
Control Circuit

Control Circuit Terminals

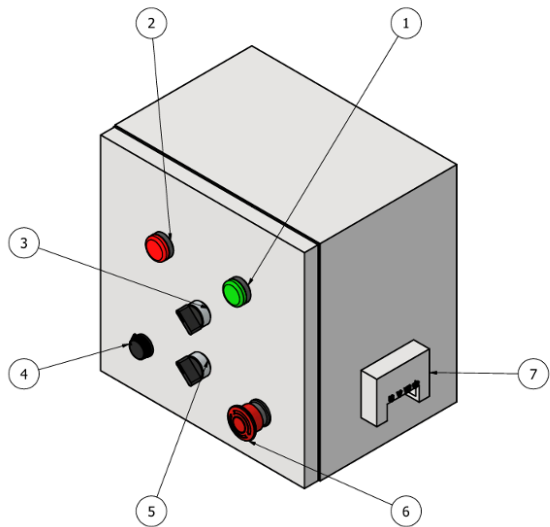


Terminal label	Terminal name	Function description
X1	COM	Multi-function input terminal 1
X2	COM	Multi-function input terminal 2
X3	COM	Multi-function input terminal 3
X4	COM	Multi-function input terminal 4
X5	COM	Multi-function input terminal 5 High speed pulse train input terminal
10V	GND	Provides 10V power supply, maximum output current: 10mA, Connect potentiometer, the resistor of potentiometer is 1-5KΩ.
24V	COM	Provide 24V power supply, maximum current is 200mA. Use for power on sensors or small relay
AI1	GND	1. Input voltage range : DC 0—10V 2. Input impedance : 22KΩ
AI2	GND	1. Input signal" DC 0-10V/4-20mA, select by jumper P1 of controller board. 2. Input impedance: Voltage signal 22KΩ, current signal 500Ω
AO1	GND	Output current or voltage signal selected by jumper P2 of controller board. Voltage signal range: 0-10V, current signal range: 0-20mA
TA TB TC	Relay output	Multiple relay output: TA and TC is normal open, TA and TB is normal close. Specification: AC250V/3A/DC30V, 1A
RS+ RS-	485 communication interface	Built in RS485 communication interface

Control Circuit Diagram



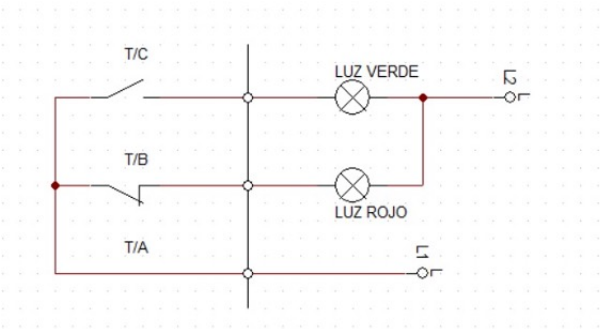
Control Board Peripherals Configuration



Item	Peripheral Name	Function Description
1	Green Pilot Light	Indicates the ON function for the Engine
2	Red Pilot Light	Indicates the OFF function for the Engine
3	Engine On/Off Selector	Turns the Cavitator Engine ON/OFF
4	Potentiometer	Regulates the Cavitator Engine Speed
5	Pump On/Off Selector	Turns the Pump ON/OFF
6	Stop Button	Emergency Stop Button for the Engine
7	Engine terminals	U, V, W and Ground Terminals for the Engine

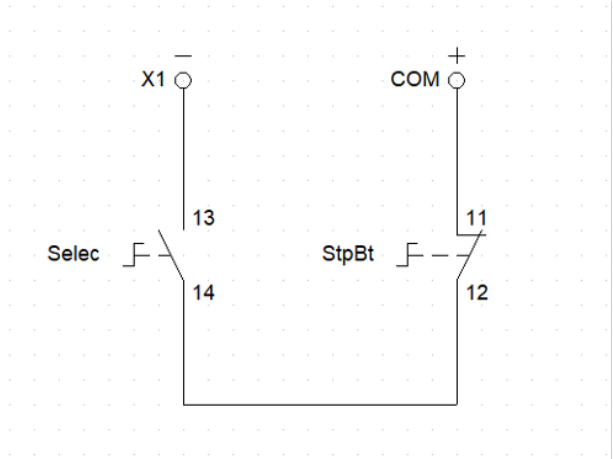
Control Board Peripherals Wiring and Circuit Configuration

Pilot Light

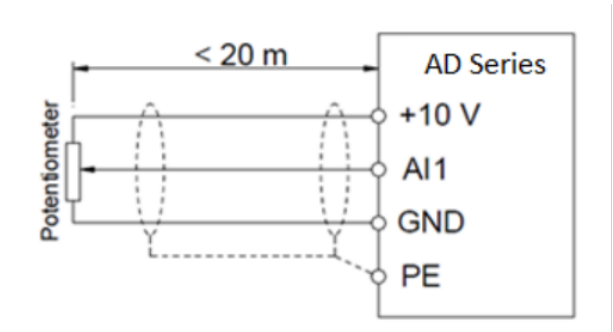


TA	TB	TC	Relay output	Multiple relay output: TA and TC is normal open, TA and TB is normal close. Specification: AC250V,3A/DC30V, 1A
----	----	----	--------------	---

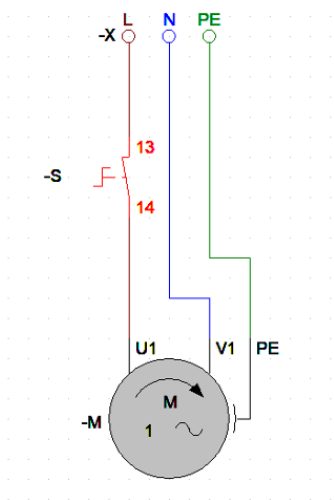
Engine ON/OFF Selector and Stop Button



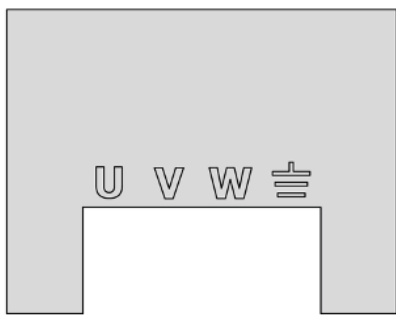
Potentiometer



Pump ON/OFF Selector



Motor Terminals



U V W	AC drive output terminal	Connecting 3 phase motor
PE ()	Grounding terminal	AC drive grounding terminal

Hydraulic Connections

It is important to remark that, independently of how the Cavitation Heat Generator is used, the only indispensable parts are the ones that come along with the device. As it was shown in the assembly figure, the inlets and outlets are included; it depends on the user which accessories are used to accommodate to individual necessities. However, the recommended size for all accessories is 3/4". A list of the parts used in product testing is listed in the table below.

Name	Quantity	Reference Image
Flexible Adapter 3/4"	7	
Threaded Tee 3/4"	1	
Straight Nipple with Nut-Type Thread 3/4"	2	
Male Threaded Plug 3/4"	1	

Bushing 1" to 3/4"	2	
Tank Adapter 3/4"	2	
Ball Valve 3/4"	1	
Threaded Union 3/4"	2	
Stainless Steel Nipple 3/4"	2	
Universal Union 3/4"	1	
90° Elbow 3/4"	1	
Hose 3/4"	3 [m]	

Note:

The majority of parts in the list are made of plastic. However, the user can use metallic parts. **The use of stainless steel is strongly recommended.** Additionally, the user can freely choose where to place the flow meter sensor. In tests, it was placed after the Cavitation Heat Generator's water outlet.

Data Taking

The Cavitation Heat Generator is equipped with a control panel that allows to visualize temperature and flow rate of the device in real time. This works with thermocouples and a flow rate sensor connected to an Arduino Uno. If the Arduino is connected to a computer equipped with Arduino IDE and Python, the data of temperatures and flow rate can be taken and stored in .csv files, along with curve plots of such data versus time. Further instructions on how to modify the Python code will be given in the next paragraphs.

For taking data, the user must have Python installed in their computer. Arduino IDE is optional, unless you want to modify the program.

The Control Panel

The control panel box for Arduino and sensors has a display and two buttons.

- The **left button** is used to alternate units in the temperature reading, between celsius and Fahrenheit.
- The **right button** is used to change between menus, alternating between temperature, flow rate, and other sensors.

Note: No matter which unit you choose to see in the display, Arduino will always send temperature in celsius and flow rate in liters per minute to the connected computer for sensor data storage. This allows to preserve consistency of units during sensor readings. If the user wishes to change units in the final data .csv files, they must either perform a unit conversion, or modify the Arduino or Python code in order to make it automatically.

Electronics and Sensors Connection

In the following tables is a detail of all the electronic components and how they are connected in the control panel, in case the

user wants to make modifications under their own personal risk.

Components in the Circuit

Component	Quantity	Description
Arduino Uno Board	1	Microcontroller
MAX6675 Thermocouple Module	2	Thermocouple amplifier module for K-type thermocouples
K-Type Thermocouple	2	Temperature sensors compatible with MAX6675
LiquidCrystal I2C Display	1	16x2 LCD with I2C interface
Pushbuttons	2	Momentary pushbuttons for user input
FS300A Flowmeter Sensor	1	Flowmeter sensor for measuring liquid flow rate
Resistors (Pull-up)	2 (optional)	10kΩ resistors for pull-up configuration of pushbuttons (if needed)
Jumper Wires	As needed	For connecting components to the Arduino
Breadboard	1 (optional)	For prototyping and organizing connections
Power Supply	1	USB-B to USB-3.0 cable or external power source for Arduino. (A data cable must be used for data taking).

Connections

Component	Subcomponent	Pin on component	Pin on Arduino
MAX6675 Thermocouple Amplifiers	Thermocouple 1	DO	10
		CS	3
		CLK	4
	Thermocouple 2	DO	5
		CS	6
		CLK	7

Component	Subcomponent	Pin on component	Pin on Arduino
LiquidCrystal Display	I2C Module	SDA	A4
		SCL	A5
		VCC	5V
		GND	GND
Pushbuttons	Button 1	Terminal 1	8
		Terminal 2	GND
	Button 2	Terminal 1	9
		Terminal 2	GND
FS300A Flowmeter Sensor	N/A	Signal	2
		VCC	5V
		GND	GND

Arduino

The Arduino code is very long, and is presented at the end of this section as a Github repository. However, it is important to remark certain important parts:

The Flow Meter Calibration Factor

Also known as the K factor, is a constant value that converts a fluid's flow rate into an electrical signal. According to the flow meter's manufacturer, it can vary as there can be unique designs and sizes. In this case, the flow meter used has a calibration factor of **5.5**, but if the user wishes to use a different flow meter for Arduino, they must consult its data sheet to check for the correct factor. Below is the piece of code that indicates the parameters for the flow meter sensor.

```

23 // Flowmeter sensor pin
24 const int flowPin = 2; // Pin connected to the FS300A flowmeter
25
26 // Flowmeter variables
27 volatile int pulseCount = 0; // Counts the number of pulses
28 float flowRate = 0.0; // Flow rate in liters per minute (L/min)
29 float totalVolume = 0.0; // Total volume in liters
30 unsigned long oldTime = 0; // Time tracking for flow rate calculation
31
32 // Calibration factor for FS300A flowmeter
33 const float calibrationFactor = 5.5;

```

Serial Print

Additionally, in order for the data to be read and stored by Python, the values of the sensors must be printed in the Serial Monitor sequentially, separated by a comma. This is done inside the *void loop*.

```

99 // Print thermocouple and flowmeter data to Serial Monitor
100 Serial.print(thermocouple1.readCelsius());
101 Serial.print(",");
102 Serial.print(thermocouple2.readCelsius());
103 Serial.print(",");
104 Serial.print(flowRate);
105 Serial.print(",");
106 Serial.println(totalVolume);

```

And the output in the Serial Monitor of Arduino IDE should look like this:

value1,value2,value3,value4

Where the two first values correspond to the temperature readings, and the rest are other sensors' readings.

Python

One of the wonders of Python is that it can do almost everything, including communicating with an Arduino board to read and store sensor data. A Python program with multiple modules has been made for this effect, which is also presented at the end of the document. Here is a detail of various considerations when connecting and reading data from Arduino.

1. The Serial Port to which Arduino is connected in the computer must always be checked. This ensures that Python will be able to detect the board. Refer to how to check the port in your Mac or Windows PC. (Usually, Arduino IDE indicates the port to which the board is connected).

```

1 import serial
2 import time
3
4 # Set up the serial connection
5 arduino_port = '/dev/cu.usbmodem141201' # Update this with your Arduino's port
6 baud_rate = 9600 # Match this with the baud rate in your Arduino sketch

```

In the figure, for example, the *USB*

Serial Port is 141201 in a Mac. This should be the only parameter to be modified manually in the `read_arduino.py` module.

2. The sensor data must be stored in lists.

```
8 # Store sensor data
9 t_inlet = []
10 t_outlet = []
11 flow_outlet = []
```

3. To choose which data to store, the sensor data is read as comma separated values.

```
31 # Read
32 t_in = data[0]
33 t_inlet.append(str(t_in))
34
35 t_out = data[1]
36 t_outlet.append(str(t_out))
37
38 f_out = data[2]
39 flow_outlet.append(str(f_out))
```

4. In the `make_dataframe.py` module, the data is stored in .csv files. The only variable to modify manually is the name of the output documents.

```
9 # Store data to csv file
10 csv_file = "temp_vs_time_2.csv"
11 df.to_csv(csv_file, index=True)
```

```
18 # Store data to csv file
19 csv_file_2 = "flow_vs_time_2.csv"
20 df2.to_csv(csv_file_2, index=True)
```

5. The `plot_data.py` module is here the data is plotted at the end of each run

of the program. This module is the one that should be executed to run the entire program, from reading the data from Arduino, to storing it in data frames, to finally plot it graphically.

How to change the temperature and flow rate units in Python

To change between units, it is important to know some conversion factors:

Parameter	Base Unit	Operation	To Get
Temperature	°C	$(C \cdot 1.8) + 32$	°F
	°C	$C + 273.15$	K
	°F	$(5/9)(F - 32)$	°C
	°F	$F + 459.67$	R
Flow Rate	L / min	$(L/min) / 60$	L / sec
	L / min	$(L/min) / 1000$	m ³ / min
	L / min	$(L/min) / 3.78541$	USgal / min
	L / min	$(L/min) / (3.78541 \cdot 60)$	USgal / sec

Knowing that Arduino will always give us temperature in degrees celsius and flow rate in liters per minute, we should refer to the following lines of Python code to change units:

- Refer to the following code lines in the `read_arduino.py` module. In this example, the temperature is being converted from degrees celsius to degrees Fahrenheit:

```
18 t_in = (data[0] * 1.8) + 32
19 t_inlet.append(str(t_in))
20
21 t_out = (data[1] * 1.8) + 32
22 t_outlet.append(str(t_out))
```

- The same is done for the flow rate. Here, liters per minute are being converted to USgal/min:

```
18         f_out = (data[2]) / 3.78541
19         flow_outlet.append(str(f_out))
```

- To correctly print values in the terminal, the following lines must also change their units:

```
18         print(f"Temperature in: {t_in} °F\n")
19         print(f"Temperature out: {t_out} °F\n")
20         print(f"Flowrate Out: {f_out} [USgal/min]\n")
```

In the *plot_data.py* module, everything that contains a unit, like [°C] or [L/min], must be changed to the unit to which you are converting the values to in the *read_arduino.py* module. This ensures that the legends on the plots will be consistent with the data shown. This manual change consists in changing *string* (text) values which do not really affect the correct function of the entire code.

Github Repository

As Arduino and Python are open source, and as we as authors want to keep the expansion of knowledge, we exhort the users of our product to contribute with recommendations and modifications to the product and the programs.

To read, check, and modify the codes, refer to this Github repository:



[Cavitation Heat Generator](#)