

**DISEÑO DE PLANTA A PEQUEÑA ESCALA PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE CAVITACIÓN
HIDRODINÁMICA**



**PAGANO, MAURO GASTÓN
RODRIGUEZ LOPEZ, GONZALO EXEQUIEL**

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2022

**DISEÑO DE PLANTA A PEQUEÑA ESCALA PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE CAVITACIÓN
HIDRODINÁMICA**

**PAGANO, MAURO GASTÓN
RODRIGUEZ LOPEZ, GONZALO EXEQUIEL**

Director: Ing. **MARCHEGANI, ARIEL**

Co-director: Ing. **AUDISIO, ORLANDO**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como
requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2022

**DISEÑO DE PLANTA A PEQUEÑA ESCALA PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE CAVITACIÓN
HIDRODINÁMICA**

**PAGANO, MAURO GASTÓN
RODRIGUEZ LOPEZ, GONZALO EXEQUIEL**

Aprobado el 18 de Noviembre de 2022

Tribunal evaluador:

- Dra. ASENSIO, Daniela.
- Ing. CAMPOS, Damián Federico.
- Ing. ROJAS, Fabián.

AGRADECIMIENTOS

Este Proyecto Integrador Profesional se lo agradecemos:

Dios por bendecirnos y ayudarnos a cumplir esta meta.

Al Ing. Ariel Marchegiani y al Ing. Orlando Audisio por ser nuestros mentores y por su compromiso para realizar este trabajo.

A los integrantes del jurado Ing. Damián Campos, Dr. Daniela Asensio y al Ing. Fabian Rojas por su colaboración y predisposición.

A los profesores Lic. Israel Funes, Dra. Maria Eugenia Parolo, Dra. Susana Martinez Stagnaro y al Ing. Esteban Luis Gonzalez por ayudarnos y brindarnos soporte en el área de química.

A la Universidad Nacional del Comahue por formarnos como profesionales.

A nuestros profesores de la carrera de Ingeniería Mecánica por guiarnos y transmitirnos sus conocimientos.

A nuestras familias por estar siempre presentes y acompañarnos en este camino.

A nuestros compañeros y amigos por su apoyo incondicional.

Y todas aquellas personas que han formado parte de nuestro crecimiento personal y profesional.

DISEÑO DE PLANTA A PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA

Autor: PAGANO, MAURO GASTÓN

Autor: RODRIGUEZ LOPEZ, GONZALO EXEQUIEL

Director: Ing. MARCHEGANI, ARIEL

Co-Director: Ing. AUDISIO, ORLANDO

Resumen

El incremento de la generación de residuos contaminantes como el aceite de cocina usado y el aumento de la demanda de combustibles diésel, son algunas de las problemáticas actuales que nos afectan como sociedad. A baja escala la producción de biodiésel se realiza mediante el proceso batch. Es decir, la producción se lleva a cabo en forma discontinua, por etapas y en distintos recipientes. Esto trae aparejado altos tiempos de producción y la utilización de equipamiento costoso. Con el objetivo de brindar una solución a estos problemas, se planteó la oportunidad de agregar valor al aceite vegetal usado transformándolo en biodiésel. En este trabajo se presenta el diseño de una planta modular de producción de biodiésel, a partir de un reactor de cavitación hidrodinámica de proceso continuo. El proceso de diseño incluyó la fabricación de un prototipo físico del reactor de cavitación para validar el proceso propuesto. Los resultados obtenidos de los ensayos permitieron validar la geometría de las cavidades del rotor y los parámetros operativos. Complementariamente, se compararon los tiempos de reacción y decantación del producto final empleando el proceso tipo batch y el de cavitación hidrodinámica, observándose una mejora sustancial al aplicarse este último proceso. Finalmente, se debe destacar que los parámetros característicos del producto final se encuentran dentro de los valores especificados por las normas internacionales de aplicación.

Palabras clave: Aceite vegetal usado, Biodiésel, Transesterificación, Cavitación hidrodinámica.

DESIGN OF A SMALL-SCALE PLANT FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL BY HYDRODYNAMIC CAVITATION

Author: PAGANO, MAURO GASTÓN

Author: RODRIGUEZ LOPEZ, GONZALO EXEQUIEL

Advisor: Ing. MARCHEGIANI, ARIEL

Co-Advisor: Ing. AUDISIO, ORLANDO

Summary

The increase in the generation of polluting waste such as used cooking oil and the increase in the demand for diesel fuels are some of the current problems that are increasing demand for diesel fuels, are some of the current problems that affect us as a society. affecting us as a society. On a small scale, biodiesel production is carried out by means of a batch process. batch process. In other words, production is carried out discontinuously, in stages and in different containers. different containers. This results in long production times and the use of expensive equipment. expensive equipment. In order to provide a solution to these problems, the opportunity to add value to the used vegetable oil by opportunity to add value to used vegetable oil by transforming it into biodiesel. In this the design of a modular biodiesel production plant is presented, based on a hydrodynamic cavitation continuous process hydrodynamic cavitation reactor. The design process included the The design process included the fabrication of a physical prototype of the cavitation reactor to validate the proposed process. The results obtained from the tests allowed validation of the rotor cavity geometry and the operating parameters. rotor cavity geometry and operating parameters. In addition, the reaction and decanting times of the final product were compared. reaction and decanting times of the final product using the batch type process and the hydrodynamic cavitation process were compared. hydrodynamic cavitation process, and a substantial improvement was observed when the latter process was applied. Finally, it should be pointed out that the characteristic parameters of the final product are within the values specified by the Finally, it should be noted that the characteristic parameters of the final product are within the values specified by the applicable international standards.

Keywords: Used vegetable oil, Biodiesel, Transesterification, Hydrodynamic cavitation.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivos generales	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	MARCO TEÓRICO	4
3.1	Biodiésel	4
3.2	Cavitación	7
3.2.1	Introducción a la cavitación	7
3.2.2	Tipos de cavitación	10
3.2.3	Cavitación hidrodinámica: formas y efectos	11
3.2.4	Reactores de cavitación	13
3.3	Normativa de referencia	15
3.4	Metodología	17
4	DEFINICIÓN DEL PROYECTO	19
4.1	Declaración de misión	19
4.2	Planificación	20
4.3	Descripción de planta de biodiésel	21
4.4	Identificación de necesidades y requerimientos	23
4.5	Especificaciones técnicas	24
5	DISEÑO CONCEPTUAL	25
5.1	Análisis funcional	25
5.2	Estructura de funciones y subfunciones	25
5.3	Alternativa solución para cada sistema o bloque	28
5.4	Criterios para evaluación y selección	31
5.5	Selección del concepto solución	32
5.6	Arquitectura del Concepto Solución Seleccionado	32

6	PROTOTIPO DEL REACTOR Y BANCO DE PRUEBAS	34
6.1	DISEÑO DE REACTOR	34
6.1.1	Prediseño y selección de componentes básicos del reactor	35
6.1.2	Modificaciones en el diseño	43
6.1.3	Versión final del reactor de cavitación	47
6.1.4	Análisis de costos del reactor	48
6.2	DISEÑO DE BANCO DE PRUEBAS	48
6.2.1	Prediseño y selección de componentes básicos del banco de prueba	49
6.2.2	Análisis de costo banco de pruebas	55
6.3	FABRICACIÓN Y MONTAJE	56
6.4	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	62
6.4.1	Puesta a punto del banco de pruebas	62
6.4.2	Materias primas y reactivos	63
6.4.3	Ensayo	64
6.4.4	Equipos e instrumentos	64
6.4.5	Análisis de muestras	64
6.4.6	Resultados	75
7	INGENIERÍA BÁSICA	77
7.1	Bloque 1: Sistema de alimentación	77
7.1.1	Componentes eléctricos	77
7.1.2	Tanque de alimentación	78
7.1.3	Tuberías y accesorios	78
7.1.4	Bombas	79
7.1.5	Válvulas	81
7.2	Bloque 2: Sistema de acondicionamiento de reactivos	81
7.2.1	Eliminación de partículas	81
7.2.2	Eliminación de agua	82
7.3	Bloque 3: Sistema de control lógico	83
7.4	Bloque 4: Sistema de dosificación	85
7.5	Bloque 5: Sistema de reacción	85
7.6	Bloque 6: Sistema de conversión de energía	85
7.7	Bloque 7: Sistema de separación	86

7.8	Bloque 8: Sistema de alarma	87
7.9	Análisis de costos	88
7.10	Resultados de ingeniería básica	93
8	CONCLUSIONES	95
9	REFERENCIAS	96
10	ANEXO I: MEMORIA DE CÁLCULO	98
10.1	Dimensionamiento de componentes eléctricos	98
10.2	Cálculo del diámetro la de tubería	99
10.3	Curva del sistema	99
10.4	Curvas de bombas	103
10.5	Corrección de curvas por efecto de viscosidad	107
10.6	Características de válvula aguja	109
10.7	Cálculos de torque de fricción del rotor, potencia y acople	110
10.8	Selección de rodamientos	111
10.9	Verificación de eje	113
10.10	Verificación de ajuste por interferencia	131
10.11	Verificación de resistencia del bastidor	134
10.12	Verificación de resonancia del bastidor	138
11	ANEXO II: SIMULACIONES	142
11.1	Simulación del rotor	142
12	ANEXO III: PLANOS	146
13	ANEXO IV: PROTOCOLO DE ENSAYOS	153

Índice de Figuras

1.1	Diagrama de procesos..	1
3.1	Transesterificación de triglicéridos para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol. (Mittelbach, 2012).	5
3.2	Porcentaje de cambio de emisiones en biodiésel para distintas mezclas. (EPA, 2002).	7
3.3	Diagrama Presión-Temperatura.	8
3.4	Diagrama Temperatura-Entropía.	8
3.5	Balance de fuerzas en una burbuja. (Ozonek, 2012).	9
3.6	Nucleación, crecimiento y colapso de una burbuja. (Science-Journals, https://www.science.org/)	10
3.7	Tipos y causas de cavitación. (Ozonek, 2012).	11
3.8	Formas de cavitación hidrodinámica. (Ozonek, 2012).	12
3.9	Clasificación de reactores de cavitación. (Ozonek, 2012).	13
3.10	Metodología adaptada (Pahl y Beitz, 2007).	18
4.1	Planta de procesamiento tipo batch.	23
5.1	Caja negra.	25
5.2	Caja transparente.	27
5.3	Concepto 1: Sistema de cavitación de placa multiorificio.	29
5.4	Placa multiorificios..	29
5.5	Concepto 2: Sistema de cavitación tipo roto-estator.	30
5.6	Cavitadores del tipo roto-estator.	30
5.7	Concepto 3: Sistema de cavitación tipo venturi.	31
5.8	Arquitectura del Concepto Solución Seleccionado..	33
6.1	Estator de PMMA.	35
6.2	Rotor de 18 agujeros.	37
6.3	Coefficiente de cavitación..	38
6.4	Distribución de presiones en el rotor..	38

6.5	Rotor de aluminio aleado de 144 agujeros, diámetro 8 <i>mm</i> y profundidad 8 <i>mm</i> .	39
6.6	Eje.	39
6.7	Motor.	40
6.8	Catalogo CZERWENY S.A Modelo A80 CP 2D.	40
6.9	Acoplamiento tipo Gummi A-20.	41
6.10	Sello mecánico EagleBurgmann modelo BT-AR.	41
6.11	Rodamiento SKF 6001.	42
6.12	Carcasa y elementos de sujeción.	42
6.13	Reactor de cavitacion hidrodinámica versión prototipo alfa.	43
6.14	Prototipos alfa de tapas.	44
6.15	Tapas versión final.	44
6.16	Prototipos alfa de rotores.	45
6.17	Soporte autocentrante P204.	45
6.18	Eje renderizado.	46
6.19	Reactor de cavitación renderizado.	47
6.20	Válvulas utilizadas.	50
6.21	Tuberías y accesorios.	50
6.22	Bomba.	51
6.23	Resistencia eléctrica.	51
6.24	Motor.	51
6.25	Elementos de transmisión.	52
6.26	Render de bastidor de banco de pruebas.	53
6.27	Vista lateral del banco de pruebas.	53
6.28	Representación en detalle del banco de pruebas.	54
6.29	Estructura bastidor.	56
6.30	Tapas mecanizadas.	57
6.31	Rotor mecanizado.	57
6.32	Despiece reactor.	58
6.33	Rotor ensamblado.	58
6.34	Armado de tuberías.	59
6.35	Rectificado de poleas.	59

6.36	Motor monofásico.	60
6.37	Calentador eléctrico.	60
6.38	Montaje de motor y reactor.	61
6.39	Banco de pruebas construido.	61
6.40	Verificación de presencia de cavitación.. . . .	62
6.41	Puesta a punto de banco de pruebas.	63
6.42	Materias primas.	63
6.43	Equipos e instrumentos de medición.	64
6.44	Muestras de productos obtenidos con aceite usado y nuevo.	65
6.45	Muestras de productos a ensayar.	65
6.46	Medición de pH.	67
6.47	Filtrado de muestras 2, 3, 7 y 9.	67
6.48	Medición de viscosidad.	68
6.49	Medición de densidad.	69
6.50	Curva de destilación de muestra N°7 (sin cavitación)..	70
6.51	Curva de destilación de muestra N°9 (con cavitación).	71
6.52	Medición de pH.	72
6.53	Destiladora..	72
6.54	Flash point.	74
6.55	Medición de cloudpoint.	74
6.56	Cromatografía.	75
6.57	Tiempos de decantación.	76
7.1	Componentes eléctricos.	78
7.2	Tanques de alimentación.	78
7.3	Tuberías y accesorios.	79
7.4	Esquema de bombas.	79
7.5	Bombas.	80
7.6	Válvulas..	81
7.7	Filtro de partículas.	82
7.8	Eliminación de agua.	82
7.9	Sistema de control lógico.	83

7.10	Diagrama de lógica de control.	84
7.11	Sistema de dosificación.	85
7.12	Dimensiones generales del bastidor.	86
7.13	Bastidor.	86
7.14	Separador electrostático.	87
7.15	Sistema de alarma.	87
7.16	Layout de ingeniería básica.	94
10.1	Esquema del sistema	100
10.2	Curva del sistema.	103
10.3	IWAKI MD-6Z.	104
10.4	IWAKI MD-20RZ.	105
10.5	IWAKI MMP11.	106
10.6	Curva de Performance IWAKI MD-6Z.. . . .	107
10.7	Curva de Performance IWAKI MD-20RZ	108
10.8	Curva de Performance IWAKI MMP11.	108
10.9	Características válvula aguja.	109
10.10	Características rodamientos UPC	111
10.11	Velocidades de rotación permitidas.	112
10.12	Ajustes recomendados del sistema agujero único.	131
10.13	Estado tensional bastidor.	134
10.14	Viga simplemente apoyada.	134
10.15	Reacciones en los apoyos.	135
10.16	Valores de fuerzas extremas.. . . .	135
10.17	Esfuerzo cortante en la viga.. . . .	135
10.18	Momento flector en la viga	136
10.19	Tubos de acero Sección Cuadrada. (Cirsoc 301).	137
10.20	Propiedades del modelo de bastidor para análisis de resonancia.	138
10.21	Detalle de cargas aplicadas al bastidor para análisis de resonancia.	138
10.22	Detalle de sujeciones de bastidor para análisis de resonancia.	138
10.23	Amplitud resultante para frecuencia modal 1.	139
10.24	Amplitud resultante para frecuencia modal 2.	139

10.25	Amplitud resultante para frecuencia modal 3.	140
10.26	Amplitud resultante para frecuencia modal 4.	140
11.1	Coefficiente de cavitación	142
11.2	Corte transversal con distribución de presiones en el rotor.	143
11.3	Corte transversal con distribución de presiones en la cavidad.	143
11.4	Corte transversal con distribución de velocidades en la cavidad.	144
11.5	Corte transversal de mallado de la cavidad.	144

Índice de Tablas

3.1	Parámetros de reacción.	5
3.2	Ventajas y desventajas del biodiésel.	6
3.3	Especificaciones técnicas del biodiésel B100.	17
4.1	Planificación de proyecto.	21
4.2	Listado de necesidades y requerimientos.	23
4.3	Listados de especificaciones técnicas.	24
5.1	Criticidad de bloques.	28
5.2	Alternativas solución para cada bloque.	28
5.3	Matriz de selección de conceptos.	32
6.1	Costo reactor.	48
6.2	Costos banco de pruebas.	55
6.3	Resultados de mediciones de pH.	66
6.4	Resultados de mediciones de densidad.	69
6.5	Tabla de resultados muestra 7 (sin cavitación).	70
6.6	Tabla de resultados muestra 9 (con cavitación).	71
7.1	Sistema de Alimentación. Componentes eléctricos.	88
7.2	Sistema de Alimentación. Componentes Hidráulicos.	88
7.3	Sistema de Alimentación. Tuberías y accesorios.	89
7.4	Sistema de Alimentación. Bombas.	89
7.5	Sistema de Alimentación. Válvulas.	90
7.6	Sistema de eliminación de partículas.	90
7.7	Sistema de eliminación de agua y precalentamiento.	91
7.8	Sistema de control lógico.	91
7.9	Sistema de conversión de energía.	92
7.10	Sistema de separación.	92
7.11	Sistema de alarmas.	92
11.1	Resultados de simulaciones fluido-dinámicas.	145

1. INTRODUCCIÓN

Parte del aceite de cocina que se utiliza en hogares y casas de comidas una vez utilizado se vierte en redes y colectoras cloacales, conductos pluviales, cursos de agua y suelos. Según lo indicado en la Ordenanza “N°12694” 2012, en la Ciudad de Neuquén en el año 2012 se generaban alrededor de 837.000 litros anuales de aceites vegetales y grasas usados que no eran gestionados correctamente. Por otra parte, hace varias décadas la Ciudad de Neuquén se encuentra en constante crecimiento, y en consecuencia el aumento de la generación de aceite vegetal usado (AVU). Por lo que resulta prioritario como sociedad abordar esta problemática con soluciones eficientes, sostenibles y sustentables.

En este proyecto se propone agregar valor al aceite vegetal usado transformándolo en biocombustible de alta calidad, más específicamente en biodiésel. Este producto se obtiene a partir de una serie de procesos que se muestran en la Figura 1.1. Adicionalmente se produce glicerina como subproducto, y en función del catalizador utilizado en la reacción de transesterificación, se podrá utilizar este componente con fines comerciales en algunas aplicaciones como por ejemplo en la agroindustria, cosmética, etc.

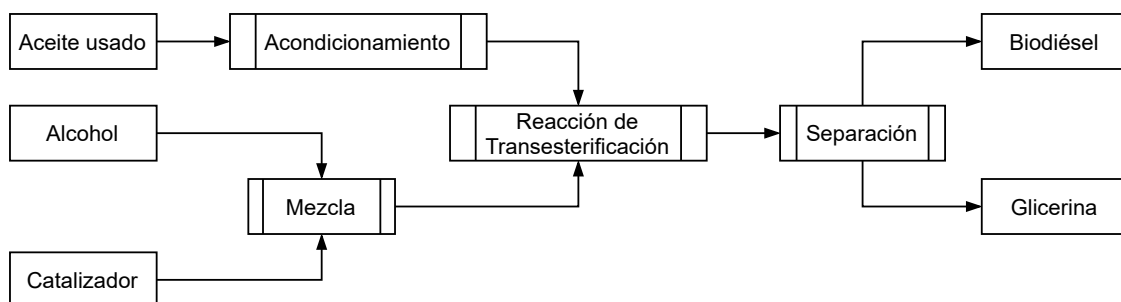


Figura 1.1. Diagrama de procesos.

El biodiésel se caracteriza por ser no tóxico, biodegradable, libre de azufre y compuestos aromáticos. Comparado con el diésel derivado del petróleo, las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, material particulado e hidrocarburos policíclicos de nitrógeno en la combustión del biodiésel son bajas. En cuanto a la huella de carbono se obtiene un "crédito ambiental" ya que el dióxido de carbono liberado por la combustión del biodiésel es aproximadamente cuatro veces menor que la combustión del diésel convencional, y a su vez, el carbono fijado por la fotosíntesis en la fase agrícola de la oleaginosa contribuye a la sostenibilidad a largo plazo.

El largo tiempo de producción, la baja eficiencia y la viabilidad económica son una serie de

problemas esenciales para tener en cuenta al diseñar y operar los sistemas de producción de biodiésel. Con estas variables en mente se propone diseñar un sistema de producción a partir del uso de un reactor de cavitación hidrodinámico, donde el líquido a procesar circula en un circuito hidráulico y es sometido a cambios de presión causado por accesorios, dispositivos o modificaciones en la geometría de la tubería produciendo el fenómeno de cavitación. Esta tecnología de reactores de cavitación hidrodinámica mejora el proceso de mezcla, incrementando la transferencia de masa y calor entre los dos reactivos para reducir el tiempo del proceso ([Ozonek, 2012](#)).

Durante el proceso de cavitación, el colapso severo de las cavidades formadas por los cambios de presión y velocidad, da como resultado la liberación de una gran cantidad de energía en un espacio muy pequeño, produciendo un aumento muy alto de la presión local ([Brennen, 2014](#)). Bajo este régimen se producen microburbujas en el seno del líquido (al disminuir la presión por debajo de la presión de vapor del líquido). Al restablecerse la presión en el sistema se produce el colapso de las cavidades. Dicho fenómeno provoca un aumento de la temperatura en el límite de las fases proporcionando la energía requerida para iniciar la reacción e incrementar la tasa de mezclado. Estos efectos acortan la velocidad de la reacción, con temperaturas más bajas y sin necesidad de utilizar agitación, obteniendo rendimientos de producción de biodiésel mayores a un 95 % ([Mittelbach, 2012](#)).

2. OBJETIVOS

A continuación se indican los objetivos generales y específicos de este proyecto.

2.1 Objetivos generales

- Realizar la ingeniería básica de una planta a pequeña escala para producir biodiésel.
- Realizar el diseño del reactor de cavitación y banco de pruebas.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar el diseño de la planta.
- Diseñar el reactor de cavitación hidrodinámica.
- Construir un prototipo físico-enfocado del reactor de cavitación.
- Diseñar y construir banco de pruebas del reactor de cavitación.
- Elaborar protocolo de ensayo.
- Realizar ensayo y evaluar bajo normas las muestras obtenidas.
- Plantear oportunidades de mejora.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales involucrados en el desarrollo del proyecto. Se comienza con una descripción general de los biocombustibles, en particular del biodiésel, donde se comenta el contexto actual en la Argentina y las cuestiones técnicas pertinentes. Luego, se expone el fenómeno de la cavitación y los parámetros de los que depende. Además, se presentan los tipos de cavitación y en particular se analiza la cavitación hidrodinámica. Seguidamente, se citan las normativas de referencia correspondientes a las especificaciones técnicas del biodiésel y se complementa el capítulo con una breve descripción de la metodología empleada en el desarrollo del proyecto.

3.1 Biodiésel

Con el paso de los años los recursos energéticos no renovables se volvieron más escasos, más caros y lamentablemente en la medida en que se van masificando, cada vez más contaminantes. Existe una necesidad latente de transitar hacia un modelo de energías menos agresivas para el medioambiente y la salud humana. Hoy en día una de las alternativas más factibles para reemplazar los combustibles fósiles son los biocombustibles.

La Argentina tuvo un gran desarrollo durante los últimos años en materia de biocombustibles, principalmente en el biodiésel de aceite de soja y en el bioetanol de caña de azúcar y de maíz. La situación de la industria local permitió posicionar al país como el principal exportador mundial y el tercer productor mundial de biodiésel en el año 2016, pero debido a las fluctuaciones en el precio de los commodities y cambios en las normativas, la capacidad instalada se encuentra actualmente subutilizada (según la Cámara Argentina de Biocombustibles).

Actualmente, el biodiésel que se produce en la industria se obtiene a partir de aceites vegetales, grasas animales y residuos de aceites de cocina. El principal inconveniente asociado al proceso productivo es el costo de adquisición de la materia prima, que puede llegar a representar entre el sesenta y el ochenta por ciento del costo total de producción para el caso de aceites vegetales vírgenes. En este punto es importante tener en cuenta la composición. Mientras mayor sea la cantidad de triglicéridos puros presente en la materia prima, más efectiva será su conversión en biodiésel y mayor su costo de adquisición.

Los aceites vegetales usados tienen un valor de adquisición relativamente bajo en comparación

con otras materias primas, pero su tasa de conversión en biodiésel es baja. Esto se debe a la poca cantidad de triglicéridos puros y a la presencia de ácidos grasos libres que dificultan la reacción.

La tecnología más común para producir biodiésel es la transesterificación con metanol (también llamada metanólisis). En esta reacción, los triglicéridos de los aceites vegetales y grasas animales reaccionan con metanol para producir FAME (ésteres metílicos de ácidos grasos) y glicerol. Generalmente, esta reacción es desencadenada por un catalizador básico o ácido. Sin embargo, los catalizadores básicos (por ejemplo, hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) son los más utilizados en la industria, porque el proceso resulta más rápido y las condiciones de reacción son moderadas (Mittelbach, 2012).

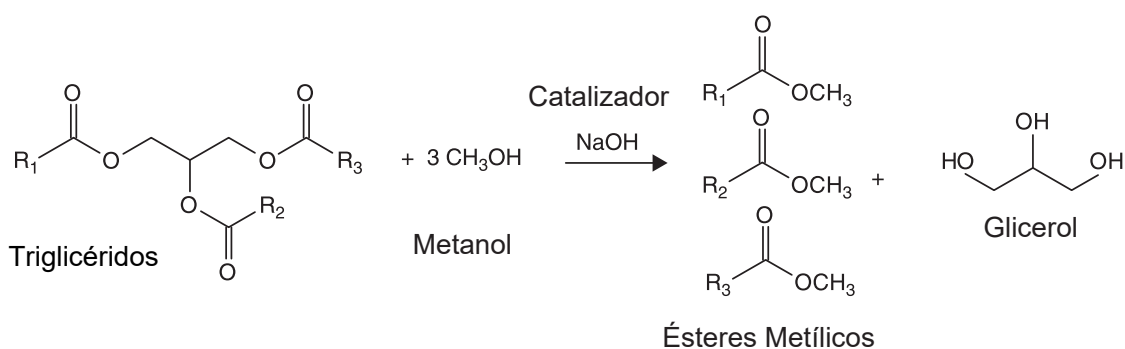


Figura 3.1. Transesterificación de triglicéridos para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol. (Mittelbach, 2012).

Para que la reacción anterior pueda ser llevada a cabo es necesario que el aceite vegetal usado tenga un porcentaje de ácidos grasos libres (FFA) inferior al 5 % en masa y que el porcentaje de agua sea inferior al 0,05 %. De lo contrario podría producirse la saponificación de los FFA con el catalizador base, lo que repercute en una mala separación de las fases de éster y glicerol, y además, la formación de jabón debido al agua presente que podría hidrolizar los triglicéridos presentes en el aceite.

Los demás parámetros que intervienen en el rendimiento de reacción son el tiempo de reacción, relación molar aceite/alcohol y el porcentaje de catalizador utilizado. Mittelbach, 2012 recomienda utilizar los siguientes parámetros con cierto rango de valores:

Tabla 3.1. Parámetros de reacción.

	Relación alcohol/aceite	Catalizador	Temperatura	Tiempo
Mín	6:1 mol/mol	1.00 %	40°C	10 min
Máx	12:1 mol/mol	2.00 %	60°C	50 min

Esto arroja como resultado que por cada cien litros de aceite vegetal usado serán necesarios

aproximadamente diez litros de alcohol y entre 100 a 200 gramos de catalizador. Obteniendo de esta manera un aproximado de 95 litros de biodiésel y 15 litros de glicerina si el rendimiento de reacción fuera del 95 %.

Por otra parte, para las materias primas que contienen más de un 5 % en peso de ácidos grasos libres, debe aplicarse un catalizador ácido y procesos complejos de acondicionamiento de la materia prima. Esto ocurre comúnmente cuando se seleccionan materias primas provenientes de grasas animales.

Al biodiésel puro obtenido se lo denomina B100 y puede ser mezclado en distintas proporciones con diésel convencional sin tener que realizar modificaciones en los motores diésel convencionales. En Argentina la normativa especifica que el contenido de biodiésel presente en el gasoil de los surtidores debe ser del 5 %, la nomenclatura correspondiente en este caso es B5. En otros países de la región la cantidad mínima de biodiésel requerida es del 10 al 20 % lo que equivale a un diésel B10 y B20 respectivamente. En el apartado 3.3 se presenta los estándares normativos para la comercialización del biodiésel en Argentina.

Las ventajas y desventajas del uso del biodiésel con respecto al diésel tradicional se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Ventajas y desventajas del biodiésel.

Ventajas	Desventajas
Menor costo de las materias primas (AVU)	Dependencia del precio de los commodities
Biodegradable y no toxico	Posibilidad de formación de depósitos
Alta lubricidad	Problemas de fluidez a bajas temperaturas
Libre de azufre y benceno	Problemas de contaminación microbológica
Disminución de emisiones de CO_x	Pérdida de rendimiento a baja temperatura
Disminución de emisiones de partículas MP	Escasa estabilidad oxidativa
Disminución de emisiones de hidrocarburos	Aumento de emisiones de NO_x

En la Figura 3.2 se muestra el porcentaje de cambio en las emisiones para distintas concentraciones de biodiésel publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2002). Una aclaración importante es que si bien hay un aumento en las emisiones de NO_x , estas puede ser reducidas mediante el empleo de aditivos y convertidores catalíticos en los caños de escape.

En el apartado 3.3 se presenta los estándares normativos para la comercialización del biodiésel en Argentina.

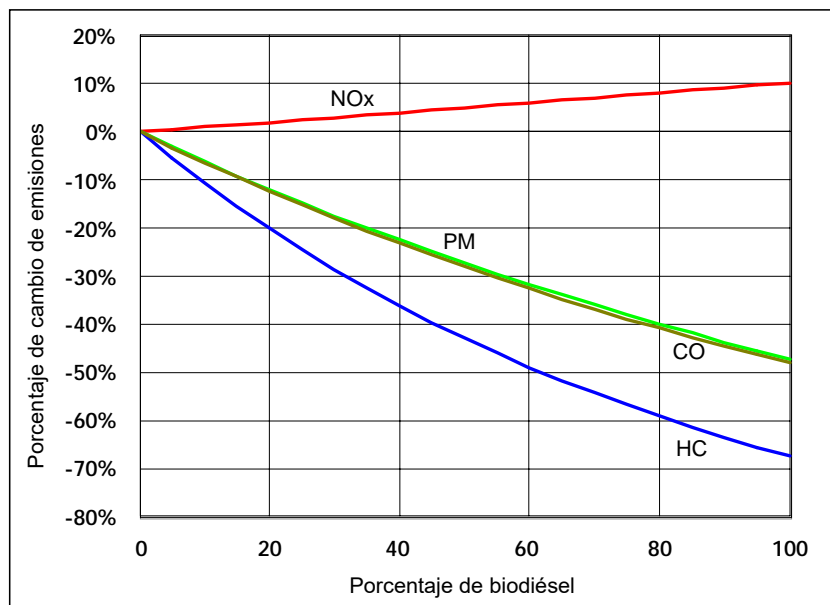


Figura 3.2. Porcentaje de cambio de emisiones en biodiésel para distintas mezclas. (EPA, 2002).

3.2 Cavitación

3.2.1 Introducción a la cavitación

La palabra cavitación proviene del latín "cavitas" que traducido al español significa cavidad. Este término fue mencionado por primera vez por Leonhard Euler en 1754 y adquirió relevancia 150 años más tarde en el diseño de alabes de turbo máquinas hidráulicas.

Por definición, la cavitación es la formación de cavidades en el seno de un líquido. Al contrario de la ebullición, donde el mecanismo impulsor viene dado por un cambio en la temperatura a presión constante, en la cavitación la fuerza impulsora esta dada por la variación en el campo de presiones. Cuando la presión desciende y es cercana a la presión de vapor, se generan burbujas esféricas que contienen vapor y gas que previamente se encontraba disuelto en el líquido. En las Figuras 3.3 y 3.4 se presentan los diagramas Presión-Temperatura (P-T) y Temperatura-Entropía (T-S). Estos diagramas muestran la existencia de una región aproximada para que el fenómeno de cavitación pueda acontecer. Sin embargo, la condición de que la presión absoluta local sea igual a la presión de vapor a la temperatura de equilibrio del sistema no asegura en todos los casos, que la cavitación se produzca realmente. La diferencia entre la presión de vapor y la presión real en el inicio de la cavitación se denomina retraso estático. En algunos casos, también existe un retraso dinámico, que se debe a fenómenos de inercia asociados al tiempo necesario para que las cavidades de vapor sean observables (Brennen, 2014).

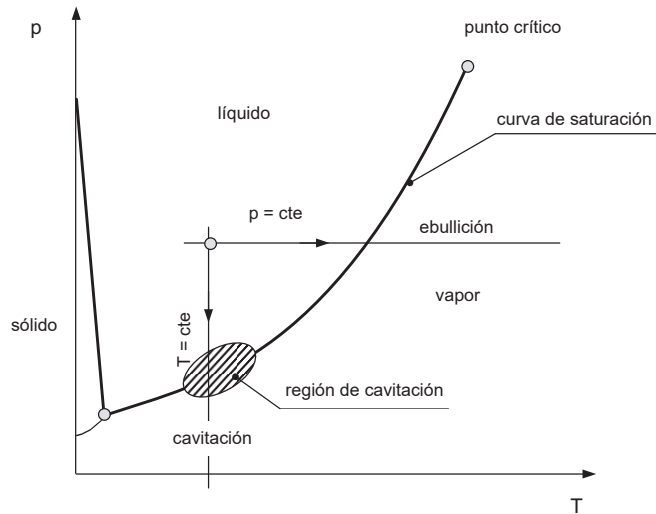


Figura 3.3. Diagrama Presión-Temperatura.

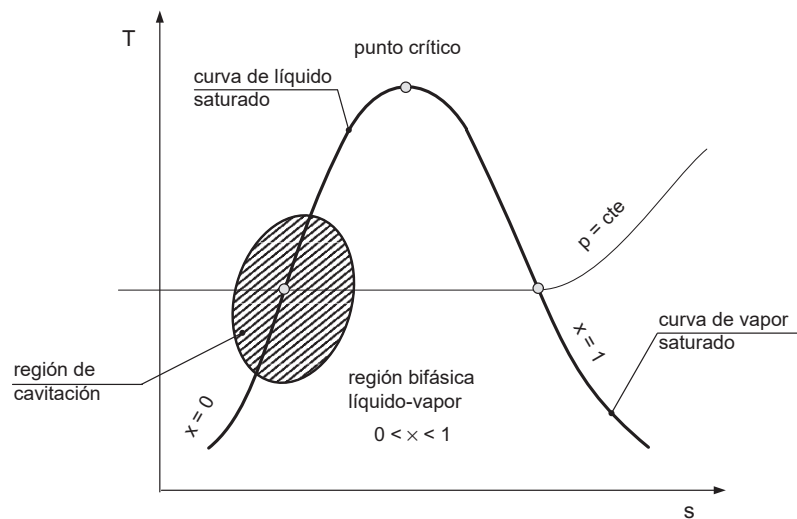


Figura 3.4. Diagrama Temperatura-Entropía.

Para el desarrollo del fenómeno de la cavitación son necesarios tres procesos, la nucleación, el crecimiento y el colapso de la cavidad. La nucleación es el proceso inicial de formación de burbujas de vapor en el cual grupos de moléculas con propiedades de la fase vapor aparecen en el líquido debido a la baja presión local la cual es cercana a la presión de vapor. El proceso de nucleación se subdivide generalmente en dos categorías: nucleación homogénea y nucleación heterogénea. La nucleación homogénea hace referencia a que el mismo líquido proporciona cavidades microscópicas que constituyen los núcleos para la formación de burbujas. Por el contrario, en la nucleación heterogénea, la base para la formación de burbujas son los sitios de nucleación que se dan en el límite entre el líquido y una pared sólida, pequeñas partículas o microburbujas llenas de gas

suspendidas en el líquido.

El segundo proceso es el crecimiento de la burbuja, que es consecuencia de la pérdida de equilibrio entre las fuerzas internas y externas en la capa límite de transición entre las fases líquida y gaseosa. El equilibrio dinámico de la burbuja no es estable, ya que la tensión superficial radial aumenta hacia el interior a medida que el tamaño de la burbuja disminuye. Si el tamaño de la burbuja es inferior a un valor crítico, ésta desaparecerá debido a un aumento de la tensión superficial. Si el tamaño de la burbuja es mayor que el valor crítico, la tensión superficial disminuye, la burbuja crece y alcanza un tamaño macroscópico hasta que las fuerzas internas y externas se equilibran. Las fuerzas internas que actúan son debido a la presión de vapor saturado del fluido y la presión de gas en la burbuja. Por la parte exterior actúan las fuerzas debidas a la tensión superficial y la fuerza externa de la presión del fluido en la superficie de la burbuja, (ver Figura 3.5).

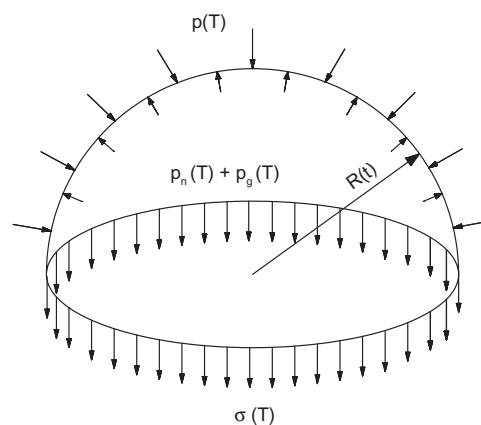


Figura 3.5. Balance de fuerzas en una burbuja. (Ozonek, 2012).

El último de los tres procesos intervinientes en la cavitación es el colapso de la burbuja. Esta fase se da en las regiones donde la presión externa aumenta considerablemente en un lapso de tiempo corto. Hay dos factores principales a tener en cuenta en el colapso de la burbuja: el tamaño máximo alcanzado por la burbuja antes de un colapso violento y la vida de la burbuja. El tamaño máximo que alcanza la burbuja determina la magnitud del pulso de presión y, por tanto, la intensidad de la cavitación que se pueda obtener en el sistema. La vida de la burbuja determina la distancia recorrida por la burbuja desde el punto donde se genera hasta el colapso (Ozonek, 2012). Se estima que las burbujas antes de la implosión tienen un radio de aproximadamente 200 micrómetros y una vida útil de menos de 200 microsegundos. La implosión genera ondas de choque de alta energía, sumado a esto, se producen micro-jets de alta velocidad, que pueden alcanzar y dañar la superficie con velocidades estimadas en más de 100 m/s. En la Figura 3.6 se muestran los tres

procesos que se desarrollan durante la cavitación.



Figura 3.6. Nucleación, crecimiento y colapso de una burbuja. (Science-Journals, <https://www.science.org/>)

3.2.2 Tipos de cavitación

Como se mencionó en la sección anterior, la fuerza impulsora que produce el fenómeno de la cavitación es la variación de un campo de presiones. De acuerdo a lo presentado por Ozonek, 2012, este cambio de presiones puede lograrse de tres formas diferentes. Estas son a través de procesos: hidrodinámicos, ultrasónicos y de suministro local de energía.

Procesos hidrodinámicos: la cavitación ocurre en el líquido que fluye durante una caída de la presión estática, causada por condiciones de flujo o influencias externas. Se produce comúnmente en canales con secciones reducidas o curvas y también como resultado del movimiento de cuerpos en un líquido como por ejemplo la hélice de un barco. Así, este tipo de cavitación aparece como resultado de una contracción local en la trayectoria del flujo del líquido o el desprendimiento de la capa límite de la superficie de cuerpos aerodinámicos.

Procesos ultrasónicos: la cavitación en tales casos es inducida por las pulsaciones dentro del líquido debido a la dispersión de ondas acústicas creadas por impacto, vibraciones de las superficies que encierran el fluido o la vibración de objetos sumergidos dentro del mismo. La separación de las moléculas líquidas y la formación de las burbujas de cavitación ocurren durante el semiciclo de expansión y su desaparición durante el semiciclo de compresión del medio de cavitación.

Procesos que suministran energía: la cavitación es significativa en pequeños volúmenes dentro del líquido, por ejemplo, por un rayo láser o una corriente de partículas elementales pesadas como protones. Ambos métodos provocan un aumento local de la energía interna del líquido, hasta un punto en el que el líquido experimenta un cambio de fase al estado gaseoso, liberando así los

gases disueltos. El efecto es crear burbujas de vapor y gases similares a las que se producen en la cavitación hidrodinámica.

En el caso de la cavitación hidrodinámica y acústica, las burbujas aparecen en el interior del líquido debido al desprendimiento local del medio bajo la influencia de grandes fuerzas de tracción, que se producen como consecuencia de una caída brusca de la presión local y que pueden ocurrir en procesos hidrodinámicos, como así también en campos ultrasónicos de alta intensidad (20 kHz a 1 MHz). La cavitación óptica y molecular es una consecuencia de la disipación local de energía. Este método de generación de cavitación permite controlar con precisión los parámetros de cavitación como el tamaño de las burbujas y su ubicación dentro del líquido. Debido a los altos costos operativos, tanto la cavitación óptica como la cavitación molecular no han encontrado aplicaciones prácticas a gran escala y son solo objeto de investigación de laboratorio. En la Figura 3.7 se resumen los tipos de cavitación y sus respectivas causas.

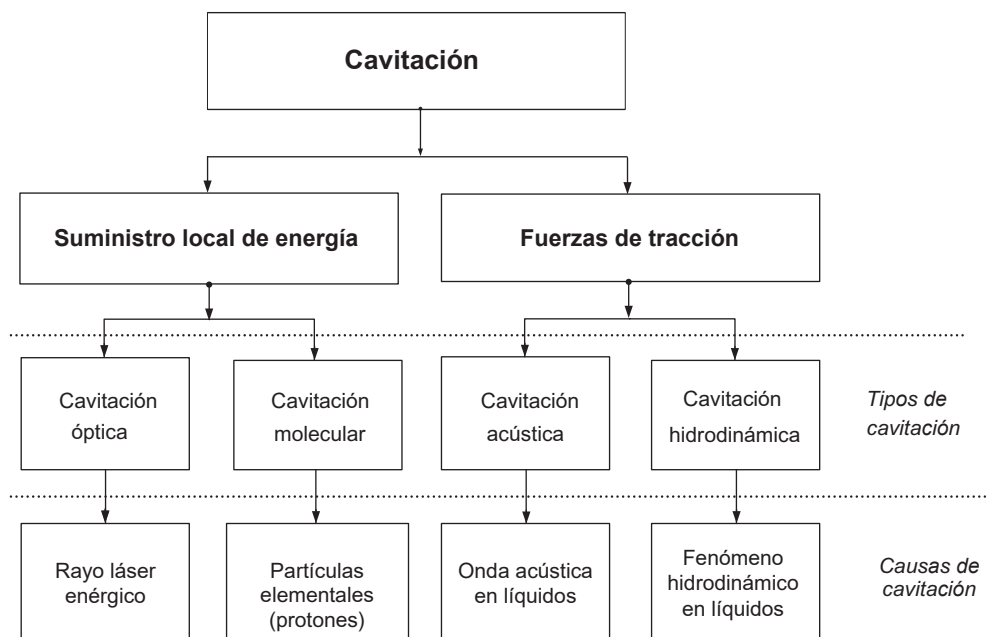


Figura 3.7. Tipos y causas de cavitación. (Ozonek, 2012).

3.2.3 Cavitación hidrodinámica: formas y efectos

En la cavitación hidrodinámica las burbujas pueden adoptar distintas configuraciones y producir importantes efectos en el medio circundante. En la Figura 3.8 se presentan las diferentes formas en las que las burbujas se manifiestan y dependiendo de la geometría y las características del flujo, los efectos serán más o menos intensos. Estos efectos pueden ser positivos o negativos

según el proceso y el medio donde ocurran.

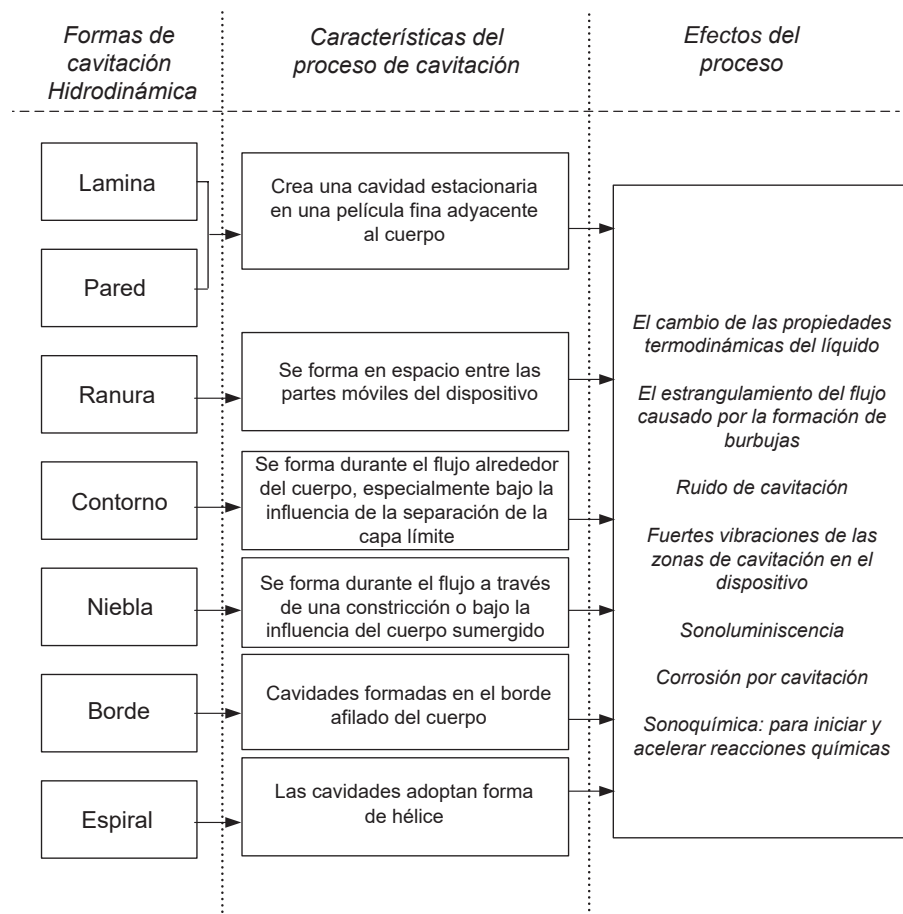


Figura 3.8. Formas de cavitación hidrodinámica. (Ozonek, 2012).

Los efectos negativos en el medio se deben a los micro-jets y a las ondas de choque derivadas de la implosión de las cavidades. Entre los efectos más comunes se encuentran la pérdida de rendimiento del sistema, la aparición de fuerzas adicionales en las estructuras sólidas, la corrosión de las paredes, la producción de ruido y vibraciones.

Sin embargo, la cavitación también se utiliza en algunos procesos industriales para concentrar la energía en pequeñas superficies y producir picos de presión elevados (Ozonek, 2012). Algunos ejemplos de estas aplicaciones positivas son: limpieza de superficies por chorros cavitantes, dispersión de partículas en un medio líquido, producción de emulsiones, aceleración de reacciones facilitadas por altas temperaturas y presiones, masaje terapéuticos y destrucción de bacterias.

En este trabajo se propone aprovechar las ventajas de la cavitación a partir del empleo de reactores hidrodinámicos en la producción de biodiésel. En la siguiente sección se presentan los distintos reactores de cavitación utilizados en la industria.

3.2.4 Reactores de cavitación

En la literatura de reactores, la falta de una clasificación para este grupo de dispositivos causa dificultades para seleccionar un equipo para un proceso tecnológico particular. Sin embargo, todos los dispositivos de cavitación conocidos se pueden dividir en tres grupos (ver Figura 3.9).

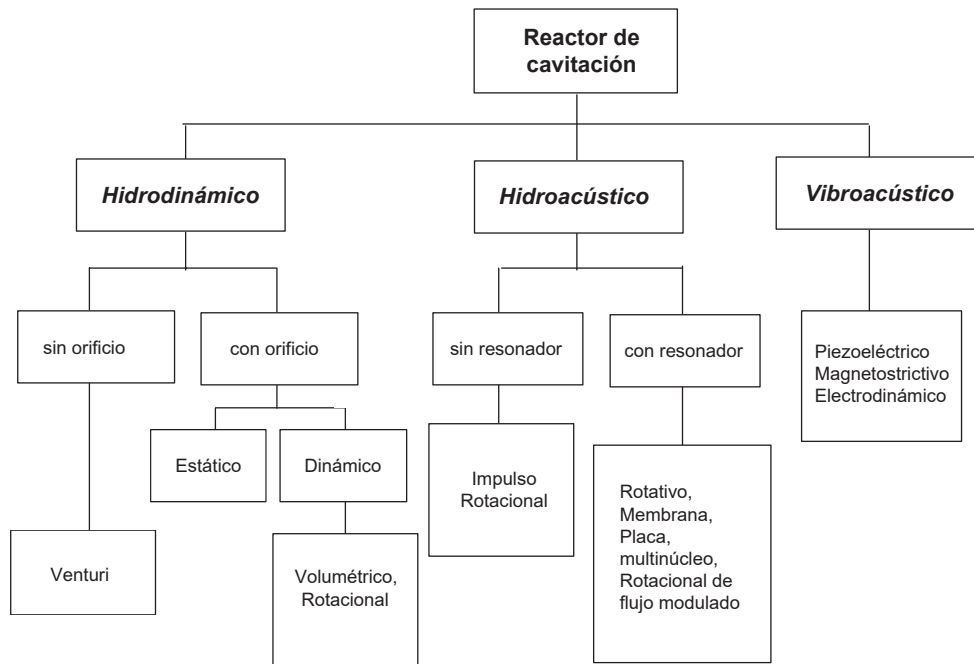


Figura 3.9. Clasificación de reactores de cavitación. (Ozonek, 2012).

El primer grupo incluye dispositivos en los que se genera cavitación como resultado de procesos hidrodinámicos asociados a un cambio brusco en la geometría del flujo. Como resultado, se produce una reducción local de la presión que favorece la cavitación hidrodinámica. El cambio en la geometría del flujo se logra seleccionando la forma apropiada para el componente. La energía necesaria para inducir la cavitación se provee a través del mismo líquido (caso estático) o con la ayuda externa de un rotor giratorio (caso dinámico). Estos dispositivos se destacan por su relativa simplicidad, confiabilidad y comodidad de uso, alto rendimiento y capacidades tecnológicas significativas.

El segundo grupo incluye dispositivos en los que se genera cavitación cambiando periódicamente la presión del líquido de forma hidroacústica. Se trata de dispositivos de flujo con transductores de ultrasonido e impulsores de varios tipos (rotativos, pulsadores y pulsadores rotativos con flujo modulado).

El tercer grupo de dispositivos de cavitación son aquellos en los que la cavitación es causa-

da por oscilaciones de presión de los transductores vibroacústicos. Estos se usan generalmente cuando se cavitan pequeñas cantidades de líquido en laboratorios. Los más comunes son los transductores piezoeléctricos. La desventaja de estos dispositivos es su bajo rendimiento y la necesidad de accesorios complejos y costosos.

Estructuralmente, los más sencillos y convenientes, en aplicaciones prácticas son los dispositivos hidrodinámicos estáticos. Estos se caracterizan por su seguridad y su larga vida útil, derivada principalmente de la ausencia de piezas móviles. Su sencilla construcción se traduce en un menor consumo de energía en comparación con otros dispositivos. Sin embargo, la tecnología más utilizada, y por tanto con mayores perspectivas de aplicación industrial, son los dispositivos de cavitación del tipo hidrodinámicos dinámicos.

Uno de los parámetros más importantes para el diseño de reactores de cavitación hidrodinámica es el **número de cavitación**. Este parámetro se define mediante variables dinámicas y no geométricas. Es decir, depende de los valores que adopten las variables en el dominio donde se desarrolla el flujo. En términos matemáticos se escribe como:

$$\sigma_c = \frac{P_f - P_v}{1/2 \cdot \rho \cdot U^2} \quad (3.1)$$

Donde P_f y P_v son la presión del fluido y de vapor, respectivamente, ρ es la densidad del medio y U es la velocidad promedio del fluido. El número de cavitación, σ_c relaciona la diferencia de presiones respecto de los efectos inerciales y mide la resistencia del flujo a la cavitación.

Cuanto mayor sea el número de cavitación, menos probable es que se produzca la cavitación. Por el contrario, cuanto más bajo sea este valor, más posibilidades hay de que el fluido entre en régimen de cavitación. De manera similar, si se está produciendo cavitación, reducir el número de cavitación disminuyendo la presión estática o aumentando la velocidad del flujo aumentará la extensión de la cavitación. En un flujo no cavitante, este parámetro adimensional no puede considerarse como un parámetro de escala. La diferencia $P_f - P_v$ de la Ec. (3.1) no tiene significado físico para un flujo monofásico, ya que no puede obtenerse por integración del gradiente de presión a lo largo de una trayectoria real. El parámetro de cavitación se convierte en un parámetro de semejanza sólo al inicio de la cavitación (Brennen, 2014). Otros parámetros que influyen en el diseño de reactores son: la geometría del dispositivo, la viscosidad, la densidad, la tensión superficial y la cantidad de gases disueltos en el fluido. Una variable adicional es el tiempo de remanencia en el reactor, que podría considerarse tanto como una variable de diseño como de ensayo.

3.3 Normativa de referencia

La secretaria de Energía y Minería de la República Argentina, en la Resolución “129” 2001, determina necesario establecer las normas que fijen las especificaciones del biodiésel para proteger a los consumidores. Los parámetros fijados en esta resolución se fundamentan en las siguientes normas:

Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods (ASTM-D6751, 2012): establece los valores internacionales que describen los requerimientos mínimos de composición y propiedades para el biodiésel.

Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend (EN-14214, 2020): detalla las especificaciones para el biodiésel mezclado con combustibles destilados. Esta especificación establece varios métodos de testeo para ser usados en la determinación de ciertas propiedades para las mezclas de biodiésel.

Las normas [EN-14214, 2020](#) y [ASTM-D6751, 2012](#) se utilizan en la industria del biocombustible a nivel mundial. Ambas normas son muy similares en cuanto a los límites de los parámetros de control. Por esta razón, en este proyecto se propone obtener un biodiésel que cumpla con los requerimientos de las dos normas en simultaneo. En la Tabla 3.3 se resumen las principales especificaciones del biodiésel B-100. Antes de analizar cada una de estas en más detalle se explican algunos de los parámetros que se miden en los ensayos establecidos por dichas normas:

- **Punto de inflamación:** el punto de inflamación es la temperatura más baja a la que el combustible emite suficiente vapor para encenderse. El biodiésel tiene un punto de inflamación elevado, normalmente superior a 150°C, mientras que el gasoil convencional tiene un punto de inflamación de 55-66°C.
 - **Punto de turbidez:** el punto de turbidez se define como la temperatura a la que el crecimiento de los cristales es lo suficientemente grande como para ser visible a simple vista. A temperaturas inferiores a el punto de turbidez, los cristales más grandes se fusionan y forman aglomeraciones que eventualmente se vuelven lo suficientemente extensas como para impedir el vertido del fluido. Es importante tener en cuenta este factor para no dañar el motor en funcionamiento a bajas temperaturas.
 - **Viscosidad:** la baja viscosidad es la principal razón por la que el biodiésel se utiliza como combustible. Altos valores de viscosidad provocan problemas de funcionamiento, como la
-

formación de depósitos en el motor. Esta propiedad física también puede utilizarse para restringir el perfil de los ácidos grasos.

- **Cenizas sulfatadas:** son unos de los compuestos que causan la disminución de la vida útil del motor. Después de la combustión se puede producir la acumulación de cenizas sulfatadas y la obstrucción de filtros e inyectores. La existencia de jabones metálicos en el biodiésel suele generar cenizas sulfatadas.
 - **Índice de cetano:** el número de cetano es uno de los principales indicadores de la calidad del diésel. Está relacionado con el tiempo de retardo al encendido que experimenta el combustible una vez que se ha inyectado en la cámara de combustión. Generalmente, los tiempos de retardo de ignición más cortos dan lugar a números de cetano más altos y viceversa. El número de cetano está influenciado por la longitud de la cadena y se obtienen valores más altos para los compuestos de cadena más larga.
 - **Glicerina libre y total:** la glicerina contribuye a la formación de depósitos en el motor durante la combustión. La glicerina es un subproducto obtenido en la reacción de transesterificación y puede causar depósitos de carbono en las puntas de los inyectores de combustible y en los anillos de los pistones. También puede influir en la operatividad a baja temperatura y en la viscosidad cinemática.
 - **Número de acidez:** es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para neutralizar el producto en un gramo de muestra de ensayo de biodiésel. Este valor da una idea del exceso de ácidos grasos libres.
 - **Estabilidad a la oxidación:** indica el grado de oxidación y el potencial de reaccionar con el aire. El biodiésel con tiempo de oxidación mayor es más estable, mientras que los que tienen valores menores pueden requerir el agregado de antioxidantes. Los productos que se forman por la oxidación de los lípidos pueden incluir aldehídos, ácidos grasos de cadena más corta, especies oxigenadas (como las cetonas) y polímeros. Esta degradación oxidativa tiene un impacto negativo en la acidez y en la viscosidad cinemática.
 - **Agua y sedimentos:** son una fuente importante de contaminación del combustible. El agua en el biodiésel provoca tres problemas graves: la corrosión de los componentes del sistema de combustible del motor, el fomento del crecimiento microbiano y la hidrólisis del FAME (Esteres Metílicos de Ácidos Grasos).
-

- **Contenido de alcohol:** si el biodiésel está contaminado con alcohol, no cumplirá las especificaciones de punto de inflamación mínimo. La contaminación por metanol o etanol suele ser el resultado de una purificación insuficiente del biodiésel tras la reacción de transesterificación.

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del biodiésel B100.

Especificaciones	Unidades	ASTM D6751		EN 14214	
		Método ASTM	Limites	Método EN / ISO	Limites
Punto de inflamación	$^{\circ}C$	D93	130 <i>min</i>	3679	101 <i>min</i>
Punto de turbidez	$^{\circ}C$	D2500	-3 a -12	-	-
Punto de fluidez	$^{\circ}C$	D97	-15 a -16	-	-
Número de cetano	-	D613	47 <i>min</i>	5165	51 <i>min</i>
Densidad a 15 $^{\circ}C$	kg/m^3	D1298	880	3675	860 a 900
Viscosidad cinemática a 40 $^{\circ}C$	mm^2/s	D445	1.9 a 6	3104	3.5 a 5
Número de acidez	$mg KOH/g$	D664	0.5 <i>max</i>	14104	0.5 <i>max</i>
Agua y sedimentos	-	D2709	0.005 <i>vol%</i>	12937	500 mg/kg
Glicerina libre	<i>% en masa</i>	D6584	0.02 <i>max</i>	14016	0.02 <i>max</i>
Glicerina total	<i>% en masa</i>	D6548	0.24	14105	0.25
Ceniza sulfatada	<i>% en masa</i>	D874	0.002 <i>max</i>	3987	0.02 <i>max</i>
Estabilidad a la oxidación a 110 $^{\circ}C$	<i>horas</i>	D6751	3	14112	6
Contenido de alcohol	<i>% en masa</i>	D93	0.2	14110	0.01 a 0.5

3.4 Metodología

Para abordar este proyecto se propone seguir un enfoque sistemático que permita disponer de un método adecuado para el desarrollo de una estructura modular. La metodología proyectual que se sigue en este trabajo es la de [Pahl y Beitz, 2007](#), ya que permite progresar desde lo general y abstracto a lo particular y concreto (ver Figura 3.10). Así mismo, se incorporan herramientas puntuales de otros autores como [Ulrich y Eppinger, 2009](#). En el siguiente esquema se muestra la metodología adaptada para este proyecto.

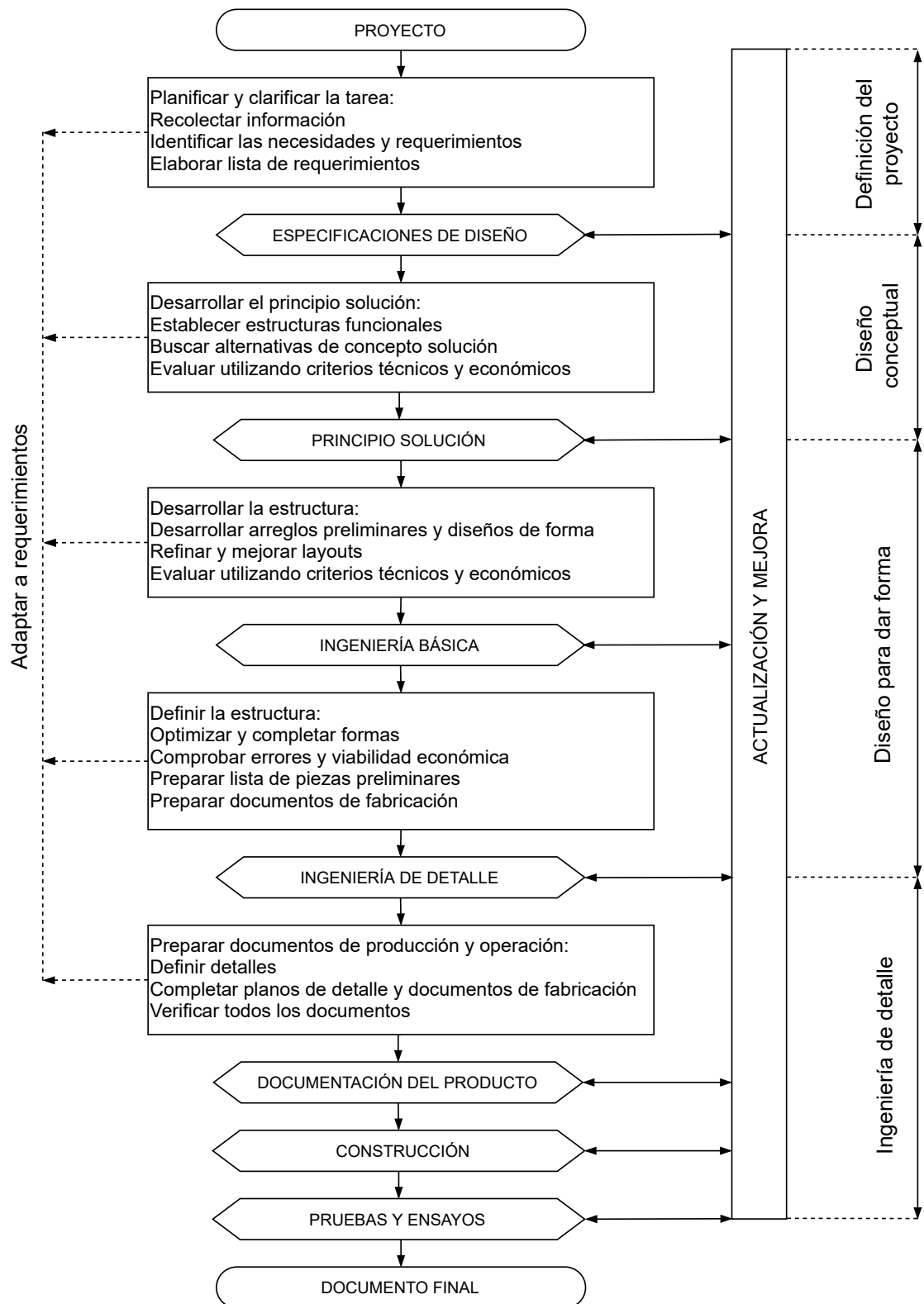


Figura 3.10. Metodología adaptada (Pahl y Beitz, 2007).

4. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

En esta etapa, se planifican y clarifican las tareas a realizar. Para esto es necesario elaborar la declaración de misión del proyecto, donde se especifica el objetivo comercial de la instalación, las suposiciones básicas y las limitaciones del proyecto. Seguidamente, se presenta la planificación de las actividades propuestas. El capítulo finaliza con la descripción de los requerimientos técnicos y la definición de las especificaciones técnicas objetivo.

4.1 Declaración de misión

Descripción del producto:

- Diseño de planta a pequeña escala para la producción de biodiésel a partir de cavitación hidrodinámica.

Propuesta de valor:

- Patente de libre acceso.
- Reducción del impacto ambiental.
- Reutilización de aceites desechables.
- Fácil uso.
- Fácil mantenimiento.

Objetivos clave de negocio:

- Ajustar el desarrollo del proyecto a un plazo de ocho meses.
- Brindar una solución a la demanda energética de combustibles.
- Dar respuesta a la generación de residuos líquidos contaminantes.

Mercado primario:

- Productores agropecuarios locales.
- Refinarías locales.

- Gobierno Nacional, Provincial y Municipal.

Mercado secundario:

- Productores particulares.

Suposiciones y restricciones:

- Utilización de materiales disponibles en el mercado nacional.
- Minimizar la dependencia insumos importados.
- Fuente de energía eléctrica.
- Fabricación nacional.

Involucrados:

- Centros de acopio de residuos.
- Productores de combustible locales.
- Productores agropecuarios.
- Universidad Nacional del Comahue.
- Proveedores nacionales.
- Fabricantes nacionales.

4.2 Planificación

Las actividades propuestas para el desarrollo de este trabajo son las siguientes:

- **Tarea A:** recopilar información acerca de los procesos productivos de biodiésel y de los efectos de la cavitación hidrodinámica.
 - **Tarea B:** realizar capacitaciones con especialistas y reuniones con productores de biodiésel con el fin de identificar necesidades y requerimientos.
 - **Tarea C:** establecer las estructuras de las funciones requeridas para el diseño de la planta.
 - **Tarea D:** buscar principios de solución para bloques críticos.
-

- **Tarea E:** combinar y confirmar en variantes de conceptos para evaluar con criterios técnicos y económicos para luego seleccionar el concepto más promisorio.
- **Tarea F:** diseñar y seleccionar los elementos requeridos para la construcción de una prototipo físico enfocado para validar el bloque crítico.
- **Tarea G:** fabricar los componentes ad-hoc para el prototipo.
- **Tarea H:** ensamblar reactor de cavitación y banco de pruebas.
- **Tarea I:** realizar pruebas y ensayos.
- **Tarea J:** analizar las muestras obtenidas.
- **Tarea K:** desarrollar la ingeniería básica de la planta.
- **Tarea L:** elaborar documento final.

Tabla 4.1. Planificación de proyecto.

Tareas	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8
A	■							
B	■							
C	■	■						
D		■	■					
E			■	■				
F				■	■			
G				■	■			
H					■	■		
I						■		
J						■	■	
K							■	
L								■

4.3 Descripción de planta de biodiésel

Generalmente la producción de biodiésel consta de una serie de procesos que buscan transformar el aceite vegetal en combustible a través de la reacción de transesterificación. Este combustible se obtiene a partir de una serie de procesos que se muestran en la Figura 1.1.

A baja escala la producción se realiza mediante el proceso batch. Es decir, la producción se lleva a cabo en forma discontinua por etapas y en distintos recipientes, uno para cada proceso, por lo que su aptitud es relevante para pequeñas producciones. Sumado a esto, se debe tener en cuenta que los procesos batch no mantienen una calidad constante de los productos entre un lote a otro, y son difícilmente automatizables. Estas dificultades traen aparejado el aumento de los costos de inversión y de los costos operativos. El alto costo de inversión inicial es debido principalmente a que los recipientes para cada proceso deben contener mínimamente el volumen de procesamiento y estar constituidos de materiales aptos (aceros inoxidable en su mayoría). Por otro lado, los costos operativos se elevan debido a los tiempos de reacción, decantación y a los tiempos muertos entre cada uno de los procesos.

Las etapas básicas para la producción de biodiésel son:

Acondicionamiento del aceite: en esta etapa se recibe el aceite y se calienta hasta aproximadamente 120°C para eliminar el agua contenida para luego enfriarlo hasta la temperatura adecuada. Para esto se cuenta con un tanque receptor que posee en su interior una resistencia eléctrica. Este tanque es representado en la Figura 4.1 con la letra "A".

Mezclado de metóxido: este proceso que se lleva a cabo en un tanque auxiliar donde se mezcla por un lado el metanol y el catalizador mediante agitadores mecánicos. El resultado de esta mezcla es el metóxido. Esta etapa de mezclado puede realizarse en paralelo con el acondicionamiento del aceite. Este tanque está representado en la Figura 4.1 con la letra "B". Una relación de volumen típica entre los recipientes A y B es aproximadamente 5:1.

Reacción de transesterificación: luego de los procesos de mezclado del metóxido y el acondicionamiento del aceite, los reactantes son bombeados a un tanque denominado "tanque de reacción". En este proceso es importante tener en cuenta la temperatura del aceite, ya que esta no puede exceder a la temperatura de evaporación del alcohol. De esta manera se evita la liberación de gases inflamables. El recipiente de reacción, "C", cuenta con un volumen ligeramente superior a la suma de los volúmenes de los tanques "A" y "B". En su interior, el tanque posee un agitador mecánico y una bomba de recirculación que favorecen a la tasa de mezclado de los reactivos. El proceso de reacción dura aproximadamente dos horas.

Separación de los productos: una vez finalizada la reacción la mezcla es bombeada al tanque separador. En este tanque la separación ocurre por decantación, es decir, por la diferencia de densidades entre los productos obtenidos. La glicerina, de mayor peso específico, se deposita en el fondo, mientras que el biodiésel permanece en la superficie. El grado de separación obtenido dependerá del tiempo de permanencia del fluido en el tanque decantador "D" y de la temperatura

de la mezcla. Normalmente este tiempo varia entre unas ocho a veinticuatro horas.

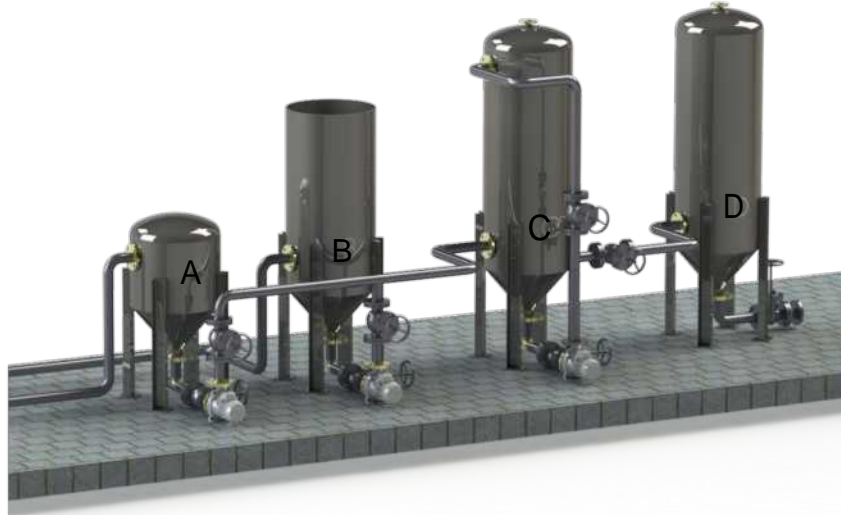


Figura 4.1. Planta de procesamiento tipo batch.

4.4 Identificación de necesidades y requerimientos

A partir de las capacitaciones realizadas, en especial del curso "Producción de Biodiésel" dictado por la Academia Greentech por parte del equipo de diseño y de la participación en distintos webinars con productores y consumidores de biocombustibles se identificaron las siguientes necesidades:

Tabla 4.2. Listado de necesidades y requerimientos.

Nº	Necesidades
1	La planta produce 60 l/h de biodiésel.
2	La planta ocupa un área menor a 6 m ² .
3	La planta tiene un peso menor a 1200 kg.
4	La planta consume una potencia inferior a 5000 W.
5	La planta opera con impurezas menores a 10 μm.
6	La planta es de fácil mantenimiento.
7	La planta es fácil de operar.
8	La planta funciona con un reactor de cavitación hidrodinámica.
9	Sistema de operación semiautomático.
10	La planta cuenta con botón de parada de emergencia.
11	La planta es segura para los procesos y para el operario.
12	La planta produce combustible de calidad.

4.5 Especificaciones técnicas

A partir de las necesidades y requerimientos mencionados anteriormente, se definen las siguientes especificaciones de la planta:

Tabla 4.3. Listados de especificaciones técnicas.

Necesidad	Métrica	Valor	Unidad
N°1	Capacidad de producción de biodiésel	60	<i>l/h</i>
N°2	Superficie de la planta	<6	<i>m²</i>
N°3	Peso total de la planta	<1200	<i>kg</i>
N°4	Consumo eléctrico	<5000	<i>W</i>
N°5	Tamaño de partículas requerido	<10	<i>μm</i>
N°6	Fácil mantenimiento	-	Lista
N°8	Reactor de cavitación hidrodinámica	-	Lista
N°9;N°7	Procesos críticos automatizados	-	Lista
N°10	Botón de parada de emergencia	-	Lista
N°11,N°12	Procesos seguros	-	Lista

5. DISEÑO CONCEPTUAL

Este capítulo tiene por objetivo desarrollar el concepto solución de la planta en función de las especificaciones técnicas obtenidas anteriormente. Para esto, se establecen las estructuras funcionales del sistema y se proponen distintas alternativas de concepto solución para luego evaluarlas bajo criterios técnicos y económicos.

5.1 Análisis funcional

El primer paso para descomponer un problema funcionalmente es representarlo como una caja negra, ésta representa las funciones generales del producto (Ulrich y Eppinger, 2009). Inicialmente se considera al sistema "Planta de biodiésel" como una caja negra (ver Figura 5.1), en la cual ingresa materia (aceite, alcohol y catalizador), energía (eléctrica) e información (interfaz con el usuario) y devuelve al entorno materia (biodiésel y glicerina), señales (información del estado de la máquina) y energía disipada (en forma de calor, sonido y/o vibraciones).

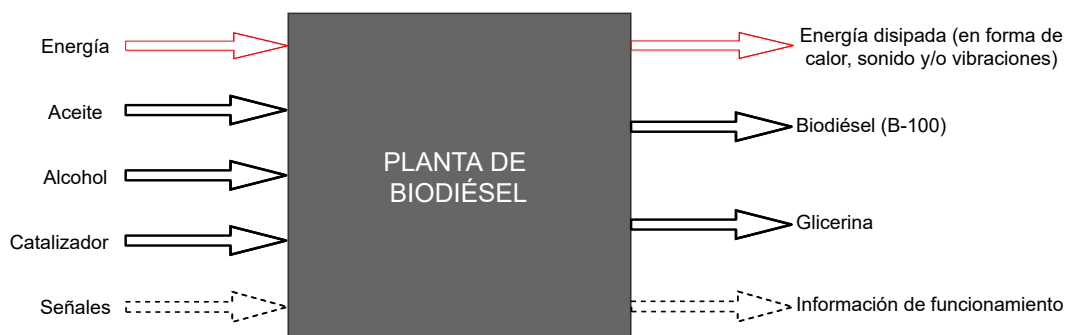


Figura 5.1. Caja negra.

5.2 Estructura de funciones y subfunciones

Al realizar la descomposición del sistema "Planta de biodiésel" en funciones y subfunciones, se encontraron ocho estructuras funcionales principales con sus correspondientes subfunciones. Estas funciones son ejecutadas por los sistemas o también llamados bloques y a su vez, las subfunciones internas son realizadas por subsistemas correspondientes a cada bloque. En la Figura 5.2 se presenta la interrelación entre los bloques y los subsistemas.

Para este proyecto se optó por una arquitectura modular, ya que los elementos físicos realizan una o pocas funciones y las interacciones entre ellos están bien definidas. Otra razón por la

que se eligió esta arquitectura es que los componentes se pueden diseñar de manera independiente unos de otros y, en caso de ser necesario, se podrán realizar cambios en el diseño de estos sin que se requieran cambios en los demás.

A continuación, se presentan los distintos bloques con sus respectivas funciones asociadas:

■ ***Bloque 1: sistema de alimentación***

Encargado de recibir la energía eléctrica y el flujo de materia prima. La materia prima luego es enviada al bloque de acondicionamiento y la energía eléctrica al bloque de conversión de energía.

■ ***Bloque 2: sistema de acondicionamiento de reactivos***

Destinado a adecuar las propiedades de la materia prima. Se eliminan las partículas sólidas del aceite y se elimina la humedad remanente. Por otro lado, se prepara la mezcla del alcohol y el catalizador.

■ ***Bloque 3: sistema de control lógico***

Destinado a controlar el funcionamiento de la planta, está vinculado con otros bloques y lleva a cabo la toma de decisiones para alterar algún parámetro determinado.

■ ***Bloque 4: sistema de dosificación***

Encargado que realizar la mezcla adecuada de los reactivos.

■ ***Bloque 5: sistema de reacción***

Se encarga se realizar la reacción de transesterificación.

■ ***Bloque 6: sistema de conversión de energía***

Encargado de convertir y disipar la energía del sistema.

■ ***Bloque 7: sistema de separación***

Este bloque se encarga de la separación de los productos obtenidos en la reacción.

■ ***Bloque 8: sistema de alarmas***

Destinado a transmitir las alertas del funcionamiento de la planta.

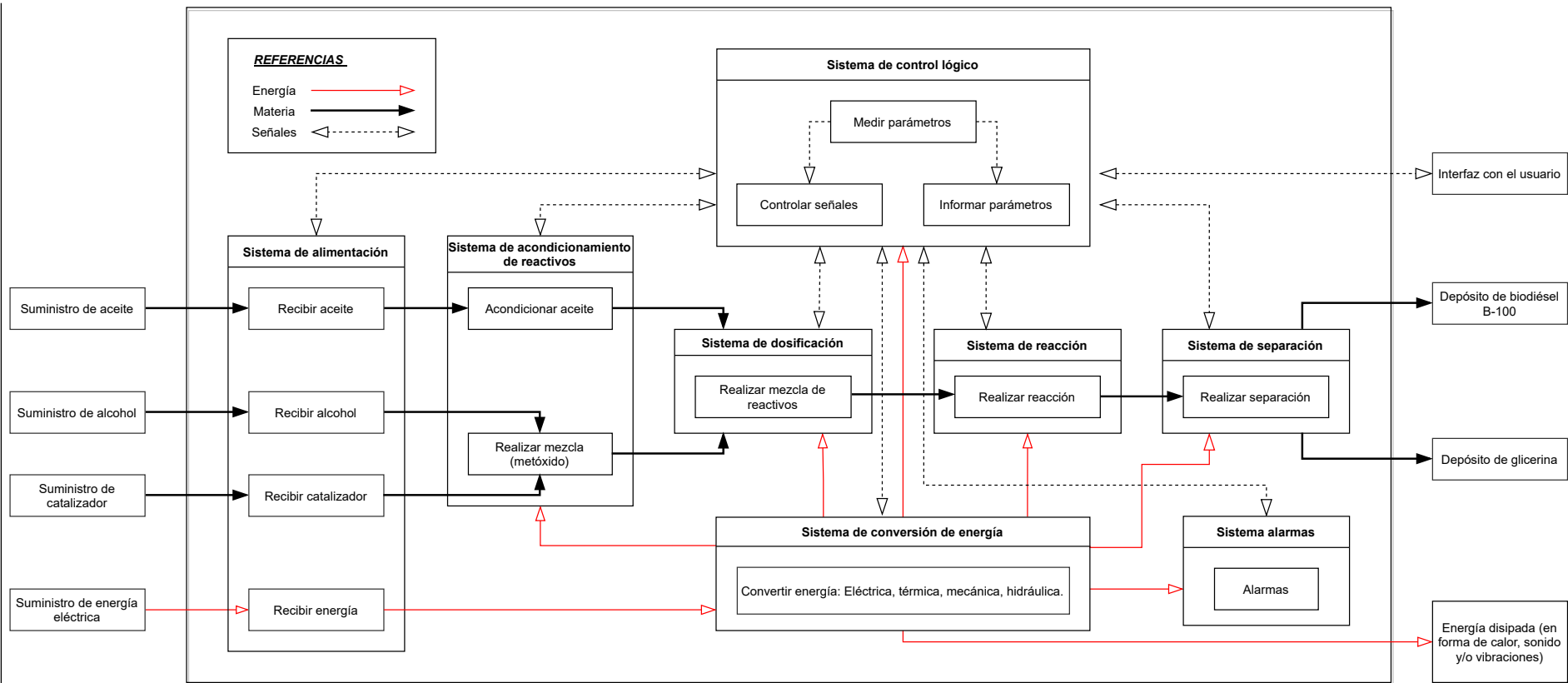


Figura 5.2. Caja transparente.

A partir de las interrelaciones de los bloques y sus respectivas funciones se le asigna un nivel de criticidad a cada bloque según su importancia relativa para el funcionamiento global de la planta (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Criticidad de bloques.

Bloque	1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de criticidad	Bajo	Medio	Alto	Alto	Muy Alto	Medio	Alto	Medio

5.3 Alternativa solución para cada sistema o bloque

En este apartado se presentan distintas alternativas solución para los bloques de niveles de criticidad alto y muy alto. El resto de los bloques quedarán definidos una vez que las alternativas para los bloques críticos sean especificadas. Estas alternativas surgen del análisis de mercado (*benchmarking*) y lluvia de ideas (*brainstorming*) realizadas por el equipo de diseño.

Tabla 5.2. Alternativas solución para cada bloque.

Alternativa	Bloque 3 Control	Bloque 4 Dosificador	Bloque 5 Reactor	Bloque 7 Separador
1	Arduino	Válvula solenoide	Placa orificio	Decantador por gravedad
2	PLC	Bomba	Roto-estator	Electrostático
3	Lógica relé	Venturi	Tipo venturi	Centrífugo de discos cónicos
4			Multi-orificio	Centrífugo cilíndrico

A partir de la Tabla 5.2 se combinaron distintas soluciones para los distintos bloques y se propusieron los siguientes conceptos:

- **Concepto 1:** Sistema de cavitación de placa multiorificio

Este concepto consiste en un sistema de control por Arduino que controla la dosificación de los reactivos mediante una válvula solenoide y donde la reacción ocurre en una placa con múltiples orificios que reducen la presión del fluido localmente al mismo tiempo que el fluido es acelerado por la disminución de la sección de paso. Si la presión del flujo desciende por debajo de la presión de vapor del fluido ocurrirá el fenómeno de cavitación. Finalmente, los productos son separados mediante un decantador por gravedad que separa las fases de glicerina y biodiésel. En la Figura 5.3 se presenta un esquema de este concepto.

En la Figura 5.4a se muestra un modelo de placa con múltiples orificios con disposición de

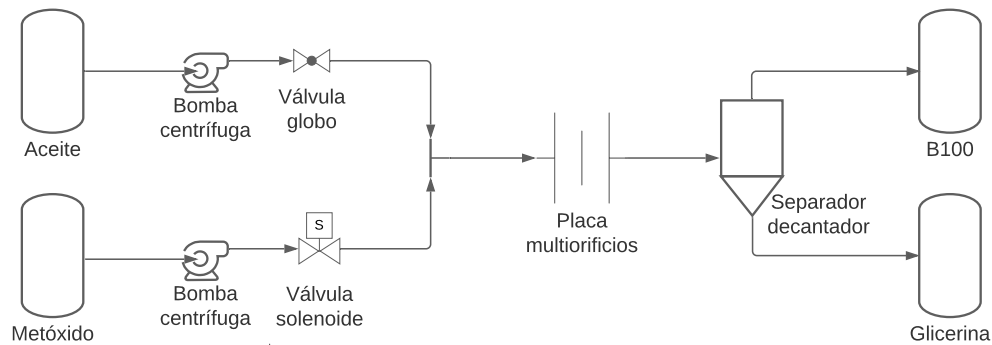
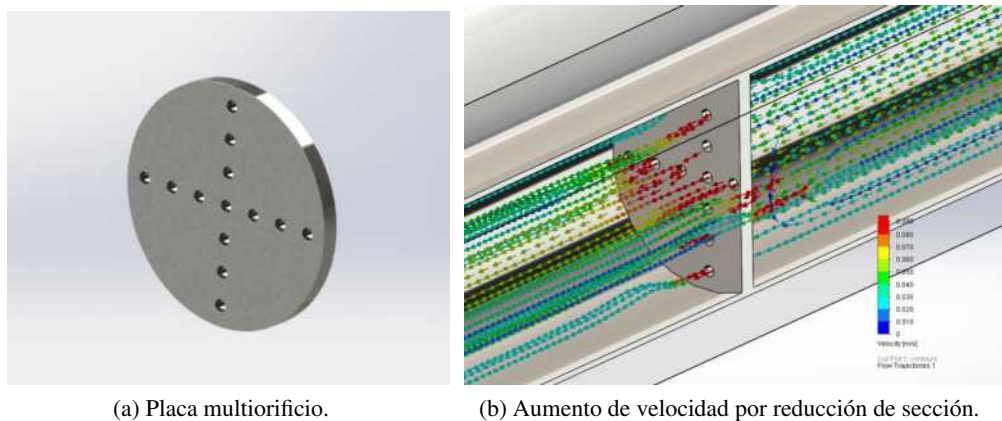


Figura 5.3. Concepto 1: Sistema de cavitación de placa multiorificio.

cruz. En la Figura 5.4b se muestra el correspondiente aumento de velocidad por la reducción de la sección de pasaje del fluido.



(a) Placa multiorificio.

(b) Aumento de velocidad por reducción de sección.

Figura 5.4. Placa multiorificio.

■ **Concepto 2:** Sistema de cavitación tipo roto-estator

Este concepto consiste en un sistema de control por PLC que controla la dosificación de los reactivos mediante una bomba dosificadora y una válvula globo. La reacción ocurre en un cavitador tipo roto-estator y la separación se produce mediante un separador electrostático. Este concepto se muestra en la Figura 5.5.

En la Figura 5.6 se muestran dos esquemas de roto-estatores típicos. La cavitación en este tipo de reactores se produce en las irregularidades o agujeros que se encuentran en la periferia del disco giratorio.

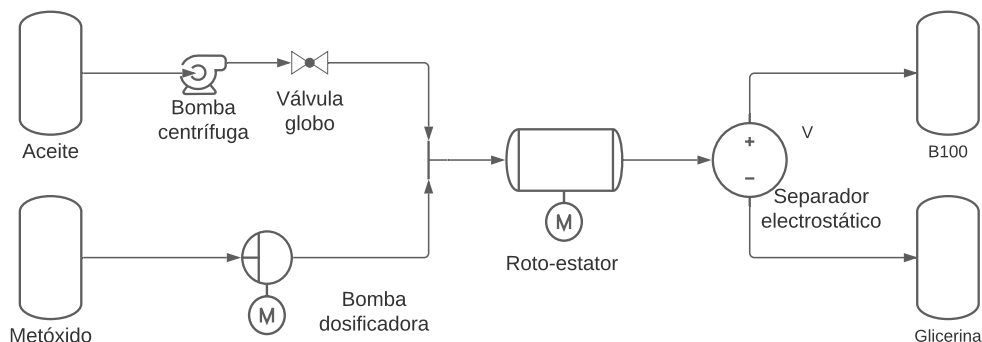


Figura 5.5. Concepto 2: Sistema de cavitación tipo roto-estator.

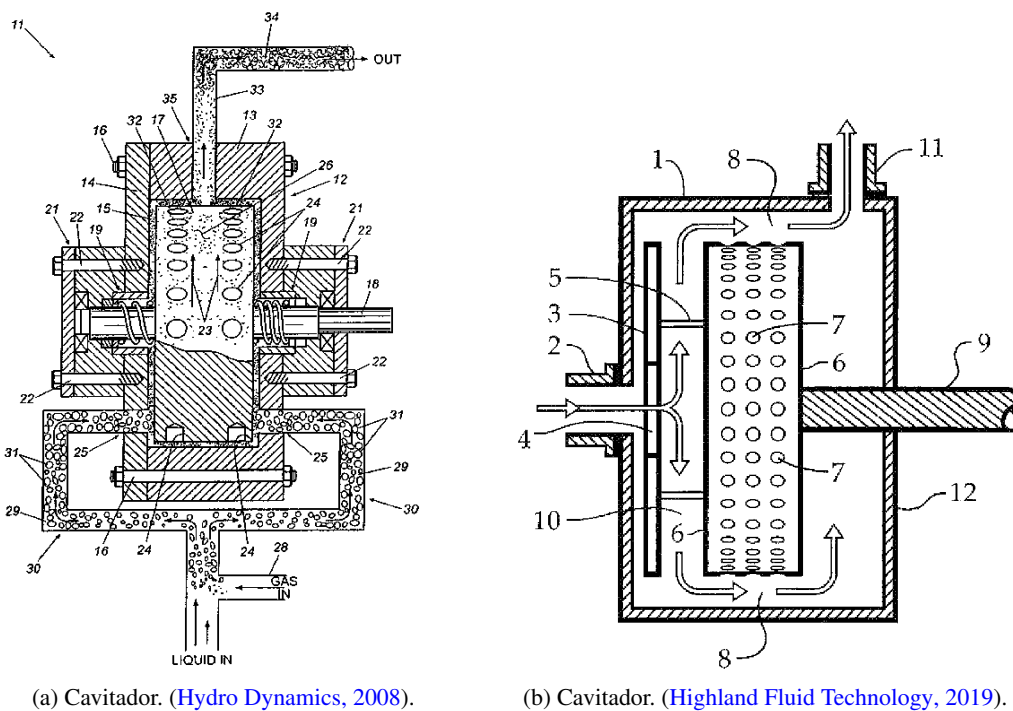


Figura 5.6. Cavitadores del tipo roto-estator.

■ Concepto 3: Sistema de cavitación tipo venturi

Este concepto se compone de un sistema de control semiautomático con lógica Relé, el cual activa una bomba centrífuga y por medio de un venturi dosificador se incorpora el metóxido al flujo de aceite. Luego, la reacción ocurre en un venturi de cavitación donde la tasa de mezclado y reacción se incrementa considerablemente. Finalmente, los productos son separados en una máquina centrífuga de discos cónicos. En la Figura 5.7 se muestra un esquema de este concepto.

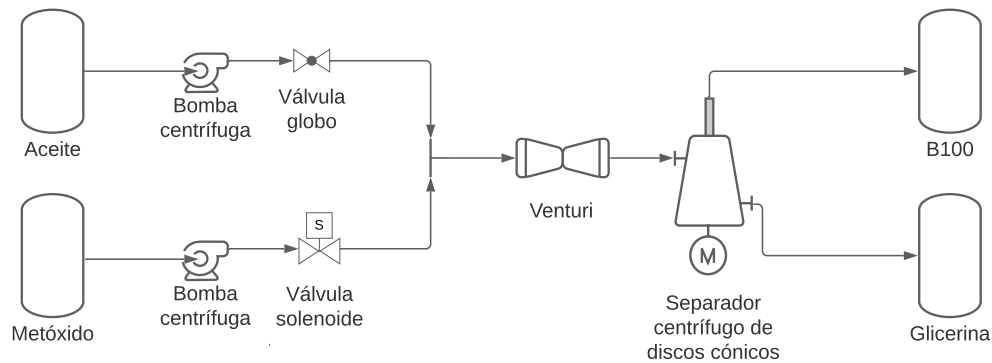


Figura 5.7. Concepto 3: Sistema de cavitación tipo venturi.

5.4 Criterios para evaluación y selección

De los tres conceptos presentados en el apartado anterior se procede a seleccionar el más promisorio para su posterior diseño y refinamiento. Para esto, se definen los siguientes criterios de evaluación en función de las necesidades, especificaciones, objetivos y limitaciones o restricciones aplicadas al proyecto. Los criterios utilizados para la selección del concepto son:

- **Costo de fabricación:** es el presupuesto destinado para la fabricación de cada concepto.
- **Tiempo de producción estimado:** es el tiempo total estimado para la producción de cierto volumen de referencia.
- **Facilidad de regulación:** considera la facilidad con la que se ajusta la planta a distintos parámetros operativos.
- **Portabilidad:** tiene en cuenta la simplicidad para el traslado de la planta.
- **Disponibilidad de piezas estándar:** tiene en cuenta la adaptabilidad al uso de piezas estandarizadas disponibles en el mercado local.
- **Simplicidad/Robustez:** considera la cantidad de elementos necesarios para el funcionamiento de la planta, complejidad de los componentes y partes móviles.
- **Facilidad de mantenimiento:** indica que tan sencillo es realizar el mantenimiento de los equipos.

5.5 Selección del concepto solución

Para la selección del concepto solución se utiliza una matriz de decisión, donde las entradas de esta matriz son los conceptos y criterios de selección previamente definidos. Como salida, se obtiene una valoración relativa entre los conceptos. Para esto, es necesario definir un concepto de referencia para poder realizar la comparación contra este. En este caso, se establece como concepto de referencia el *Concepto 3 - Venturi*, debido a que el proceso de cavitación se realiza mediante un tubo venturi, el cual es uno de los métodos más estudiados y el equipo de diseño considera que es útil para su comparación debido a su sencillez y practicidad. Una vez seleccionado el concepto de referencia se procede a realizar una evaluación relativa de “mejor que” (+1), “igual a” (0), o “peor que” (-1), para representar cómo se evalúa cada concepto en comparación con el concepto de referencia relativo a cada criterio.

Luego, se realiza la suma y se ordenan los conceptos según su valoración. En este caso, el concepto con mejor valoración resulta ser el concepto número dos. La matriz obtenida se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Matriz de selección de conceptos.

Criterio	Concepto 1 Placa multiorificio	Concepto 2 Roto-estator	Concepto 3 Venturi
Costo de fabricación	+1	0	0
Tiempo de producción	-1	+1	0
Facilidad de regulación	-1	+1	0
Portabilidad	-1	+1	0
Disponibilidad de piezas estándar	+1	+1	0
Simplicidad / Robustez	+1	-1	0
Fácil mantenimiento	+1	0	0
Valoración	1	3	0
Ranking	2	1	3

5.6 Arquitectura del Concepto Solución Seleccionado

En la Figura 5.8 se presenta a modo de esquema la arquitectura del concepto solución seleccionado y se listan los componentes básicos. Las dimensiones y disposición de los componentes no son relevantes en este esquema, más bien se busca resaltar el orden de interacción entre componentes y la secuencia de procesos.

Si bien el concepto seleccionado es más complejo en relación a los conceptos uno y tres (debido a que el tipo de reactor complejiza la tarea de diseño por la incorporación de partes móviles), este concepto tiene como principal ventaja frente a los demás, que el tiempo requerido para la producción de biodiésel es menor. Sumado a lo anterior sobresale la facilidad para regular caudales, su portabilidad (relacionada con la simplicidad en cuanto al traslado de la planta) y la escalabilidad del proyecto para producciones a baja y mediana escala.

La selección de este concepto incorpora en el bloque de reacción (el cual es de alta criticidad para el funcionamiento de la planta) un roto-estator de cavitación hidrodinámica el cual plantea interrogantes desde el punto del diseño, porque a priori se desconoce el proceso de cavitación en el mismo y en la aplicación de producción de biodiésel. Por esta razón, se considera fundamental diseñar y construir un prototipo físico enfocado para validar esta función por medio de ensayos, previo a continuar con la Ingeniería Básica de la planta.

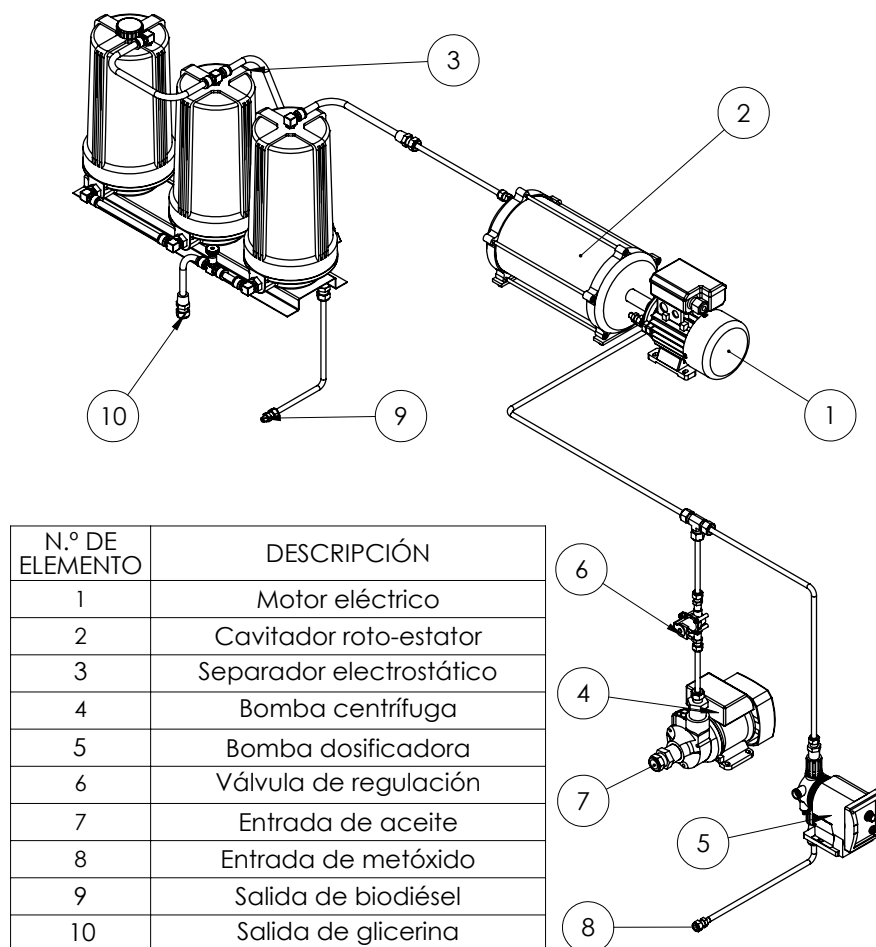


Figura 5.8. Arquitectura del Concepto Solución Seleccionado.

6. PROTOTIPO DEL REACTOR Y BANCO DE PRUEBAS

Debido a la complejidad del diseño de la planta y dada la importancia del sistema de reacción, en este capítulo se realiza el diseño y construcción de un prototipo físico enfocado, con el objetivo de validar la función principal de la máquina mediante ensayos en la fase experimental.

Dado que el proceso de diseño es iterativo, y que debe ser retroalimentado en cada etapa, se incluyó en esta fase la construcción y evaluación de versiones múltiples de prototipos alfa del reactor para determinar si el producto funcionará como está diseñado, o si serán necesarios realizar cambios en el diseño. Para realizar esta evaluación y refinamiento se diseña adicionalmente un banco de pruebas, tomando como referencia la Arquitectura del Concepto Solución Seleccionado, con el objetivo de replicar las condiciones reales de funcionamiento. Luego, se presenta la fabricación y montaje, y validación experimental del dispositivo propuesto.

Con lo cual, las secciones a seguir son las siguientes:

- Diseño del reactor (6.1)
- Diseño de banco de pruebas (6.2)
- Fabricación y montaje (6.3)
- Experimental (6.4)

A continuación, se presentan el proceso iterativo de diseño del reactor.

6.1 DISEÑO DE REACTOR

Las 3 etapas que se presentan para el diseño del reactor son las siguientes:

- Prediseño y selección de componentes básicos
- Modificaciones en el diseño
- Versión final del prototipo

6.1.1 Prediseño y selección de componentes básicos del reactor

Este bloque es el encargado de realizar la reacción de transesterificación. Para llevar a cabo esta tarea, el equipo de diseño optó por la utilización de un reactor tipo roto-estator. Este dispositivo cuenta con los siguientes elementos que lo componen:

- *Estator*
- *Rotor*
- *Eje de transmisión*
- *Motor*
- *Acople*
- *Sellos mecánicos*
- *Rodamientos*
- *Carcasa y elementos de sujeción*

6.1.1.1 Estator

Como punto de partida para el diseño del dispositivo se considera un estator de polimetilmetacrilato (PMMA) transparente el cual permita observar el fenómeno de cavitación. Las dimensiones estándar con las que se provee este componente en el mercado local son de diámetro exterior 89 mm y espesor de 5 mm. La longitud adecuada para el estator se definió en 110 mm.



Figura 6.1. Estator de PMMA.

6.1.1.2 Rotor

A partir del análisis de las patentes publicadas por [Hydro Dynamics, 2008](#) y [Highland Fluid Technology, 2019](#) y la revisión de catálogos de productos similares, aplicando ingeniería inversa, se propuso como primer aproximación que la distancia entre estator y rotor sea de 10 mm. De esta manera, el diámetro exterior propuesto para el rotor resulta de 60 mm. Así mismo, se estableció la longitud del rotor en 90 mm y la cantidad de orificios por fila en 18.

Otra variable para definir es la velocidad de giro. Para determinar esta variable se considera que el inicio de la cavitación generalmente ocurre para un número de cavitación $\sigma_c = 1$ y hay efectos significativos de cavitación cuando $\sigma_c < 1$. Para este proyecto, σ , se calculará con base al metanol debido a que este tiene la presión de vapor más elevada entre los reactivos a utilizar y para garantizar la presencia de la fase vapor en el reactor se utilizará $\sigma = 0,5$ en la ecuación 6.1.

$$\sigma = \frac{P_f - P_v}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2} \quad (6.1)$$

Donde P_f es la presión del fluido (en el reactor, externa a la cavidad), P_v es la presión de vapor del metanol a 60°C, ρ es la densidad del metanol a 60°C y V es la velocidad del fluido en el punto donde se analiza la cavitación (dentro de la cavidad) que en principio es desconocida. Como primera aproximación se puede considerar la velocidad del fluido como la velocidad periférica del fluido $V \approx U$, la cual se tiene en la superficie del rotor y puede escribirse en función del radio del rotor y las revoluciones por minuto.

$$U = \frac{2\pi}{60} Nr \quad (6.2)$$

Remplazando 6.1 en 6.2 tenemos

$$\sigma = \frac{P_f - P_v}{1/2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{2\pi}{60} Nr\right)^2} \quad (6.3)$$

Si se considera la presión de fluido como la presión atmosférica y las variables desconocidas se remplazan por datos obtenidos con REFPROP (ver [Lemmon y col., 2018](#)) $P_f = 101.325 Pa$; $P_v = 84.713 Pa$; $\rho = 752,79 kg/m^3$; $\sigma = 0,5$; $r = 0.03 m$ Ec. (6.4); Despejando N , se obtienen las revoluciones necesarias para lograr el coeficiente de cavitación propuesto para el reactor.

$$N = \sqrt[2]{\frac{P_f - P_v}{1/2 \rho \sigma \left(\frac{2\pi}{60} r\right)^2}} = 2990 rpm \quad (6.4)$$

Hasta este punto se obtuvo para el rotor, el diámetro exterior, la longitud total, la cantidad de agujeros y la velocidad de giro. Para determinar el diámetro de las cavidades y la profundidad de las mismas se estudia la relación entre estas variables con la mínima presión obtenida dentro de la cavidad. Para esto se realizaron 30 simulaciones fluido dinámicas en [Solidworks, 2016](#), en las que se varió el diámetro y la profundidad de las cavidades, y con los valores de presiones y velocidades obtenidos dentro de la cavidad, se calculó el coeficiente de cavitación para cada uno de los casos. Los diámetros que se utilizaron para las simulaciones fueron 5, 6, 7, 8, 9 y 10 *mm* y profundidades de 4, 6, 8, 10 y 12 *mm*; el fluido de trabajo fue metanol y se configuró el régimen de rotación en 3000 *rpm*. Para optimizar los tiempos de computo se utilizó un rotor de 60 *mm* de diámetro y 20 *mm* de espesor con una única fila de cavidades similar al de la Figura 6.2. La configuración de los ensayos y los resultados completos se adjuntan en el Anexo 11.1.



Figura 6.2. Rotor de 18 agujeros.

En la Figura 6.3, se muestran los datos obtenidos para el coeficiente de cavitación con respecto a la profundidad del agujero (para diámetro constante). En la gráfica se puede observar que a medida que aumenta la profundidad, el coeficiente de cavitación disminuye, es decir, aumentar la profundidad favorece al fenómeno de cavitación. Por otro lado, si se fija una profundidad y se incrementa el diámetro, la cavitación también se intensifica pero en menor medida.

Para seleccionar los diámetros y las profundidades se deben considerar las limitaciones fluidodinámicas y geométricas. Por un lado, si se observa la línea de $\sigma_c = 1$, se aprecia que aproximadamente 8 *mm* es la profundidad mínima para la aparición de cavitación; Por otra parte, el diámetro del rotor limita las profundidades y diámetros máximos que podrían tener los agujeros, ya que se produciría interferencia. En este caso, el perímetro del rotor es de $2\pi r = 188.49$ *mm*, y al considerar 18 agujeros por fila y una separación mínima entre agujeros de 2 *mm*, resulta que $D < 8.47$ *mm*. De esta manera, se decide que el diámetro y la profundidad de los agujeros sean ambos de 8 *mm*. En la Figura 6.4, se muestra la distribución de presiones en el rotor con la geometría seleccionada.

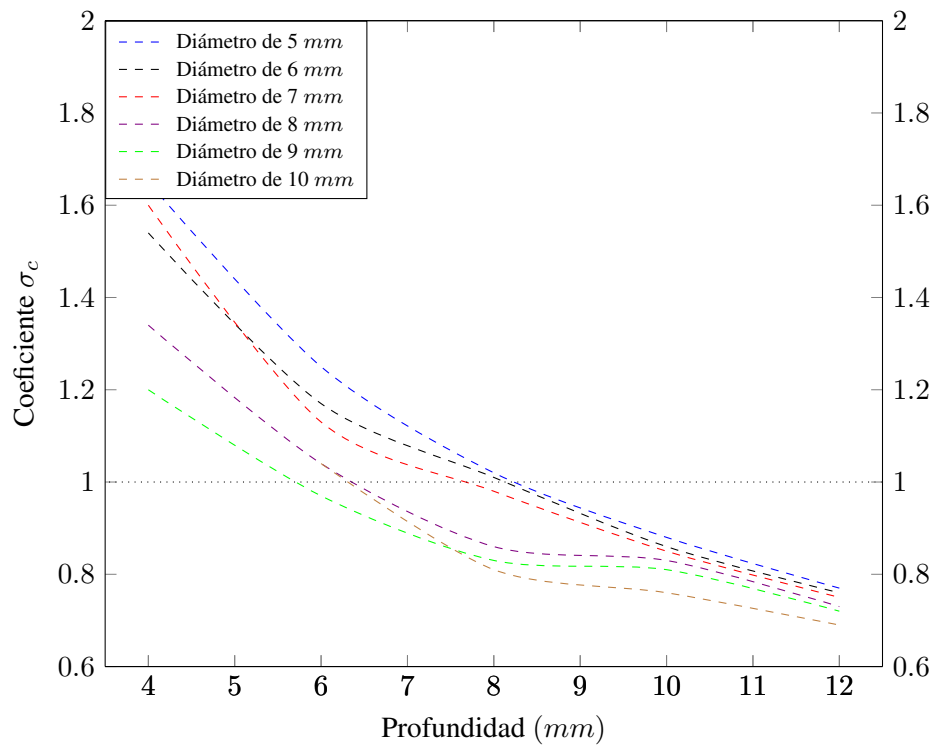


Figura 6.3. Coeficiente de cavitación.

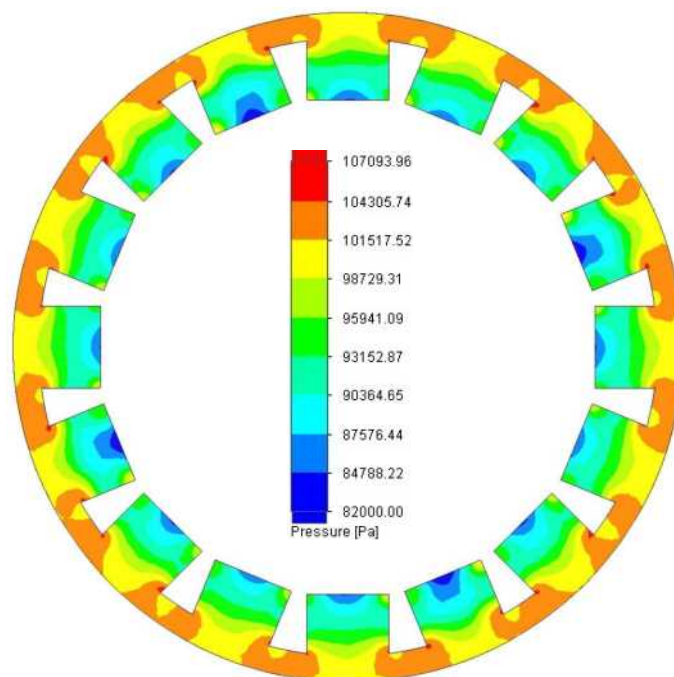


Figura 6.4. Distribución de presiones en el rotor.

El material especificado para la construcción del rotor es aluminio aleado debido a la compatibilidad con los reactivos y temperaturas a la que se expondrá en operación. En la Figura 6.5 se muestra el rotor con la disposición de los agujeros.

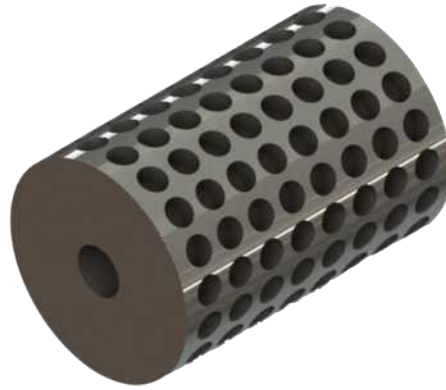


Figura 6.5. Rotor de aluminio aleado de 144 agujeros, diámetro 8 *mm* y profundidad 8 *mm*.

6.1.1.3 Eje de transmisión

Como punto de partida para el diseño del eje se considera un acero comercial SAE 1045. Este es un acero bajo en carbono y se encuentra disponible en el mercado local. La longitud del eje deberá ser acorde para alojar el rotor, los dos rodamientos en los extremos del estator, los dos sellos mecánicos y los elementos de sujeción a los extremos. Además, deberá contar con una longitud extra que permita el acople al eje motriz. Para el diseño del eje se considerarán las cargas aplicadas y las condiciones de vínculo. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el escalonamiento del eje debe ser acorde a los diámetros de rodamientos y sellos mecánicos disponibles en el mercado. En este punto se consideran diámetros con escalonamientos preliminares de 12, 14 y 16 *mm*. La Figura 6.6 muestra la posible disposición de escalonamientos a modo ilustrativo.



Figura 6.6. Eje.

6.1.1.4 Motor

Para la selección del motor es necesario definir las rpm de funcionamiento y la potencia requerida. Las rpm se estimaron en la subsección 6.1.1.2 que resultó en un valor de 3000 vueltas por minuto. Para el cálculo de la potencia es necesario conocer el torque aplicado en el eje, el cual está asociado a la fricción del fluido y a la fricción de los componentes mecánicos. El cálculo del torque de fricción y la potencia requerida por el motor (0,75 kW) se presentan en Anexo 10.7

El motor seleccionado es del fabricante CZERWENY modelo A80CP2D de dos polos.



Figura 6.7. Motor.

MOTORES MONOFÁSICO LÍNEA ALEX BAJO PAR

Motores asincrónicos monofásicos, rotor jaula de ardilla, 220V 50Hz
Servicio continuo S1, aislación Clase B, IP54, factor de servicio 1.

Tipo	Potencia		Inom. (A)	RPM	Cos φ	Eff (%)	I _{arr} /I _{nom}	M _{nom} (Nm)	M _{arr} /M	M _k /M	Peso (Kg)
	kW	CV									
2 POLOS											
A63 CP 2E	0.18	1/4	1.5	2800	0.96	50	2.5	0.61	0.55	2.6	4.9
A71 CP 2A	0.25	1/3	2.3	2840	0.96	52	3.1	0.84	0.57	2.3	6.8
A71 CP 2B	0.37	1/2	3.0	2830	0.95	58	3.1	1.25	0.55	2.0	6.9
A80 CP 2C	0.55	3/4	4.4	2800	0.90	63	3.7	1.87	0.35	2.0	11.3
A80 CP 2D	0.75	1	5.6	2800	0.93	66	3.9	2.56	0.35	2.1	11.5
A80 CP 2E	1.1	1.5	7.6	2820	0.94	70	4.1	3.72	0.45	2.4	11.6
A90S CP 2C	1.5	2	10.0	2860	0.92	72	5.2	5.01	0.35	2.3	14.9
A90L CP 2D	2.2	3	14.7	2860	0.93	74	5.1	7.34	0.30	2.1	19.3

Figura 6.8. Catalogo CZERWENY S.A Modelo A80 CP 2D.

6.1.1.5 Acople

Para transmitir eficazmente el par motor, se selecciona un acoplamiento flexible que permita absorber las desalineaciones y amortiguar las vibraciones. El acople seleccionado es de la marca

Gummi, el modelo A20. El cálculo de este componente se presenta en el Anexo [10.7](#).



Figura 6.9. Acoplamiento tipo Gummi A-20.

6.1.1.6 Sellos mecánicos

Para evitar la fuga de los fluidos entre los huecos del eje y la carcasa se utilizan sellos mecánicos. En este caso, se seleccionan 2 sellos con asiento de teflón de la marca EagleBurgmann disponibles en el mercado local. Estos sellos garantizan el correcto funcionamiento hasta los 120°C y 10 m/s de velocidad.



Figura 6.10. Sello mecánico EagleBurgmann modelo BT-AR.

6.1.1.7 Rodamientos

Debido a la configuración adoptada para el diseño del reactor se sabe de antemano que las cargas radiales y axiales producidas en el eje serán de baja magnitud. Teniendo esto presente se procede a preseleccionar rodamientos del tipo rígido de bolas, del fabricante SKF, modelo 6001. En la Figura [6.11](#) se muestran las dimensiones de este componente.

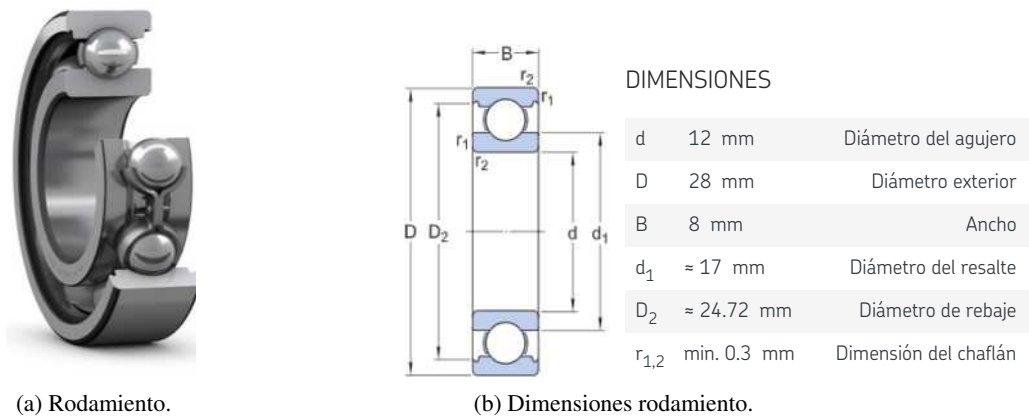


Figura 6.11. Rodamiento SKF 6001.

6.1.1.8 Carcasa y elementos de sujeción

En la Figura 6.12 se muestra la disposición de la carcasa y los elementos de sujeción. La carcasa está compuesta de 2 tapas que se encargan de sellar herméticamente los extremos del estator. Las tapan permiten el alojamiento de los rodamientos y es la pieza que fija el reactor al bastidor. Para este componente se realiza un diseño enfocado en cumplir con las funciones anteriores y se considera que el tipo de manufactura a emplear es del tipo aditiva por extrusión, más precisamente impresión 3D en PETG. En cuanto a los elementos de sujeción, se emplean varillas roscadas zincadas de 1/4 pulgada, con sus respectivas tuercas y arandelas de 1/4 pulgada. Por ultimo, para poder fijar los rodamientos a la carcasa se emplean arandelas seeger inoxidable Din 472.

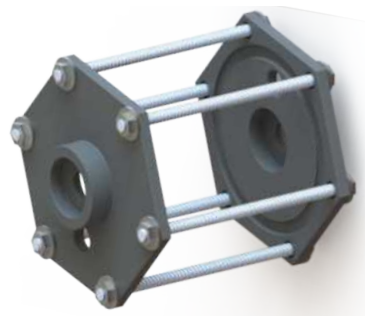


Figura 6.12. Carcasa y elementos de sujeción.

En la Figura 6.2 se muestra un *layout* del ensamblaje del reactor de cavitación con todos sus elementos.

6.1.1.9 Prototipo alfa del reactor de cavitación



Figura 6.13. Reactor de cavitación hidrodinámica versión prototipo alfa.

6.1.2 Modificaciones en el diseño

Para estudiar el desempeño del reactor de cavitación el equipo de diseño consideró conveniente que el rotor pudiera ensayarse a distintas temperaturas y *rpm*. Para variar esta última, se evaluaron dos alternativas. Por un lado, incorporar un variador de frecuencia en el motor y por otro incorporar una transmisión por correa que permita variar la relación de transmisión. Por restricciones presupuestarias el equipo se inclinó por la transmisión por correa. Esta combinación de factores modificó las cargas actuantes sobre el eje y demás componentes. Sumado a esto, la selección preliminar del material y geometría de ciertos componentes no resultaron ser adecuados con lo cual se realizaron distintas modificaciones de materiales, geométricas, y de tolerancias que se presentan a continuación:

6.1.2.1 Proceso de rediseño de tapas

- Durante la evaluación de las tapas de la versión I (ver Figura 6.14a) se observó que los rodamientos interiores elevaban su temperatura y deterioraban el sello estático interior. Esto se resolvió colocando los rodamientos en la parte exterior (ver Figura 6.14b).

- Al alojar los rodamientos en la cara exterior se limitó el espacio para conectar acoples en la entrada y salida de las tapas. Al no disponer de piezas estándar para realizar dicha conexión se decidió diseñar una extensión que permitiera realizar una soldadura por termofusión (ver Figura 6.14c).
- La extensión para la soldadura por termofusión resultó ser deficiente para garantizar la hermeticidad del reactor por la mala adhesión de los materiales. Sumado a esto, la flexión del eje provocaba deformaciones en las tapas, por lo que se decidió cambiar la geometría y el material para estas (ver Figura 6.15). El material seleccionado para esta modificación es acero SAE 1045.
- En la versión final, se decidió no montar los rodamientos en las tapas para evitar que la carga del eje se transmitiera por estas. Los planos de las tapas se presentan en el Anexo 12.

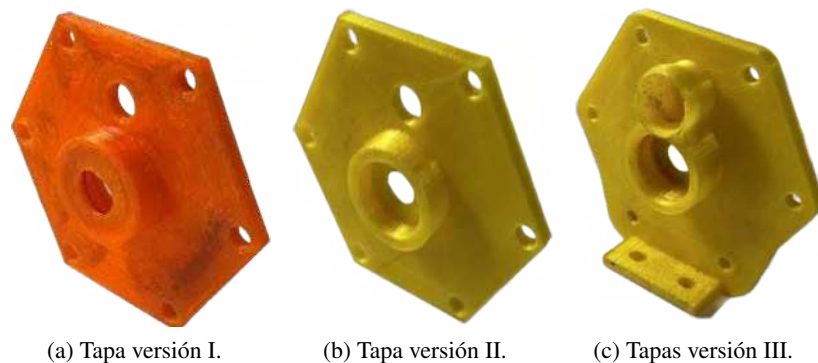


Figura 6.14. Prototipos alfa de tapas.

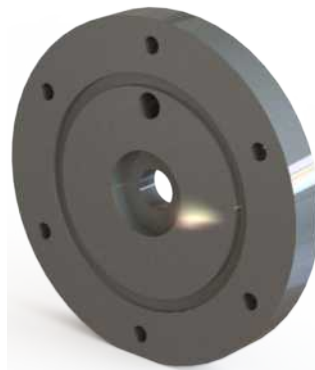


Figura 6.15. Tapas versión final.

6.1.2.2 Proceso de rediseño del rotor

- Se evaluó la geometría del rotor fabricando prototipos en impresión 3D para detectar fenómenos perjudiciales inadvertidos antes de enviar a mecanizar la versión final (ver Figura 6.16).
- Se modificó la configuración para que el montaje de los sellos mecánicos fuera el adecuado y así evitar el desgaste anticipado. El plano del rotor se presenta en el Anexo 12.

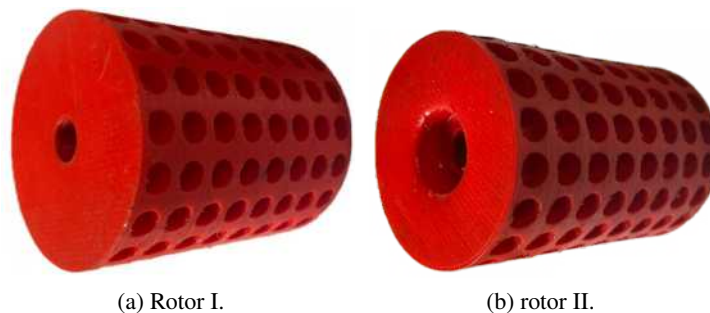


Figura 6.16. Prototipos alfa de rotores.

6.1.2.3 Incorporación de rodamientos con soporte autocentrante

- Se decidió incorporar rodamientos con soporte autocentrante alejados de las tapas para disminuir las solicitaciones sobre estas y la carga térmica sobre los sellos.
- La ventaja que presenta este tipo de rodamientos es que permite la autoalineación del eje, evitando la incorporación de esfuerzos por desalineación y vibraciones.
- Los rodamientos seleccionados son rodamientos radiales de bolas tipo UC marca TIMKEM, con sello y un alojamiento de hierro fundido de alto grado serie.



Figura 6.17. Soporte autocentrante P204.

6.1.2.4 Rediseño de la geometría del eje

Dadas las modificaciones de las tapas, las condiciones de vínculo de los rodamientos y la transmisión por polea, fue necesario rediseñar la geometría del eje (ver Figura 6.18). El plano del eje con las principales dimensiones se presenta en el Anexo 12. En cuanto al tipo de unión entre el rotor y el eje se decidió utilizar un ajuste por interferencia. Los cálculos se presentan en el Anexo 10.10.

En el Anexo 10.9 se presentan las verificaciones del eje, las mismas se realizan utilizando un software específico de cálculo y los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento tensional y resistencia con respecto a la fatiga y la fluencia. También, señalan deflexiones tolerables y frecuencias críticas adecuadas, dado en rango de trabajo.



Figura 6.18. Eje renderizado.

6.1.3 Versión final del reactor de cavitación

En la Figura 6.19 se presenta la última versión del reactor de cavitación para su posterior fabricación y ensayo.

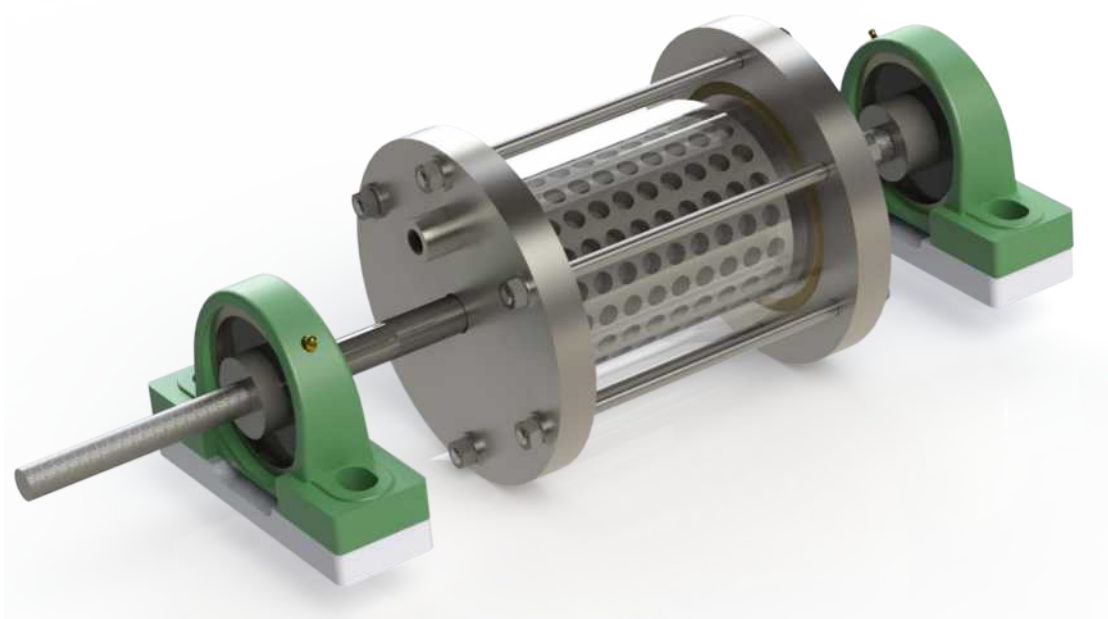


Figura 6.19. Reactor de cavitación renderizado.

6.1.4 Análisis de costos del reactor

A continuación, se presentan los costos de referencia estimados para cada uno de los componentes del prototipo del reactor.

Tabla 6.1. Costo reactor.

Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$	
	Estator	Comercial	10	1	10
	Material rotor aluminio	Ad-hoc	15	1	15
	Eje SAE 1045	Ad-hoc	13	1	13
	Sellos	Comercial	22	1	22
	Rodamiento	Comercial	6	2	12
	Tapas SAE 1045	Ad-hoc	13	1	13
	Mecanizado piezas	Comercial	50	1	50
	Varillas, tuercas y arandelas	Comercial	8	1	8
Total				143	

6.2 DISEÑO DE BANCO DE PRUEBAS

En esta sección se presenta el proceso de selección y prediseño de los componentes requeridos para el armado del banco de pruebas. Adicionalmente, se presenta el análisis de costos con los costos de referencia estimados para el armado del mismo.

6.2.1 Prediseño y selección de componentes básicos del banco de prueba

Para realizar la evaluación del desempeño del cavitador hidrodinámico se diseña un banco de pruebas con los siguientes elementos característicos:

- *Válvulas, tuberías y accesorios*
- *Bomba*
- *Calentador*
- *Motor*
- *Poleas y correa*
- *Reactor*
- *Recipiente de reactivos y productos*
- *Bastidor*

Se debe aclarar que, dada la necesidad de validar la función y subfunciones de la máquina, dentro de un presupuesto acotado, se emplearon componentes que pueden tener una vida de servicio limitada para un número de pruebas limitadas. A continuación, se presentan las especificaciones de cada uno de los componentes.

6.2.1.1 Válvulas, tuberías y accesorios

- **Válvulas:** para lograr la regulación adecuada del caudal, se utiliza una válvula aguja de 1/2. La selección de este componente se debe a que ya se cuenta con stock de la misma. Por otra parte, para cerrar o abrir el paso por los distintos ramales, se seleccionan 3 válvulas esféricas de termofusión de 20 mm y una válvula esférica de PVC (ver Figura 6.20).
-

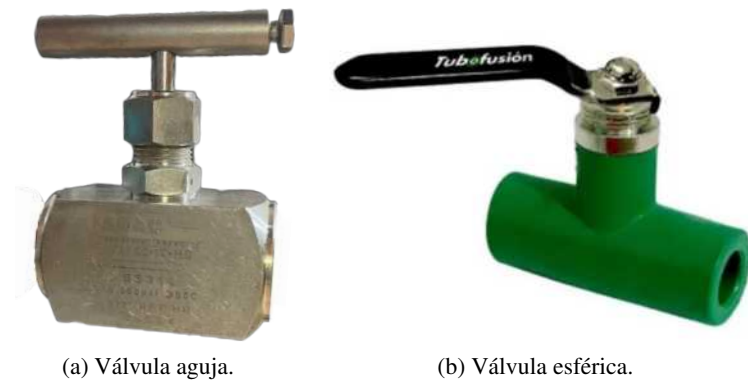


Figura 6.20. Válvulas utilizadas.

- **Tuberías:** para la conducción de los fluidos del banco de pruebas se seleccionan tuberías de termofusión, debido principalmente a su disponibilidad, facilidad de construcción y bajo costo (ver Figura 6.21). El diámetro seleccionado de 20 mm es acorde a las recomendaciones del Instituto de Hidráulica ([ANSI/HI, 2016](#)) para un caudal de de 1 *litro/min*.
- **Accesorios** el resto de los componentes requeridos para la construcción del circuito hidráulico son: 4 uniones dobles, 11 codos 90° y 2 uniones T.



Figura 6.21. Tuberías y accesorios.

6.2.1.2 Bomba

La bomba seleccionada para realizar los ensayos es una bomba periférica monofásica de 0.5 HP marca Leo (ver Figura 6.22). La selección de ésta bomba se debe a que ya se encuentra el stock de la misma. Si bien este tipo de bombas están diseñadas para funcionar con agua y en cierto rangos de caudales, las especificaciones que provee el fabricante, garantizan su posible utilización para los ensayos propuestos.



Figura 6.22. Bomba.

6.2.1.3 Calentador

El calentador debe cumplir la función de acondicionar el aceite hasta los 60 °C, previo a realizar la reacción. Como el tiempo de acondicionamiento en este punto no es una variable de estudio, se propone utilizar una resistencia eléctrica de inmersión de 1500 W (ver Figura 6.23).



Figura 6.23. Resistencia eléctrica.

6.2.1.4 Motor

El motor seleccionado para utilizar en el banco de pruebas es un motor de 1HP de 2800 rpm, de 220 V y con frecuencia de 50 Hz (ver Figura 6.24). Este motor ya se encuentra disponible dentro del stock del equipo de diseño.



Figura 6.24. Motor.

6.2.1.5 Poleas y correa

Las poleas a utilizar para la transmisión de potencia son poleas de 100 *mm* y 50 *mm* ambas de canal tipo A y con ejes de 16 *mm* y 12 *mm* respectivamente. La correa seleccionada es una correa lisa perfil V de canal tipo A.



Figura 6.25. Elementos de transmisión.

6.2.1.6 Reactor

El reactor a utilizar en el banco de pruebas es el que se presenta en la sección [6.1.3](#).

6.2.1.7 Recipiente de reactivos y productos

Para los reactivos y productos se propone el armado de un circuito de recirculado con un único recipiente. Esto permite optimizar los espacios en el bastidor y facilita el control de los caudales. Como recipiente se propone la utilización de un balde plástico de capacidad de 30 litros.

6.2.1.8 Bastidor

El diseño del bastidor propuesto contempla una estructura de perfiles estructurales de acero con uniones soldadas (ver Figura [6.26](#)). Del predimensionamiento se obtiene una sección resistente equivalente a la de un tubo cuadrado de 20x20. Las dimensiones de este componente se presentan en el Anexo [12](#). Los resultados obtenidos de la verificación de resistencia y rigidez estructural se presentan en el Anexo [10](#).



Figura 6.26. Render de bastidor de banco de pruebas.

6.2.1.9 Banco de pruebas

La disposición empleada para estos elementos se muestran en las Figura 6.27. Los planos y lista de componentes se presentan en el Anexo 12.



Figura 6.27. Vista lateral del banco de pruebas.



Figura 6.28. Representación en detalle del banco de pruebas.

6.2.2 Análisis de costo banco de pruebas

A continuación, se presentan los costos de referencia estimados para cada uno de los componentes del banco de pruebas.

Tabla 6.2. Costos banco de pruebas.

Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$	
	Válvulas	Comercial	12	3	36
	Tuberías y accesorios	Comercial	25	1	25
	Bomba	Comercial	43	1	43
	Calentador	Comercial	23	1	23
	Motor	Comercial	67	1	67
	Poleas y correa	Comercial	14	1	14
	Reactor	Comercial	143	1	143
	Bastidor	Comercial	30	1	30
	Mano de obra	Comercial	100	1	100
Total				481	

6.3 FABRICACIÓN Y MONTAJE

A continuación, se presenta una secuencia fotográfica del desarrollo, fabricación y montaje del banco de pruebas. En primer lugar, se fabricó el bastidor. Este proceso se llevó a cabo en un taller externo que contaba con las herramientas requeridas. El bastidor se fabricó como una estructura soldada a partir de perfiles estructurales cuadrados 20x20 *mm* (ver Figura 6.41a) y luego se lo pintó con pintura protectora contra la oxidación/corrosión (ver Figura 6.29b). Una vez finalizada la estructura se procedió con la fabricación de las partes del reactor de cavitación. Para esto se mandaron a tornear el eje y el rotor y se fabricaron las tapas y las poleas para la transmisión (ver Figuras 6.30; 6.31; 6.32; 6.35) y se cortaron las juntas de adamite. Ya con los componentes básicos fabricados, el trabajo siguió en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la universidad, donde se cortaron y unieron las tuberías con las medidas requeridas, se ensambló el calentador de aceite y se montaron todos los componentes en el bastidor. Finalizado este paso, se procedió con la instalación eléctrica de la bomba, el calentador y el motor. El ensamblaje final se muestra en la Figura 6.39.



(a) Estructura bastidor.



(b) Estructura bastidor pintado.

Figura 6.29. Estructura bastidor.



Figura 6.30. Tapas mecanizadas.



Figura 6.31. Rotor mecanizado.



Figura 6.32. Despiece reactor.



Figura 6.33. Rotor ensamblado.

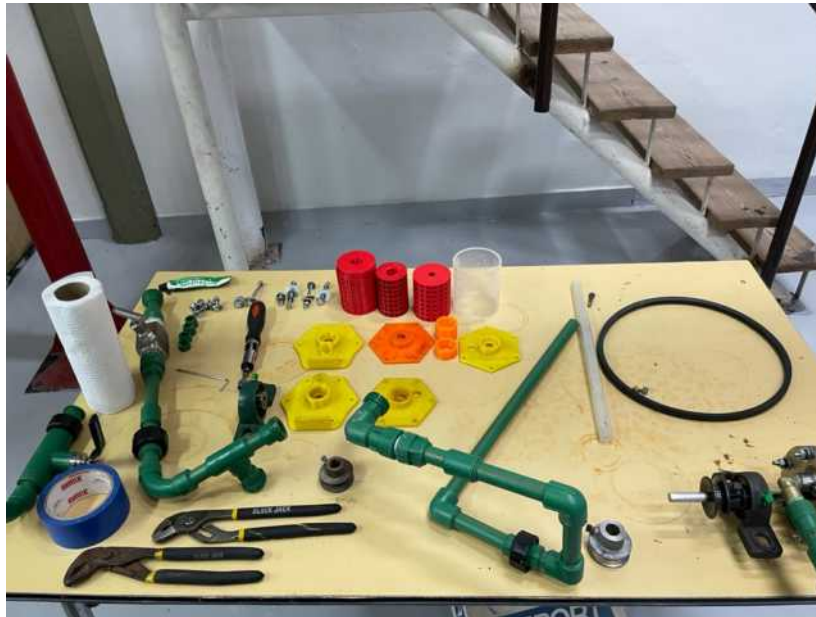


Figura 6.34. Armado de tuberías.



Figura 6.35. Rectificado de poleas.



Figura 6.36. Motor monofásico.



Figura 6.37. Calentador eléctrico.



Figura 6.38. Montaje de motor y reactor.



Figura 6.39. Banco de pruebas construido.

6.4 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los ajustes que se realizaron en el banco de pruebas con el objetivo de validar el prototipo físico del cavitador hidrodinámico. Además, se exponen los resultados obtenidos en las muestras realizadas y finaliza la sección con la caracterización del producto final.

6.4.1 Puesta a punto del banco de pruebas

Para garantizar el correcto funcionamiento durante la fase de ensayo se realizaron distintos ajustes en la puesta a punto del equipo. En primer lugar, se purgó el sistema hidráulico con agua y se verificó la ausencia de fugas. Luego, se reemplazó el fluido hidráulico por aceite caliente y metanol, y se comprobó que todos los elementos del sistema se mantuvieran íntegros (en especial el estator, que al resultar ser de metacrilato se corría riesgo de que se fracture en presencia de alcohol y se deformara por el calor). Al realizar esta última prueba se registraron fugas en las juntas que habían sido selladas mediante resinas epoxicas de plomería (sellaroscas). Por esta misma razón, se decidió cambiar las uniones selladas por uniones con teflón y las juntas epoxicas del cavitador por juntas de adamite. Por último, se alinearon las poleas, tanto del motor como del cavitador y se tensó la correa de transmisión para verificar que la velocidad de giro fuera la requerida para los ensayos. Una vez finalizada la puesta a punto, se verificó que efectivamente existía cavitación hidrodinámica en el reactor antes de comenzar los ensayos (ver Figura 6.40).

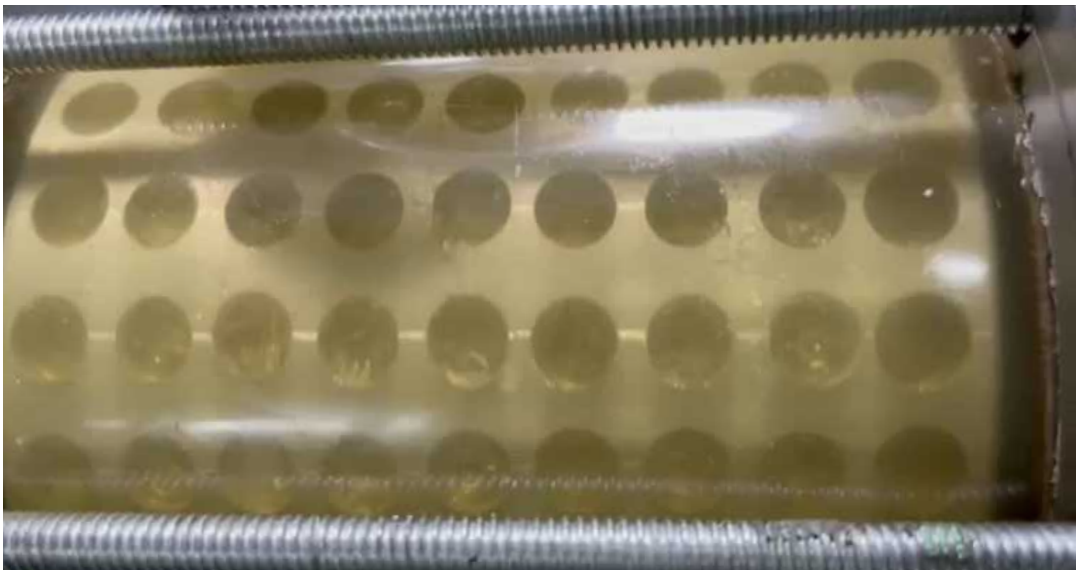
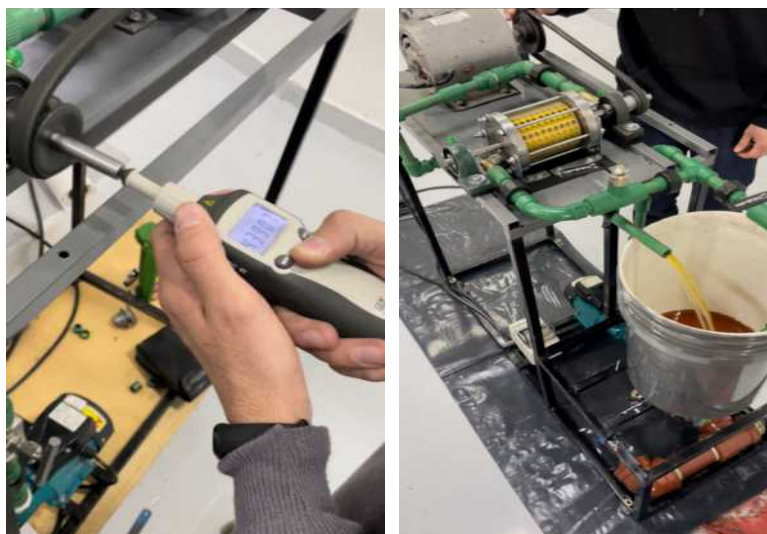


Figura 6.40. Verificación de presencia de cavitación.



(a) Medición de RPM.

(b) Verificación de fugas.

Figura 6.41. Puesta a punto de banco de pruebas.

6.4.2 Materias primas y reactivos

Para realizar los ensayos el equipo de diseño optó por utilizar como materia prima tanto aceite vegetal nuevo como aceite usado. En cuanto a los reactivos se decidió por el uso de exclusivamente metanol de calidad industrial debido a la disponibilidad en el mercado local. Los catalizadores básicos propuestos para el ensayo fueron hidróxido de sodio e hidróxido de potasio, pero como se verá más adelante, solo uno de ellos fue testeado en las pruebas realizadas.



(a) Aceite usado.

(b) Metanol y Metóxido de sodio.

Figura 6.42. Materias primas.

6.4.3 Ensayo

Durante los ensayos se tuvo el inconveniente de que al preparar el metóxido de potasio, la reacción exotérmica entre el metanol y el hidróxido de potasio fundió los recipientes plásticos provocando la pinchadura de los mismos y pérdida de líquidos inflamables. Por cuestiones de seguridad se consideró continuar las pruebas únicamente con metóxido de sodio. El protocolo de ensayo utilizado se presenta en el Anexo IV 13.

6.4.4 Equipos e instrumentos

Para la realización de cada uno de los ensayos fue necesario pesar las cantidades de hidróxido de sodio, medir los volúmenes a utilizar de metanol y aceite, y controlar la temperatura para la mezcla. Para esto se utilizó una balanza analítica marca PREC, termómetros de mercurio ASTM 8 marca MIV y probetas graduadas de 100, 250 y 500 ml (ver Figura 6.43).



Figura 6.43. Equipos e instrumentos de medición.

6.4.5 Análisis de muestras

Para la caracterización de las muestras obtenidas (ver Figuras 6.45 y 6.44) se realizaron análisis de densidad, viscosidad y pH, tanto para los productos obtenidos mediante el proceso con cavitación hidrodinámica, como para el proceso sin cavitación. Luego de obtener estos parámetros, se aplicó un proceso de purificación mediante destilación con el cual se obtuvieron las curvas características, y además, parámetros que permitieron calcular el índice de cetano. Adicionalmente, se midió la viscosidad cinemática, flash point, cloud point y por último, se realizó una cromatografía de FAME para determinar si las muestras contenían esteres metílicos (biodiésel). A continuación, se presentan los métodos utilizados para la determinación de las propiedades mencionadas:



(a) Muestras 7, 9 y 12 a partir de aceite usado.

(b) Muestras de productos obtenidos.

Figura 6.44. Muestras de productos obtenidos con aceite usado y nuevo.



Figura 6.45. Muestras de productos a ensayar.

- **Medición de PH: Tiras indicadoras**
- **Viscosidad: ASTM D445**
- **Densidad: ASTM D1298**
- **Curva de destilación: ASTM D86**
- **Índice de cetano: IRAM-IAPG 6686**
- **Flash point: ASTM D 93**
- **Cloud point: D 2500**
- **Cromatografía de FAME**

6.4.5.1 Medición de pH

Para la medición de pH se filtraron las muestras con filtros Whatman grado 42 de 2.5 *micrones* (ver Figuras 6.46a y 6.46b). Debido a los altos tiempos de filtrado se decidió medir únicamente 4 muestras representativas. Las muestras se seleccionaron según el origen del aceite y el proceso de obtención del producto. Las muestras 2 y 3 se tratan de productos obtenidos a partir de aceite nuevo. Siendo la 2 producida sin cavitación hidrodinámica y la 3 producida con cavitación. Las muestras 7 y 9, son productos obtenidos a partir de aceite usado. Siendo el producto 7, el producido sin cavitación y el producto 9, con cavitación hidrodinámica (ver Figura 6.47). En la Tabla 6.3 se presentan los datos obtenidos para el ensayo de pH. El pH registrado en los productos obtenidos a partir de aceite nuevo resultó ser básico. Esto se debe a la alta concentración de catalizador (NaOH) presente en la muestra. Adicionalmente, se registró la presencia de una fase de color blanquecino similar al color que presentan la formación de jabón. La fase glicerina luego de la decantación no se encontró completamente definida, por lo que se infiere que las proporciones utilizadas para este ensayo no fueron las correctas. En cuanto a los productos obtenidos a partir de aceite usado, los pH registrados resultaron ser ácidos, con valores de 5 y 5.5 para los procesos sin cavitación hidrodinámica y con cavitación respectivamente. Este resultado se debe en parte a la presencia de ácidos grasos libres que fueron transformados en esteres metílicos. Además, la fase glicerina quedó completamente definida, por lo que se podría inferir que la reacción producida en el ensayo es efectivamente transesterificación.

Tabla 6.3. Resultados de mediciones de pH.

PH medido	Sin cavitación	Con cavitación
Producto de aceite nuevo	9.5	8
Producto de aceite usado	5	5.5



(a) Sedimentos en filtros Whatman.

(b) Indicadores de pH-Fix.

Figura 6.46. Medición de pH.



Figura 6.47. Filtrado de muestras 2, 3, 7 y 9.

6.4.5.2 Viscosidad ASTM D445

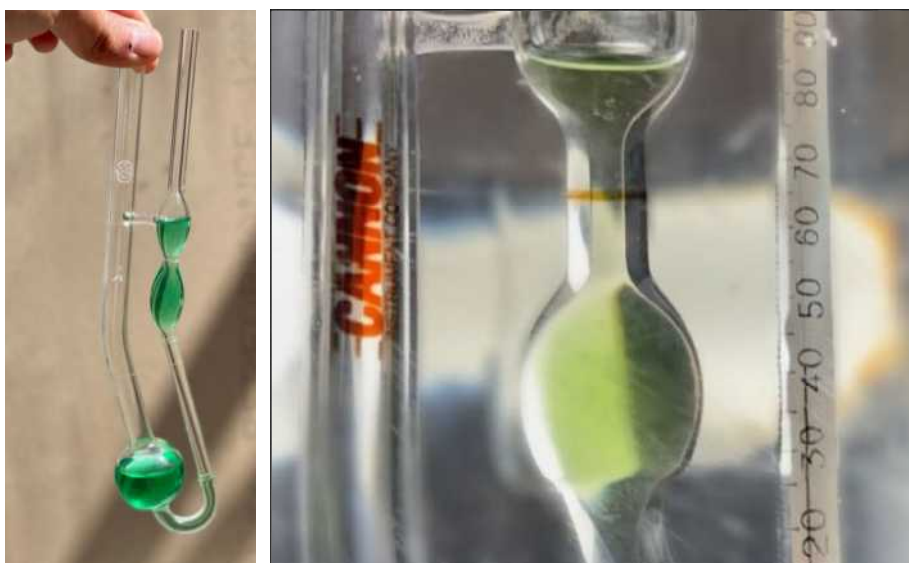
La medición de viscosidad se llevó a cabo utilizando el método ASTM D445. El viscosímetro utilizado fue el Cannon-fenske n°75, con diámetro capilar 0.54 mm, constante de Richtwert 0.008 y con rango de medición de 1.6 a 6.4 mm²/s. La ecuación utilizada para el cálculo es la siguiente:

$$\nu = K(t - \vartheta) \quad (6.5)$$

Donde

ν : Viscosidad cinemática	[mm ² /s]
t : tiempo	[s]
K : Constante de Richtwert	[-]
ϑ : Corrección de Hagenbach	[s]

Para la determinación de los tiempos deben cronometrarse los tiempos de escurrimiento entre las líneas de referencia (superior e inferior del bulbo) que presenta el viscosímetro (ver Figura 6.48). Otro parámetro a tener en cuenta es la temperatura del baño. Esta debe controlarse a 40 °C. De los ensayos realizados se obtuvo un tiempo medido promedio de 565 y 544 segundos para las muestras 7 y 9 respectivamente. Esto arroja como resultado una viscosidad de 4.520 y 4.352 mm²/s respectivamente. Ambos valores calculados se encuentran dentro del rango exigido por la norma de 1.9 a 6 mm²/s.



(a) Viscosímetro n°75

(b) Medición de tiempo de escurrimiento.

Figura 6.48. Medición de viscosidad.

6.4.5.3 Densidad ASTM D1298

En la medición de densidad se utilizó un hidrómetro ASTM 315H, de rango a 850 a 900 y divisiones de 0.5 kg/m^3 . Se colocaron las muestras a testear en probetas y se las acondicionó hasta alcanzar $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.4. Estos se encuentran en el rango esperado de 0.860 a 900 kg/l para biodiésel.

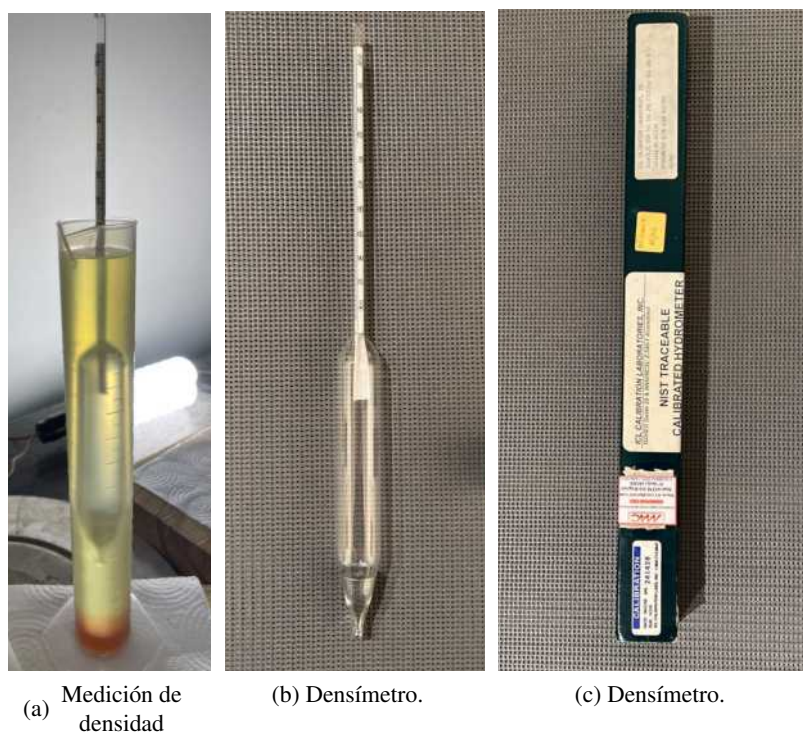


Figura 6.49. Medición de densidad.

Tabla 6.4. Resultados de mediciones de densidad.

Densidad medida	Sin cavitación	Con cavitación
Producto de aceite nuevo	0.895	0.868
Producto de aceite usado	0.883	0.875

6.4.5.4 Curva de destilación ASTM D86

La curva de destilación se construyó siguiendo el procedimiento recomendado en el método ASTM D 86, Standard test method for destilatium for petroleum products at atmosferic. Se registraron las temperaturas desde el punto inicial (primera gota) hasta el punto final, con un paso de 5 % en volumen entre mediciones, y la temperatura del baño en 12°C. Para el ensayo se colocaron 100 ml de las muestras de producto 7 y 9 a una temperatura entre 13 y 18°C. Las curvas obtenidas para ambas muestras presentan rangos de ebullición coincidentes con los esperados para biodiésel. Las temperaturas máximas de ebullición registradas fueron de 332 y 341°C para las muestras 7 y 9 respectivamente. Ambas se encuentran por debajo del limite de 360°C establecido por la norma ASTM D6751. En las Figuras 6.50 y 6.51 se presentan las curvas obtenidas y en las Tablas 6.5 y 6.6 los registros de temperatura para cada porcentaje de volumen recuperado.

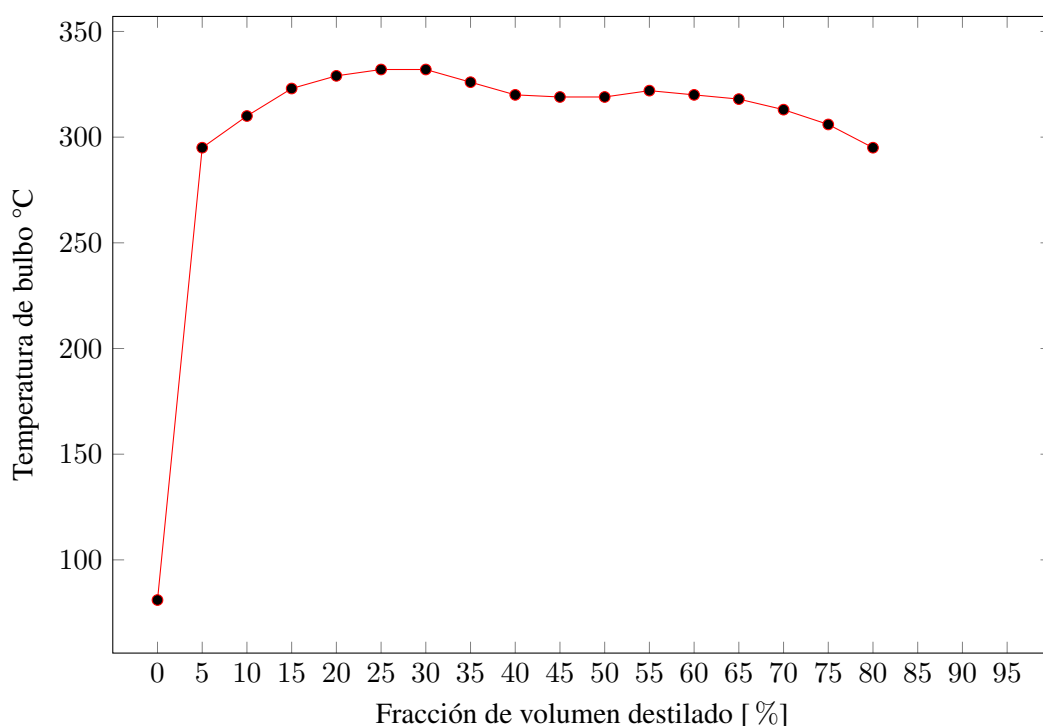


Figura 6.50. Curva de destilación de muestra N°7 (sin cavitación).

Tabla 6.5. Tabla de resultados muestra 7 (sin cavitación).

	Pto inicial	5ml	10ml	15ml	20ml	25ml	30ml	35ml	40ml	45ml
Temp °C	81	295	310	323	329	332	332	326	320	319
	50ml	55ml	60ml	65ml	70ml	75ml	80ml	85ml	90ml	95ml
Temp °C	319	322	320	318	313	306	295	-	-	-

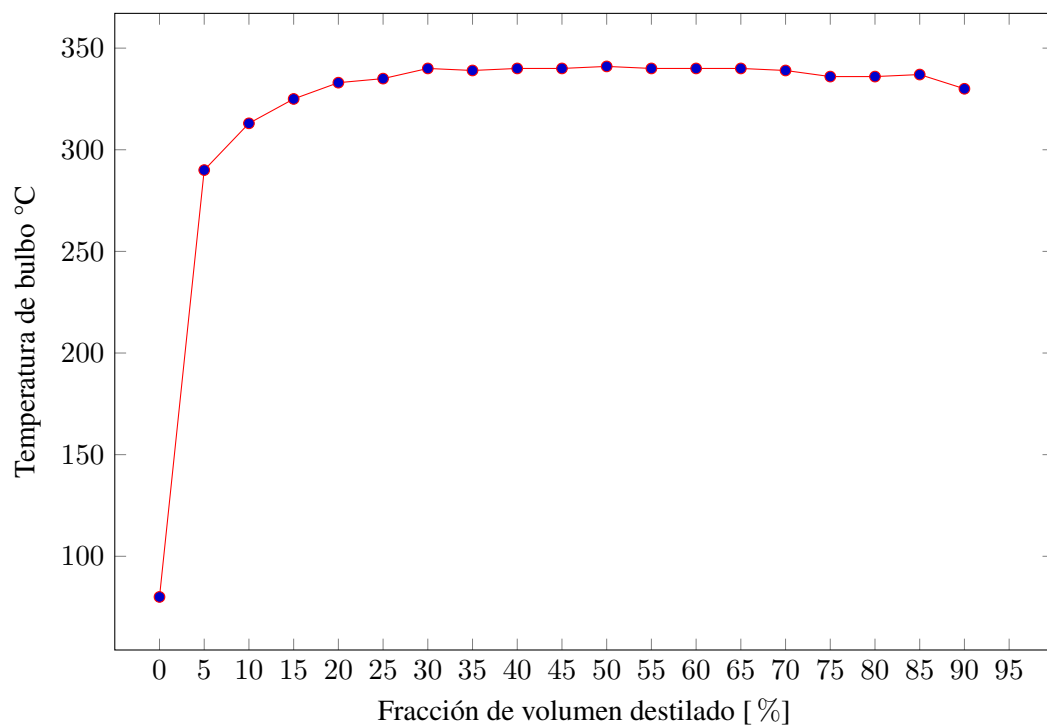
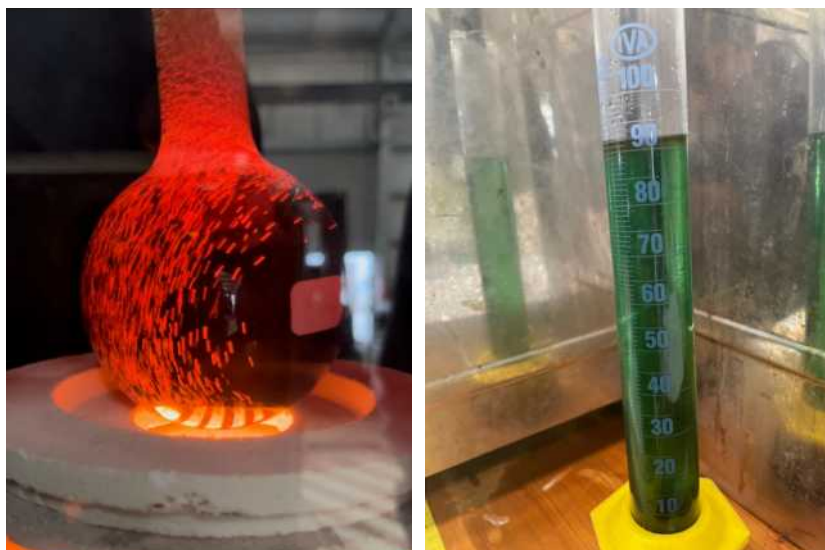


Figura 6.51. Curva de destilación de muestra N°9 (con cavitación).

Tabla 6.6. Tabla de resultados muestra 9 (con cavitación).

	Pto inicial	5ml	10ml	15ml	20ml	25ml	30ml	35ml	40ml	45ml
Temp °C	80	290	313	325	333	335	340	339	340	340
	50ml	55ml	60ml	65ml	70ml	75ml	80ml	85ml	90ml	95ml
Temp °C	341	340	340	340	339	336	336	337	330	-



(a) Balón de destilación.

(b) Probeta con destilado.

Figura 6.52. Medición de pH.



Figura 6.53. Destiladora.

6.4.5.5 Índice cetano IRAM-IAPG 6686

El índice de cetano calculado requiere del uso de parámetros obtenidos de la curva de destilación. En este caso, se calculó el índice de cetano de la muestra número 9 con los valores de densidad obtenidos anteriormente y las temperaturas de producto recuperado a 10 %, 50 % y 90 % de volumen. La ecuación propuesta en la norma IRAM-IAPG 6686 es la siguiente:

$$IC = 45.2 + 0.0892 + (0.131 + 0.901B)T_{50N} + (0.0523 - 0.42B)T_{90N} + 0.00049(T_{10N}^2 - T_{90N}^2) + 107B + 60B^2 \quad (6.6)$$

$$B = [\exp(-0.0035D_N) - 1] \quad (6.7)$$

$$D_N = D - 850 \quad (6.8)$$

$$T_{N10} = T_{10} - 215 \quad (6.9)$$

$$T_{N50} = T_{50} - 260 \quad (6.10)$$

$$T_{N90} = T_{90} - 310 \quad (6.11)$$

El resultado obtenido del cálculo es 56.09. Se comprueba de esta manera que el índice de cetano calculado se encuentra dentro de los valores estipulados por la norma ASTM D6751 que establece un mínimo de 47.

6.4.5.6 Flash Point ASTM D93

Para realizar este ensayo se vertieron las muestras de producto en un recipiente metálico (copa abierta) y se elevó la temperatura lentamente. Durante el calentamiento se fueron aplicando, reiteradas veces, la fuente de ignición para lograr la llama y así determinar la presencia de vapores inflamables. El ensayo se realizó hasta los 133 °C y no se registró presencia de vapores inflamables durante el calentamiento (ver Figura 6.54). De esta manera quedo determinado que el punto de inflamación de las muestras se encuentran dentro del limite inferior establecido por la norma de ASTM D93 de 130°C .

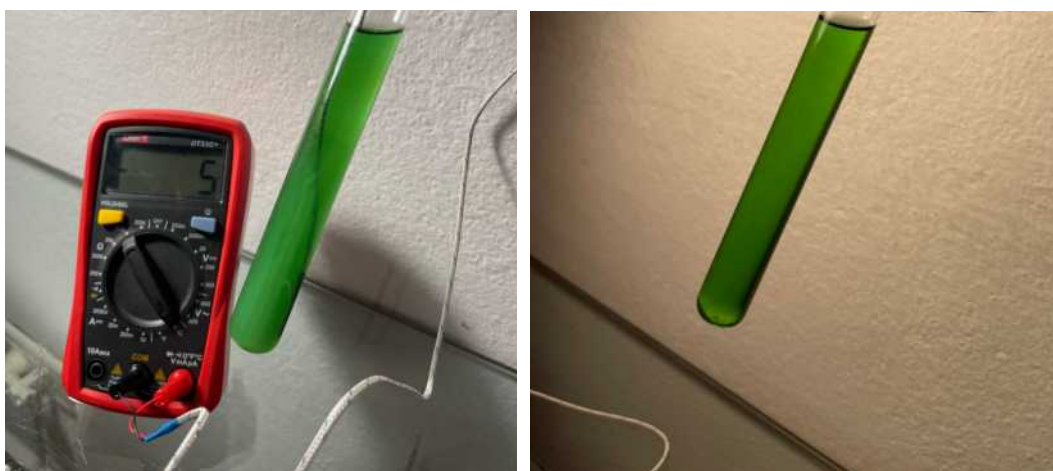


Figura 6.54. Flash point.

6.4.5.7 Cloud Point ASTM D2500

Para determinar el cloud point o punto de turbidez se enfrió el baño de etanol grado comercial (95 %), hasta la temperatura de -18°C . Luego, se colocó el tubo de ensayo con la muestra dentro del baño y se registró el descenso de temperatura de la muestra. Durante el enfriamiento se pudo observar que la formación y crecimiento de cristales se produce a una temperatura de $-5 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 6.55a se puede observar la formación de cristales en la parte baja del tubo de ensayo, donde la temperatura es inferior. El valor obtenido se encuentra dentro del rango de -12°C a -3°C que establece la norma ASTM D6751.



(a) Muestra a -5°C .

(b) Muestra a temperatura ambiente.

Figura 6.55. Medición de cloudpoint.

6.4.5.8 Cromatografía

Con ayuda de docentes del CITAAC (Centro de Investigaciones en Toxicología Ambiental y Agrobiotecnología del Comahue) se realizó la cromatografía de la muestra 9 y se la contrasto contra una cromatografía de aceite de girasol transesterificado (ver Figura 6.56). Los resultados obtenidos indican coincidencia entre los picos más importantes del aceite transesterificado y los picos obtenidos en la muestra 9. De esta manera, se podría inferir que los picos de la muestra 9 se tratan de ésteres metílicos. Para especificar fehacientemente el porcentaje de esteres metílicos restaría contrastar con el estándar para biodiésel y utilizar una columna polar.

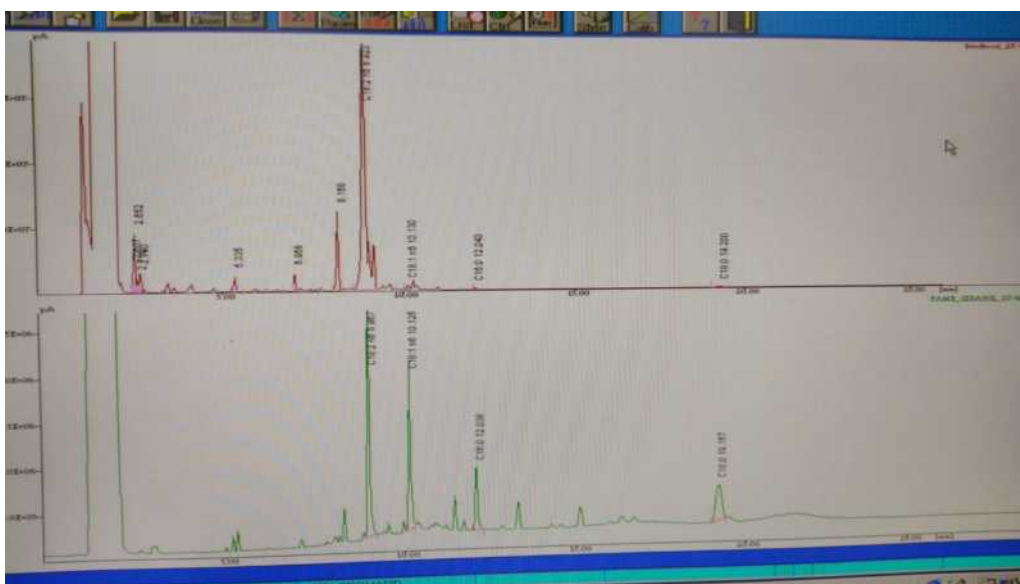


Figura 6.56. Cromatografía.

6.4.6 Resultados

Se pudo observar una mejora significativa en los tiempos de decantación para los productos obtenidos a partir de cavitación hidrodinámica. En la Figura 6.57a se muestran los productos 7 y 9 al principio del proceso de decantación y en la Figura 6.57b se muestran los productos pasados 5 minutos. La velocidad de decantación es una variable importante en el proceso productivo de biodiésel y los resultados obtenidos podrán utilizarse para diseñar procesos más productivos y más eficientes que los procesos convencionales.

En cuanto a las muestras de los productos analizados, los resultados de los distintos ensayos son comparables con los reportados en la literatura consultada:

- La viscosidad a 40°C se encuentra entre los límites superior e inferior de la norma ASTM



(a) Muestra 7 proceso sin cavitación.

(b) Muestra 9 proceso con cavitación.

Figura 6.57. Tiempos de decantación.

Método D445. Y la densidad a 15°C está dentro de las especificaciones para biodiésel. Por lo que se garantiza una fluidez y comportamiento adecuado para motores de combustión interna.

- La temperatura de destilación obtenidas a 10 % , 50 % , 90 % , se encuentra por dentro del rango especificado para biodiésel respecto a la norma ASTM D6751, lo que evidencia que el producto no contiene contaminantes de alto punto de ebullición.
- El índice de cetano calculado (IC=56.09), está por encima del valor mínimo (IC=47), de acuerdo con el método ASTM D 976. Esto garantiza condiciones de autoencendido adecuadas para motores de combustión interna encendidos por compresión.
- El punto de inflamación (Flash point), se encuentra por encima del valor mínimo dado en el método ASTM D 93 de 130°C . Por esta razón se considera que el producto es seguro para su almacenamiento y adecuado para su uso.
- El Cloud point obtenido -5°C se encuentra en el rango establecido. Debido a las condiciones climáticas de la región se deberá tener en cuenta este valor y considerar el uso de algún aditivo para evitar la formación de cristales y su correcta fluidez.

Con los resultados obtenidos, se puede inferir que los productos están compuestos por ésteres metílicos (FAME), o Biodiésel y su posible aptitud para el uso como combustible en motores diésel.

7. INGENIERÍA BÁSICA

Esta sección tiene como objetivo definir la arquitectura de la planta. Para este proyecto se optó por una la arquitectura modular, ya que los elementos físicos realizan una o pocas funciones y las interacciones entre ellos están bien definidas. Otra razón por la que se eligió esta arquitectura es que los componentes se pueden diseñar de manera independiente unos de otros y, en caso de ser necesario, se podrán realizar cambios en el diseño de estos sin que se requieran cambios en los demás. A continuación, se procede a realizar el diseño y/o selección de los componentes principales y definir el posicionamiento de cada bloque en el espacio (*layout* geométrico).

7.1 Bloque 1: Sistema de alimentación

En este bloque se definen los equipos y elementos encargados de recibir, suministrar y regular las materias primas y el abastecimiento energético de la planta. Los componentes y equipos que componen el sistema de alimentación son los siguientes.

- *Componentes eléctricos*
- *Tanques de alimentación*
- *Tuberías y accesorios*
- *Bombas*
- *Válvulas*

7.1.1 Componentes eléctricos

En primer lugar, es conveniente definir que la planta será energizada con energía disponible en el territorio nacional, la cual es alterna, de 220 *Volts* y con frecuencia de 50 *Hz*. También, hay que tener en cuenta la potencia máxima especificada, la cual no debe superar los 5000 *W*, según se muestra en la Tabla 4.3 de especificaciones técnicas. En la Tabla 7.1 se presentan los componentes seleccionados y los cálculos del dimensionamiento de los componentes presentan en el Anexo 10.1.



Figura 7.1. Componentes eléctricos.

7.1.2 Tanque de alimentación

Para garantizar el suministro de materia prima a la planta, en este caso de aceite y metóxido, es necesario contar con recipientes o tanques de almacenamiento. Para esto, se seleccionan recipientes de acero inoxidable para trabajar con fluidos corrosivos dadas las propiedades del material, robustez y durabilidad. El tanque de aceite tiene una capacidad de 60 *litros* según se muestra en la Figura 7.2a, mientras que el tanque de metóxido tiene una capacidad de 10 *litros* (ver Figura 7.2b). En la Tabla 7.2 se muestran los tanques seleccionados con sus respectivos costos.



Figura 7.2. Tanques de alimentación.

7.1.3 Tuberías y accesorios

Para la conducción de los fluidos en la planta se utilizan tuberías y accesorios de acero inoxidable. Esta selección se fundamenta en su resistencia a la corrosión y durabilidad. Para el dimensionamiento de las tuberías se toma como referencia una velocidad máxima de escurrimiento de 2.5 m/s de acuerdo las recomendaciones del Instituto de Hidráulica (ANSI/HI, 2016) y según el

caudal especificado en la Tabla 4.3 de 1 l/min , se selecciona una tubería de diámetro nominal de $1/2 \text{ pulg}$ con un schedule número 40. Los elementos seleccionados se muestran en la Tabla 7.3.

La velocidad obtenida en estas condiciones se encuentra dentro del rango de trabajo recomendado. Los cálculos se presentan en el Anexo 10.2.



Figura 7.3. Tuberías y accesorios.

7.1.4 Bombas

Para mover los fluidos desde un punto a otro en los distintos tipos de procesos de la planta, es necesario contar con bombas adecuadas para cumplir tales funciones. Para garantizar el flujo de aceite que se encuentra en el recipiente de almacenamiento a temperatura ambiente y alinearlo hacia el proceso de acondicionamiento, se selecciona una bomba de aceite de baja temperatura. Luego, una vez acondicionado el aceite, (cabe destacar que está a una temperatura cercana a los $120 \text{ }^\circ\text{C}$), se bombea hacia el sistema de mezcla utilizando una bomba de aceite de alta temperatura. Finalmente, para la dosificación del metóxido desde el tanque de almacenamiento hacia el sistema de mezcla se utiliza una bomba dosificadora. En la Figura 7.4 se presenta un esquema con las bombas mencionadas y la disposición de las mismas.

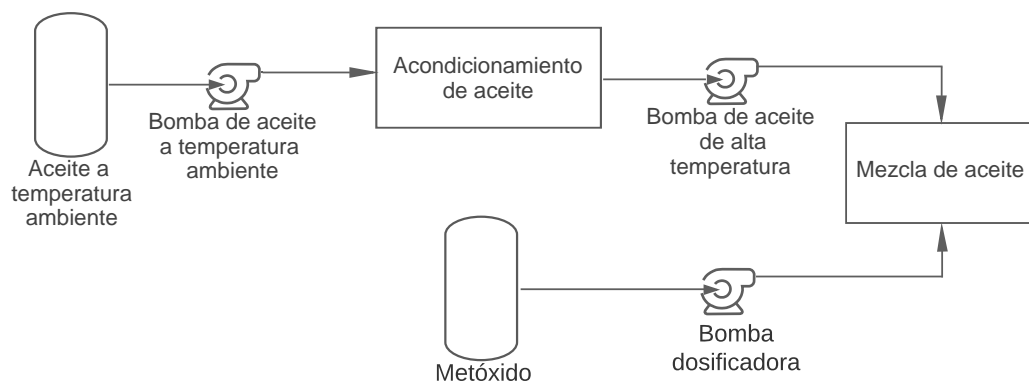


Figura 7.4. Esquema de bombas.

Para ejecutar cada una de estas funciones se seleccionan bombas centrífugas capaces de cumplir con los requerimientos en base a las métricas definidas en la Tabla 4.3. Así mismo, para la selección adecuada de cada bomba se debe tener en cuenta la curva del sistema (que a priori no está definida, ya que los elementos que componen el sistema están en desarrollo y/o selección). Este proceso es del tipo iterativo; No obstante, se realiza una primera aproximación de la curva del sistema la cual se refinará en las siguientes etapas de diseño. Los cálculos de las curvas se presentan en el Anexo 10.2. Otro punto a tener en cuenta para la correcta selección de las bombas es el contexto operativo al que estará sometida cada una de las bombas, como puede ser la temperatura del ambiente, la fluctuación en las propiedades de los fluidos, la capacidad a la que estará trabajando la planta, entre otras.

Las bombas centrífugas seleccionadas que cumplen con los requisitos mencionados anteriormente se presentan en la Tabla 7.4. Estas son de la marca Iwaki America Inc, que son provistas en el mercado local. Algo a considerar es que los ensayos de las bombas generalmente se realizan utilizando agua como fluido y a temperatura ambiente, por lo que las curvas características están dadas en estas condiciones de trabajo. Para obtener curvas aproximadas al comportamiento real se corrigen las curvas de performance para trabajar con los diferentes fluidos, en este caso con aceite y metóxido, y a las temperaturas requeridas en los distintos procesos. Los cambios de viscosidades y densidades de cada fluido afectan o modifican el caudal, la altura, el rendimiento y la potencia de cada una de las bombas.

Las características y curvas de performance se presentan en el Anexo 10.3 y los cálculos para las correcciones son los propuestos por el Instituto de Hidráulica (ANSI/HI, 2010) y se presentan en el Anexo 10.4.

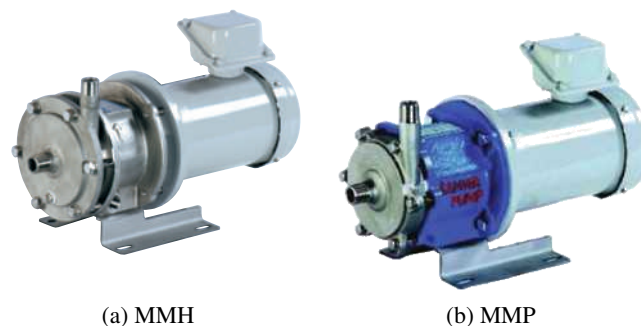


Figura 7.5. Bombas.

7.1.5 Válvulas

Para el control adecuado de los procesos en la planta es necesario poder regular la circulación de los fluidos mediante distintos tipos de válvulas. En este caso particular se utilizan 3 tipos.

- Válvula aguja: Utilizada para obtener una regulación fina del caudal.
- Válvula de retención: Su función es impedir la inversión del flujo en el circuito.
- Válvula esférica: Su función es la de cerrar el paso del fluido aislando así ciertos componentes.

Las válvulas seleccionadas se presentan en la Tabla 7.5. Las propiedades y características se presentan en el Anexo 10.5.



Figura 7.6. Válvulas.

7.2 Bloque 2: Sistema de acondicionamiento de reactivos

El sistema de acondicionamiento de reactivos consiste en poner en especificación el aceite usado y el metóxido para que el proceso de reacción se realice sin inconvenientes. En este bloque se realizan siguientes procesos:

- Eliminación de partículas
- Eliminación de agua

7.2.1 Eliminación de partículas

La primera parte del acondicionamiento del aceite y el metóxido se basa en eliminar el material particulado dado que las partículas pueden obstruir los inyectores de combustible, válvulas y otros

dispositivos esenciales de los motores. Para la eliminación de las partículas se utiliza un filtro de 5 micrones según las recomendaciones dadas por Mittelbach (Mittelbach, 2012). En la Tabla 7.6 se muestran los elementos seleccionados.



Figura 7.7. Filtro de partículas.

7.2.2 Eliminación de agua

La segunda parte del acondicionamiento del aceite y el metóxido se basa en eliminar el agua que pueda contener el aceite, dado que en presencia de agua ocurre una reacción no deseada llamada saponificación (la formación de jabón). El metóxido es adquirido con una alta pureza con lo que se asegura que no contiene agua. Esta parte del acondicionamiento también tiene la función de precalentar los reactivos a una temperatura adecuada para la reacción. La temperatura recomendada ronda los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ según Mittelbach (Mittelbach, 2012). Para esto se propone utilizar un dispositivo ad-hoc, que disponga de un recipiente capaz de contener el aceite y una resistencia eléctrica para lograr la evaporación del agua y el precalentamiento requerido. Teniendo en cuenta que la evaporación del agua se realiza a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y luego el aceite debe ser enfriado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ se propone utilizar un intercambiador de calor de placas para precalentar la corriente de aceite frío y de esta manera recuperar parte de esta energía suministrada.



Figura 7.8. Eliminación de agua.

7.3 Bloque 3: Sistema de control lógico

El sistema de control lógico controla el funcionamiento de la planta y sus procesos. En este trabajo se buscará generar algoritmos específicos con un enfoque a seguridad de los procesos (calidad del producto) sin dejar de lado la seguridad operativa. La Figura 7.10 muestra el diagrama de flujo que ilustra la lógica de control y la toma de decisiones del controlador programable. En primera instancia, el controlador solicita una medición del suministro eléctrico y niveles de producto en los recipientes de aceite y metóxido. Si estos son correctos, el control pedirá que se definan los parámetros de operación (caudales volumétricos, relaciones molares, temperaturas de reacción y acondicionamiento y el volumen a procesar). Una vez realizado este paso el sistema de control da la orden para el comienzo de llenado del recipiente de acondicionamiento. Alcanzado el nivel adecuado en el tanque se activa el control de temperatura para comenzar con el secado del aceite. Luego, el controlador da la orden de puesta en marcha del reactor y comienzan los procesos de control de caudales y temperaturas correspondientes. Para garantizar que las variables termodinámicas sean las correctas, el control censa continuamente lecturas de caudales y temperaturas. Alcanzado el nivel de volumen procesado el control envía la señal de apagado a todos los procesos.



(a) PLC

(b) Modulo de expansión.

Figura 7.9. Sistema de control lógico.

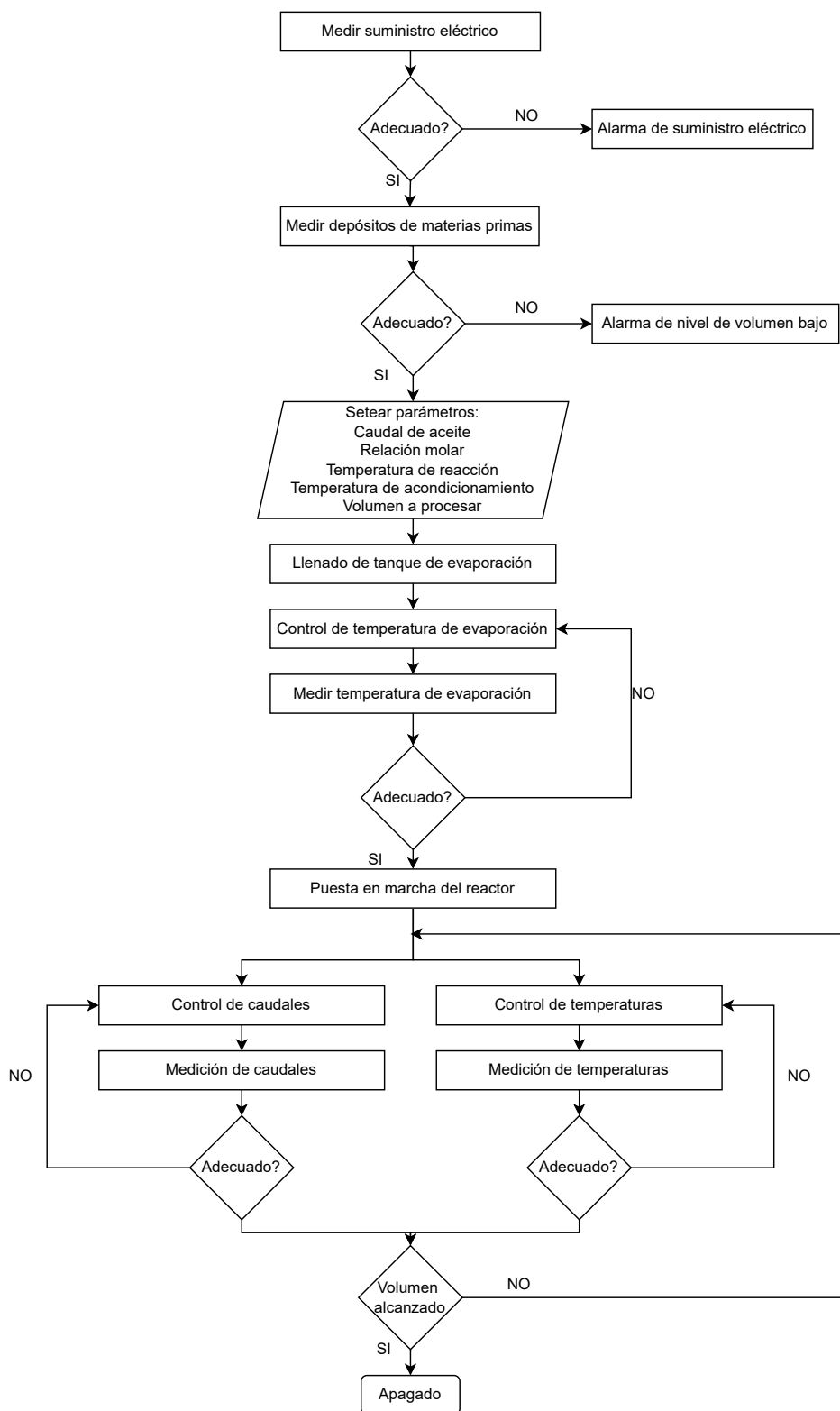


Figura 7.10. Diagrama de lógica de control.

7.4 Bloque 4: Sistema de dosificación

En función del concepto solución seleccionado se determinó que los componentes requeridos para dosificar adecuadamente el metóxido son: la válvula de regulación tipo aguja marca Genebre y la bomba de metóxido Iwaki, ambos ya seleccionados en el bloque 1 en las subsecciones 7.1.4 y 7.1.5 respectivamente. Adicionalmente con la asistencia del sistema de control se incorpora un motor paso a paso Nema 23 en el vástago de la válvula aguja. Este componente ya fue seleccionado en el bloque 3, en la sección 7.3).



Figura 7.11. Sistema de dosificación.

7.5 Bloque 5: Sistema de reacción

Los elementos que integran el sistema de reacción se presentan en la sección 6.1.

7.6 Bloque 6: Sistema de conversión de energía

El objetivo de este sistema es recibir y convertir la energía de manera adecuada. Para esto es necesario asegurar una correcta fijación de los componentes hidráulicos, eléctricos y mecánicos en una estructura que sea capaz de soportar las cargas aplicadas, ya sean térmicas como solicitaciones por fuerzas o momentos. A su vez deberá ser capaz de amortiguar las vibraciones provocadas por los elementos rotativos del sistema. Por otra parte, la estructura tendrá que ser robusta y a su vez ligera para su traslado y portabilidad. Por esta razón se decide utilizar perfiles estructurales cuadrados de acero de 20x20 *mm* con la disposición que se muestran en las Figuras 7.12 y 7.13. En la Tabla 7.9 se presentan los costos estimados para la construcción de la estructura del bastidor.

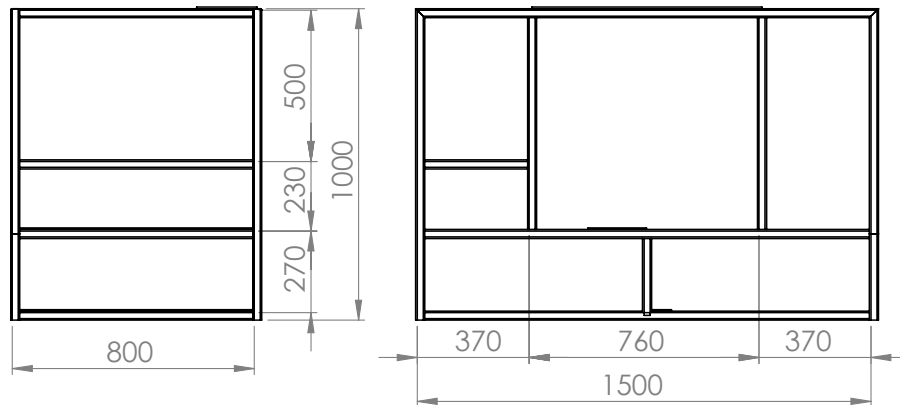


Figura 7.12. Dimensiones generales del bastidor.

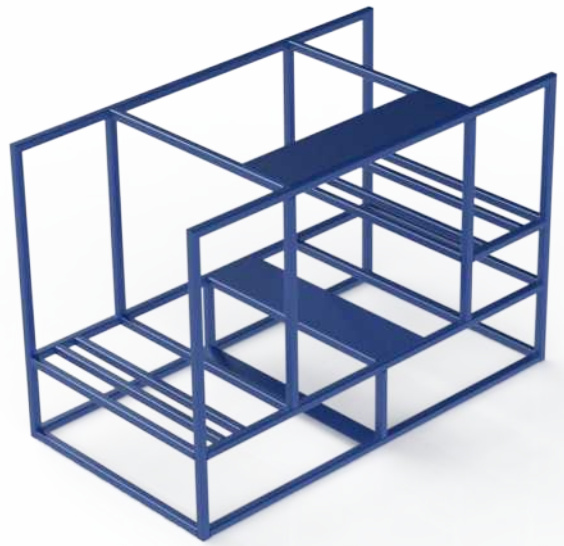


Figura 7.13. Bastidor.

7.7 Bloque 7: Sistema de separación

La elección del dispositivo empleado en el sistema de separación de biodiésel y glicerina se fundamenta en los estudios publicados por Huangal y Abbaszaadeh (Huangal, 2019; Abbaszaadeh, 2014) y en pruebas a pequeña escala que el equipo de diseño realizó previamente. Para este caso particular se propone la utilización de un recipiente transparente que consta de una entrada lateral por donde ingresa la mezcla de biodiésel-glicerina y dos salidas, una en el fondo y otra en la parte superior por las cuales se extraerán la glicerina y el biodiésel respectivamente. Para que la separación de las dos fases se realice de manera efectiva es necesario introducir un alto voltaje a la mezcla. La glicerina con una mayor conductividad se acumulará en el fondo del recipiente y el biodiésel con menor conductividad migrará a la parte superior. Los electrodos a utilizar son dos

varillas de cobre macizas de 25 cm de largo, 8 mm de diámetro. Como fuente de alimentación se utiliza un transformador de corriente eléctrica de 220 V que permita regular los voltajes a 9000 V (35 mA) con corriente alterna. Los costos de los componentes se resumen en la siguiente tabla.



Figura 7.14. Separador electrostático.

7.8 Bloque 8: Sistema de alarma

Cuando los procesos se encuentren fuera de los parámetros de funcionamiento preestablecidos, el sistema de alarmas entrará en vigencia. Alarmas lumínicas como sonoras deberán activarse para dar aviso al operario de la situación anormal. Para esto se selecciona una baliza sirena rotativa y una botonera de parada de emergencia. Otra medida de seguridad sería monitorear los valores de caudal y presiones in situ. Para esto se seleccionan caudalímetros tipo rotámetros de acrílico y manómetros mecánicos.



(a) Baliza.



(b) Caja de pulsadores.

Figura 7.15. Sistema de alarma.

7.9 Análisis de costos

Con el grado de avance obtenido hasta este punto, se realiza un costeo temprano para determinar la viabilidad del proyecto y la posibilidad de continuar con la ingeniería de detalle de la planta. A continuación, se presentan las tablas con los costos estimados obtenidos para cada uno de los bloques.

Tabla 7.1. Sistema de Alimentación. Componentes eléctricos.






Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Gabinete Schneider ip 66	Comercial	120	1	120
 Interruptor termomagnético Schneider 25A	Comercial	8	1	8
 Interruptor diferencial Schneider 25A C.fuga de 30 mA	Comercial	25	1	25
 Cables Kalop TPR 3x6 mm	Comercial	4/m	10	40
 Puesta tierra jabalina lisa 3/8x1.5 m	Comercial	11	1	11
Total				204

Tabla 7.2. Sistema de Alimentación. Componentes Hidráulicos.



Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Tanque 10 litros inoxidable	Comercial	58	1	58
 Tanque 60 litros inoxidable	Comercial	70	1	70
Total				128

Tabla 7.3. Sistema de Alimentación. Tuberías y accesorios.






Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Tubería inox. 1/2 pulg	Comercial	7/m	1	7
 Codo 1/2 pulg	Comercial	4.5	1	4.5
 Conexión T 1/2 pulg	Comercial	10	1	10
 Unión doble 1/2 pulg	Comercial	15	1	15
 Mano de obra	Comercial	10	1	10
Total				46.5

Tabla 7.4. Sistema de Alimentación. Bombas.




Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Bombas de aceite a temperatura ambiente IWAKI MMP11	Comercial	96	1	96
 Bombas de aceite a alta temperatura IWAKI MMH11	Comercial	96	1	96
 Bombas de metóxido IWAKI MD-6Z	Comercial	140	1	140
Total				332

Tabla 7.5. Sistema de Alimentación. Válvulas.




Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Válvula aguja 6000 NPT H-H 1/2 pulg	Comercial	32	3	64
 Válvula esférica 1/2 pulg	Comercial	13	6	78
 Válvula de retención 1/2 pulg	Comercial	13	6	78
Total				220

Tabla 7.6. Sistema de eliminación de partículas.



Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Filtro de aceite	Comercial	3	1	3
 Carcasa porta filtro	Comercial	24	1	24
Total				27

Tabla 7.7. Sistema de eliminación de agua y precalentamiento.





Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$	
	Resistencia eléctrica	Comercial	9	1	9
	Tanque inoxidable	Comercial	50	1	50
	Intercambiador de calor Calgaro E40100	Comercial	70	1	70
	Instalación	Comercial	21	1	21
Total					150

Tabla 7.8. Sistema de control lógico.






Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$	
	PLC Siemens Logo 8	Comercial	154	1	154
	Modulo expansión Logo 8	Comercial	81	1	81
	Caudalímetro Microstream	Comercial	16	3	16
	Sensor temperatura Pt100	Comercial	19	3	19
	Motor paso a paso Nema 23	Comercial	23	3	69
Total					339

Tabla 7.9. Sistema de conversión de energía.




Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Caño estructural 20x20 mm	Comercial	14	5	70
 Chapa lisa 1/4 1 m ²	Comercial	98	1	98
 Mano de obra	Comercial	50	1	50
Total				218

Tabla 7.10. Sistema de separación.






Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Separador	Manufacturado	300	1	300
Total				300

Tabla 7.11. Sistema de alarmas.

Componente	Tipo	Precio US\$	Unidades	Total US\$
 Baliza rotativa	Comercial	9.6	1	9.6
 Caja pulsadores	Comercial	65	1	65
 Rotámetro	Comercial	50	1	50
 Manómetros	Comercial	35	1	35
Total				159.6

Al realizar el costeo temprano, se obtuvo que el costo de fabricación de la planta asciende a 2124 USD aproximadamente. Este resultado es positivo y da una idea de la viabilidad económica del proyecto, ya que, en mercado actual, los precios de plantas con capacidades productivas similares parten desde los 17000 USD y pueden ascender hasta 50000 USD.

7.10 Resultados de ingeniería básica

Partiendo del concepto solución para los distintos bloques, críticos y básicos, se le dio forma a cada uno ellos teniendo en cuenta la arquitectura modular propuesta para este proyecto.

En la Figura 7.16 se muestra la disposición de cada bloque en el espacio con todos los componentes seleccionados y prediseñados en la etapa de ingeniería básica.

Antes de avanzar con la ingeniería de detalle se deberían contemplar las siguientes líneas de trabajo:

- Estudio de desgaste por pitting en reactores de cavitación hidrodinámica.
 - Plan de mantenimiento.
 - Diseño de recuperador de metanol.
 - Diseño de módulo de lavado de biodiésel.
 - Diseño de módulo de refinado.
-

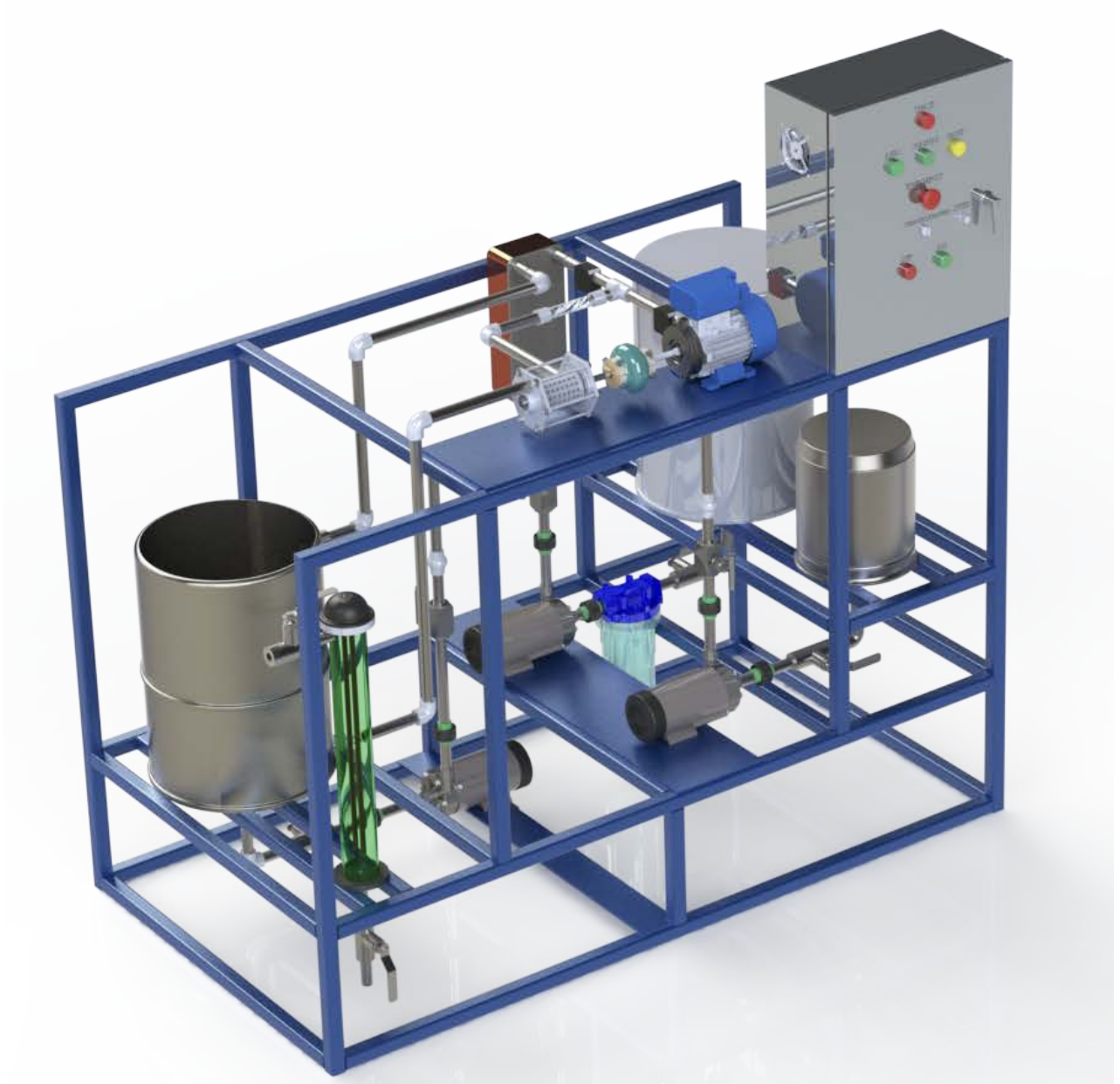


Figura 7.16. *Layout* de ingeniería básica.

8. CONCLUSIONES

En primer lugar, se logró confirmar la presencia de cavitación hidrodinámica en el reactor, validando de esta manera los cálculos y simulaciones simplificadas realizadas en el dimensionamiento. En especial la geometría de orificios utilizada para la lograr la reducción local de la presión. A su vez, se corroboró la incidencia de las variables de proceso, como la temperatura y la velocidad de giro. Se verificó que al aumentar tanto la temperatura como la velocidad de giro, el fenómeno de cavitación se intensificaba. No obstante, es necesario considerar el desgaste por cavitación tanto en el rotor como en el estator para poder estimar la vida útil de los componentes.

El segundo hallazgo, fue el registro de una sustancial mejora en los tiempos de reacción y decantación del producto final a partir de cavitación hidrodinámica en comparación con el proceso convencional de recirculado. Si bien los tiempos de inicio y fin de decantación no fueron definidos, al observarse la tasa de separación de glicerina, se pudo concluir que el proceso de reacción por cavitación hidrodinámica es adecuado para utilizarse en plantas de producción continua.

Por otro lado, en la fase de validación experimental, se analizaron y caracterizaron las muestras. Estas arrojaron valores comparables con los parámetros definidos por las normas internacionales (véase la sección 6.4.6). Con los resultados obtenidos, se puede inferir que los productos están compuestos por biodiésel y su posible aptitud para el uso como combustible en motores diésel. Solo queda pendiente realizar un análisis completo de todas las propiedades en un laboratorio especializado y obtener la certificación de calidad.

Finalmente, partiendo del *layout* establecido con la arquitectura de la planta, se desarrolló la ingeniería básica de los componentes. En esta etapa, se aplicaron herramientas de costeo temprano, obteniéndose resultados positivos en cuanto a la viabilidad del proyecto.

El proyecto resultó ser muy valioso para el equipo. El diseño de los componentes y la máquina, las tareas de fabricación, búsquedas de presupuestos, la utilización de software específico, la realización de cursos y reuniones con especialistas, son algunas de las tareas que permitieron ampliar los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería mecánica. Esperamos que este trabajo fomente el uso e investigación de esta tecnología con el fin de potenciar economías regionales y favorecer al desarrollo sostenible y sustentable de la región.

9. REFERENCIAS

129. (2001). <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-129-2001-68158>
- Abbaszaadeh. (2014). *Electrostatic coagulation for separation of crude glycerin from biodiesel*. Adv. Environ. Biol.
- ANSI/HI. (2010). *ANSI/HI 9.6.7: American National Standard (Guideline) for Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance*. Hydraulic Institute. www.Pumps.org
- ANSI/HI. (2016). *ANSI/HI 9.6.6: American National Standard for Rotodynamic Pumps for Pump Piping*. Hydraulic Institute. www.Pumps.org
- ASTM-D6751. (2012). *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend*. ASTM.
- Brennen, C. E. (2014). *Cavitation and Bubble Dynamics*. Cambridge University Press.
- CRANE. (2013). *Flow of fluids through Valves, Fittings and Pipe*. Crane Co.
- EN-14214. (2020). *Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods*. EN.
- EPA. (2002). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001ZA0.pdf>
- Frank White, H. X. (2021). *Fluid Mechanics*. McGraw Hill LLC.
- Highland Fluid Technology, L. (2019). <https://patents.google.com/patent/US10258944B2>
- Huangal. (2019). *Separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiésel con aplicación de varios voltajes y distancias entre electrodos*. Scielo.
- Hydro Dynamics, I. (2008). <https://patents.google.com/patent/US7360755B2>
- ISO-286. (2010). *ISO code system for tolerances on linear sizes*. EN.
- KISSsoft. (2018). Computer Software. Gleason Company. <https://www.KISSsoft.AG>
- Lemmon, E. W., Bell, I., Huber, M. L. & McLinden, M. O. (2018). NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/https://doi.org/10.18434/T4/1502528>
- Mittelbach, M. (2012). *Advances in biodiesel catalysts and processing technologies*. Editorial McGraw-Hill.
- N°12694. (2012). <http://www.muninqn.gov.ar/info/doc/digesto/ordenanzas/12694.pdf>

- Ozonek, J. (2012). *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. CRC Press.
- Pahl, G. & Beitz, W. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Editorial Springer-Verlag.
- Solidworks. (2016). *Dassault Systemes*. Computer Software. Dassault Systemes. <https://www.solidworks.com/>
- Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D. (2009). *Product Design and Development*. Editorial McGraw-Hill Education.
-

10. ANEXO I: MEMORIA DE CÁLCULO

10.1 Dimensionamiento de componentes eléctricos

Para el dimensionamiento de los componentes eléctricos se necesitan conocer parámetros como son las fases con las que se trabaja, (trifásico o monofásico), la tensión, la frecuencia y la potencia. En este caso, la planta se diseña para trabajar con una fase y energizado por la red local, con lo cual se tiene una frecuencia de 50 Hz y una tensión de 220 Volts . Para la potencia tenemos que esta dada en las especificaciones técnicas según la Tabla 4.3, la cual es de 5000 W . Luego, para el cálculo de la corriente eléctrica, utilizamos la Ecuación 10.1.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{5000}{220} = 22.7\text{ Amper} \quad (10.1)$$

Donde

P : Potencia [*Watts*]

V : Tensión eléctrica [*Volts*]

I : Corriente eléctrica [*Amper*]

Conocidos ahora los parámetros, se seleccionan los siguientes elementos:

- ✓ Interruptor termomagnético Schneider bipolar modelo Easy9 de 25 Amperios
- ✓ Interruptor diferencial Schneider bipolar modelo Easy9 de 25 Amperios y una sensibilidad a la fuga a tierra de 30 mA
- ✓ Cable Kalop PTR tripolar $3 \times 6\text{ mm}$
- ✓ Gabinete Schneider ip66
- ✓ Jabalina $3/8 \times 1.5\text{ M}$

En la Tabla 7.1 se detallan los precios y cantidades.

10.2 Cálculo del diámetro la de tubería

Para el dimensionamiento de las tuberías se toma como referencia una velocidad máxima de escurrimiento de 2.5 m/s de acuerdo las recomendaciones de (ANSI/HI, 2016) y según el caudal especificado en la Tabla 4.3 de 1 *litro/min* utilizando la Ecuación 10.2 se obtiene la relación entre el caudal, la velocidad y el área.

$$Q = VA = V \frac{\pi d^2}{4} \quad (10.2)$$

Donde

Q : Caudal [m^3/s]
 V : velocidad [m/s]
 A : Área [m^2]
 d : Diámetro [m]

Despejando el diámetro y reemplazando tenemos

$$d = \sqrt[2]{\frac{4Q}{V\pi}} = \sqrt[2]{\frac{4(16.6 \times 10^{-6})}{(2.5)\pi}} = 2.9 \text{ mm} \quad (10.3)$$

Según el resultado obtenido se selecciona una tubería de diámetro interno igual o superior, en este caso se elige un tubería de acero inoxidable AISI-316 de 1/2 *pulg* con schedule 40 (espesor 2.77 mm y diámetro externo de 21.24 mm) por su resistencia a la corrosión, durabilidad y disponibilidad en el mercado local.

Los precios y demás accesorios se presentan en la Tabla 7.3.

10.3 Curva del sistema

Para el cálculo de la curva del sistema se presenta un esquema simplificado de la planta según se ve en la Figura 10.1. Donde, del 1 al 5 son los distintos estados de los fluidos, y también sirven como punto útil para dividir el sistema en subsistemas y así poder simplificar el problema.

En el ramal superior se observa primer tramo 1-2, el cual es de aceite a temperatura ambiente, conectado en serie con el tramo 2-4 que es de aceite a alta temperatura. El ramal superior de aceite se conecta en paralelo al ramal inferior de metóxido, que es el tramo 3-4, para luego dar lugar al tramo final 4-5. A cada tramo se asigna un factor K_i que tiene en cuenta las pérdidas de carga locales y distribuidas asociadas a cada tramo. Con esto definido, para obtener las curvas del sistema se plantea un sistema de ecuaciones.

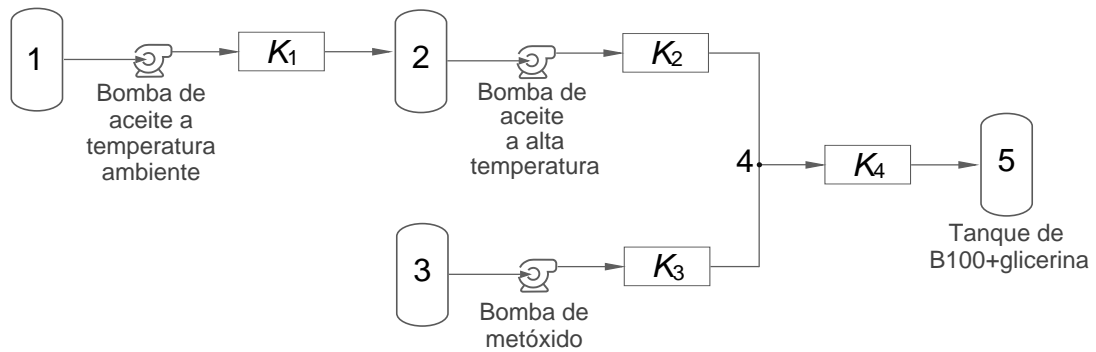


Figura 10.1. Esquema del sistema

En primer lugar, se plantean las ecuaciones de continuidad en los distintos tramos de la planta donde se considera el sistema en régimen estacionario.

Se analiza el ramal superior y se observa que el caudal del tramo 1-2 " Q_1 " es igual al caudal del tramo 2-3 " Q_2 " dado que están conectados en serie. Luego, el caudal del tramo 4-5 " Q_4 " es la suma de los caudales " Q_2 " del tramo 2-4 y " Q_3 " del tramo 3-4 dado que están conectados en paralelo, con lo cual, se plantean las ecuaciones 10.4 y 10.5.

$$Q_1 = Q_2 \quad (10.4)$$

$$Q_2 + Q_3 = Q_4 \quad (10.5)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones de energía en los distintos tramos de la planta.

$$\left(\frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) + H_1 - \frac{Q_1^2}{2gA^2} K_1 = \left(\frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad (10.6)$$

$$\left(\frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) + H_2 - \frac{Q_2^2}{2gA^2} K_2 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) \quad (10.7)$$

$$\left(\frac{p_3}{\rho_3 g} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 \right) + H_3 - \frac{Q_3^2}{2gA^2} K_3 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) \quad (10.8)$$

$$\left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) + H_4 - \frac{Q_4^2}{2gA^2} K_4 = \left(\frac{p_5}{\rho_5 g} + \frac{v_5^2}{2g} + z_5 \right) \quad (10.9)$$

Donde

p : Presión	$[Pa]$	g : Gravedad	$[m/s^2]$	K_i : factor de perdida
ρ : Densidad	$[Kg/m^3]$	v : velocidad	$[m/s]$	
z : Altura geométrica	$[m]$	H_i : Altura del sistema	$[m]$	
Q_i : Caudal	$[m^3/s]$	A : Área	$[m^2]$	

Luego, se consideran las siguientes simplificaciones al sistema de ecuaciones. En 1, 2, 3 y 5 hay recipientes a presión atmosférica a un mismo nivel de fluido con una velocidad cercana a cero y que además en 4 la altura geométrica es igual a los demás puntos mencionados con lo cual se reemplaza en las ecuaciones 10.6 a 10.9 y se despeja la altura del sistema H_i obteniendo así las siguientes relaciones.

$$H_1 = \left(\frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) + \frac{Q_1^2}{2gA^2} K_1 \quad (10.10)$$

$$H_1 = \frac{Q_1^2}{2gA^2} K_1 \quad (10.11)$$

$$H_2 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) + \frac{Q_2^2}{2gA^2} K_2 \quad (10.12)$$

$$H_2 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} \right) + \frac{Q_2^2}{2gA^2} K_2 \quad (10.13)$$

$$H_3 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) - \left(\frac{p_3}{\rho_3 g} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 \right) + \frac{Q_3^2}{2gA^2} K_3 \quad (10.14)$$

$$H_3 = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} \right) + \frac{Q_3^2}{2gA^2} K_3 \quad (10.15)$$

$$H_4 = \left(\frac{p_5}{\rho_5 g} + \frac{v_5^2}{2g} + z_5 \right) - \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \right) + \frac{Q_4^2}{2gA^2} K_4 \quad (10.16)$$

$$H_4 = - \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} \right) + \frac{Q_4^2}{2gA^2} K_4 \quad (10.17)$$

Luego de obtener las curvas del sistema de los distintos tramos se procede a obtener la curva del sistema total, para ello se realizan las siguientes operaciones. Primero, para hallar la curva

del sistema en serie de los tramos 1-2 y 2-4 se suman las expresiones 10.10 y 10.12 teniendo en cuenta la ecuación 10.4 obteniendo así la la curva del sistema en serie H_{12} como se muestra a continuación.

$$H_{12} = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} \right) + \frac{Q_1^2}{2gA^2} (K_1 + K_2) \quad (10.18)$$

Segundo, para obtener la curva del sistema de la conexión en paralelo del ramal superior e inferior se despeja el caudal de las expresiones 10.18 y 10.14, para luego remplazarlos en la ecuación 10.5, seguido se despeja la altura del sistema H_{123} y se encuentra la curva del sistema en paralelo como se muestra a continuación.

$$H_{123} = \left(\frac{p_4}{\rho_4 g} + \frac{v_4^2}{2g} \right) + \frac{Q_4^2}{2gA^2} \left(\frac{K_1 K_3 + K_2 K_3}{K_1 + K_2 + K_3} \right) \quad (10.19)$$

Finalmente, para obtener la curva del sistema total de la planta se resuelve la conexión en serie sumando las ecuaciones 10.19 y 10.16 logrando así la expresión que se muestra seguidamente.

$$H_{total} = H_{1234} = \frac{Q_4^2}{2gA^2} \left(\frac{K_1(K_3 + K_4) + K_2(K_3 + K_4) + K_3 K_4}{K_1 + K_2 + K_3} \right) \quad (10.20)$$

En la Figura ?? se presentan gráficas genéricas de las distintas curvas de sistema.

Luego de obtener las expresiones genéricas de las curvas del sistema, se analizan los parámetros restantes para especificar cada curva. Entre los parámetros restantes tenemos la altura estática y dinámica en el punto 4 y los factores de pérdida que se definen mediante la expresión 10.21, donde el primer termino consiste en las pérdidas distribuidas y corresponde a la expresión de Darcy, mientras que el segundo termino, la sumatoria de los coeficientes hace referencia a las pérdidas localizadas del circuito y cada coeficiente se determina experimentalmente, aunque también existen cartas que permiten encontrar aproximaciones según CRANE, 2013.

$$K_i = f \frac{L}{D} + \sum k_i \quad (10.21)$$

Donde

f : Factor de fricción

L : Longitud [m]

D : Diámetro [m]

k_i : Factor de pérdida

Para el encontrar el factor de fricción se pueden utilizar distintas ecuaciones que aproximan a

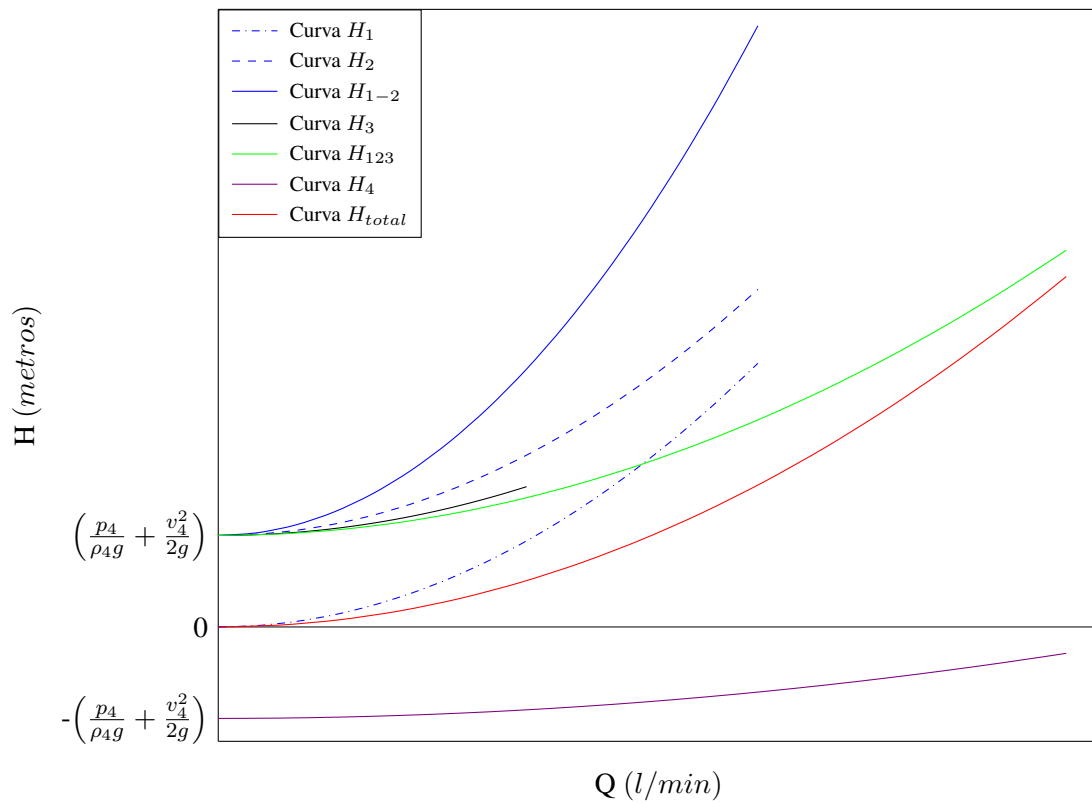


Figura 10.2. Curva del sistema.

esta variable. En este caso, se utiliza la ecuación de Swamee-Jain la cual se muestra a continuación.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (10.22)$$

ϵ : Rugosidad relativa [mm]

D : Diámetro [m]

Re : Número de Reynolds

10.4 Curvas de bombas

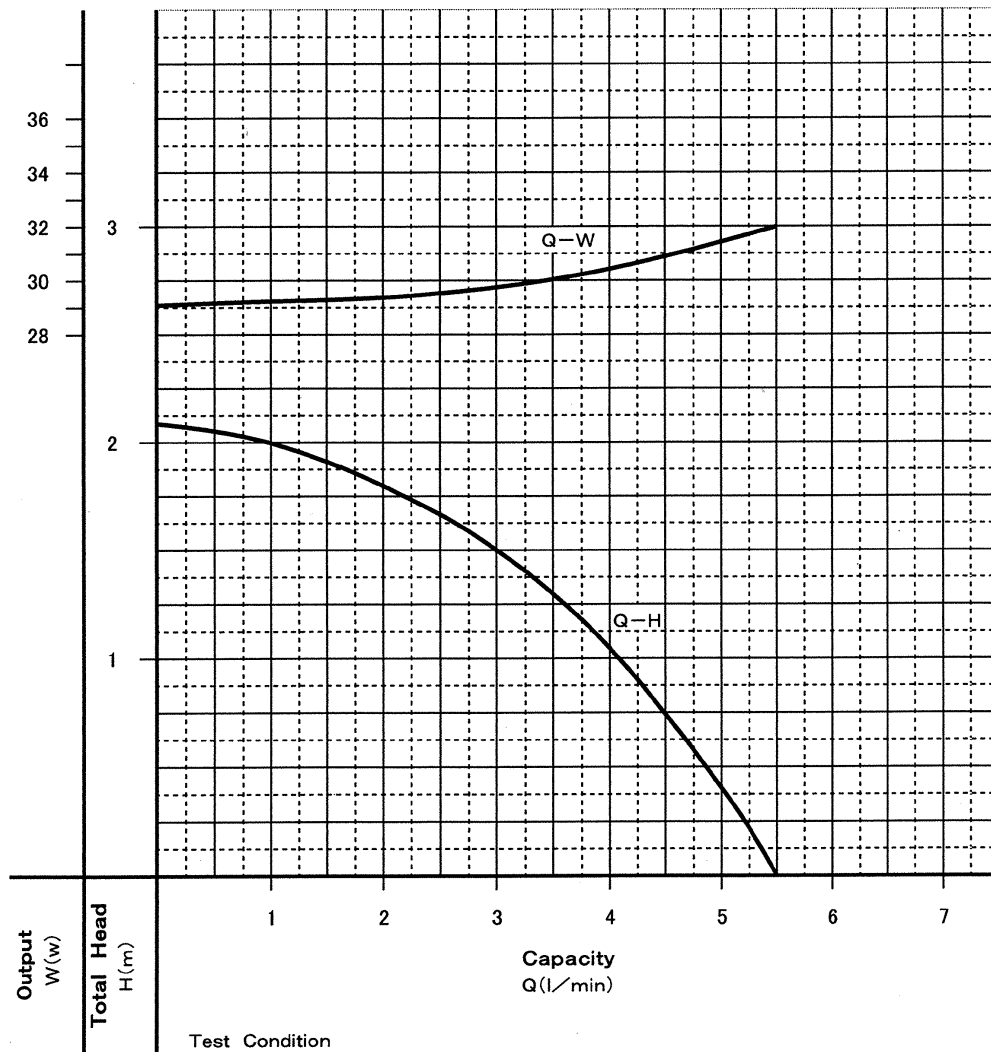
A continuación se presentan las distintas curvas de las bombas a utilizar en la planta.



Performance Curves

2PC-3880

IWAKI Magnet Pumps		Model	MD-6Z
Max. Capacity	5.5 l/min	Max. Head	2.1 m
Power Source	AC 230 V, 50 Hz, 1 ϕ	Input	32 W



Test Condition
 Test Liquid ; Room Temperature • Clear Water

Approved By	Made By
<i>A. Okmichi</i>	<i>M. Ozato</i>

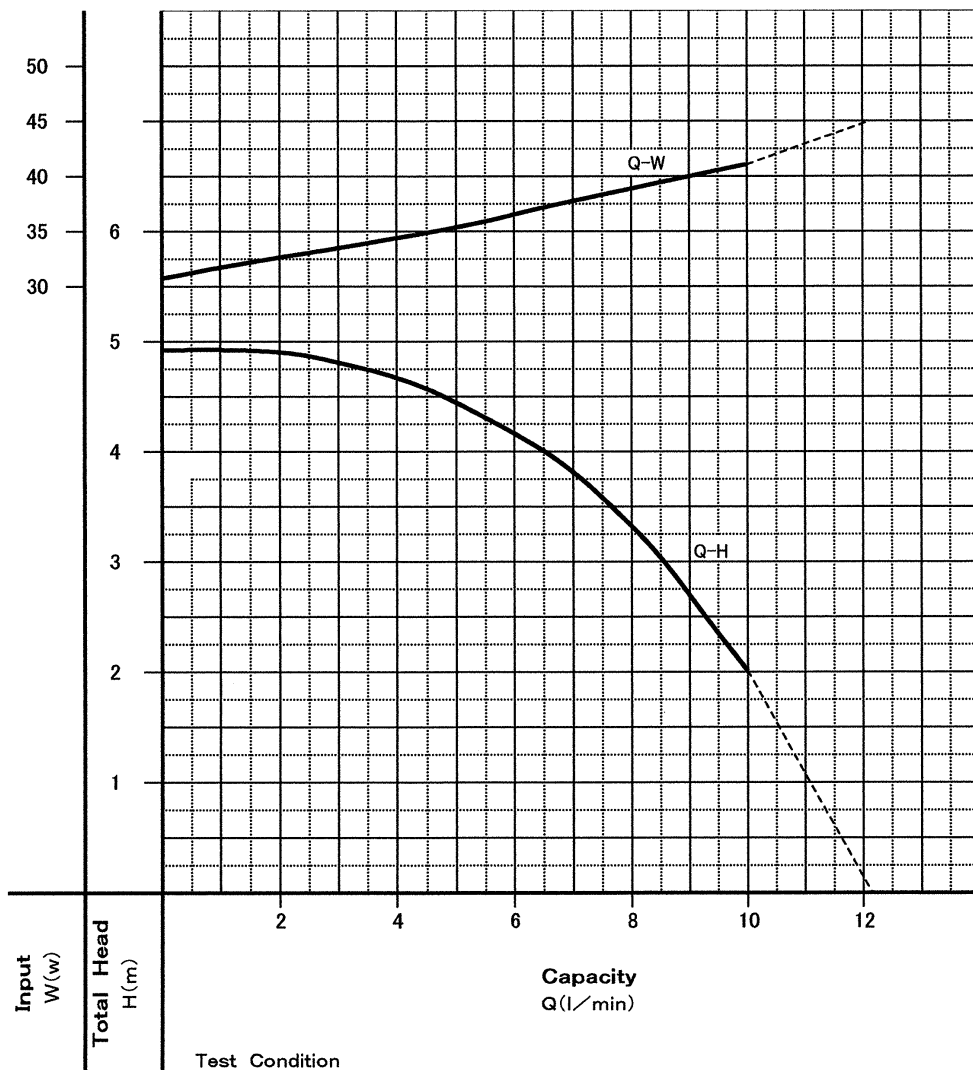
Figura 10.3. IWAKI MD-6Z.



Performance Curves

2PC-3350

IWAKI Magnet Pumps		Model	MD-20RZ-220N
Max. Capacity	10 l/min	Max. Head	4.9m
Power Source	AC 230 V, 50Hz, 1φ	Input	45W



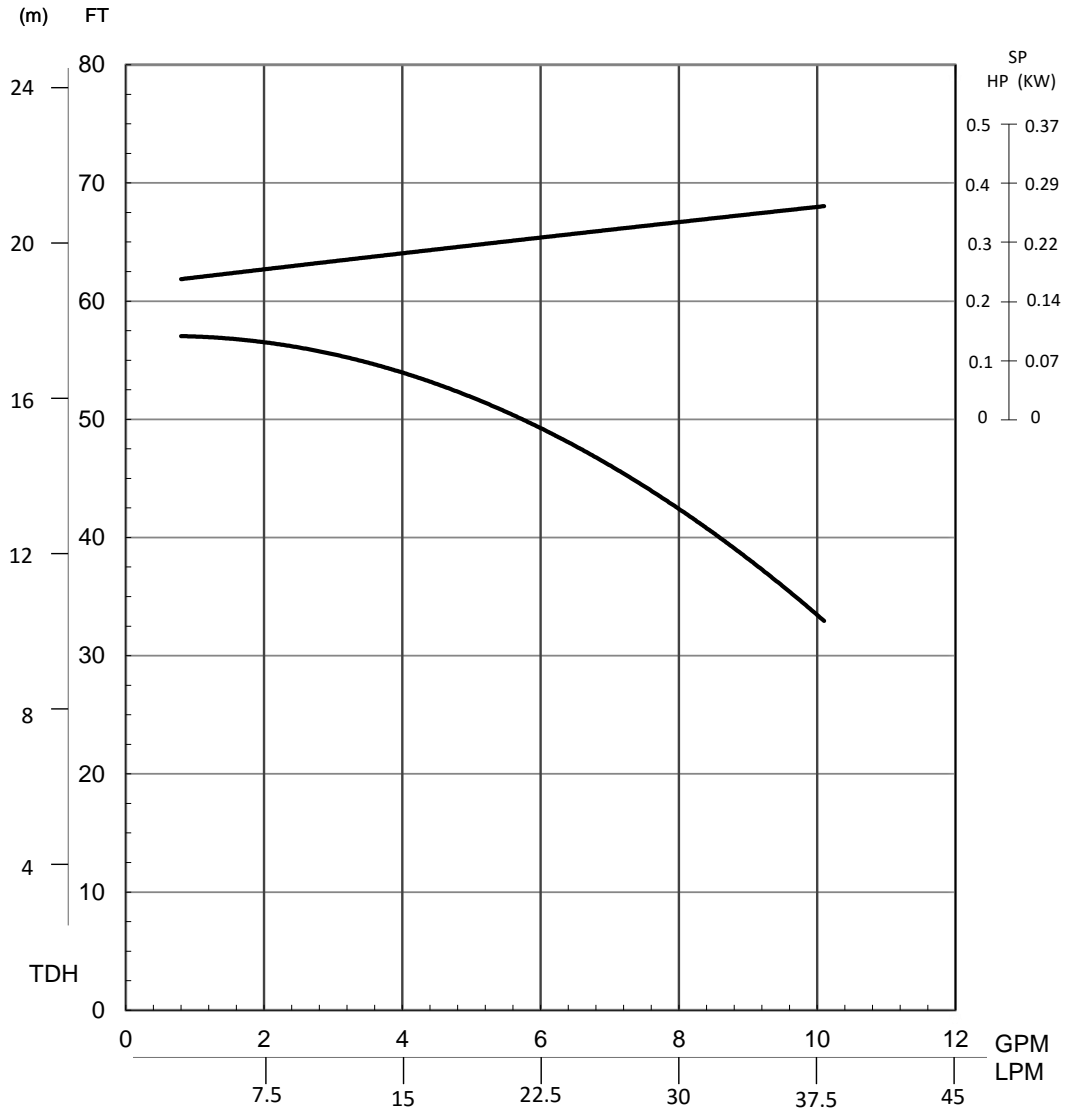
Test Condition
 Test Liquid ; Room Temperature • Clear Water

Approved By	Made By
<i>A. Chmichi</i>	<i>M. Onozato</i>

Figura 10.4. IWAKI MD-20RZ.



MMP11



Curve No. IALT-00405	Approved: JP	Suction: 1/2" NPT
RPM: 3500	Date: 6/2018	Discharge: 1/2" NPT
	Ref:	Impeller Size: 3.66"

Performance based on water at 70°F (21°C).
 Fluids with specific gravities other than 1.0 should be reviewed by the factory.

Figura 10.5. IWAKI MMP11.

10.5 Corrección de curvas por efecto de viscosidad

Las curvas características de las bombas generalmente se ensayan con agua. Para trabajar con otro líquido, con una viscosidad deferente, las curvas reales aproximadas se obtienen utilizando factores de corrección los cuales se basan la norma [ANSI/HI, 2010](#): “Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic Pump Performance”.

A continuación se presentan las curvas características de las bombas y las respectivas curvas corregidas. No obstante, hay que considerar que las correcciones son aproximaciones, (Véase la Figura 10.6, la curva de performance corregida presenta un comportamiento inestable en el rango de 0 a 2 l/min). Por lo tanto es necesario hablar con el fabricante y consultarle acerca del comportamiento de la bomba trabajando con otro fluido y si es posible ensayar la bombas con el fluido a utilizar y así obtener los valores reales.

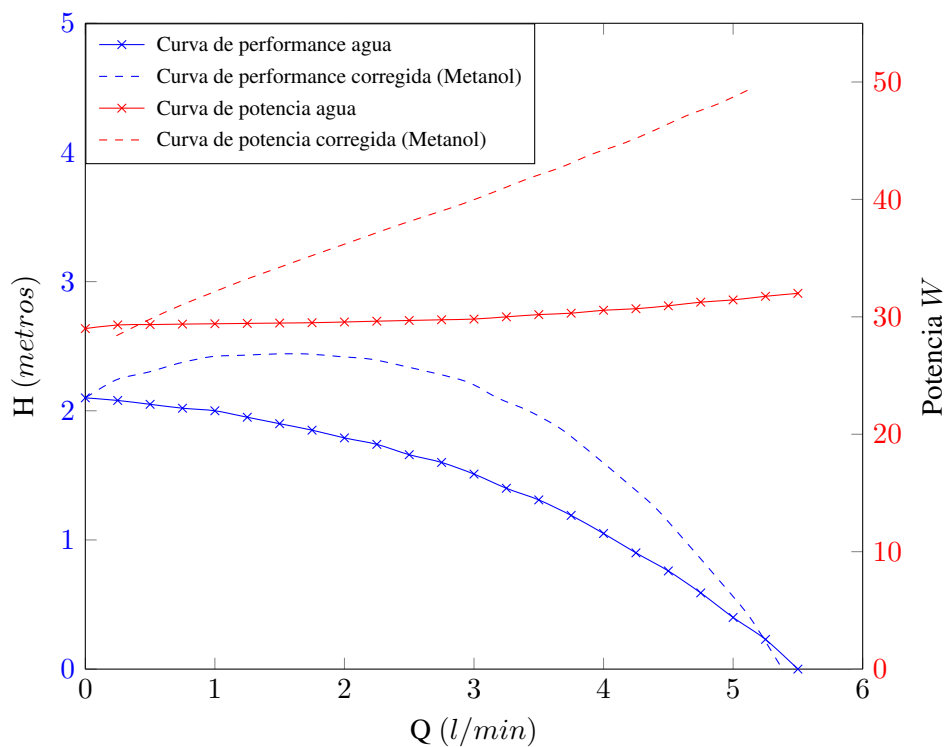


Figura 10.6. Curva de Performance IWAKI MD-6Z.

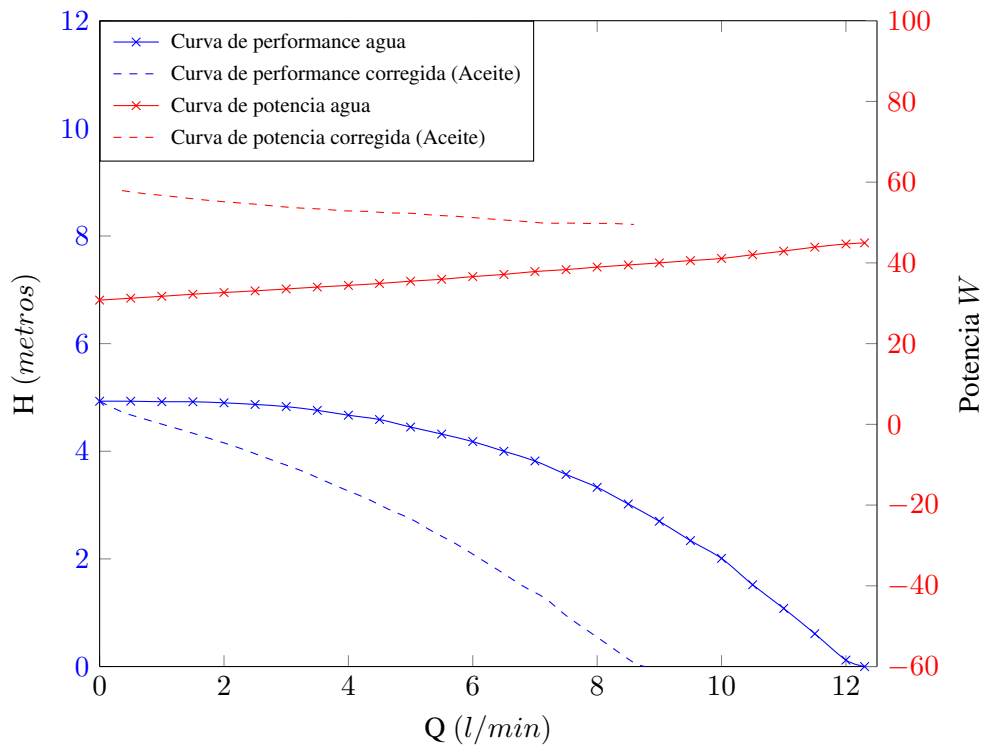


Figura 10.7. Curva de Performance IWAKI MD-20RZ

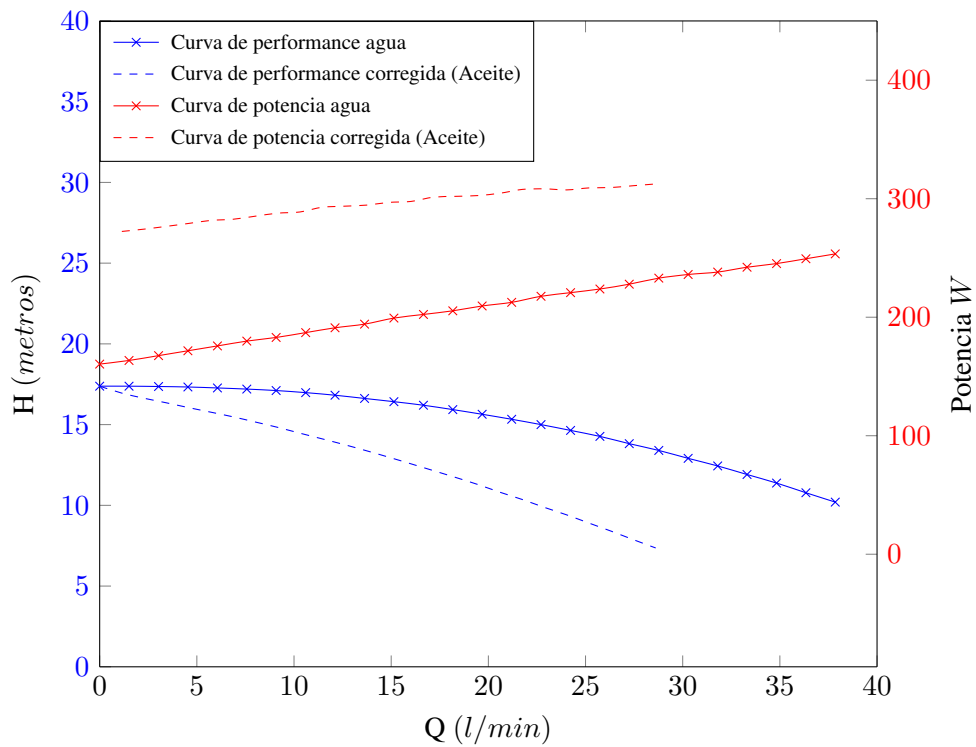
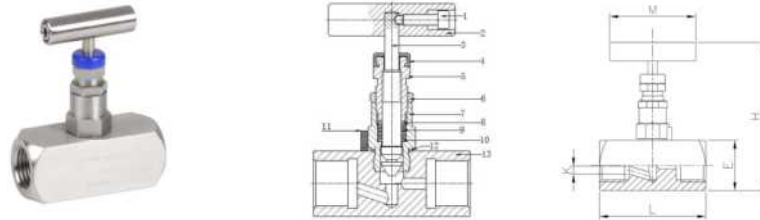


Figura 10.8. Curva de Performance IWAKI MMP11.

10.6 Características de válvula aguja



DIMENSIONES GENERALES / GENERAL DIMENSIONS

Ref	Medida / Size	PN (psi)	Dimensiones/Dimensions (mm)					PESO / WEIGHT (Kg)
			E	H	L	M	K	
2225 02	1/4"	6000	25.5	90	61	55	4	0,365
2225 03	3/8"	6000	25.5	90	61	55	4	0,355
2225 04	1/2"	6000	28.5	92	68	55	5	0,440
2225 05	3/4"	6000	38	98	76	55	6	0,800
2225 06	1"	6000	44.5	108	85	55	8	1,120

DIAGRAMA DE PÉRDIDAS DE CARGA / HEAD LOSSES DIAGRAM

(H₂O / 20 °C Flujo Horizontal / Horizontal flow).

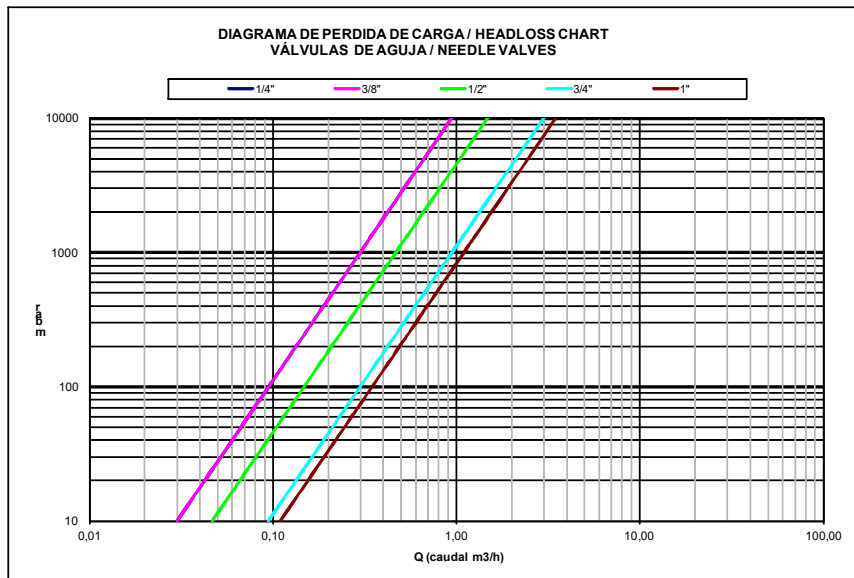


Figura 10.9. Características válvula aguja.

10.7 Cálculos de torque de fricción del rotor, potencia y acople

Para el calculo aproximado del torque de fricción entre fluido y el rotor, ya que el modelo considera un cilindro liso, se utiliza la ecuación 10.23 según Frank White, 2021.

$$T = \frac{2\pi\omega\mu R^3 L}{\Delta R} + \frac{\pi\omega\mu R^4}{\Delta R} \quad (10.23)$$

Donde

ω : Velocidad angular [$rads^{-1}$]	$\omega = 314,16$ [$rads^{-1}$]
μ : Viscosidad dinámica del aceite [cps]	$\mu = 61,047$ [cps]
L : Longitud del rotor [m]	$L = 0,09$ [m]
R : Radio [m]	$R = 0,03$ [m]
ΔR : Espacio Anular [m]	$\Delta R = 0,01$ [m]

Remplazando los valores obtenemos

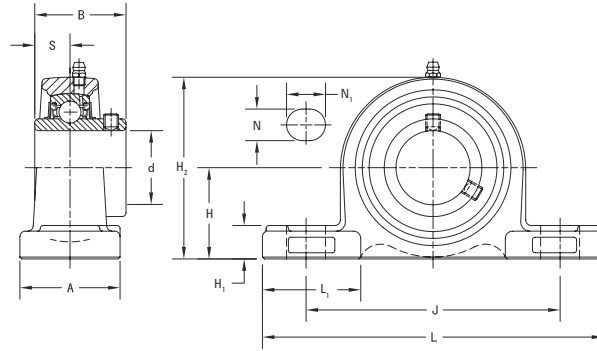
$$T = \frac{2\pi(314,16)(0,061047)(0,03^3)(0,09)}{0,01} + \frac{\pi(314,16)(0,061047)(0,03^4)}{0,01} \quad (10.24)$$

$$T = 0,034[Nm]$$

$$P = T \frac{2\pi(rpm)}{60} = (0,034) \frac{2\pi(3000)}{60} \quad (10.25)$$

$$P = 11W$$

10.8 Selección de rodamientos



Eje Diá. d	Designación del soporte	Referencia del rodamiento	Índices de carga básicos		Dimensiones											Tamaño del perno	Peso		
			Dinámico	Estático	H	L	L ₁	A	H ₁	J	H ₂	S	B	N	N ₁				
			C _r	C _{0r}	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in			mm in	mm in
12	UCP201	UC201																	
	1/2	UCP201-8	UC201-8																
15	UCP202	UC202	12,8	6,7	30,2	127	36	38	16	95	60	12,7	31,0	13	18	M10	0,6		
	5/8	UCP202-10	UC202-10	2878	1495	1 3/8	5	1 1/2	5/8	3 3/4	2 3/8	0,500	1,220	1/2	3/8	3/8	1,3		
17	UCP203	UC203																	
	3/4	UCP204-12	UC204-12	12,8	6,7	33,3	127	36	38	16	95	65	12,7	31,0	13	18	M10	0,7	
20	UCP204	UC204	2878	1495	1 3/8	5	1 1/2	1 1/2	5/8	3 3/4	2 3/8	0,500	1,220	1/2	3/8	3/8	1,5		
	7/8	UCP205-14	UC205-14																
	1 1/8	UCP205-15	UC205-15	14	7,85	36,5	140	38	38	16	105	70	14,3	34,1	13	18	M10	0,8	
25	UCP205	UC205	3147	1765	1 7/8	5 1/2	1 1/2	1 1/2	5/8	4 1/8	2 9/16	0,563	1,343	1/2	3/8	3/8	1,8		
	1	UCP205-16	UC205-16																
	1 1/8	UCP206-18	UC206-18																
30	UCP206	UC206	19,5	11,3	42,9	165	48	48	17	121	84	15,9	38,1	17	21	M14	1,3		
	1 3/8	UCP206-19	UC206-19	4384	2540	1 7/8	6 1/2	1 7/8	7/8	4 3/4	3 3/8	0,626	1,500	1/2	3/8	1/2	2,9		
	1 1/4	UCP206-20	UC206-20																
	1 1/4	UCP207-20	UC207-20																
	1 3/8	UCP207-21	UC207-21																
	1 3/8	UCP207-22	UC207-22	25,7	15,4	47,6	167	47	48	18	127	95	17,5	42,9	17	21	M14	1,6	
35	UCP207	UC207	5778	3462	1 7/8	6 5/8	1 7/8	1 7/8	7/8	5	3 3/4	0,689	1,689	1/2	3/8	1/2	3,5		
	1 3/8	UCP207-23	UC207-23																
	1 1/2	UCP208-24	UC208-24																
	1 3/8	UCP208-25	UC208-25	29,1	17,8	49,2	184	53	54	18	137	98	19,0	49,2	17	21	M14	2,0	
40	UCP208	UC208	6542	4002	1 3/8	7 1/4	2 3/8	2 1/8	7/8	5 1/2	3 7/8	0,748	1,937	1/2	3/8	1/2	4,4		
	1 3/8	UCP209-26	UC209-26																
	1 1/2	UCP209-27	UC209-27	34,1	21,3	54,0	190	55	54	20	146	106	19,0	49,2	17	21	M14	2,2	
	1 3/4	UCP209-28	UC209-28	7666	4788	2 1/8	7 13/16	2 3/8	2 1/8	5 3/4	4 1/8	0,748	1,937	1/2	3/8	1/2	4,9		
45	UCP209	UC209																	

⁽¹⁾ Es necesario utilizar roscas cónicas de tamaño 1/8 si el tamaño del diámetro interior es menor de 210. Si el tamaño del diámetro interior es mayor que 211, es necesario utilizar roscas de tamaño 1/2 BSPT.

Continúa en la página siguiente.

Figura 10.10. Características rodamientos UPC

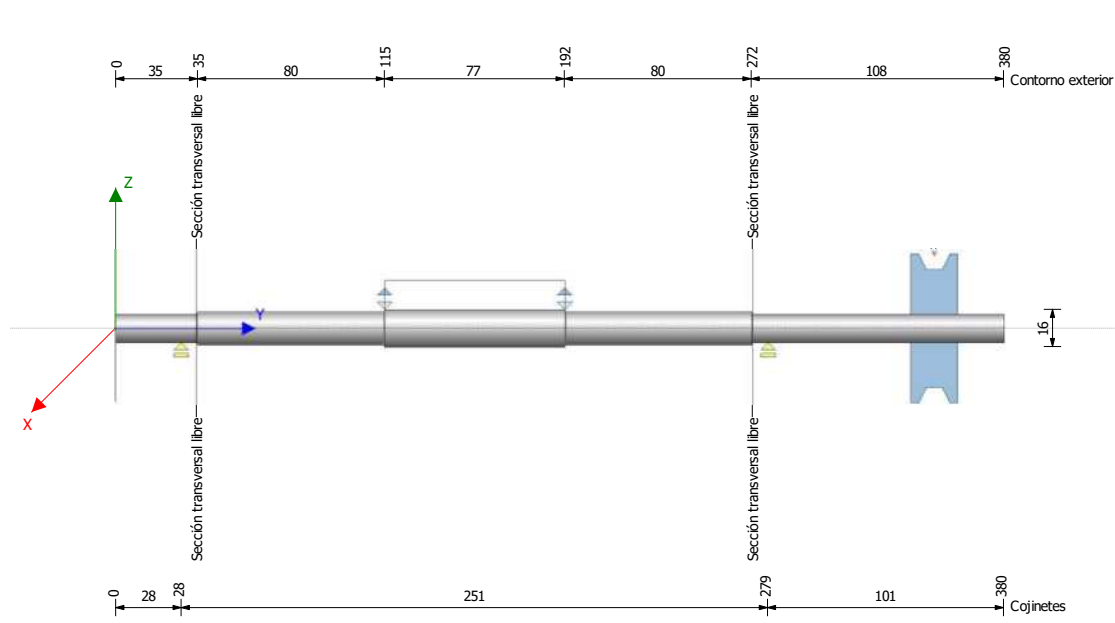
**TABLA 11. VELOCIDAD DE ROTACIÓN PERMITIDA
LOS SOPORTES DE RODAMIENTOS**

Código de Diá. Interior	Serie de diámetro	
	2	3
	RPM	
01	5800	-
02	5800	-
03	5800	-
04	5800	-
05	5100	4600
06	4300	3900
07	3700	3400
08	3300	3100
09	3100	2700
10	2800	2400
11	2500	2300
12	2300	2100
13	2200	1900
14	2100	1800
15	2000	1700
16	1800	1600
17	1700	1500
18	1600	1400
19	-	1400
20	-	1300
21	-	1200
22	-	1100
24	-	1100
26	-	1000
28	-	910

Figura 10.11. Velocidades de rotación permitidas.

10.9 Verificación de eje

A continuación se presenta la configuración de sujeciones y cargas utilizadas en la verificación del eje mediante el software de cálculo [KISSsoft, 2018](#)



Los resultados obtenidos son:

Flexión máxima	39.73	$[\mu\text{m}]$
Tensión equivalente máxima	12.76	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
Seguridad mínima fatiga	40.8	
Seguridad mínima estática	28.0	
Frecuencia propia crítica	386.05	$[\text{Hz}]$

Estos resultados muestran un buen comportamiento tensional y resistencia con respecto a la fatiga y la fluencia. Las deflexiones son tolerables y las frecuencias críticas adecuadas, dado en rango de trabajo. El informe completo se presenta seguidamente.

Archivo

Nombre : Verificación de eje
 Modificado por: Mauro día: 09.11.2022 hora: 21:19:12

Cálculo de árboles, ejes y vigas

Datos de entrada

Sistema de coordenadas del árbol: véase Fig. W-002

Denominación	Árbol 1
Plano	
Posición de inicio (mm)	0.000
Longitud (mm)	380.000
Velocidad (1/min)	3000.00
Sentido de giro: en el sentido de las agujas del reloj	
Material	M 1045 (1)
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	206000.000
Número de Poisson un	0.300
Densidad (kg/m ³)	7830.000
Coefficiente de dilatación térmica (10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperatura (°C)	20.000
Peso del árbol (kg)	0.441
(Nota: El peso se aplica para los árboles sin tener en cuenta las ruedas dentadas)	
Peso del árbol, incluidas masas adicionales (kg)	0.441
Momento de inercia de masa (kg*mm ²)	10.883
Momento de inercia GD2 (Nm ²)	0.000
Posición en el espacio (°)	0.000
Engranajes con rigidez según ISO	
Las deformaciones por cizallamiento se tendrán en cuenta	
Factor de corrección del cizallamiento	1.100
Las rigideces de los rodamientos se determinarán a partir de la geometría interna del cojinete	
Posición de tolerancia: Valor medio	
Material de la caja	M 1045 (1)
Coefficiente de dilatación térmica (10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperatura de la caja (°C)	60.000
Punto de referencia térmico de la caja (mm)	0.000
Temperatura de referencia (°C)	20.000

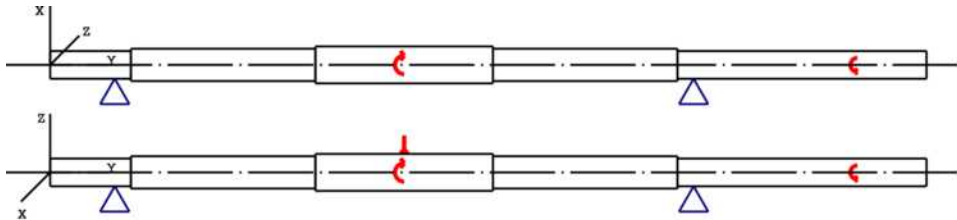


Figura: Introducciones de carga

Definición del árbol (Árbol 1)
Contorno exterior

Cilindro (Cilindro)			0.000mm ... 35.000mm
Diámetro (mm)	[d]	12.0000	
Longitud (mm)	[l]	35.0000	
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000	

Radio derecha (Radio derecha)

 $r=0.50$ (mm), $Rz=8.0$, Girado ($Ra=3.2\mu\text{m}/125\mu\text{in}$)

Cilindro (Cilindro)			35.000mm ... 115.000mm
Diámetro (mm)	[d]	14.0000	
Longitud (mm)	[l]	80.0000	
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000	

Radio derecha (Radio derecha)

 $r=0.50$ (mm), $Rz=8.0$, Girado ($Ra=3.2\mu\text{m}/125\mu\text{in}$)

Cilindro (Cilindro)			115.000mm ... 192.000mm
Diámetro (mm)	[d]	16.0000	
Longitud (mm)	[l]	77.0000	
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000	

Cilindro (Cilindro)			192.000mm ... 272.000mm
---------------------	--	--	-------------------------



Diámetro (mm)	[d]	14.0000
Longitud (mm)	[l]	80.0000
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000

Radio izquierda (Radio izquierda)
r=0.50 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)

Cilindro (Cilindro)		272.000mm ... 380.000mm
Diámetro (mm)	[d]	12.0000
Longitud (mm)	[l]	108.0000
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000

Radio izquierda (Radio izquierda)
r=0.50 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)

Fuerzas

Tipo del elemento de fuerza		Polea de cable
Denominación en el modelo		Polea de cable
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	350.0000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	350.0000
Sentido del cable Bowden (°)		0.0000
Diámetro del disco (mm)		50.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		20.0000
Potencia (kW)		0.7500 accionado (accionamiento)
Momento torsor (Nm)		2.3873
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		0.0000
Fuerza transversal Z (N)		0.0000
Momento flector X (Nm)		0.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000
Suma de las fuerzas del cable Bowden (N)		0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Fuerza céntrica
Denominación en el modelo		Fuerza céntrica
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	153.5000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	153.5000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		77.0000
Potencia (kW)		0.0000
Momento torsor (Nm)		-0.0000
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		0.0000
Fuerza transversal Z (N)		-50.0000
Momento flector X (Nm)		0.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Potencia disipada
Denominación en el modelo		Potencia disipada
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	153.5000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	153.5000
Potencia perdida (kW)		0.7500
Par equivalente (Nm)		-2.3873
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		77.0000

Cojinetes

Denominación en el modelo		Soporte
Tipo de cojinete		Cojinete con apoyo libre
Posición del cojinete (mm)	[Ylokal]	28.000
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	28.000
Grados de libertad		
X: fijoY: libreZ: fijo		
Rx: libreRy: libreRz: libre		

Denominación en el modelo		Soporte
Tipo de cojinete		Cojinete con apoyo libre
Posición del cojinete (mm)	[Ylokal]	279.000
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	279.000
Grados de libertad		
X: fijoY: libreZ: fijo		
Rx: libreRy: libreRz: libre		

Resultados

Árbol

Flexión máxima (μm)	39.725
Posición del máximo (mm)	380.000
Gravicentro de masa (mm)	181.370
Suma del esfuerzo axial (N)	0.000
Deformación bajo momento torsor ($^{\circ}$)	0.113

Cojinetes

Árbol 'Árbol 1' Cojinete 'Soporte'

Posición (coordenada Y)	[y]	28.00	mm
Fuerza de reacción del cojinete	[Fx]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fy]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fz]	0.027	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fr]	0.027	kN (90°)
Desplazamiento de cojinete	[ux]	0.000	μm
Desplazamiento de cojinete	[uy]	0.000	μm
Desplazamiento de cojinete	[uz]	0.000	μm
Desplazamiento de cojinete	[ur]	0.000	μm
Inclinación de cojinete	[rx]	-0.404	mrاد (-1.39°)
Inclinación de cojinete	[ry]	0.000	mrاد (0°)
Inclinación de cojinete	[rz]	0.000	mrاد (0°)
Inclinación de cojinete	[rr]	0.404	mrاد (1.39°)

Árbol 'Árbol 1' Cojinete 'Soporte'

Posición (coordinada Y)	[y]	279.00	mm
Fuerza de reacción del cojinete	[Fx]	-0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fy]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fz]	0.028	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[Fr]	0.028	kN (90°)
Desplazamiento de cojinete	[ux]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[uy]	-0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[uz]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[ur]	0.000	µm
Inclinación de cojinete	[rx]	0.399	mrاد (1.37°)
Inclinación de cojinete	[ry]	0.923	mrاد (3.17°)
Inclinación de cojinete	[rz]	-0.000	mrاد (0°)
Inclinación de cojinete	[r]	0.399	mrاد (1.37°)

Nota: Utilización = $(L_{req}/L_h)^{1/k}$

Rodamiento de bolas: $k = 3$, rodamiento de rodillos: $k = 10/3$

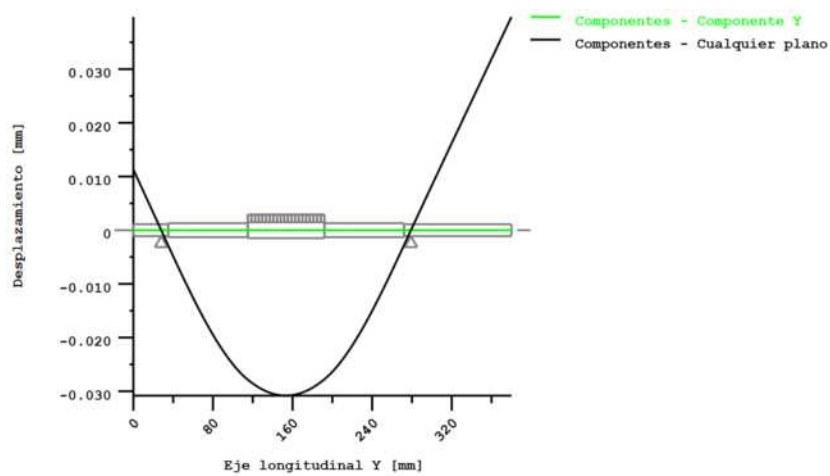
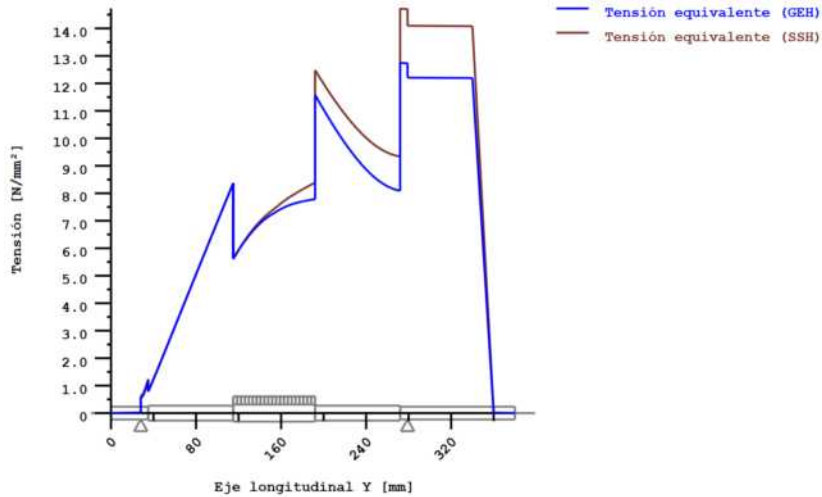


Figura: Deformación (líneas de flexión, etc.) (Cualquier plano 90 121)



Tensiones nominales, sin tener en cuenta las concentraciones de tensión

GEH(von Mises): $\text{sigV} = ((\text{sigB} + \text{sigZ}, D)^2 + 3 * (\text{tauT} + \text{tauS})^2)^{1/2}$

SSH(Tresca): $\text{sigV} = ((\text{sigB} - \text{sigZ}, D)^2 + 4 * (\text{tauT} + \text{tauS})^2)^{1/2}$

Figura: Tensión equivalente

Frecuencias propias/Velocidades críticas

1. Frecuencia propia:	0.00 Hz, Velocidad de giro crítica:	0.00 1/min	Traslación de cuerpo rígido Y 'Árbol 1'
2. Frecuencia propia:	0.00 Hz, Velocidad de giro crítica:	0.00 1/min	Rotación de cuerpo rígido Y 'Árbol 1'
3. Frecuencia propia:	386.05 Hz, Velocidad de giro crítica:	23162.74 1/min	Flexión YZ 'Árbol 1', Flexión XY 'Árbol 1'
4. Frecuencia propia:	743.46 Hz, Velocidad de giro crítica:	44607.53 1/min	Flexión XY 'Árbol 1', Flexión YZ 'Árbol 1'

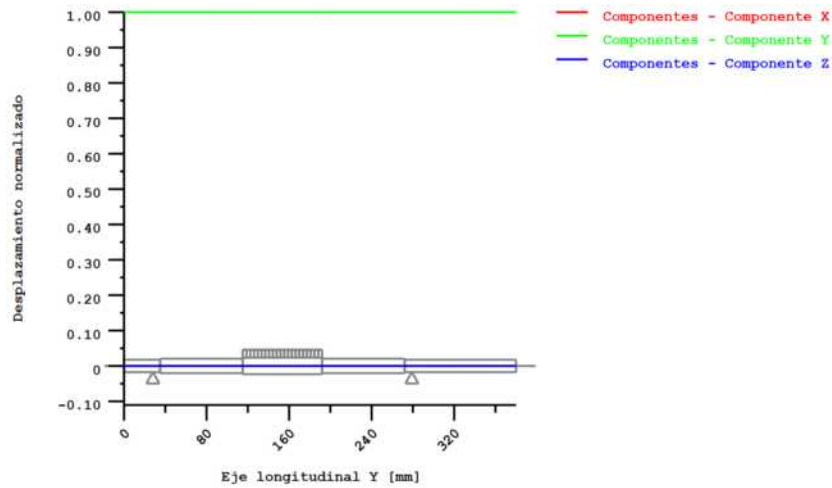


Figura: Frecuencias propias (Rotación normalizada) (Frecuencia propia: 1. (0 Hz))

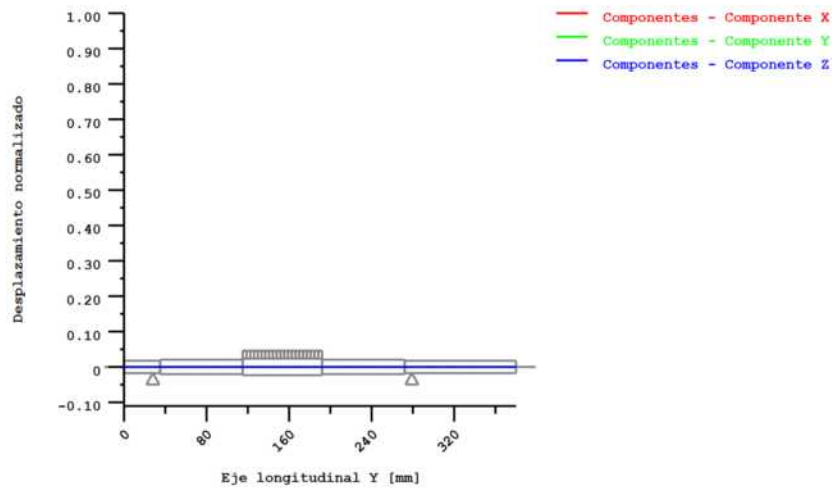


Figura: Frecuencias propias (Rotación normalizada) (Frecuencia propia: 2. (0 Hz))

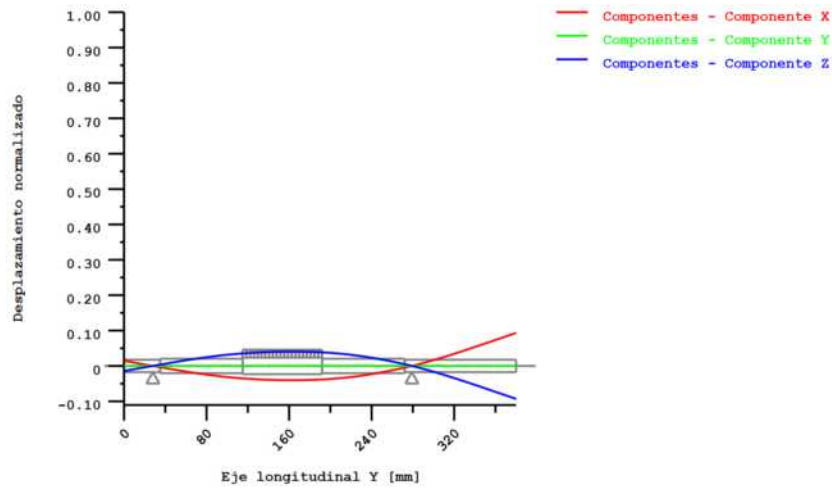


Figura: Frecuencias propias (Rotación normalizada) (Frecuencia propia: 3. (386.05 Hz))

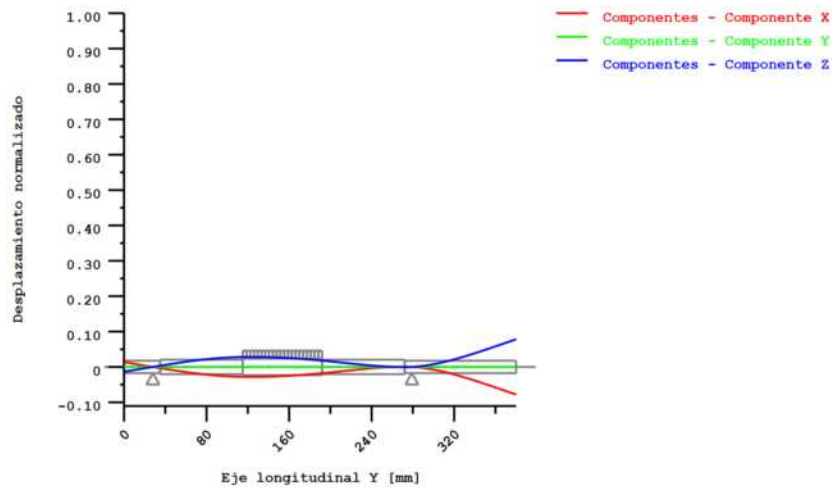


Figura: Frecuencias propias (Rotación normalizada) (Frecuencia propia: 4. (743.46 Hz))

Casos de pandeo

1. Caso de pandeo: S1=22261.44
2. Caso de pandeo: S2=79013.40

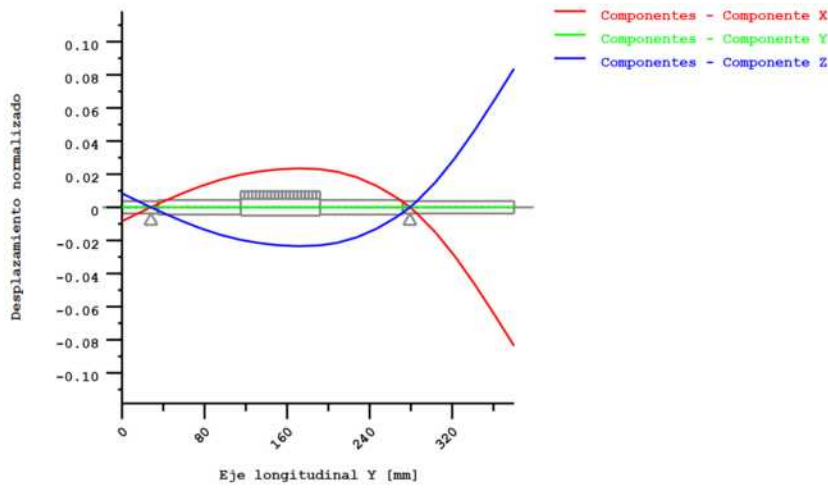


Figura: Casos de pandeo (Rotación normalizada) (Caso de pandeo: 1. (22261.44407))

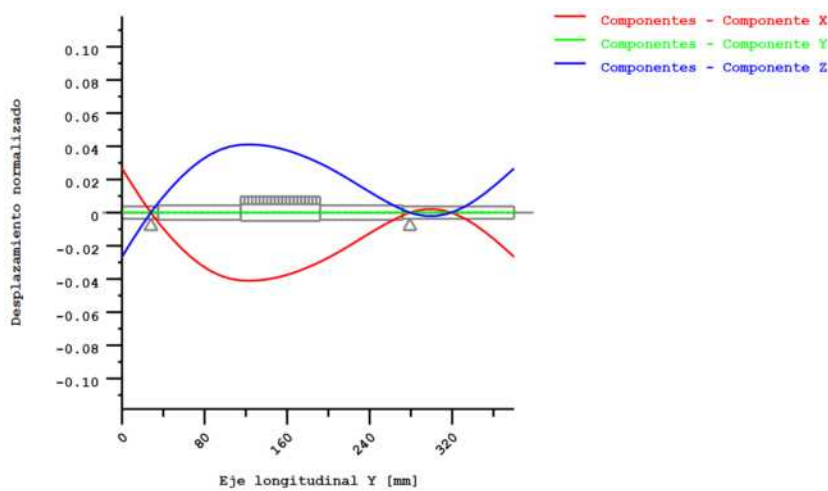


Figura: Casos de pandeo (Rotación normalizada) (Caso de pandeo: 2. (79013.40123))



Cálculo de la resistencia según DIN 743:2012 con límite de fatiga según Normas FKM y borrador FVA

SUMARIO

Árbol 1

Material	M 1045 (1)
Tipo de material	Acero bonificado
Tratamiento del material	no aleado, bonificado
Tratamiento de superficie	Ninguno

Cálculo, límite de fatiga y de la resistencia estática

Cálculo para el caso de utilización 2 ($\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$)

Sección	Posición (Coord. Y) (mm)	
	0.00	Entrada propia
Sección transversal libre	272.50	Entrada propia
Sección transversal libre	34.50	Entrada propia

Resultados:

Sección	Kfb	Kfσ	K2d	SD	SS
	1.00	0.89	0.97	9999.99	9999.99
Sección transversal libre	1.00	0.89	0.97	40.87	28.07
Sección transversal libre	1.00	0.89	0.97	304.13	345.76

Seguridades nominales: 1.20 1.20

Abreviaciones:

Kfb: Factor de entalladura flexión

Kfσ: Factor de superficie

K2d: Factor de tamaño Flexión

SD: Seguridad, resistencia límite de fatiga

SS: Seguridad Límite elástico

Vida y daños

Vida sistema (h) [Hatt] 1000000.00

Daños sistema (%) [D] 0.00

Daños (%) [H] (100.0 h)

Cálculo de la fiabilidad R(t) con distribución de Weibull; t in (h):

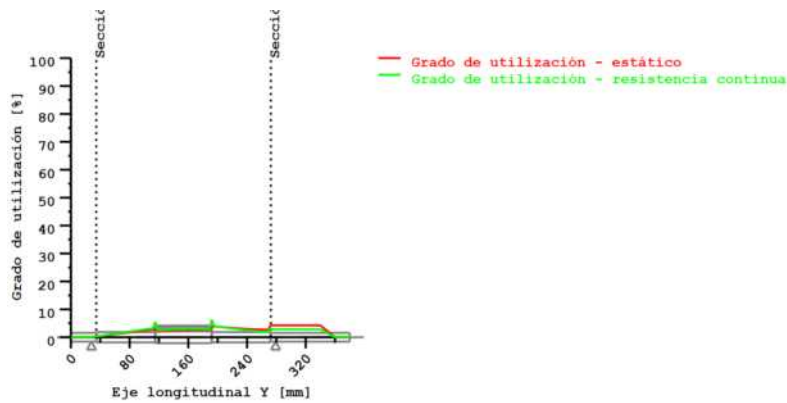
$$R(t) = 100 * \text{Exp}(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$$

Welle	fac	b	t0	T
1	180000	1.5	1.641e+011	3.481e+011

Daños secciones transversales (%) [D]
:
Sección transversal libre: 0.00
Sección transversal libre: 0.00

**Utilización (%) [Smin/S]**

Sección transversal	0.010	Estático	0.010	Resistencia continua
Sección transversal libre	4.275		2.936	
Sección transversal libre	0.347		0.395	
Utilización máxima (%)		[A]	4.275	



Utilización = S_{min}/S (%)

Figura: Resistencia

Detalles del cálculo

Datos generales

Denominación	Árbol 1		
Plano			
Longitud (mm)	[l]	380.00	
Velocidad (1/min)	[n]	3000.00	
Material	M 1045 (1)		
Tipo de material	Acero bonificado		
Tratamiento del material	no aleado, bonificado		
Tratamiento de superficie	Ninguno		

	Tracción/Compresión	Flexión	Torsión	Cizalla
Factor de carga cálculo estático	1.700	1.700	1.700	1.700
Factor de carga resistencia a la fatiga	1.000	1.000	1.000	1.000
Diámetro de referencia del material (mm)	[dB]	16.00		
σ_B según DIN 743 (en dB) (N/mm ²)	[σ_B]	700.00		
σ_S según DIN 743 (en dB) (N/mm ²)	[σ_S]	490.00		
[σ_{zdW}] (bei dB) (N/mm ²)		280.00		
[σ_bW] (bei dB) (N/mm ²)		350.00		
[τ_tW] (bei dB) (N/mm ²)		210.00		
Espesor del material en bruto (mm)	[dWerkst]	17.00		
Datos del material, calculados con K1(d) según DIN 743/3				
Propiedades de resistencia mecánica del material, determinadas por el espesor del material en bruto				
Factor de dimensión geométrica K1d, calculado con el diámetro bruto				
[σ_{Beff}] (N/mm ²)		695.21		
[σ_{Seff}] (N/mm ²)		485.61		
[σ_{bF}] (N/mm ²)		582.74		
[τ_{tF}] (N/mm ²)		336.44		
[σ_{BRand}] (N/mm ²)		628.00		
[σ_{zdW}] (N/mm ²)		278.08		

[obW] (N/mm²) 347.60
 [rtW] (N/mm²) 208.56

Resistencia a la fatiga con carga única

Duración de vida teórica [H] 100.00
 Número de ciclos de carga (Mio) [NL] 18.000

Datos de la línea Woehler análogos a los de las Normas FKM:

[kσ, kτ]	5	8
[kDσ, kDτ]	0	0
[NDσ, NDτ]	1e+006	1e+006
[NDσII, NDτII]	0	0

Cálculo para el caso de utilización 2 ($\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$)

Corte transversal " Entrada propia

Comentario
 Posición (Coordenada Y) (mm) [y] 0.000
 Diámetro exterior (mm) [da] 12.000
 Diámetro interior (mm) [di] 0.000
 Efecto de entalle Entrada propia
 Rugosidad media (μm) [Rz] 8.000

	Tracción/Compresión	Flexión	Torsión	Cizalla
Esfuerzo: (N) (Nm)				
Valor medio				
[Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]	0.000	0.000	0.000	0.000
Desviación (Amplitud) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]	0.000	0.000	0.000	0.000
Valor máximo [Fzdmx, Mbmax, Tmax, Fqmax]	0.000	0.000	0.000	0.000
Sección, momentos de resistencia: (mm ²)				
[A, Wb, Wt, A]	113.097	169.646	339.292	113.097

Tensiones: (N/mm²)

[σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm ²)	0.000	0.000	0.000	0.000
[σzda, σba, τa, τqa] (N/mm ²)	0.000	0.000	0.000	0.000
[σzdmx, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm ²)	0.000	0.000	0.000	0.000

Influencia tecnológica del tamaño

[K1(σB)]	0.993
[K1(σS)]	0.991

	Tracción/Compresión	Flexión	Torsión
Coeficiente de efecto de entalle [β(dB)]	0.000	0.000	0.000
[dB] (mm) = 0.0			
Influencia de las dimensiones geométricas [K3(d)]	0.000	0.000	0.000
Influencia de las dimensiones geométricas [K3(dB)]	0.000	0.000	0.000
Coeficiente de efecto de entalle [β]	1.000	1.000	1.000
Influencia de las dimensiones geométricas [K2(d)]	1.000	0.969	0.969
Factor, influencia de la rugosidad de la superficie [KF]	0.892	0.892	0.938
Factor de compactación de la superficie [KV]	1.000	1.000	1.000
Factor, global de influencia [K]	1.120	1.153	1.098

Factor de seguridad existente para la verificación de la resistencia a la fatiga:

Esfuerzo mediano comparativo (N/mm²) [σmV] 0.000
 Esfuerzo mediano comparativo (N/mm²) [τmV] 0.000

Límite de fatiga de un componente sometido a cambios de carga (N/mm²)

[σWK]	248.189	301.518	189.899
Factor de influencia de la sensib. al esfuerzo medio. [ψσK]	0.217	0.277	0.158
Amplitud admisible (N/mm ²) [σADK]	248.189	301.518	189.899
Amplitud admisible (N/mm ²) [σANK]	248.189	301.518	189.899
Suma Miner efectiva [DM]	0.300	0.300	0.300
Factor concentración [fKoll]	1.000	1.000	1.000
Seguridad contra fatiga [S]		9999.990	
Seguridad nominal contra fatiga [Smin]		1.200	
Resultado (%) [S/Smin]		1000000.0	

Factor de seguridad existente



para verificar si se ha sobrepasado el límite aparente de elasticidad:

Factor sensibilidad de entalladura estático	[K2F]	1.000	1.200	1.200
Factor de crecimiento	[yF]	1.000	1.000	1.000
Límite aparente de elasticidad de un componente (N/mm ²)	[σFK]	485.614	582.736	336.443
Seguridad, límite aparente de elasticidad	[S]		9999.990	
Seguridad nominal	[Smin]		1.200	
Resultado (%)	[S/Smin]		1000000.0	

Corte transversal 'Sección transversal libre' Entrada propia

Comentario

Posición (Coordenada Y) (mm)	[y]	272.500
Diámetro exterior (mm)	[da]	12.000
Diámetro interior (mm)	[di]	0.000
Efecto de entalle		Entrada propia
Rugosidad media (µm)	[Rz]	8.000

		Tracción/Compresión	Flexión	Torsión	Cizalla
Esfuerzo: (N) (Nm)					
Valor medio	[Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]	0.000	0.000	1.194	0.000
Desviación (Amplitud) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]		0.000	0.129	1.194	26.696
Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]		0.000	0.220	4.058	45.382
Sección, momentos de resistencia: (mm ²) [A, Wb, Wt, A]		113.097	169.646	339.292	113.097
Tensiones: (N/mm ²)					
[σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm ²)		0.000	0.000	3.518	0.000
[σzda, σba, τa, τqa] (N/mm ²)		0.000	0.763	3.518	0.315
[σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm ²)		0.000	1.297	11.962	0.535
Influencia tecnológica del tamaño	[K1(σB)]	0.993			
	[K1(σS)]	0.991			

		Tracción/Compresión	Flexión	Torsión
Coefficiente de efecto de entalle	[β(dB)]	0.000	0.000	0.000
[dB] (mm) = 0.0				
Influencia de las dimensiones geométricas	[K3(d)]	0.000	0.000	0.000
Influencia de las dimensiones geométricas	[K3(dB)]	0.000	0.000	0.000
Coefficiente de efecto de entalle	[β]	1.000	1.000	1.000
Influencia de las dimensiones geométricas	[K2(d)]	1.000	0.969	0.969
Factor, influencia de la rugosidad de la superficie	[KF]		0.892	0.892
Factor de compactación de la superficie	[KV]	1.000	1.000	1.000
Factor, global de influencia	[K]	1.120	1.153	1.098

Factor de seguridad existente para la verificación de la resistencia a la fatiga:

Esfuerzo mediano comparativo (N/mm ²)	[σmV]	6.094		
Esfuerzo mediano comparativo (N/mm ²)	[τmV]	3.518		
Límite de fatiga de un componente sometido a cambios de carga (N/mm ²)	[σWK]	248.189	301.518	189.899
Factor de influencia de la sensib. al esfuerzo medio.	[ψσK]	0.217	0.277	0.158
Amplitud admisible (N/mm ²)	[σADK]	0.080	64.831	163.963
Amplitud admisible (N/mm ²)	[σANK]	0.080	64.831	163.963
Suma Miner efectiva	[DM]	0.300	0.300	0.300
Factor concentración	[fKoll]	1.000	1.000	1.000
Seguridad contra fatiga	[S]		40.865	
Seguridad nominal contra fatiga	[Smin]		1.200	
Resultado (%)	[S/Smin]		3405.4	

Factor de seguridad existente

para verificar si se ha sobrepasado el límite aparente de elasticidad:

Factor sensibilidad de entalladura estático	[K2F]	1.000	1.200	1.200
Factor de crecimiento	[yF]	1.000	1.000	1.000
Límite aparente de elasticidad de un componente (N/mm ²)	[σFK]	485.614	582.736	336.443
Seguridad, límite aparente de elasticidad	[S]		28.072	
Seguridad nominal	[Smin]		1.200	
Resultado (%)	[S/Smin]		2339.3	

Corte transversal 'Sección transversal libre' Entrada propia

Comentario

Posición (Coordenada Y) (mm)	[y]	34.500
Diámetro exterior (mm)	[da]	12.000
Diámetro interior (mm)	[di]	0.000
Efecto de entalle		Entrada propia
Rugosidad media (µm)	[Rz]	8.000

		Tracción/Compresión	Flexión	Torsión	Cizalla
Esfuerzo: (N) (Nm)					
Valor medio	[Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]	0.000	0.000	0.000	0.000
Desviación (Amplitud)	[Fzda, Mba, Ta, Fqa]	0.000	0.168	0.000	26.371
Valor máximo	[Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]	0.000	0.286	0.000	44.830
Sección, momentos de resistencia: (mm ²)	[A, Wb, Wt, A]	113.097	169.646	339.292	113.097
Tensiones: (N/mm ²)					
[σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm ²)		0.000	0.000	0.000	0.000
[σzda, σba, τa, τqa] (N/mm ²)		0.000	0.991	0.000	0.311
[σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm ²)		0.000	1.685	0.000	0.529
Influencia tecnológica del tamaño	[K1(σB)]	0.993			
	[K1(σS)]	0.991			

		Tracción/Compresión	Flexión	Torsión
Coeficiente de efecto de entalle	[β(dB)]	0.000	0.000	0.000
[dB] (mm) = 0.0				
Influencia de las dimensiones geométricas	[K3(d)]	0.000	0.000	0.000
Influencia de las dimensiones geométricas	[K3(dB)]	0.000	0.000	0.000
Coeficiente de efecto de entalle	[β]	1.000	1.000	1.000
Influencia de las dimensiones geométricas	[K2(d)]	1.000	0.969	0.969
Factor, influencia de la rugosidad de la superficie	[KF]		0.892	0.892
Factor de compactación de la superficie	[KV]	1.000	1.000	1.000
Factor, global de influencia	[K]	1.120	1.153	1.098

Factor de seguridad existente para la verificación de la resistencia a la fatiga:

Esfuerzo mediano comparativo (N/mm ²)	[σmV]	0.000
Esfuerzo mediano comparativo (N/mm ²)	[τmV]	0.000
Límite de fatiga de un componente sometido a cambios de carga (N/mm ²)	[σWK]	248.189
		301.518
Factor de influencia de la sensib. al esfuerzo medio.	[ψσK]	0.217
		0.277
Amplitud admisible (N/mm ²)	[σADK]	248.189
		301.518
Amplitud admisible (N/mm ²)	[σANK]	248.189
		301.518
Suma Miner efectiva	[DM]	0.300
		0.300
Factor concentración	[fKoll]	1.000
		1.000
Seguridad contra fatiga	[S]	304.134
Seguridad nominal contra fatiga	[Smin]	1.200
Resultado (%)	[S/Smin]	25344.5

Factor de seguridad existente



para verificar si se ha sobrepasado el límite aparente de elasticidad:

Factor sensibilidad de entalladura estático	[K2F]	1.000	1.200	1.200
Factor de crecimiento	[yF]	1.000	1.000	1.000
Límite aparente de elasticidad de un componente (N/mm ²)	[σFK]	485.614	582.736	336.443
Seguridad, límite aparente de elasticidad	[S]		345.760	
Seguridad nominal	[Smin]		1.200	
Resultado (%)	[S/Smin]		28813.3	

Indicaciones:

- La fuerza transversal no se tendrá en cuenta durante el cálculo según DIN 743.
- Sección con ajuste forzado:
Los factores de entalladura para el caso 'Ajuste forzado ligero' ya no se definen en DIN743. Los factores se tomarán de la directiva FKM..

Final del protocolo

Lineas:

598

10.10 Verificación de ajuste por interferencia

Para el montaje del rotor en el eje se realiza un ajuste por interferencia, donde se adopta la sugerencia de H7/r6 según se muestra en la Figura 10.12 tomada de la norma ISO-286, 2010.

Basic hole	Tolerance classes for shafts																	
	Clearance fits				Transition fits				Interference fits									
H 6					g5	h5	js5	k5	m5	n5	p5							
H 7						f6	g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6	u6	x6
H 8				e7		f7		h7	js7	k7	m7				s7		u7	
H 9			d8	e8		f8		h8										
H 9			d8	e8		f8		h8										
H10	b9	c9	d9	e9				h9										
H 11	b11	c11	d10					h10										

Figura 10.12. Ajustes recomendados del sistema agujero único.

Para un diámetro de 16 mm y un ajuste H7/r6 tenemos los siguientes datos

Diámetro nominal del eje d y el agujero D .

$$D = d = 16\text{mm}$$

Las tolerancias son

$$IT7 = 0.018\text{mm}$$

$$IT6 = 0.011\text{mm}$$

Las posiciones de las tolerancias

$$\text{Posición } H = 0.000\text{ mm}$$

$$\text{Posición } r = 0.023\text{ mm}$$

Con lo cual las dimensiones del eje y del agujero son las siguiente

$$D = 16 \begin{matrix} 0.018 \\ 0.000 \end{matrix} [\text{mm}]$$

$$d = 16 \begin{matrix} 0.034 \\ 0.023 \end{matrix} [\text{mm}]$$

Luego las interferencia mínima y máxima serán

$$\delta_{min} = 0.023 - 0.018 = 0.005 [\text{mm}]$$

$$\delta_{max} = 0.034 - 0.000 = 0.034 [\text{mm}]$$

Eje Acero SAE 1045		Rotor Aluminio 6069-T6	
$d = 16$	[mm]	$d_o = 72$	[mm]
$d_i = 0$	[mm]		
$E_i = 210$	[GPa]	$E_o = 68.9$	[GPa]
$\nu_i = 0.3$	[-]	$\nu = 68.9$	[-]
$Sy_{eje} = 512$	[MPa]	$Sy_{rotor} = 414$	[MPa]

Ahora, teniendo en cuenta los siguientes datos

Se calcula la presión máxima y mínima con expresión 10.26

$$p = \frac{\delta}{\frac{d}{E_o} \left(\frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} + \nu_o \right) + \frac{d}{E_i} \left(\frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_i \right)} \quad (10.26)$$

Se obtienen los siguientes resultados

$$p_{max} = 88 \text{ [MPa]} \quad (10.27)$$

$$p_{min} = 12.9 \text{ [MPa]}$$

Las tensiones radiales y tangenciales se determinan con las siguientes expresiones

$$\sigma_{t.eje} = -p \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} = -88 \text{ MPa} \quad (10.28)$$

$$\sigma_{t.rotor} = -p \frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} = 97.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{r.eje} = -p = -88 \text{ MPa} \quad (10.29)$$

$$\sigma_{r.rotor} = -p = -88 \text{ MPa}$$

Ahora se calculan los esfuerzos planos de Von Mises según la ecuación 10.30

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (10.30)$$

$$\sigma'_{eje} = 88 \text{ MPa} \quad (10.31)$$

$$\sigma'_{rotor} = 160 \text{ MPa}$$

Luego se analizan los factores de seguridad a la fluencia

$$\begin{aligned}FSy_{eje} &= \frac{Sy_{eje}}{\sigma'_{eje}} = \frac{512}{88} = 5.8 \\FSy_{rotor} &= \frac{Sy_{eje}}{\sigma'_{eje}} = \frac{414}{160} = 2.5\end{aligned}\tag{10.32}$$

Con lo cual, ambos componentes (eje y rotor) se encuentran dentro del rango elástico, verificando la condición de fluencia.

10.11 Verificación de resistencia del bastidor

A partir del análisis estático realizado en un software específico se encontró que la sección más solicitada de la estructura es la viga superior central (ver Figura 10.13). La fuerza aplicada sobre este elemento es igual a 500 N y se distribuye a lo largo de toda su longitud (650 mm). A continuación, se presenta la verificación a flexión y tracción aplicando el reglamento Cirsoc 301 para este elemento.

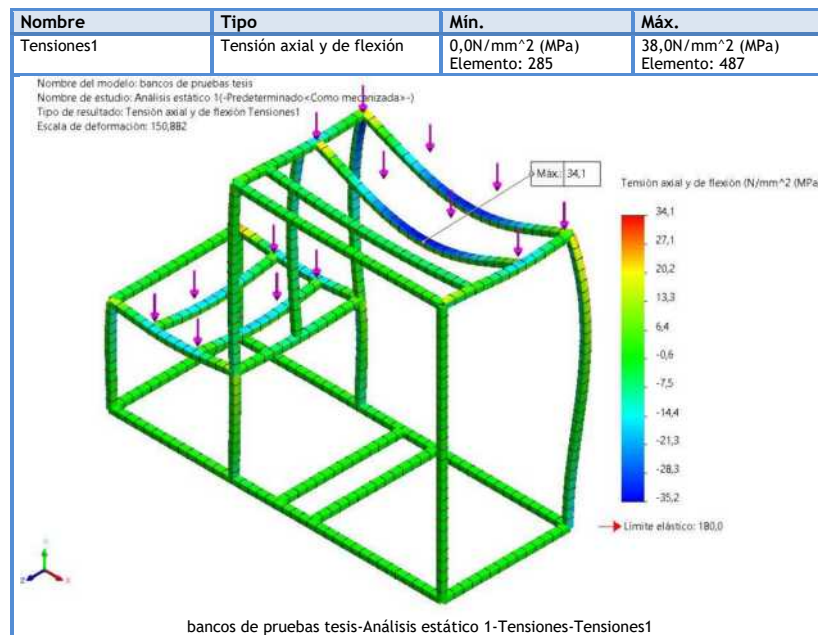


Figura 10.13. Estado tensional bastidor.

Para el análisis de este elemento, se asume a dicha sección como una viga simplemente apoyada, como la que se muestra a continuación:

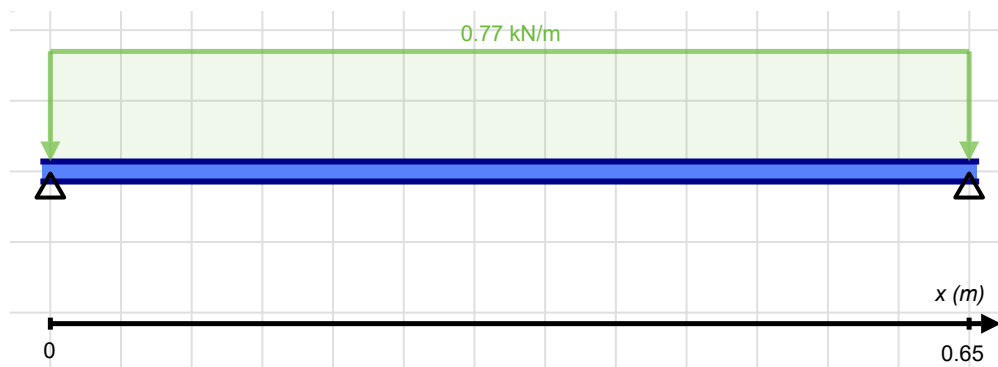


Figura 10.14. Viga simplemente apoyada.

Las reacciones en ambos extremos de la viga resultan 25 N (ver Figura 10.15) y los

valores máximos y mínimos resultantes se muestran en la Figura 10.16).

Support at	X	Y	Mx
0	0 kN	0.25 kN	0 kN-m
0.65	0 kN	0.25 kN	0 kN-m

Figura 10.15. Reacciones en los apoyos.

Result	Max	Min
Bending Moment	0.041 kN-m	0 kN-m
Shear	0.25 kN	-0.25 kN
Displacement	0 mm	-0.001 mm

Figura 10.16. Valores de fuerzas extremas.

En las Figuras 10.17 y 10.18 se muestran los diagramas de Corte y Momento Flector respectivamente.

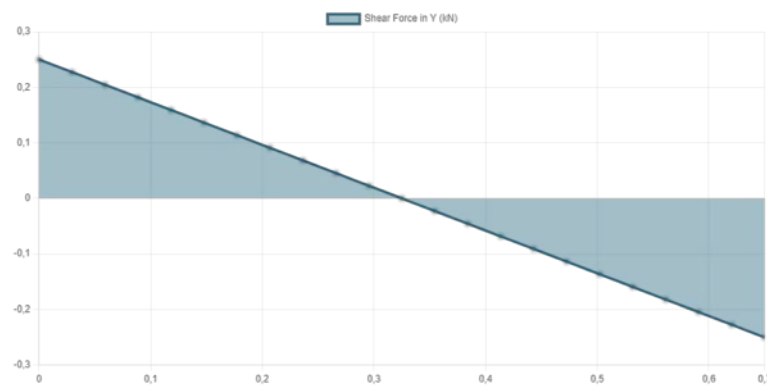


Figura 10.17. Esfuerzo cortante en la viga.

Los perfiles estructurales, por lo general, son de acero A-36. La tensión de fluencia especificada para este material es $F_y = 250\text{MPa}$ y las propiedades geométricas para tubos de sección cuadrada se muestran en la Figura 10.19.

Para el cálculo de barras de sección simétrica sometidas a fuerza axial y flexión, Cirsoc propone la verificación mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{P_u}{2 \phi P_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1 \quad (10.33)$$

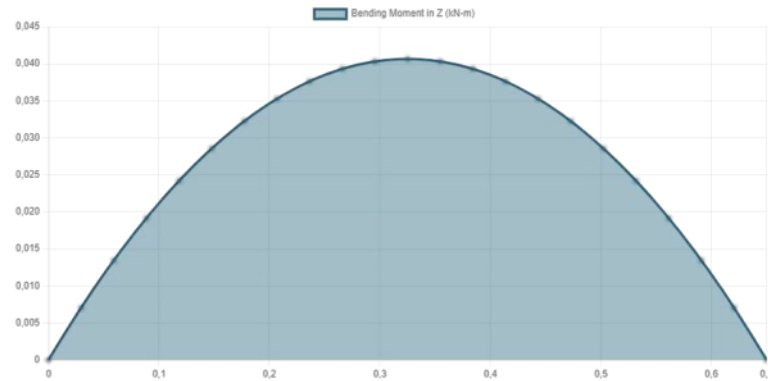


Figura 10.18. Momento flector en la viga

Donde

- P_u : Resistencia requerida axial [kN]
- P_n : Resistencia nominal [kN]
- M_u : Resistencia requerida a flexión de la barra [$N.m$]
- M_n : Resistencia nominal a flexión [$N.m$]
- x : Subíndice relativo al eje fuerte de flexión
- y : Subíndice relativo al eje débil de flexión
- ϕ_b : Factor de resistencia axial
- $\phi_b = 0, 9$: Factor de resistencia para la flexión [m^3/s]

y

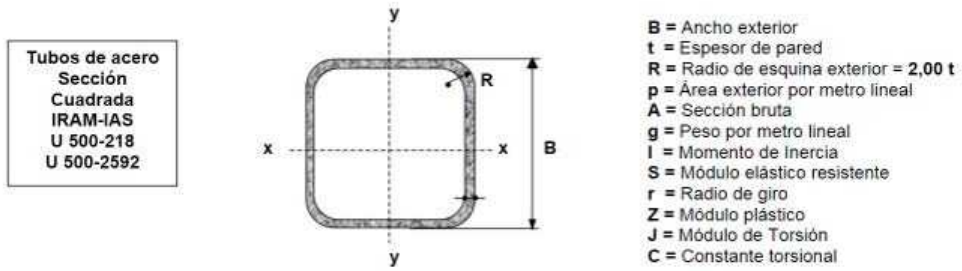
$$M_n = Z.F_y \quad (10.34)$$

De la Figura 10.19 se obtiene que para el perfil de 20mm y $t = 1.6$, resulta un valor de $Z = 0.752 \text{ cm}^3$. Luego, reemplazando en la ecuación anterior resulta $M_{nx} = M_{ny} = 188 \text{ N.m}$. Tomando $M_{ux} = 41 \text{ N.m}$ y reemplazando en la ecuación 10.33 se obtiene

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1 \quad (10.35)$$

$$\frac{41 \text{ Nm}}{(0.9) 188 \text{ Nm}} + \frac{0 \text{ Nm}}{(0.9) (188 \text{ Nm})} = 0.242 \leq 1 \quad (10.36)$$

De esta manera se verifica que las tensiones presentes en la barra de sección cuadrada 20x20 mm no exceden los límites establecidos por Cirsoc 301.



B [mm]	t [mm]	p [m ² /m]	Ag [cm ²]	g [Kg/m]	Ix=Iy [cm ⁴]	Sx=Sy [cm ³]	rx=ry [cm]	Zx=Zy [cm ³]	J [cm ⁴]	C [cm ³]
15	0.70	0.058	0.388	0.304	0.130	0.173	0.579	0.206	0.203	0.285
	0.90	0.057	0.487	0.382	0.158	0.210	0.569	0.254	0.248	0.355
	1.25	0.056	0.647	0.508	0.197	0.263	0.552	0.327	0.315	0.465
20	0.90	0.077	0.667	0.523	0.399	0.399	0.773	0.473	0.622	0.654
	1.25	0.076	0.897	0.704	0.513	0.513	0.756	0.621	0.810	0.871
	1.60	0.075	1.112	0.873	0.607	0.607	0.739	0.752	0.968	1.068
25	0.90	0.097	0.847	0.665	0.809	0.647	0.977	0.759	1.253	1.043
	1.25	0.096	1.147	0.901	1.058	0.847	0.960	1.010	1.657	1.403
	1.60	0.095	1.432	1.124	1.274	1.019	0.943	1.237	2.013	1.736
	2.00	0.093	1.737	1.364	1.483	1.186	0.924	1.468	2.363	2.085
30	0.90	0.117	1.027	0.806	1.433	0.956	1.181	1.113	2.210	1.521
	1.25	0.116	1.397	1.097	1.895	1.263	1.165	1.492	2.949	2.059
	1.60	0.115	1.752	1.375	2.307	1.538	1.148	1.842	3.620	2.565
	2.00	0.113	2.137	1.678	2.720	1.813	1.128	2.208	4.304	3.105

Figura 10.19. Tubos de acero Sección Cuadrada. (Cirsoc 301).

10.12 Verificación de resonancia del bastidor

A continuación se presenta la configuración de materiales, sujeciones y cargas utilizadas en el análisis de resonancia.


Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1010 Barra de acero laminada en caliente</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: $1,8e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Límite de tracción: $3,25e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Módulo elástico: $2e+11 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,29</p> <p>Densidad: 7.870 kg/m^3</p> <p>Módulo cortante: $8e+10 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: $1,22e-05 / \text{Kelvin}$</p>	<p>Sólido 1(Recortar/Extender17[2])(bancos de pruebas tesis), Sólido 2(Tubo cuadrado 20 X 20 X 2(1)[11])(bancos de pruebas tesis)</p>

Figura 10.20. Propiedades del modelo de bastidor para análisis de resonancia.





Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 plano(s), 1 Viga(s)</p> <p>Referencia: Planta</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---; ---; -500 N</p> <p>Momentos: ---; ---; --- N.m</p>
Fuerza-2		<p>Entidades: 1 plano(s), 1 Viga(s)</p> <p>Referencia: Planta</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---; ---; -400 N</p> <p>Momentos: ---; ---; --- N.m</p>
Fuerza-3		<p>Entidades: 1 plano(s), 1 Viga(s)</p> <p>Referencia: Planta</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---; ---; -400 N</p> <p>Momentos: ---; ---; --- N.m</p>
Fuerza-4		<p>Entidades: 1 plano(s), 1 Viga(s)</p> <p>Referencia: Planta</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---; ---; -500 N</p> <p>Momentos: ---; ---; --- N.m</p>

Figura 10.21. Detalle de cargas aplicadas al bastidor para análisis de resonancia.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-2		<p>Entidades: 4 Juntas</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

Figura 10.22. Detalle de sujeciones de bastidor para análisis de resonancia.

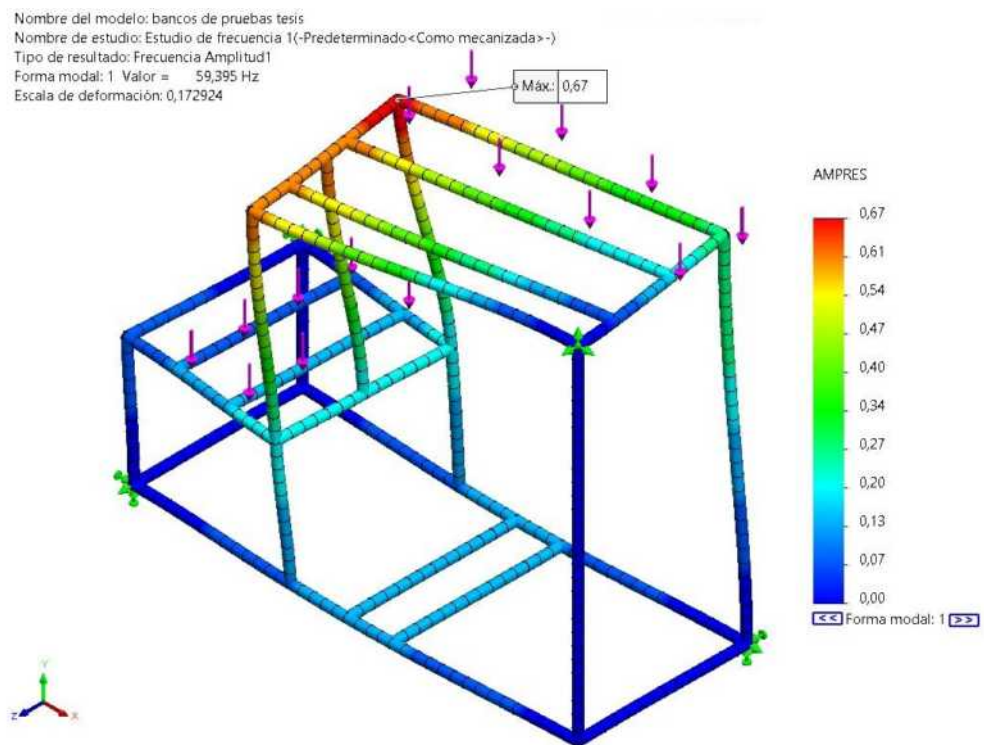


Figura 10.23. Amplitud resultante para frecuencia modal 1.

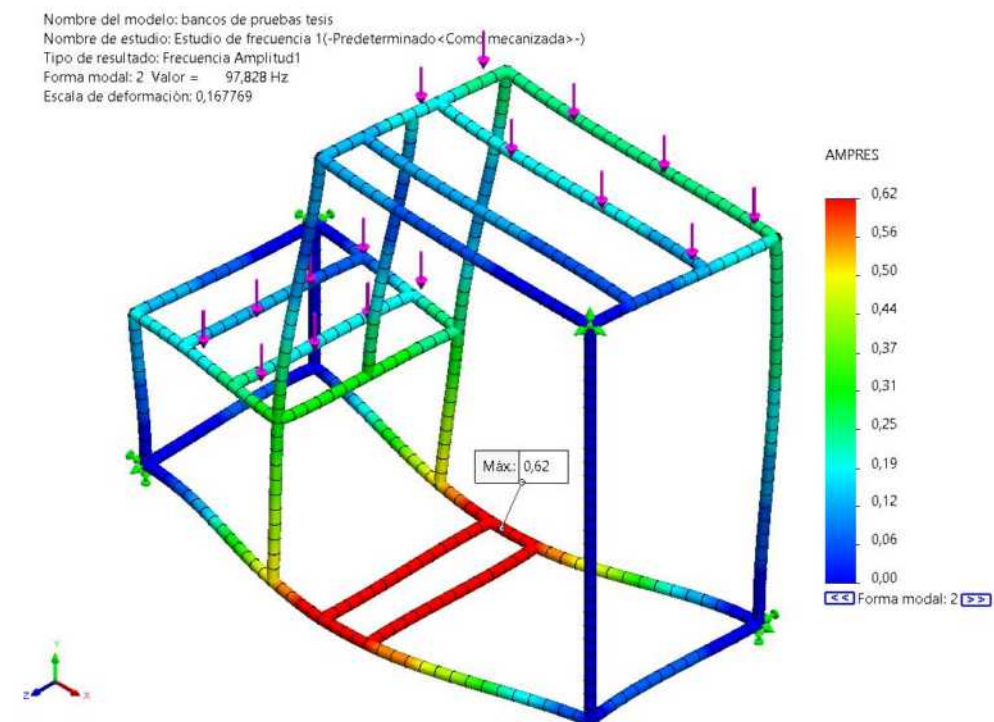


Figura 10.24. Amplitud resultante para frecuencia modal 2.

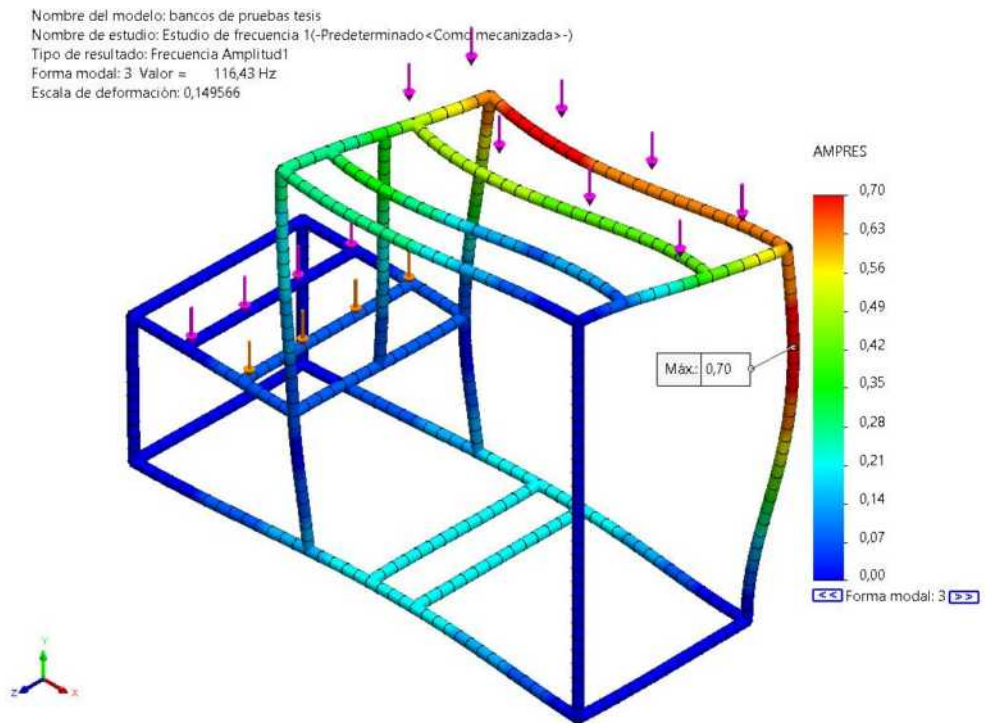


Figura 10.25. Amplitud resultante para frecuencia modal 3.

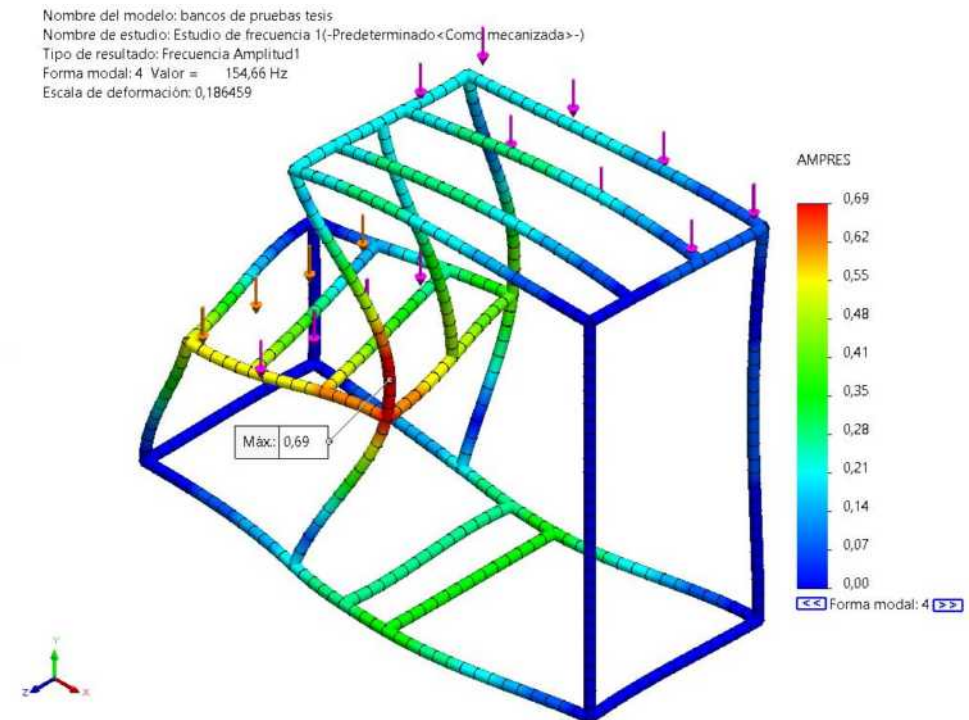


Figura 10.26. Amplitud resultante para frecuencia modal 4.

Conclusión de análisis de resonancia: En este estudio se analizaron las frecuencias resonantes de una armadura reticulada de perfil cuadrado 20x20 *mm* con sus respectivas cargas aplicadas. El Solver direct sparse arrojó que las primeras 4 frecuencias naturales de la estructura son 373.19; 614.67; 731.55 y 971.74 *rad/s* o lo que es igual a 3563.7; 5869.6; 6985.7 y 9279.4 *rpm*, por lo que se recomienda evitar tales frecuencias excitantes.

11. ANEXO II: SIMULACIONES

11.1 Simulación del rotor

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los 30 casos fluido-dinámicos que se analizaron. Para las simulaciones se utilizó metanol debido a que este tiene la presión de vapor más elevada entre los reactivos a utilizar y el régimen de vueltas se definió en 3000 *rpm*. Los diámetros y alturas de los orificios se variaron entre 5 a 10 *mm* y entre 4 a 12 *mm* respectivamente. Como resultado se obtuvo que la profundidad y el diámetro de orificio, ambos en 8 *mm*, garantizan el régimen de cavitación con coeficientes de cavitación debajo de 1.

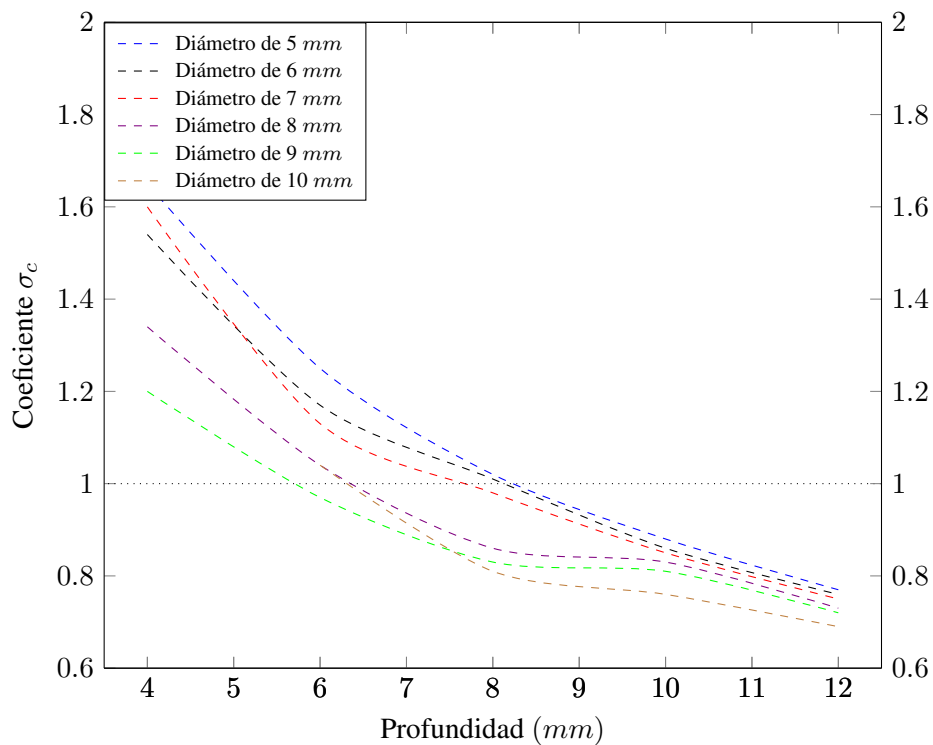


Figura 11.1. Coeficiente de cavitación

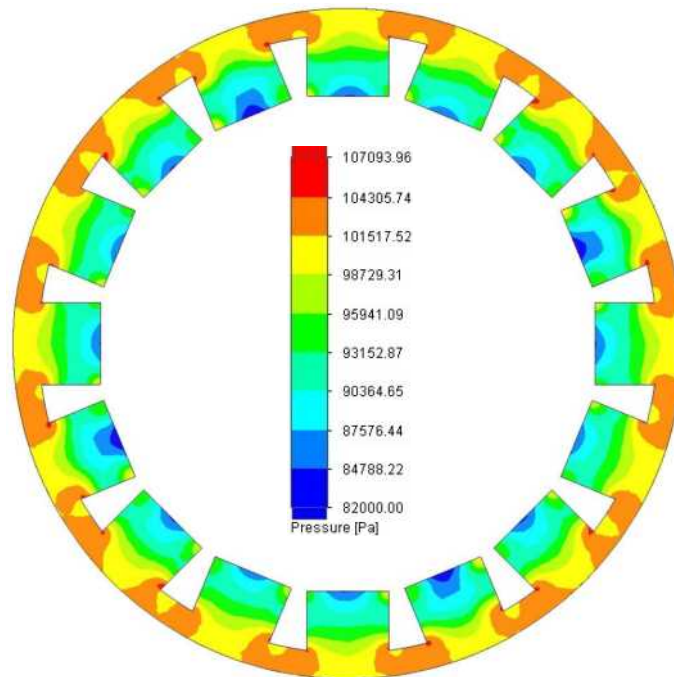


Figura 11.2. Corte transversal con distribución de presiones en el rotor.

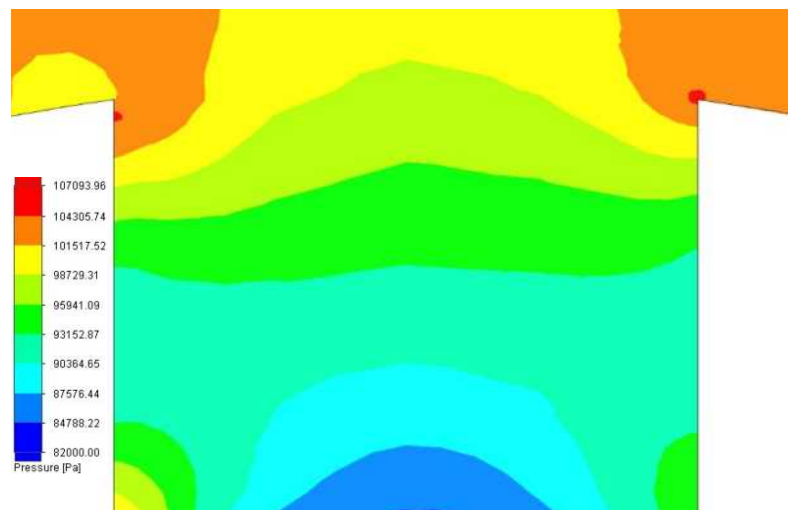


Figura 11.3. Corte transversal con distribución de presiones en la cavidad.

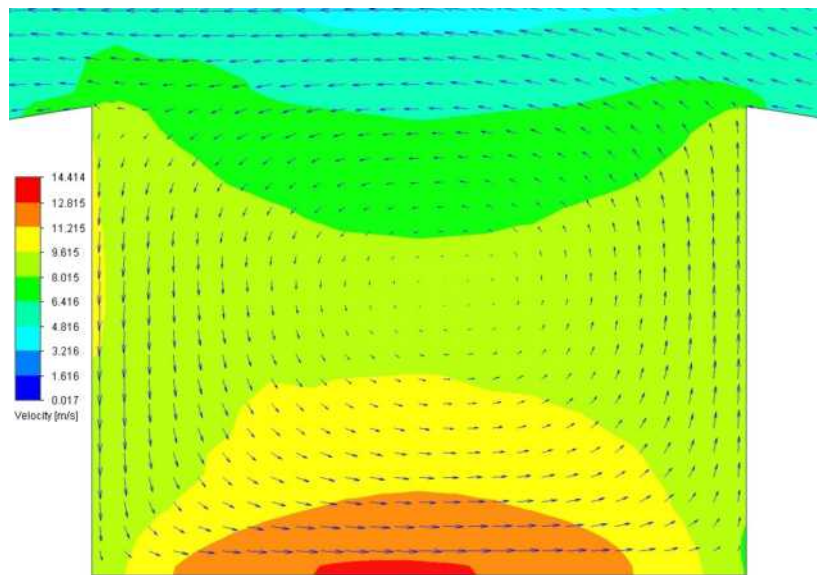


Figura 11.4. Corte transversal con distribución de velocidades en la cavidad.

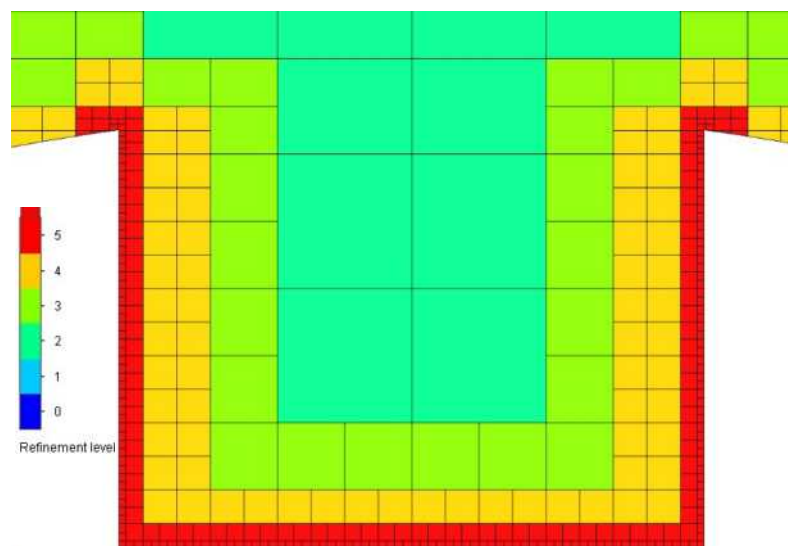


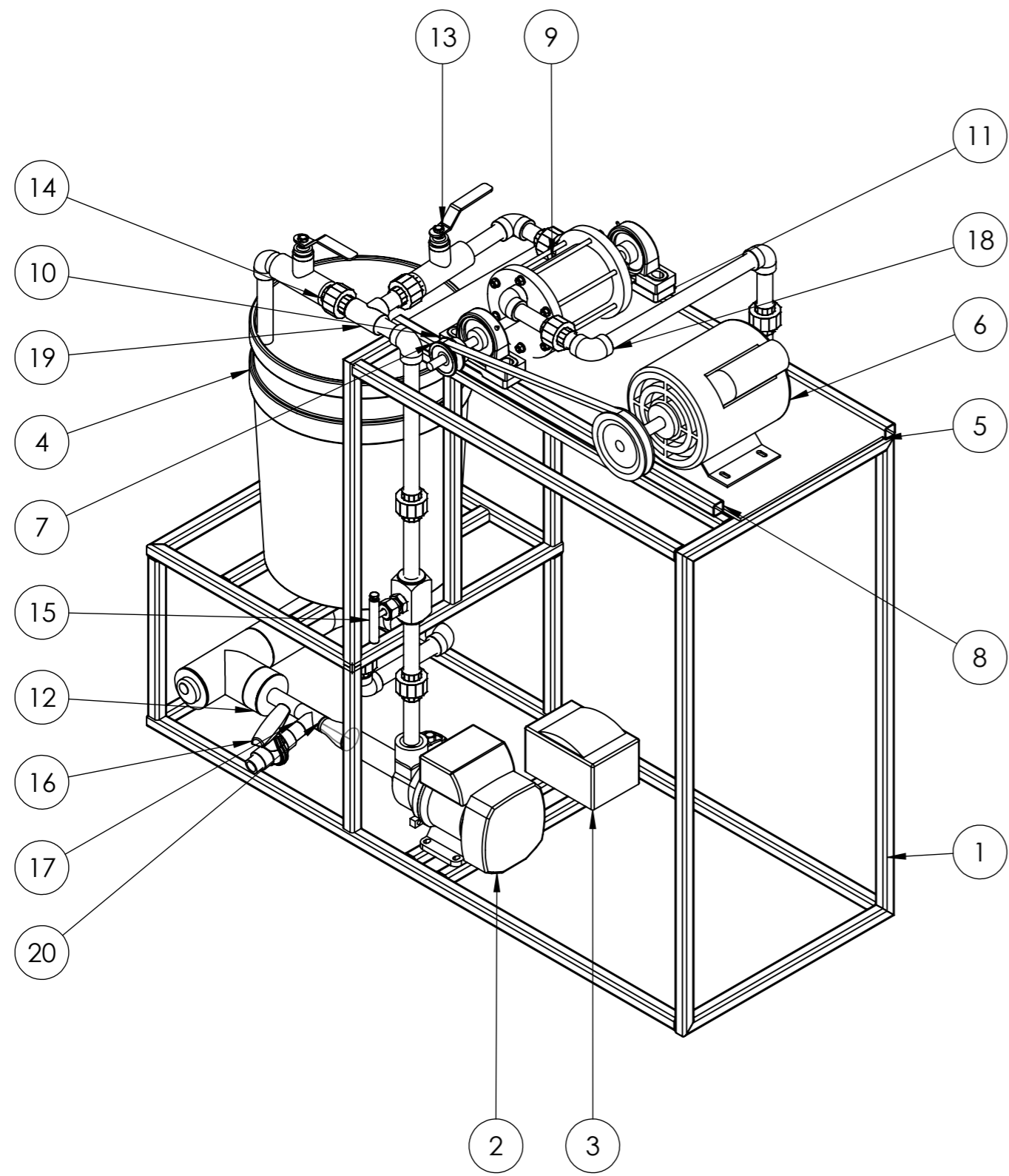
Figura 11.5. Corte transversal de mallado de la cavidad.

Tabla 11.1. Resultados de simulaciones fluido-dinámicas.

Run	RPM	$d[mm]$	$h[mm]$	$P_{min}[Pa]$	σ_c
1	3000	5	4	88079	1.65
2	3000	5	6	88079	1.25
3	3000	5	8	85090	1.02
4	3000	5	10	82470	0.88
5	3000	5	12	79885	0.77
6	3000	6	4	90512	1.53
10	3000	6	6	87091	1.16
9	3000	6	8	84912	1.01
8	3000	6	10	82047	0.86
7	3000	6	12	79437	0.75
11	3000	7	4	90916	1.59
12	3000	7	6	86619	1.13
13	3000	7	8	84402	0.98
14	3000	7	10	81674	0.84
15	3000	7	12	79121	0.74
16	3000	8	4	88943	1.34
17	3000	8	6	85320	1.03
18	3000	8	8	81930	0.85
19	3000	8	10	81196	0.82
20	3000	8	12	78541	0.73
21	3000	9	4	87495	1.20
22	3000	9	6	84275	0.97
23	3000	9	8	81423	0.83
24	3000	9	10	80718	0.80
25	3000	9	12	78095	0.71
26	3000	10	4	87562	1.20
27	3000	10	6	85384	1.04
28	3000	10	8	80834	0.81
29	3000	10	10	79585	0.76
30	3000	10	12	77323	0.69

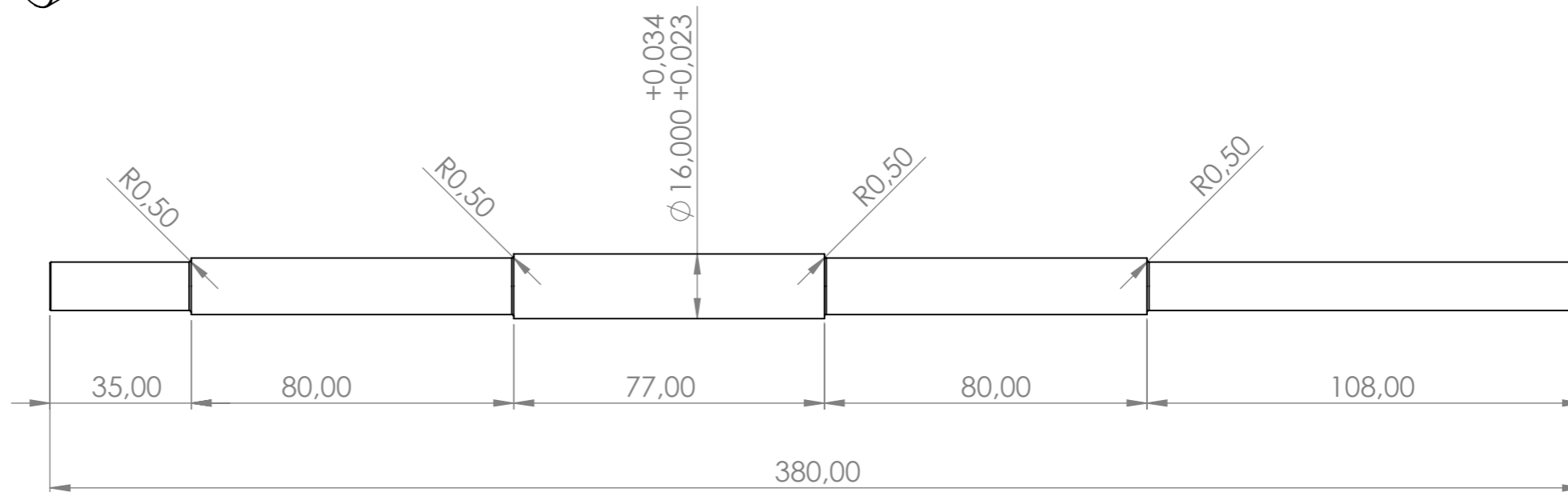
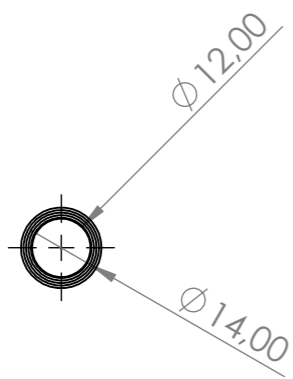
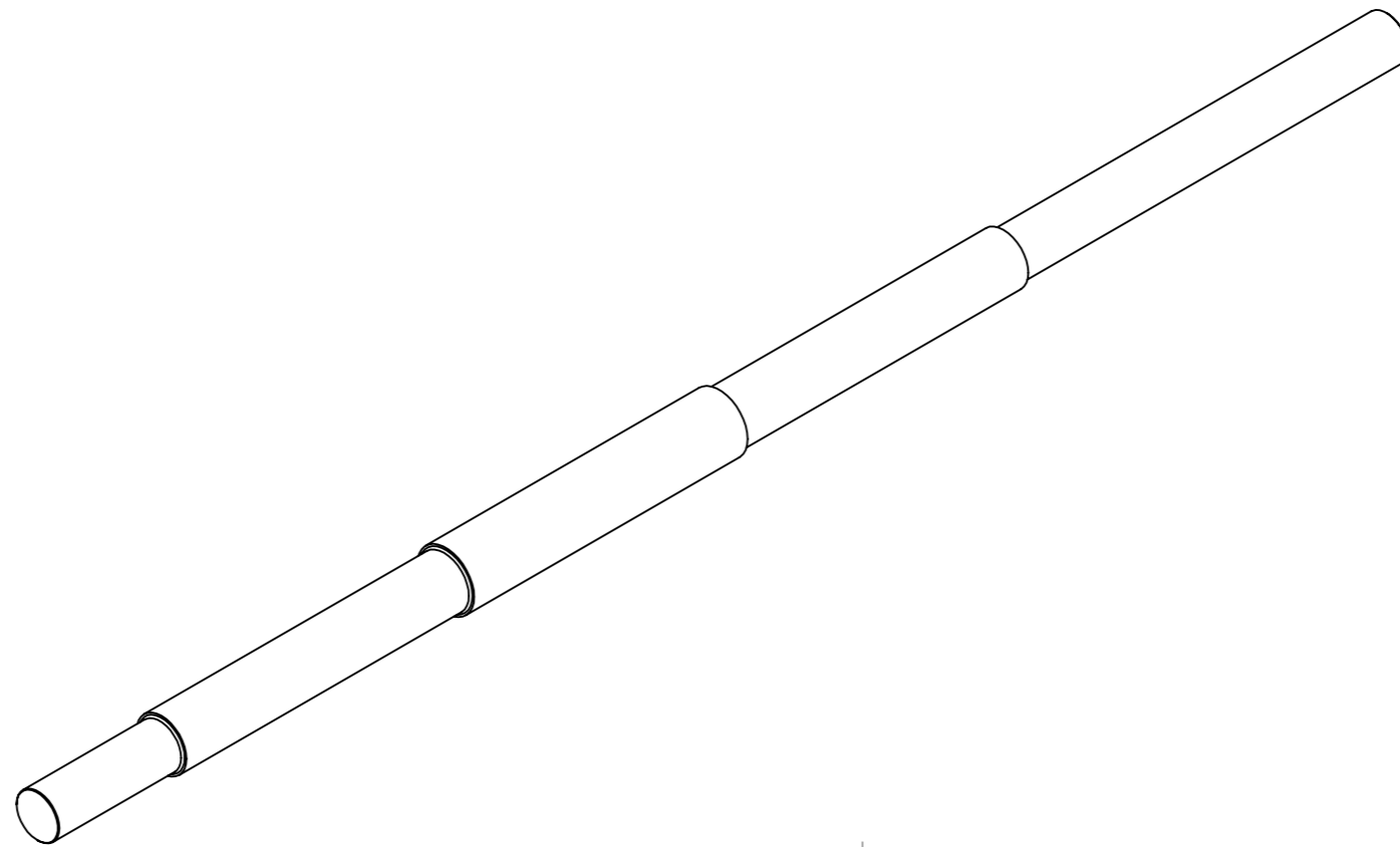
12. ANEXO III: PLANOS

A continuación se presentan los planos de los componentes ad-hoc.

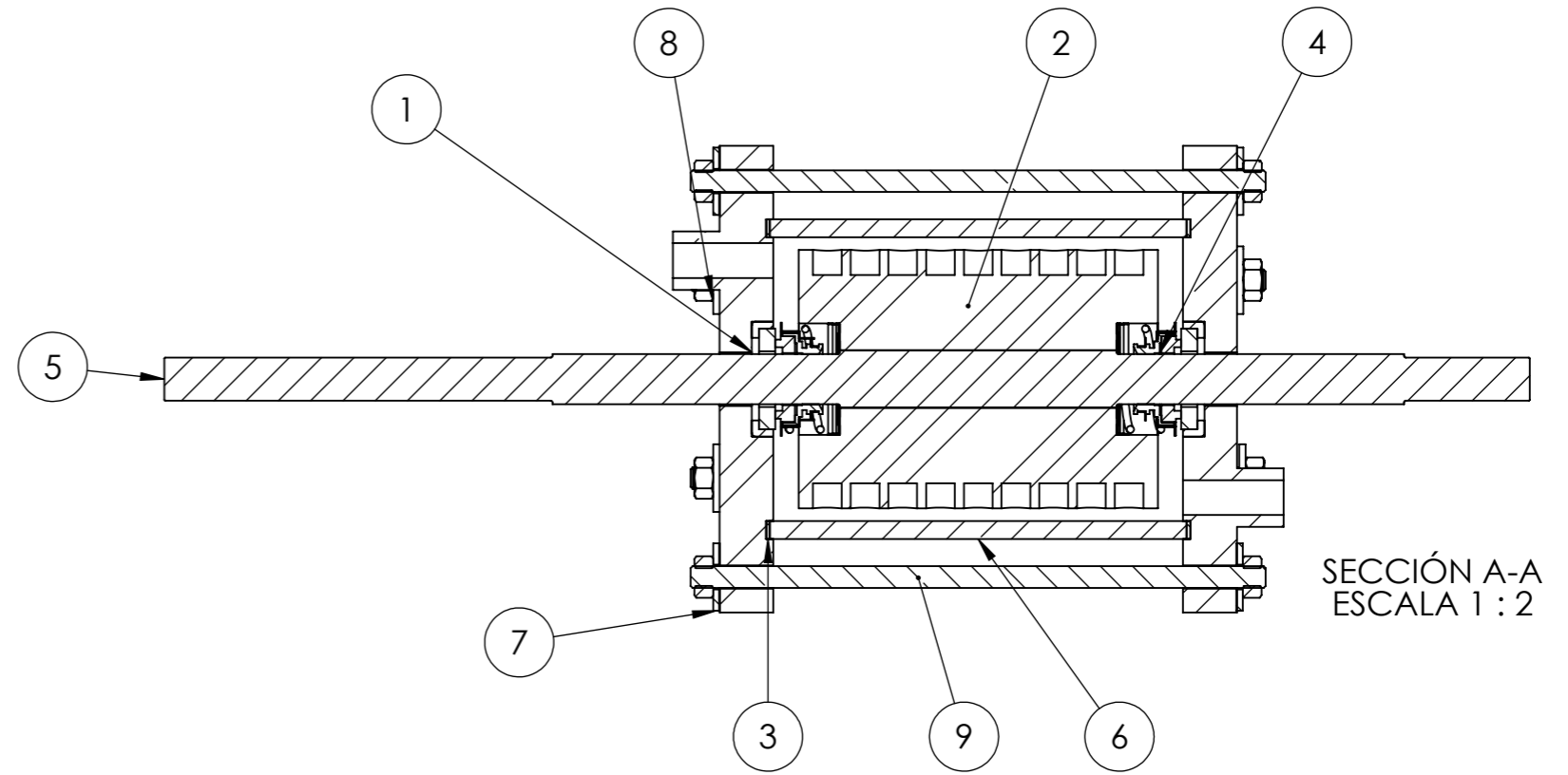
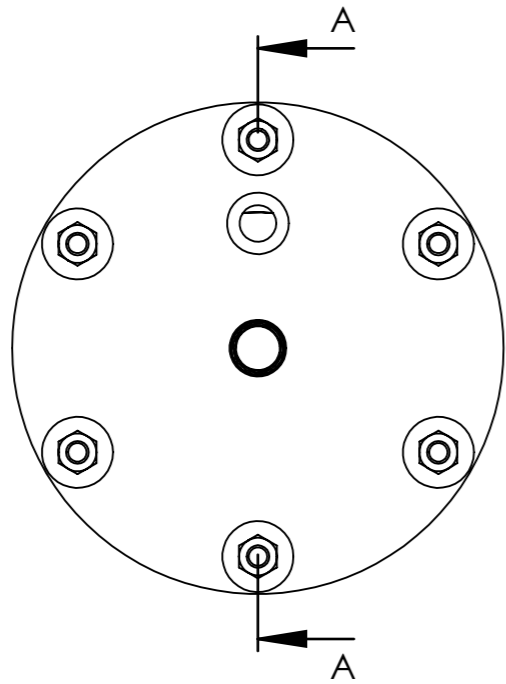


N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Bastidor	1
2	Bomba 0,5 HP	1
3	Tablero eléctrico	1
4	Recipiente 20 litros	1
5	Placa de soporte	1
6	Motor eléctrico 1 HP	1
7	Conjunto polea y correa	1
8	Soporte estructural 20x20 mm	1
9	Reactor de cavitación	1
10	Soporte autocentrante UCP 201	2
11	Soporte de rodamientos	2
12	Calentador	1
13	Válvula esférica	3
14	Unión doble termofusión 20mm	8
15	Válvula aguja 12,5 mm	1
16	Válvula esférica de descarga	1
17	Conexión T polipropileno	1
18	Codo termofusión 20 mm	11
19	T termofusión 20 mm	1
20	Cañería termofusión 20mm x 3m	1

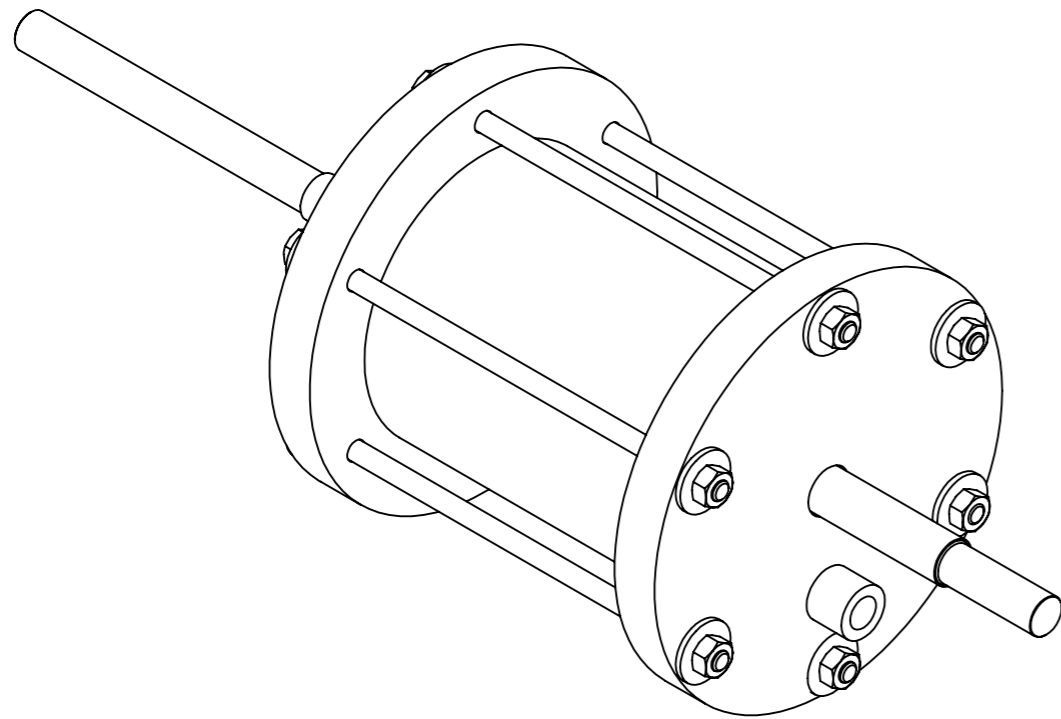
Notas	Fecha	16/09/22	Nombre	G.Rodriguez	Materia	Proyecto integrador profesional	Equipo de diseño	Pagano - Rodriguez
	Dibujó		Revisó		Aprobó		Archivo	Banco de pruebas
	Esc.	1:1	Título				Fecha	17/9/2022
	Toler. Rug.						Banco de pruebas	



Notas	Fecha	Nombre	Materia	Equipo de diseño
Dibujó	16/09/22	G.Rodriguez	Proyecto integrador profesional	Pagano - Rodriguez
Revisó				
Aprobó				
Esc. 1:1,5	Titulo			Archivo
	Eje			Eje
Toler. 0.01 Rug.				Fecha
				Plano

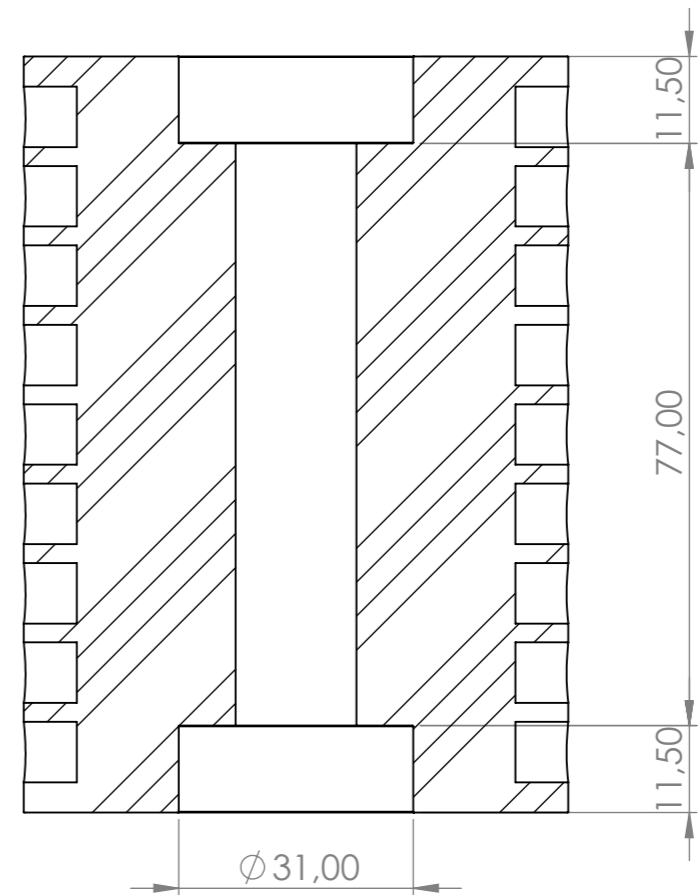
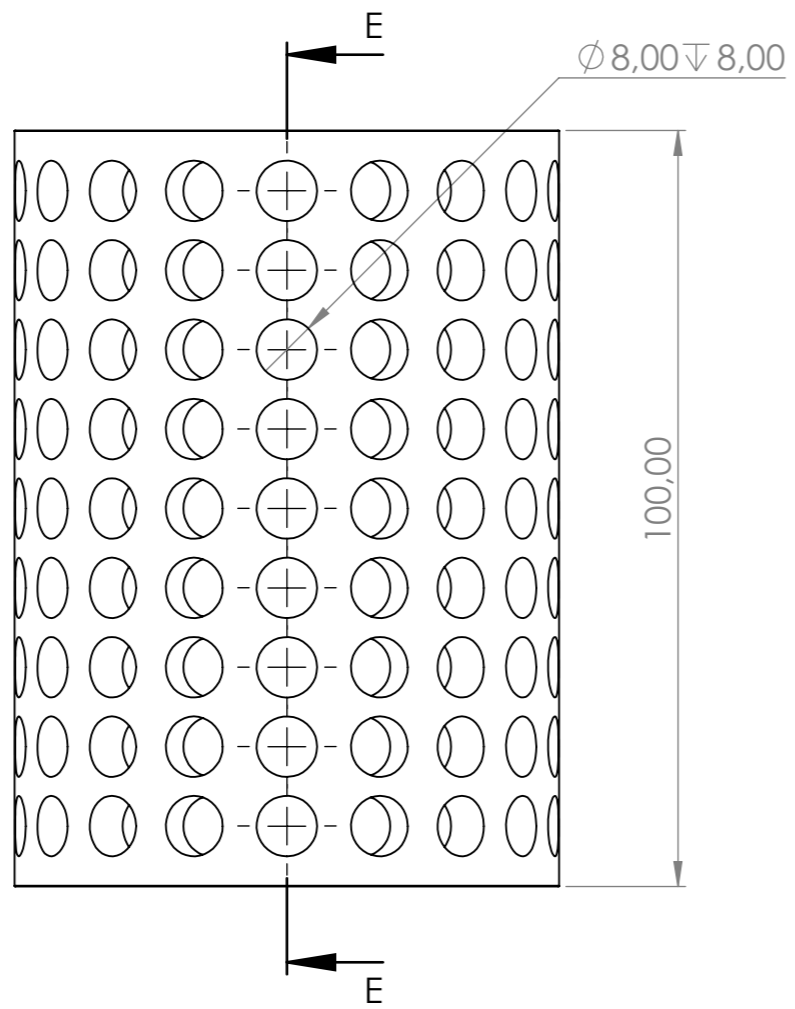


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

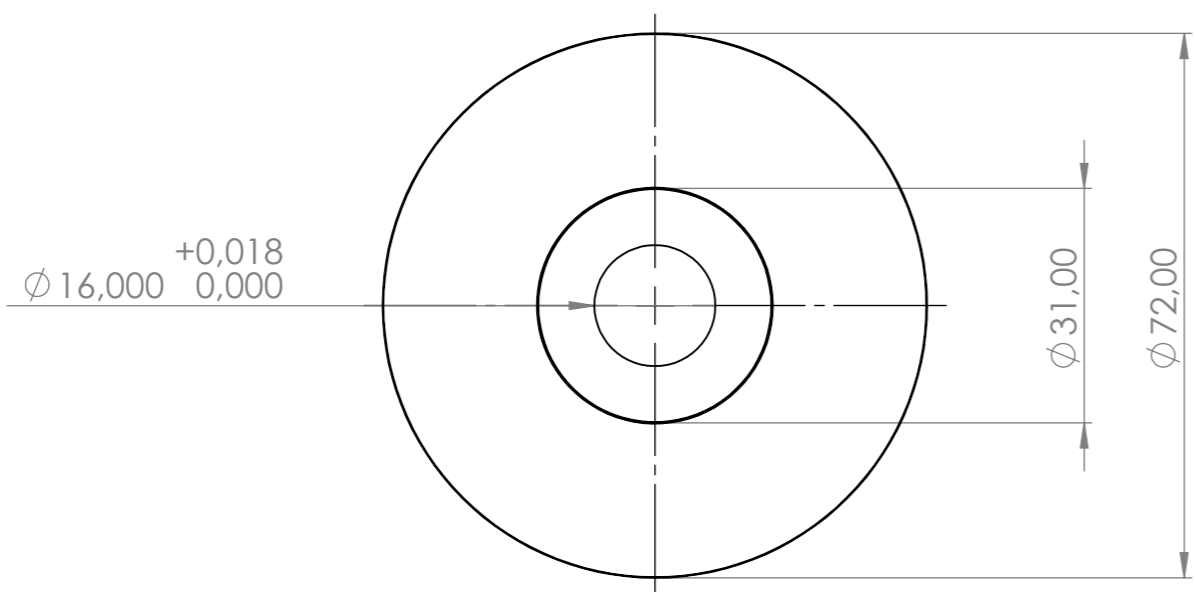


N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tapa circular acero 1045	2
2	Rotor 100 mm aluminio	1
3	Juntas de ademite	2
4	Sello mecanico 14 mm	2
5	Eje escalonado acero 1045	1
6	Estator PMMA	1
7	Arandela acero 6 mm	12
8	Tuerca hexagonal M6	12
9	Varilla roscada M6	6

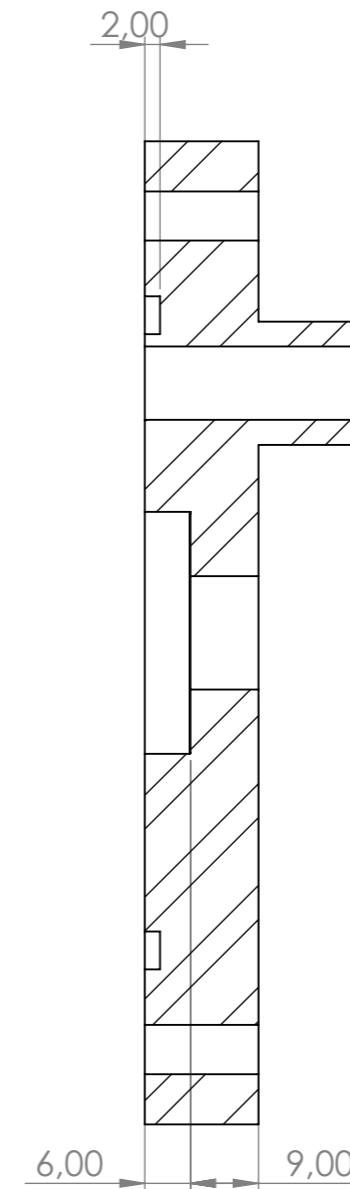
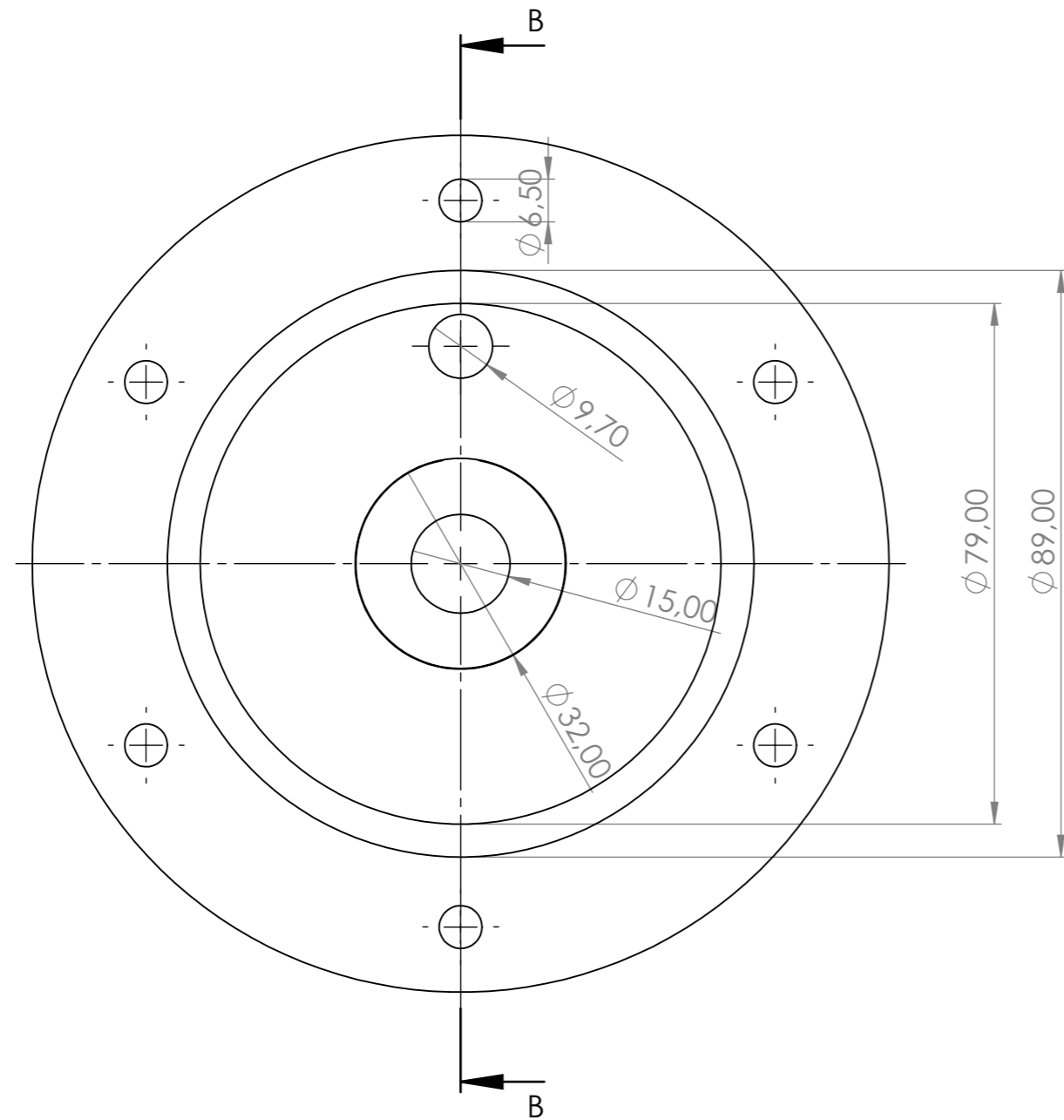
Notas	Fecha	16/09/22	Nombre	G.Rodriguez	Materia	Proyecto integrador profesional	Equipo de diseño	Pagano - Rodriguez
	Dibujó		Revisó		Aprobó		Archivo	Cavitador hidrodinámico
	Esc.	1:1	Titulo				Fecha	17/9/2022
	Toler. Rug.		Ensamble cavitador hidrodinámico				Plano	



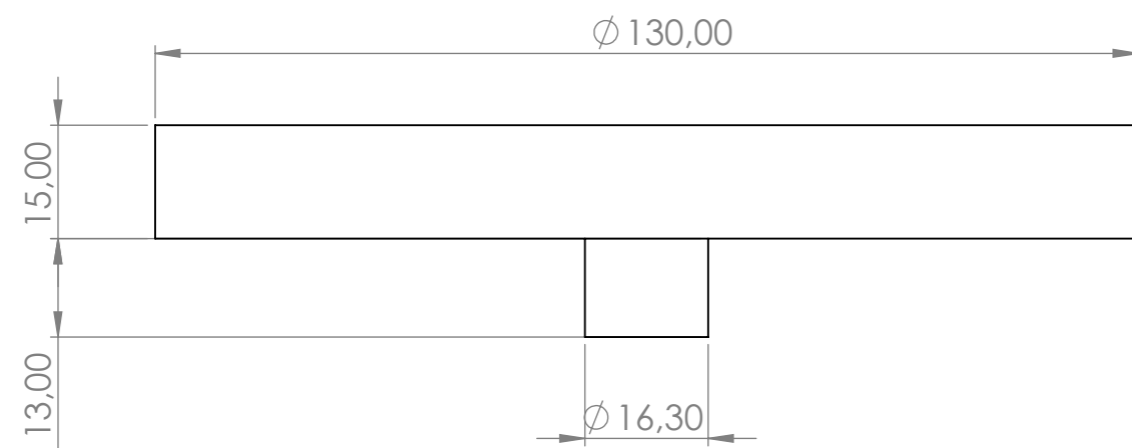
SECCIÓN E-E
ESCALA 1 : 1



Notas	Fecha	Nombre	Materia	Equipo de diseño	
Dibujó	17/09/22	G.Rodriguez	Proyecto integrador profesional	Pagano - Rodriguez	
Revisó					
Aprobó					
Esc.	Título			Archivo	
1:1	Rotor			Rotor	
				Fecha	17/9/2022
Toler. 0.01mm Rug.				Plano	



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1



Notas	Fecha	Nombre	Materia	Equipo de diseño
Dibujó	16/09/22	G.Rodriguez	Proyecto integrador profesional	Pagano - Rodriguez
Revisó				
Aprobó				
Esc.	Título			Archivo
1:1	Tapa frontal cavitador			Tapa frontal cavitador
Toler. Rug.			Fecha	16/9/2022
			Plano	

13. ANEXO IV: PROTOCOLO DE ENSAYOS

”Ensayo de reactor de cavitación de biodiésel”

Para realizar de cada uno de los ensayos se utilizarán 8 litros de aceite y 1.6 litros de metanol con 28 gramos de $NaOH$. El primer ensayo se realizará con aceite limpio y el segundo ensayo con aceite usado.

Ensayo 1: aceite nuevo

1. Verificación de conexiones eléctricas, hidráulicas y sistema de transmisión.
2. Control de reactivos: control de volumen, densidad y proporciones a utilizar.
3. Arranque la bomba de recirculación y toma de muestra 1 y muestra 2 con cavitador apagado.
4. Arranque del cavitador y toma de muestra 3 y muestra 4.
5. Luego de 10 minutos tomar la muestra 5 y muestra 6.
6. Apagado del equipo.
7. Control de tiempos de decantación.
8. Control de productos obtenidos.

Ensayo 2: Aceite usado

1. Verificación de conexiones eléctricas, hidráulicas y sistema de transmisión.
2. Control de reactivos: control de volumen, densidad y proporciones a utilizar.
3. Arranque la bomba de recirculación y toma de muestra 7 y muestra 8 con cavitador apagado.
4. Arranque del cavitador y toma de muestra 9 y muestra 10.
5. Luego de 10 minutos tomar la muestra 11 y muestra 12.
6. Apagado del equipo.

7. Control de tiempos de decantación.
8. Control de productos obtenidos.