

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño y Prototipo de un Sistema para Remoción de Material de Soporte
empleado en la Manufactura Aditiva por MJP (Material Jet Printing)

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Hung Chih Wu Chen

Freddy André Chica Toledo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, hermanos, primos, tíos y amigos, que en todo momento me han apoyado en todos los aspectos de la vida y haber creado la persona que soy el día de hoy. Una especial dedicatoria a Nathaly Pino, por haber dado apoyo incondicional y estar a mi lado en tiempos de necesidad.

Hung Chih Wu Chen

El presente proyecto se lo dedico a mis profesores más allegados, a mi familia y a mis amigos.

Su influencia se ha extendido más allá de mi carrera, he crecido con ustedes y su apoyo ha sido siempre el pilar más grande que he tenido en mi desarrollo.

Freddy André Chica Toledo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la institución por haber dado la oportunidad de poder entrar y estudiar la carrera que más me apasiona.

Agradezco al laboratorio CAMPRO por haber dado apoyo, no solo en este proyecto sino en mi vida académica y a mis tutores por habernos guiado en todo momento.

Hung Chih Wu Chen

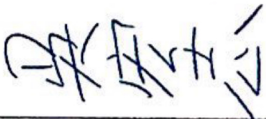
Agradezco a mis profesores, mis padres, mis amigos y consejeros. Agradezco a la institución, a mi tutor y a todo el personal del laboratorio CAMPRO.

Todos han sido fundamentales en mi desarrollo tanto académico como personal y profesional. Con el éxito, de lo único que estaré seguro es que por ustedes soy quien soy, dejándome sentarme en los hombros de gigantes.

Freddy André Chica Toledo

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Hung Chih Wu Chen* y *Freddy André Chica Toledo* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Hung Chih Wu Chen




Freddy André Chica
Toledo

EVALUADORES



MSc. Jorge Medardo Marcial Hernández
PROFESOR DE LA MATERIA



PhD. Jorge Luis Amaya Rivas
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El laboratorio CAMPRO posee un equipo de manufactura aditiva de tecnología MJP, este utiliza dos tipos de materiales para imprimir las piezas; un polímero para la pieza y una cera de soporte que debe ser removida luego de la impresión. La remoción del material de soporte es complicada con herramientas actuales del laboratorio, no se remueve completamente la cera y los equipos de remoción en el mercado son costosos. El objetivo del proyecto es diseñar y construir un prototipo que remueva completamente este material de soporte, lo más económicamente posible. Como solución, se optó por un sistema de agitación mecánica y calentamiento por convección. El diseño y construcción del equipo se dividió en: parte mecánica y parte eléctrica-control. En la parte mecánica, se diseñó una estructura con materiales del mercado local, se seleccionó un motor DC 16W y se diseñó el agitador junto con su respectivo eje. Para la parte eléctrica-control, se seleccionó una placa Arduino UNO, sensor de temperatura DS18B20, puente H L298n para controlar el motor y una resistencia de calentamiento de 1000W. Terminada la construcción del prototipo, se imprimieron piezas de distintas complejidades y se realizaron pruebas de eficiencia de remoción. Como resultado, se comprobó la remoción completa de la cera, reduciendo el tiempo en 60-70% en comparación al proceso previamente llevado por el laboratorio. También se obtuvo un mejor acabado y menores costos de producción que la competencia. Se concluye que el prototipo puede realizar la remoción de material de soporte de manera eficaz, realizando una mejora al proceso de producción.

Palabras Clave: Manufactura aditiva, MJP, Agitadores, Material de soporte, Mezcla aceite-cera

ABSTRACT

The CAMPRO laboratory, has an industrial MJP technology additive manufacturing equipment, which uses two types of material to print workpieces, a polymer for the workpiece and support wax which must be removed after printing. The support material removal is complicated with current tools available in the laboratory, the wax is not fully removed, and commercial equipment is very costly. The objective of this project is to design and build a prototype which removes the support wax completely, as economically viable as possible. The solution involves a mechanical agitation system with convection heating. The design and building process was divided into mechanical part and electrical-control part. Inside the mechanical part, a support structure was built using locally available materials, a DC 16W motor was selected and an agitator with its corresponding shaft was designed. Accordingly, inside the electrical-control part, an Arduino UNO motherboard, a DS18B20 temperature sensor, a L298n H bridge for motor control and a 1000W heating resistance were selected. Once the building process was completed, various workpieces with diverse geometrical complexities were printed and removal efficiency testing was conducted. As a result, complete wax removal was achieved, reducing the process time by 60-70% compared to the previous method followed by the laboratory. Furthermore, better surface finish was obtained whilst lower production costs were generated. In conclusion, the prototype was found to be efficient in the support material removal, causing a clear improvement in the production process.

Keywords: *Additive manufacturing, MJP, Agitators, Support Material, Oil-wax mixture*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del Problema	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Material Jet Printing (MJP).....	3
1.4.2 Métodos de remoción de material de soporte	5
1.4.3 Agitación y sus beneficios.....	6
1.4.4 Reología de la mezcla aceite-cera	7
CAPÍTULO 2	8
2. Metodología.....	8
2.1 Metodología de diseño a seguir.....	8
2.2 Selección de Sistema de Solución	10
2.2.1 Sistema de ducha por bombeo	10
2.2.2 Sistema de agitación.....	10

2.2.3	Sistema de ultrasonido	10
2.2.4	Matriz de decisión de la solución	10
2.3	Selección de aspectos relevantes	11
2.4	Limitaciones, Especificaciones y Parámetros de Diseño	13
2.5	Diseño de Forma General	14
2.6	Cálculos de Diseño	15
2.6.1	Tanque, deflectores y agitador.....	15
2.6.2	Motor	18
2.6.3	Estructura de soporte.....	22
2.6.4	Eje principal	23
2.6.5	Pérdidas y tiempo de remoción.....	25
2.7	Selección de componentes	32
2.7.1	Componentes Mecánicos	32
2.7.2	Componentes eléctricos y de control	33
2.8	Control y código	34
CAPÍTULO 3.....		35
3.	Resultados Y ANÁLISIS	35
3.1	Construcción	35
3.1.1	Planos.....	35
3.1.2	Proceso de construcción.....	35
3.2	Pruebas y Análisis de resultados.....	38
3.2.1	Tiempos de remoción	38
3.2.2	Acabado	39
3.3	Pruebas de eficiencia	39
3.3.1	Prueba Dimensional.....	39
3.3.2	Pruebas de pesaje.....	41
3.3.3	Pruebas de tiempo de remoción de material de soporte	43

3.4	Efectos del proceso.....	45
3.4.1	Tratamiento térmico en piezas.....	45
3.4.2	Saturación de mezcla	45
3.5	Análisis de Costos.....	47
CAPÍTULO 4.....		48
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	48
4.1	Conclusiones.....	48
4.1.1	Prueba Dimensional.....	48
4.1.2	Prueba de Pesaje	48
4.1.3	Piezas de geometría compleja.....	48
4.1.4	Eficiencia del prototipo.....	49
4.1.5	Costos del prototipo.....	49
4.1.6	Implicaciones del diseño en la industria de la manufactura aditiva	49
4.1.7	Lecciones Aprendidas.....	50
4.2	Recomendaciones.....	50
4.2.1	Procedimiento de uso y mantenimiento óptimo.....	51
BIBLIOGRAFÍA		48
APÉNDICE A		53
APENDICE B		59
APENDICE C		61

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society of Testing and Materials
API	American Petroleum Institute
MJP	Material Jet Printing
MA	Manufactura Aditiva
MC	Manufactura Convencional
CAMPRO	Campo Avanzado de Manufactura y Prototipo
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

SIMBOLOGÍA

mg	Miligramo
m	Metro
mm	Milímetro
gr	Gramos
min	Minutos
pulg	Pulgadas
°C	Grados Celsius
MPa	Mega Pascales
N	Newton

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de Impresión MJP	3
Figura 1.2. Ejemplos de agitadores y sus partes.	7
Figura 2.1. Metodología de diseño del prototipo [Elaboración Propia]	9
Figura 2.2. Diseño de forma completo. [Elaboración Propia]	15
Figura 2.3. Vista en corte de prototipo y sus componentes. [Elaboración Propia]	15
Figura 2.4. Nomenclatura de dimensiones de tanque y agitador	16
Figura 2.5. Número de potencia en función del número de Reynolds para diferentes relaciones D/T [Paul et al., 2003].....	20
Figura 2.6. Número de potencia en función del número de Reynolds para diferentes tipos de turbinas [Paul et al., 2003].	20
Figura 2.7. Diseños de forma de estructura [Elaboración Propia].....	22
Figura 2.8. Diseño de forma de eje principal [Elaboración propia]	23
Figura 2.9. Simulación de frecuencia natural del sistema eje agitador [Elaboración propia]	25
Figura 2.10. Conexión de control con sus componentes respectivos [Elaboración propia]	35
Figura 3.1. Compras de materiales. De izquierda a derecha, caneca de aceite para freír y motor DC 12V [Elaboración Propia].....	35
Figura 3.2. Fabricación de estructura y deflectores [Elaboración Propia]	36
Figura 3.3. Conexiones y pruebas de sistema de control [Elaboración Propia]	36
Figura 3.4. Mejora en parte estética del prototipo [Elaboración Propia].....	37
Figura 3.5. Prototipo ensamblado [Elaboración Propia].....	37
Figura 3.6. Comparación de Remoción de cera por tipo de fluido [Elaboración Propia]	39
Figura 3.7. Placas de prueba dimensional con y sin cera removida [Elaboración Propia]	40
Figura 3.8. Comprobación de deflexión en placas. De arriba a abajo: placa 1mm, placa 2mm, placa 3mm espesor [Elaboración Propia]	40
Figura 3.9. Mediciones directas de espesores luego de proceso de remoción para cada pieza impresa [Elaboración Propia]	41
Figura 3.10. Pesaje de impresión de una pletina 200x400x1mm [Elaboración Propia].	42

Figura 3.11. Monumentos impresos para prueba de tiempo general de remoción [Elaboración Propia].	43
Figura 3.12. Comparación de velocidades de enfriamientos [Elaboración Propia].....	45
Figura 3.13. De izquierda a derecha: Muestras de aceite saturado, muestra de cristales de cera sin aceite [Elaboración Propia]	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades de distintos materiales involucrados en la impresión MJP de la impresora ProJet 3510 SD [ProJet 3500 SD & HD Catalogue]	4
Tabla 1.2. Propiedades físicas de distintos aceites vegetales comerciales	6
Tabla 2.1. Matriz de decisión de alternativa de solución [Elaboración propia]	11
Tabla 2.2. Carta morfológica de elementos de la solución. [Elaboración propia]	12
Tabla 2.3. Aspectos seleccionados del sistema de agitación [Elaboración propia].	13
Tabla 2.4. Relaciones de las dimensiones del tanque, agitador y deflectores	17
Tabla 2.5. Geometría de tanque, deflectores y agitador [Elaboración Propia]	17
Tabla 2.6. Esfuerzos permisibles del acero AISI 304 [API 650]	18
Tabla 2.7. Resultados de la simulación [Elaboración Propia]	25
Tabla 2.8. Propiedades de materiales involucrados en el equipo [Elaboración Propia]	26
Tabla 2.9. Ecuaciones de Transferencia de Calor [Elaboración Propia]	26
Tabla 2.10. Viscosidad cinemática de distintos aceites vegetales a distintas temperaturas [Rojas et al., 2013]	27
Tabla 2.11. Coeficientes universales de transferencia de calor [Elaboración Propia] ...	31
Tabla 3.1. Tiempos de remoción para las dos situaciones [Elaboración Propia]	38
Tabla 3.2. Resultados de pesaje de piezas después de remoción [Elaboración Propia]	42
Tabla 3.3. Monumentos impresos de geometrías complejas [Elaboración Propia]	43
Tabla 3.4. Saturación de cera en la mezcla [Elaboración Propia]	46
Tabla 3.5. Descripción de costos para la construcción del prototipo [Elaboración Propia]	47
Tabla A.1. Tabla de escalas de comparación de criterios. [Elaboración Propia]	53
Tabla A.2. Comparación de los criterios de selección del agitador. [Elaboración Propia]	54
Tabla A.3. Matriz de decisión del agitador. [Elaboración Propia]	54
Tabla A.4. Comparación de los criterios de selección de la posición del agitador. [Elaboración Propia]	55
Tabla A.5. Matriz de decisión de la posición del agitador. [Elaboración Propia]	55

Tabla A.6. Comparación de los criterios de selección de la resistencia de calentamiento. [Elaboración Propia].....	56
Tabla A.7. Matriz de decisión de la resistencia de calentamiento. [Elaboración Propia].....	56
Tabla A.8. Comparación de los criterios de selección del aislamiento térmico. [Elaboración Propia].....	57
Tabla A.9. Matriz de decisión del aislante térmico. [Elaboración Propia]	57
Tabla A.10. Comparación de los criterios de selección del controlador. [Elaboración Propia].....	58
Tabla A.11. Matriz de decisión del controlador. [Elaboración Propia]	58

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Planos en explosión del prototipo.....	61
Plano 2. Componentes del prototipo.	62
Plano 3. Ensamble del prototipo.....	63
Plano 4. Estructura base	64
Plano 5. Tanque.....	65
Plano 6. Viga soporte vertical.....	66
Plano 7. Acople.....	67
Plano 8. Deflectores.....	68
Plano 9. Agitador.....	69
Plano 10. Eje principal.....	70

Nota: Planos pueden ser encontrados en Apéndices C

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los procesos de remoción de material, conocidos como procesos de manufactura convencional (MC), se han vuelto inadecuados debido a que prototipar un nuevo diseño puede tomar tiempos extensos, costos elevados y manufactura complicada, particularmente para piezas con geometrías complejas. Como solución a este problema, la industria ha ido evolucionando hacia el uso de técnicas de manufactura que depositen material en vez de removerlo, conocido como manufactura aditiva (MA) o coloquialmente, impresión 3D. Existen varias técnicas de MA, de las cuales material jet printing (MJP) ha demostrado ser una técnica sumamente útil para el prototipado de piezas, ya que permite la generación de geometrías precisas y tiempos relativamente bajos de producción (Pushkar, Subodh, & Karunakaran, 2018). Sin embargo, existen muchos desafíos que faltan por resolver, siendo uno de los principales que esta técnica de manufactura requiere de materiales auxiliares que pueden llegar a causar problemas indeseados al momento de removerlos (Ligon, Liska, Stampfl, Gurr, & Mülhaupt, 2017) .

1.1 Definición del Problema

Como parte de la manufactura, el uso de resinas líquidas tratadas por fotocurado para el proceso de impresión de elementos requiere de la impresión simultánea de estructuras de soporte, en ciertos casos a base de cera. Esta cera se adhiere fuertemente una vez finalizada la impresión y debe ser correctamente removida sin afectar las propiedades de la pieza manufacturada, por lo que simplemente arrancarla no resulta del todo eficiente. La cera utilizada como material de soporte se ablanda a aproximadamente 40°C y entra en fase líquida a 60°C; mientras que el material de la pieza (material de los elementos impresos) sufre distorsión por calentamiento alrededor de los 88°C. La remoción del material resulta crítica debido a que, al estar pegada a la pieza final, esta puede resultar dañada volviendo a la pieza requerida no útil. El trabajo consta en desarrollar un sistema de remoción de material de soporte, de tal manera que la pieza

final permanezca limpia, de buena calidad superficial y con sus dimensiones predeterminadas.

1.2 Justificación del proyecto

La tecnología Multijet asegura la velocidad óptima de los procesos, lo cual la convierte viable para una manufactura en escala industrial. (Kamble, Pushkar & Chavan, Subodh & K.P., Karunakaran, 2018, Multi-jet Fluid Deposition in 3D Printing: A Review.) El laboratorio CAMPRO de la FIMCP cuenta con una impresora 3D ProJet 3510 SD; la misma que utiliza un proceso de MJP para la fabricación de elementos a partir de foto-curado de resinas de plástico con características similares al plástico ABS, dando como resultado piezas sólidas. Dentro de la industria, estas piezas pueden ser empleadas para rápido modelado de piezas, pruebas de ensamble; por lo cual su precisión de impresión resulta crítica.

A partir de lo planteado, resulta el desafío de diseñar un sistema de remoción del material de soporte asegurando el estado óptimo de la pieza impresa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y prototipar un sistema de remoción del material de soporte para elementos producidos por MJP

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema de remoción de material de soporte de acuerdo con las restricciones de impresión que requiere el cliente (150x100x100 mm) y requerimientos térmicos del material de impresión (Alrededor de 88°C).
2. Generar un prototipo de la etapa de remoción de material del sistema completo.
3. Diseñar e implementar un sistema de control de temperatura interna para el sistema de remoción de material.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Material Jet Printing (MJP)

La manufactura aditiva por *material jetting*, o en particular la técnica de impresión 3D inkjet, es un proceso de MA que puede generar piezas al depositar gotas de líquido fotopolimérico usando un cabezal de impresión y curando el fotopolímero mediante lámparas UV (Yap et al., 2017). Existen tipos de impresoras, tales como la ProJet 3510 SD, que son capaces de depositar selectivamente múltiples resinas poliméricas foto-curables al mismo tiempo, de esta manera fabricando partes de múltiples materiales. Materiales de soporte sacrificables, son generados automáticamente y depositados junto con los fotopolímeros para sostener estructuras en voladizo (Yap et al., 2017). La introducción de estos materiales de soporte implica que, al finalizar la impresión se deberá realizar un proceso de remoción del soporte, lo cual puede llegar a ser una tarea dificultosa dependiendo del tipo de material auxiliar empleado. Para el caso de la ProJet 3510 SD, este material de soporte es VisiJet S300, un tipo de cera de parafina con aditivos. A continuación, se muestra una imagen representativa del proceso de impresión.

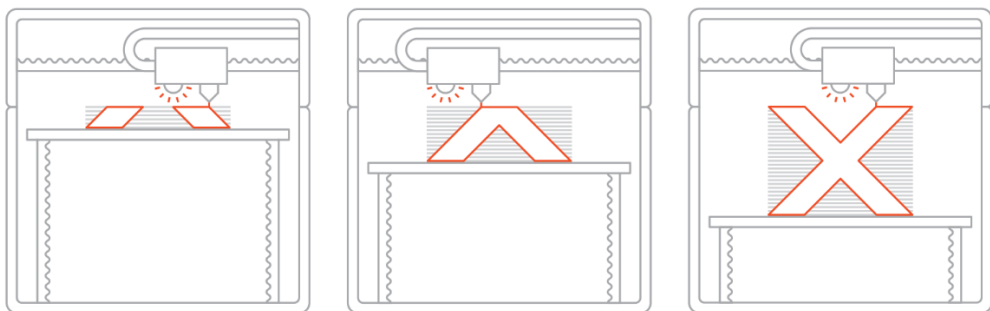


Figura 1.1. Proceso de Impresión MJP
[Alkaios Bournias Varotsis, Editor 3D Hubs]

El fabricante, provee información limitada sobre las propiedades de estos materiales, y de igual manera, la bibliografía científica no provee de información significativa sobre pruebas químicas o mecánicas. A pesar de esto, se certifica en embalaje que el componente principal del material de

soporte VisiJet S300 consiste en cera de parafina, lo cual permite aproximar las propiedades del material de soporte con las de este material. La cera de parafina se encuentra por lo general como un sólido blanco, inodoro, carente de sabor, con un punto de fusión típico entre 60°C y 84°C, es insoluble en agua, pero sí es soluble en éter, benceno, y algunos ésteres (Poole & Mangelsdorf, 1932).

Para el caso del resto de materiales, se adjunta una tabla con datos proporcionados por el fabricante, con las especificaciones de las propiedades de diversos materiales disponibles. Cabe recalcar que, entre estos materiales, el VisiJet M3-X es el material más versátil y comúnmente empleado en las impresiones de este fabricante.

Tabla 1.1. Propiedades de distintos materiales involucrados en la impresión MJP de la impresora ProJet 3510 SD [ProJet 3500 SD & HD Catalogue]

Propiedades	Normas	VisiJet M3-X	VisiJet M3 Black	VisiJet M3 Crystal	VisiJet M3 Navy	VisiJet S300
Composición		Polímero Foto-Curable				Cera
Color		Blanco	Negro	Natural	Azul	Blanco
Cantidad Embotellada		2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
Densidad @ 80°C (líquido)	ASTM D4164	1.04 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	N/A
Tensión Máxima	ASTM D638	49 MPa	35.2 MPa	42.4 MPa	20.5 MPa	N/A
Módulo de Elasticidad	ASTM D638	2168 MPa	1594 MPa	1463 MPa	735 MPa	N/A
Elongación Máxima	ASTM D638	8.3%	19.7%	6.8%	8.0%	N/A
Flexión Máxima	ADTM D790	65 MPa	44.5 MPa	49 MPa	28.1 MPa	N/A
Distorsión Térmica @ 0.45 MPa	ASTM D648	88 °C	57 °C	56 °C	46 °C	N/A
Punto de Fusión		N/A	N/A	N/A	N/A	60 °C
Punto de Ablandamiento		N/A	N/A	N/A	N/A	40 °C
Compatibilidad ProJet		SD, HD	SD, HD	SD, HD	SD, HD	SD, HD
Descripción		Parecido al ABS	Plástico flexible y de alta resistencia	Plástico resistente, translúcido	Plástico, azul	Cera no tóxica para soportes fundibles

1.4.2 Métodos de remoción de material de soporte

La fragilidad de las piezas impresas por MJP es sumamente influyente hacia la técnica de remoción que deba usarse. Para generalizar el proceso de remoción, también deben considerarse todos los tipos de piezas que pueden ser impresas, lo cual trae consigo desafíos tales como la existencia de cera en lugares difíciles de alcanzar con una herramienta, orificios de diámetro milimétrico o partes con secciones transversales muy finas.

En base al fabricante (3DSystems Product, 2012) y literatura, los métodos más populares para realizar el acabado de las piezas impresas están:

- Remoción mecánica: se trata del uso de herramientas de baja dureza que permitan el raspado de la cera hasta obtener la pieza final.
- Horno: este método puede ser tanto por radiación, donde se calienta una resistencia eléctrica al circular una corriente por un filamento emitiendo de esta manera calor hacia la cera y la pieza; así como por convección forzada, donde se circula aire caliente en el interior del horno, transfiriendo su calor a la cera y la pieza.
- Baño caliente: este método consiste en sumergir la pieza con cera en un tanque caliente de tal manera que el fluido diluya la cera sin afectar la pieza.
- Ducha caliente: consiste en dejar caer un fluido caliente hacia pieza con cera, de tal manera que el caudal de fluido remueva continuamente la cera.
- Baño ultrasónico: para este caso, la pieza es sumergida en un baño caliente y se proporciona movimiento al fluido mediante ondas de sonido emitidas por un generador ultrasónico.

Dentro de la bibliografía, (Yin et al., 2018) sugieren que el uso de un baño de aceite vegetal caliente a 70°C es la manera más efectiva de remover el material de soporte. Su experimento muestra tiempos estimados de mejor eficiencia y sugieren emplear esta técnica en sistemas industriales. Se muestran así las propiedades promedio de varios aceites vegetales para el rango de temperaturas establecido.

Tabla 1.2. Propiedades físicas de distintos aceites vegetales comerciales

[Rojas, Coimbra, & Telis-Romero, 2013]

Aceites Vegetales	Densidad [kg/m³]	Viscosidad Dinámica [mPa.s]	Viscosidad Cinemática [m²/s]	Conductividad Térmica [W/m °K]	Capacidad Calorífica [J/g °K]
Algodón	927.10	52.25	5.638E-05	0.182	2.249
Canola	920.20	93.99	1.021E-04	0.173	2.249
Girasol	919.60	63.94	6.953E-05	0.164	2.453
Maíz	931.60	69.90	7.504E-05	0.168	2.154
Soya	922.70	60.60	6.567E-05	0.158	2.148

1.4.3 Agitación y sus beneficios

La remoción de la cera al ser diluida implica que esta tenderá a combinarse con el fluido de trabajo. Esto puede causar problemas al significar que la cera puede acumularse y finalmente pegarse nuevamente a la pieza. Debido a esto, mantenerla en un estado miscible (de alta solubilidad) con el fluido de trabajo es beneficioso. Además de esto, debido a que existe una infinidad de geometrías posibles a ser impresas, homogenizar la temperatura permite asegurar tiempos menores y disminuir la posibilidad de distorsiones en la pieza final.

Un agitador es un dispositivo o mecanismo, cuya función es poner en movimiento las sustancias que se quieren mezclar u homogenizar. El uso de agitadores en un sistema promueve el equilibrio en las propiedades de la mezcla. Generalmente los agitadores consisten en un rotor de turbina y un eje, los cuales pueden ser de varios tamaños y tipos dependiendo de la aplicación que se le va a dar. De la misma manera, estos también pueden ser del tipo ultrasónicos, en el cual se usa un transductor de ultrasonido piezoeléctrico para generar vibraciones en el fluido causando una mezcla.

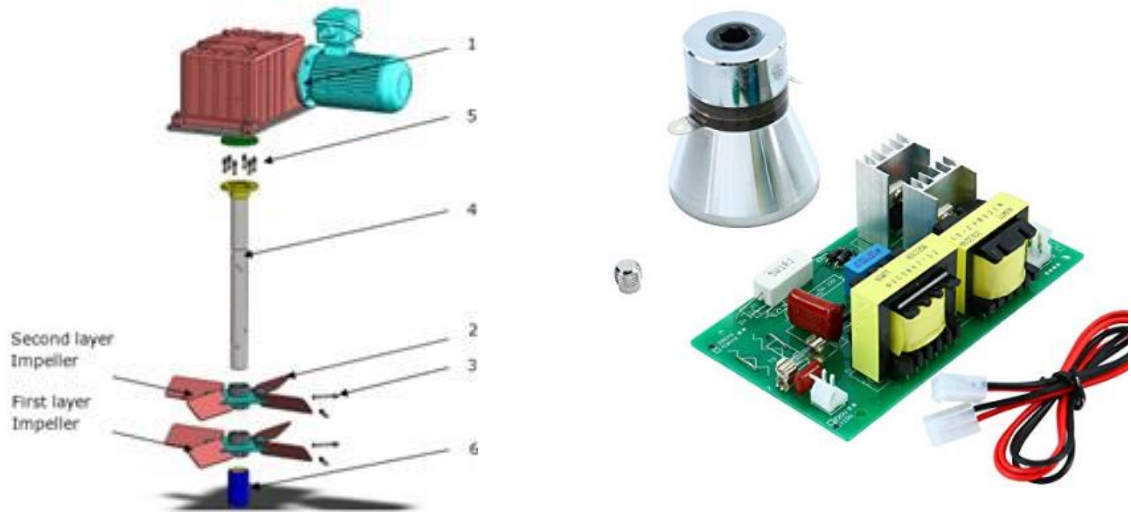


Figura 1.2. Ejemplos de agitadores y sus partes.
[Solids Control, 2012]

1.4.4 Reología de la mezcla aceite-cera

Un factor importante en el diseño del sistema de remoción es cómo variarán las propiedades de la mezcla a medida que se realicen remociones continuas de cera. Esto se debe a que se desearía el reúso del material de trabajo y un bajo consumo energético, reduciendo de esta manera contaminaciones al medio ambiente. Para analizar los cambios que pueden suceder durante el proceso es necesario analizar la reología de la mezcla, dado que al agregar cera al aceite se debe confirmar su solubilidad y viscosidad.

Dentro de la literatura, (Sarbojeet, 2016) demostró experimentalmente que para la cera de parafina, un aumento en la concentración de la mezcla hasta un 10% no aumenta significativamente los módulos elásticos ni viscosos, por lo que la viscosidad aparente no se ve tan afectada. Esto quiere decir que la mezcla puede estar 10% saturada en masa con cera y aún ser operable para el agitador. Además de esto, se demuestra experimentalmente el efecto que la temperatura tiene sobre la mezcla, donde la cera una vez derretida se vuelve miscible con los ésteres del aceite vegetal, causando una gran homogeneidad.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de diseño a seguir

La solución al problema planteado conlleva el diseño de un sistema de recirculación de fluido de trabajo, cuyo flujo se mantenga en contacto permanente con la pieza impresa en 3D a velocidades relativas constantes y removiendo el material de soporte por transferencia de calor.

Para iniciar el diseño de este proyecto, se realizó una inducción con el personal del laboratorio CAMPRO para comprender el uso del equipo, sus limitaciones espaciales y demás características esenciales para el proyecto. A partir de esta información y junto con información de la literatura, se pudo identificar la necesidad de utilizar matrices de decisión para definir el sistema óptimo de remoción, así como los componentes y características más convenientes para la solución. Estas limitaciones vinieron de la mano con los parámetros de diseño identificados.

La descripción de la metodología seguida para llegar a la solución final viene dada por la ilustración 2.1, la cual muestra un flujograma detallando los distintos métodos empleados para cada sección del diseño. Por otro lado, cada uno de estos puntos es descrito en las siguientes secciones.

Cabe recalcar que este flujograma describe una iteración del prototipo, esto quiere decir que el proceso seguido describe únicamente al prototipo actual, más no los posibles prototipos siguientes. Se menciona esto ya que existe un sinnúmero de posibilidades de diseño, por lo que un segundo prototipo el cual posea mejoras intrínsecas es inevitable.

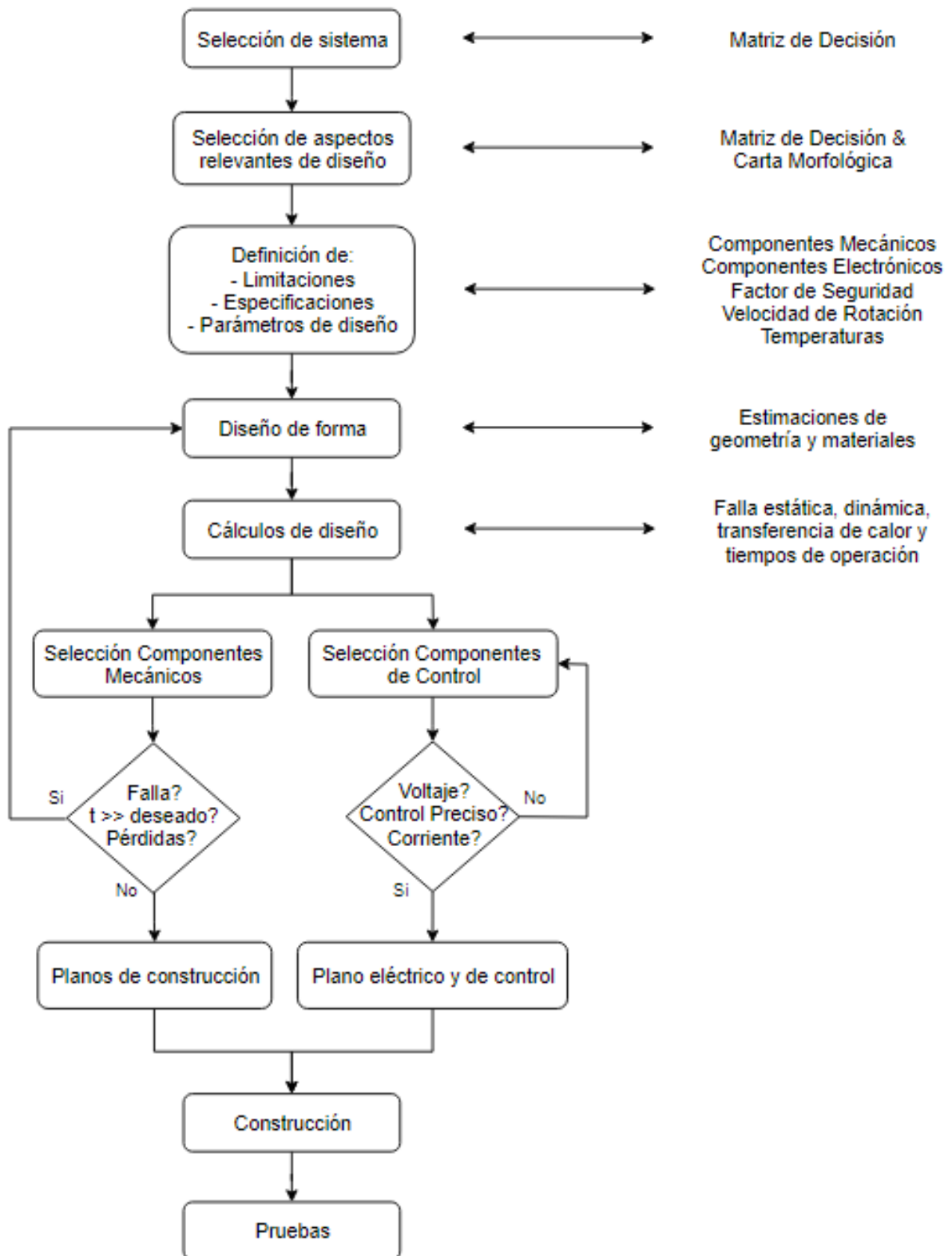


Figura 2.1. Metodología de diseño del prototipo [Elaboración Propia]

2.2 Selección de Sistema de Solución

2.2.1 Sistema de ducha por bombeo

La remoción del material de soporte se realiza por medio de la convección forzada producida por la caída del fluido sobre la pieza impresa. El fluido se calienta a la temperatura de 70°C, para luego ser bombeado mediante una bomba de engranes hacia una cabeza de ducha. En este punto, el fluido cae libremente sobre la pieza encerrada en un compartimento que permita su ingreso y salida. La parte inferior del compartimento permite el retorno del fluido al tanque de calentamiento conformando un sistema retroalimentado.

2.2.2 Sistema de agitación

Este sistema remueve el material de soporte por medio de convección forzada producida por el movimiento del fluido. La diferencia con el sistema anterior es que en este la pieza impresa se encuentra inmersa en el fluido, cuyo movimiento es producido por un agitador. A su vez, un calentador externo eleva la temperatura del fluido a la deseada.

2.2.3 Sistema de ultrasonido

Similar al sistema agitación, se remueve el material de soporte por medio de convección forzada producida por el movimiento del fluido. La diferencia se encuentra en que el movimiento del fluido es producido por una fuente de ultrasonido, el cual produce agitación al fluido y como consecuencia produce convección forzada a la pieza.

2.2.4 Matriz de decisión de la solución

Para determinar la alternativa más conveniente, se realizó una matriz de decisión usando el método de “Weighted Scoring Method”, el cual consta en medir ciertos parámetros de desempeño del diseño, evaluando y ponderando con valores. El valor más alto de la sumatoria de los valores para cada una de las alternativas corresponde al diseño seleccionado. La descripción detallada de este proceso puede ser encontrada en apéndice A.

Tabla 2.1. Matriz de decisión de alternativa de solución [Elaboración propia]

Característica	Ponderación [p]	Agitador		Bomba		Ultrasonido	
		Calificación [c]	c*p	Calificación [c]	c*p	Calificación [c]	c*p
Desempeño	0,30	10	3	10	3	10	3
Instalación sencilla	0,10	10	1	8	0,8	6	0,6
Seguridad	0,20	7	1,4	10	2	8	1,6
Alta Mantenibilidad	0,10	10	1	3	0,3	2	0,2
Bajo costo de producción	0,20	10	2	1	0,2	3	0,6
Bajo consumo energético	0,05	10	0,5	10	0,5	10	0,5
Accesibilidad a repuestos	0,05	10	0,5	10	0,5	10	0,5
Total	1,00	67,00	9,40	52,00	7,30	49,00	7,00

Se puede observar en la Tabla 2.1, que la alternativa seleccionada fue el sistema del agitador.


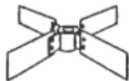
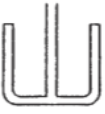












2.3 Selección de aspectos relevantes

Una vez seleccionado el sistema de agitación, se realizó una carta morfológica de los aspectos identificados más relevantes para el diseño de este sistema:

- Agitador
- Posición del agitador
- Suministro de calor
- Aislamiento
- Elemento de control






La carta morfológica se muestra en la tabla 2.2. Se puede observar que cada elemento tiene varias alternativas aplicables para nuestro diseño, pero se tiene que seleccionar lo más conveniente. Se realizaron varias matrices de decisión para cada uno de los elementos, con sus respectivos criterios de comparación y peso dependiendo de la función de cada una de ellas. Estas matrices pueden ser encontradas en apéndice A.

Tabla 2.2. Carta morfológica de elementos de la solución. [Elaboración propia]

Elemento	Opciones		
Agitador	Cuchilla estrecha 	Cuchillas rectas 	Ancla 
Posición de agitador	Superior 	Inferior 	Lateral 
Suministro de calor	Resistencia tipo hornilla 	Abrazadera 	Resistencia tipo varilla 
Aislamiento	Piralu 	Lana mineral de roca 	Termolón 
Control	Arduino 	PLC 	Raspberry 

Con la finalidad de mostrar los aspectos relevantes seleccionados, se muestra el resultado de las matrices de decisión de cada elemento en la tabla 2.3 a continuación.

Tabla 2.3. Aspectos seleccionados del sistema de agitación [Elaboración propia].

Elemento	Selección	Imagen Descriptiva
Agitador	Cuchilla inclinada	
Posición del agitador	Superior	
Suministro de calor	Resistencia tipo hornilla	
Aislamiento	Termolón	
Control	Arduino	

2.4 Limitaciones, Especificaciones y Parámetros de Diseño

Tal y como fue mencionado, se pudieron identificar limitaciones y especificaciones en base a los requerimientos del laboratorio. Para esto, las siguientes condiciones fueron establecidas como parámetros de diseño:

- Para el tanque:
 - Dimensiones máximas de pieza 150x100x100 mm
 - Diámetro debe albergar jaula, pieza, deflectores y agitador
 - Altura alberga eje, agitador y espacio de fuga para flujo axial
 - Debe incluir deflectores en su interior que promuevan la turbulencia
- Para el agitador:
 - Produce flujo axial y su geometría no requiere altas potencias
 - Manufactura sencilla
- Para el eje:

- Resistente a la corrosión
- Factor de seguridad de 3
- Se necesita un acople para unir los componentes
- Para la estructura:
 - Estéticamente atractiva
 - Alta rigidez y estabilidad para reducir o evitar vibraciones
 - Fácil manufactura, ensamble y alta mantenibilidad
 - Factor de seguridad mínimo de 1.5
- Para el motor:
 - Control sencillo
 - Se asume eficiencia de motor y caja 0.8 cada uno
 - Alta relación calidad-precio
- Para la resistencia:
 - Amplia área de contacto para promover transferencia de calor
 - Alta relación calidad-precio
 - Alta potencia para reducir tiempos de calentamiento
- Condiciones de operación:
 - Temperatura de fluido máxima 70°C
 - Temperatura ambiente 20°C
 - Temperatura máxima de contacto con aislamiento 40°C
 - Pérdidas menores al 7% del suministro de calor
 - Factor de seguridad de pérdidas 1.5
 - Velocidad de rotación 300 rpm
 - Propiedades del aceite y la cera son tomadas de la peor condición de temperatura
 - Propiedades de otros materiales se consideran constantes con respecto a la temperatura

2.5 Diseño de Forma General

En la ilustración 2.2 se puede apreciar el diagrama de forma del prototipo y seguido en la ilustración 2.3, se puede apreciar con detalle cada componente del equipo. Cada parte presentada será analizada en la siguiente sección.

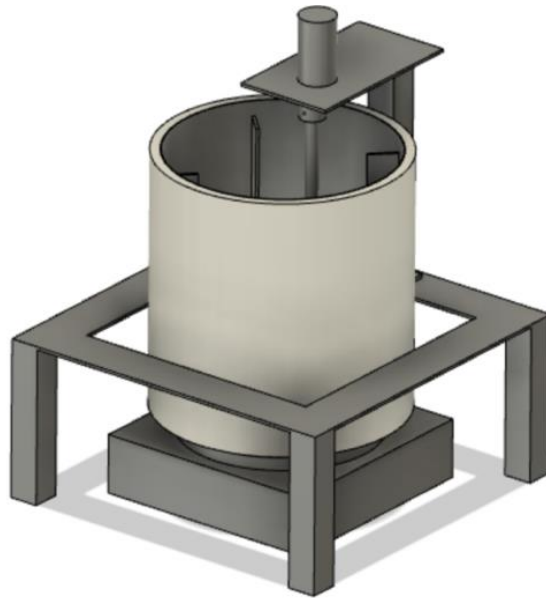


Figura 2.2. Diseño de forma completo. [Elaboración Propia]

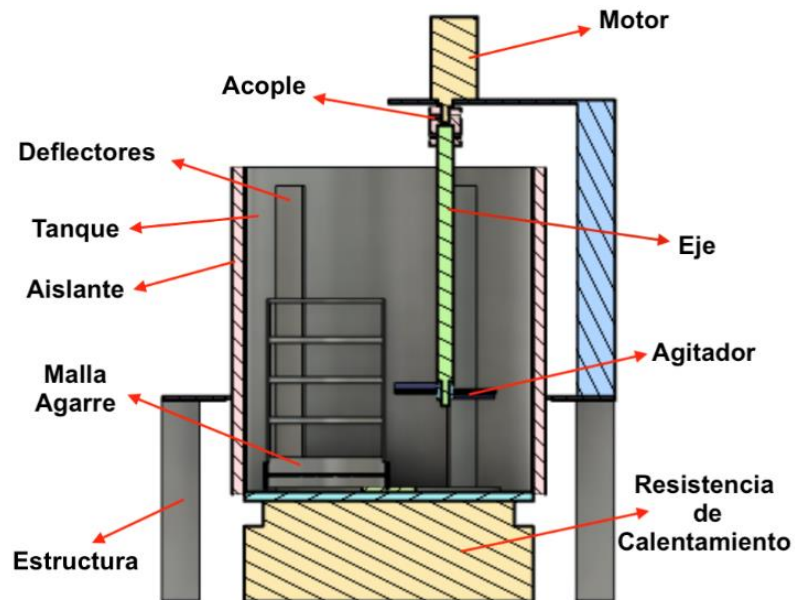


Figura 2.3. Vista en corte de prototipo y sus componentes. [Elaboración Propia]

2.6 Cálculos de Diseño

2.6.1 Tanque, deflectores y agitador

Debido a que se seleccionó aceite vegetal como el fluido de trabajo, se utilizó la norma ASME Vol. 1 con la finalidad de establecer el material del

tanque. Esta norma hace referencia a los materiales empleados al trabajar con fluidos corrosivos en los procesos alimenticios, donde el aceite vegetal entra en esta categoría. La norma sugiere que los materiales más eficaces para el tanque son:

- Acero AISI 316 (acero inoxidable)
- Acero AISI 304 (acero inoxidable)

Ya que ambos pueden ser fácilmente obtenidos, se seleccionó aquel que sea más económicamente asequible, siendo este por lo general el acero AISI 304. En base a las limitaciones dimensionales previamente mencionadas, un diámetro de 230mm, el cual es un diámetro estándar de ollas de acero inoxidable, es la alternativa más atractiva para la selección. Parametrizando la geometría del tanque se tiene la ilustración 2.4.

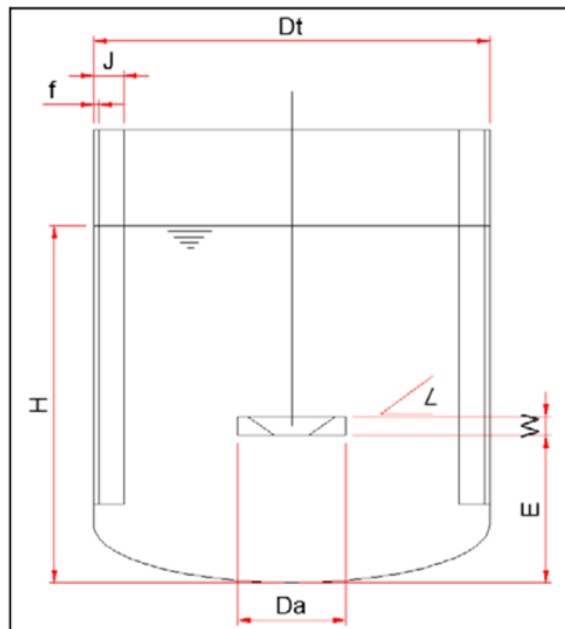


Figura 2.4. Nomenclatura de dimensiones de tanque y agitador
[Kayode Coker, 2001]

El diseño de los deflectores y el agitador vienen de la mano con el tanque. Esto viene dado en el diseño de mezcladores, donde (Kayode Coker, 2001) sugiere relaciones dimensionales entre la geometría del tanque, el agitador y los deflectores, como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Relaciones de las dimensiones del tanque, agitador y deflectores
[Kayode Coker, 2001]

Para agitador tipo placas inclinadas	
H/Dt	1
Da/Dt	1/3
E/Dt	1/3
W/Da	1/6
J/Dt	1/10
Ángulo	45°
Excentricidad/Da	0,57

Estas relaciones dimensionales llevan a la geometría descrita por la tabla 2.5. Se agrega también un factor de excentricidad, el cual se incluye debido a que el agitador no debe colocarse en el centro, así permitiendo el ingreso de la jaula con la pieza.

Tabla 2.5. Geometría de tanque, deflectores y agitador [Elaboración Propia]

Parámetro	Nomenclatura	Valor [mm]
Diámetro de tanque	Dt	230
Alto de tanque	H	230
Diámetro de agitador	Da	77
Distancia entre base y agitador	E	77
Alto de agitador	w	13
Ancho de deflectores	J	23
Separación de deflectores al tanque	f	4,6
Excentricidad del eje	ε	45

Finalmente, empleando la norma API 650, la cual hace referencia al diseño de tanques de almacenamiento de petróleo, se usó el método “1 Pie” para determinar el espesor del tanque. Se utilizaron las ecuaciones 2.1 y 2.2 además de los datos proporcionados por las tablas 2.5 y 2.6 para el cálculo del espesor. Los esfuerzos permisibles presentados también fueron obtenidos de la norma.

$$t_d = \frac{0.0005 * D(30.48 - H) * G}{S_d} + C \quad (2.1)$$

$$t_t = \frac{0.0005 * D(30.48 - H) * G}{S_t} + C \quad (2.2)$$

Donde:

t_d = espesor de diseño [mm]

t_t = espesor de prueba hidrostática [mm]

S_d = esfuerzo permisible por condiciones de diseño [kg/cm²]

S_t = esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática [kg/cm²]

D = diámetro nominal del tanque [cm]

H = nivel del líquido en diseño [cm]

G = gravedad específica del líquido [-]

C = tolerancia de corrosión [mm]

Nota: Para este caso en específico, el espesor depende en su mayoría de la tolerancia de corrosión debido a las pequeñas dimensiones. Se agrega esta ecuación a los cálculos ya que es posible requerir escalar las dimensiones.

Tabla 2.6. Esfuerzos permisibles del acero AISI 304 [API 650]

Material	Esfuerzo de diseño (S_d)	Esfuerzo prueba hidrostática (S_t)
AISI 304	1410 [kg/cm ²]	1580 [kg/cm ²]

2.6.2 Motor

La selección del motor depende de la cantidad de fluido que se requiere mover y de la potencia necesaria para hacerlo. Para ello (Paul, Atiemo-obeng, & Kresta, 2003) introducen el uso del número de caudal y número de potencia en su "Handbook of Industrial Mixing". Ambos dependen del número de Reynolds para diferentes tipos de agitadores con sus respectivas dimensiones, y así una vez calculado el número de Reynolds, se puede obtener el número de bombeo usando la ilustración 2.5 y el

número de potencia usando la ilustración 2.6. La ecuación para determinar el número de Reynolds es la ecuación 2.3.

$$N_{Re} = \frac{ND^2}{\nu} \quad (2.3)$$

Donde:

N_{Re} = número de Reynolds [-]

N = velocidad de rotación del agitador [rps]

D = Diámetro del agitador [m]

ν = viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

Utilizando los datos obtenidos en la sección anterior de diámetro del agitador y usando una velocidad de rotación de 300 RPM, se emplea la ecuación 2.3 para el cálculo del número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{ND^2}{\nu} = \frac{\left(300 \frac{rev}{min} \times \frac{min}{60 seg}\right) (0.077 m)^2}{7.38 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 401.7$$

Nota: Se nota que este resultado por sí sólo no implica un flujo turbulento al estar en el rango de flujo laminar. Es por esto que el uso de los deflectores en este flujo es esencial, ya que estos generan la turbulencia sin requerir velocidades altas.

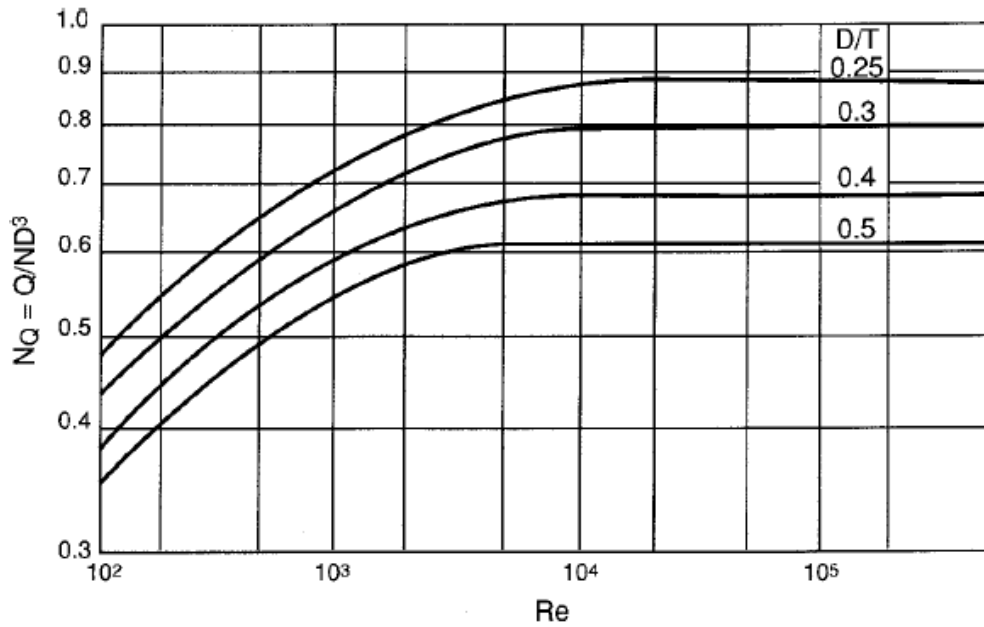


Figura 2.5. Número de potencia en función del número de Reynolds para diferentes relaciones D/T [Paul et al., 2003]

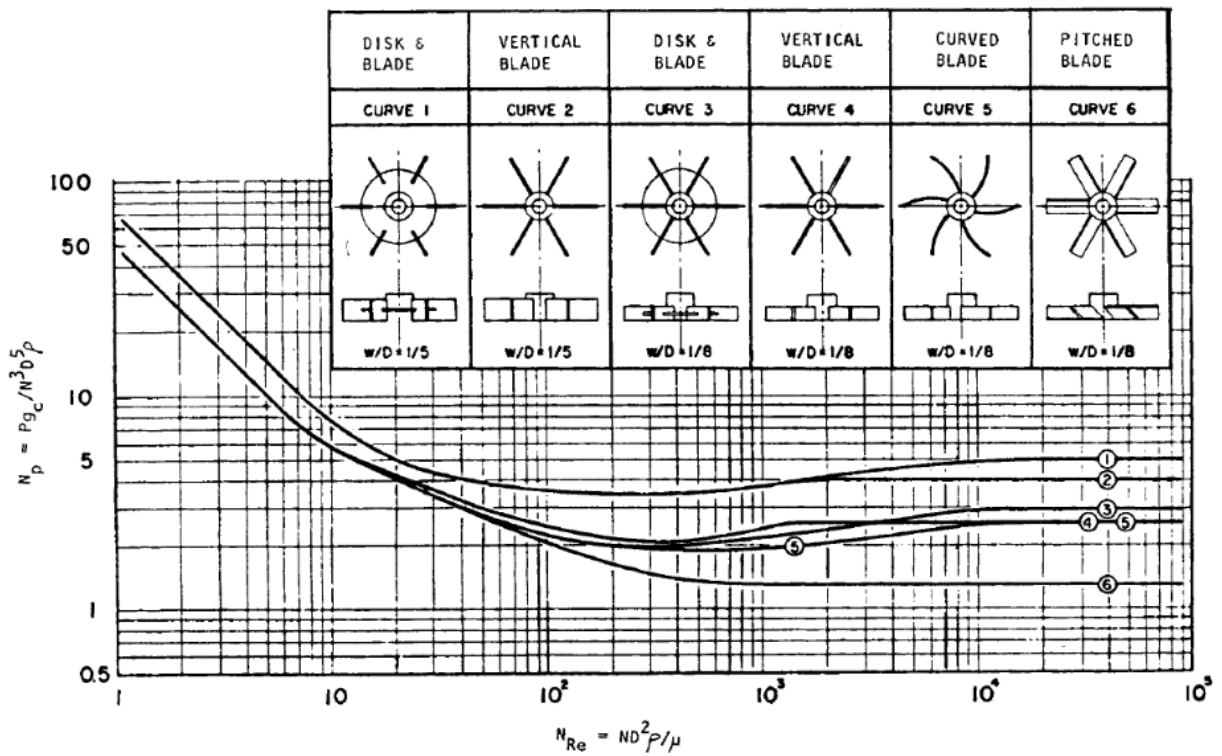


Figura 2.6. Número de potencia en función del número de Reynolds para diferentes tipos de turbinas [Paul et al., 2003].

A partir del número de bombeo, se obtiene el caudal requerido mediante la ecuación 2.4 descrita en la ilustración 2.5.

$$Q = N_Q N D^3 \quad (2.4)$$

Donde:

Q = caudal de fluido [m³/s]

N_Q = número de bombeo [-]

N = velocidad del agitador [rps]

D = diámetro del agitador [m]

El número de bombeo es de 0.72, por lo que el caudal es:

$$Q = N_Q N D^3 = 0.67 \left(300 \frac{rev}{min} \times \frac{min}{60 seg} \right) (0.077 m)^3 = 0.002 [m^3/s] = 31.47 [gpm]$$

Seguido, a partir del número de potencia, se obtiene la potencia requerida usando la ecuación 2.5 descrita en la ilustración 2.6.

$$P = N_p \rho N^3 D^5 \quad (2.5)$$

Donde:

P = potencia requerida [W]

N_p = número de potencia [-]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

N = velocidad del agitador [rps]

D = diámetro del agitador [m]

Como se seleccionó el agitador tipo cuchillas inclinadas, se usó la curva número 6 en la Ilustración 2.6. Con un número de Reynolds de 401, se tiene aproximadamente 1.6 de numero de potencia.

$$P = N_p D^5 N^3 \rho = (1.6)(0.077m)^5 \left(\frac{300 rev}{60 seg} \right)^3 \left(925 \frac{kg}{m^3} \right) = 0.5 [W]$$

Como se conoce que la potencia calculada es la potencia ideal y se sabe que dentro de los sistemas hay perdidas, se consideran las eficiencias del motor y la reducción de 0.8 cada una. Entonces calculando la potencia real requerida, se tiene lo siguiente:

$$P_R = \frac{P}{\eta_{motor}\eta_{transmision}} = \frac{0.5}{0.8^2} = 0.78 [W]$$

2.6.3 Estructura de soporte

La estructura de soporte cumple la función de almacenar todos los componentes del sistema, así como de soportar el motor del agitador. Esto conllevó a diseñar la estructura en 2 componentes; el primero es la base de cobertura, la cual soporta la resistencia y el tanque lleno de aceite; el segundo es la columna y base superior, los cuales soportan el motor en la parte superior. La ilustración 2.7 muestra ambos componentes de la estructura.

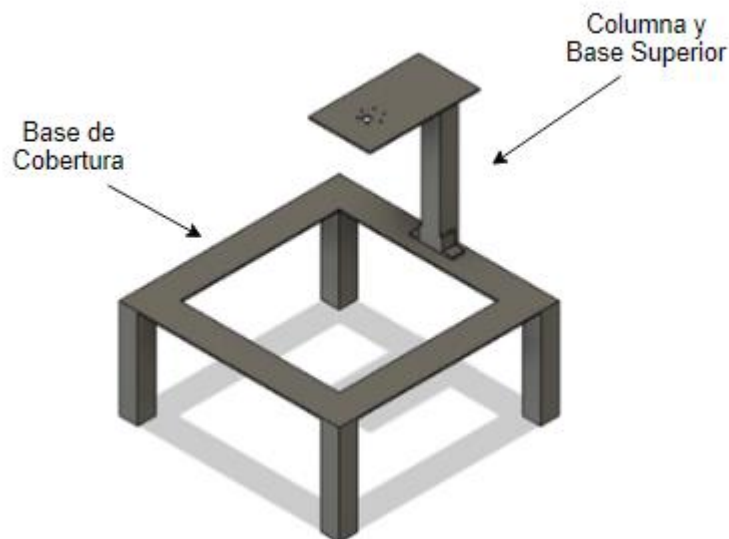


Figura 2.7. Diseños de forma de estructura [Elaboración Propia]

Por efecto de mantenibilidad, la columna fue diseñada como removible, por lo que pernos son usados para sostenerla. Esto quiere decir que la carga crítica es la soportada por los pernos al soportar el momento causado por la columna y todos los componentes unidos a ella. Por otro lado, ya que se requería que todo el equipo se mueva en conjunto, una base de soporte se soldó a la parte inferior de la estructura.

2.6.4 Eje principal

Se consideró un eje con un cambio de sección y con una longitud roscada para ajustar y apretar el agitador con una rosca, como se puede observar en la ilustración 2.8.



Figura 2.8. Diseño de forma de eje principal [Elaboración propia]

Al analizar las fuerzas involucradas en el proceso, se observa que la fuerza más significativa es la fuerza de arrastre producido por el movimiento de los alabes del agitador en el fluido. Esto, a su vez, produce un esfuerzo de torsión en el eje. Teniendo en cuenta la potencia requerida para mover el fluido, calculado anteriormente en la selección del motor, se calculó el torque soportado por el eje utilizando la ecuación 2.8, proporcionada por (Paul et al., 2003).

$$T = \frac{N_p \rho N^3 D^5}{2\pi} \quad (2.8)$$

Donde:

T = torque sometido [Nm]

N_p = número de potencia [-]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

N = velocidad del agitador [rps]

D = diámetro del agitador [m]

$$T = \frac{N_p \rho N^3 D^5}{2\pi} = \frac{0.5}{2\pi} = 0.08 \text{ [Nm]}$$

Una vez obtenido el torque, se obtuvo el diámetro requerido empleando un factor de seguridad $N_f = 3$ y usando la ecuación general de Goodman (Norton, 2009), que se muestra a continuación:

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs} T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

Debido a que solo se encuentran esfuerzos medios, la ecuación cambia como se ve a continuación.

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

Donde:

d = diámetro del eje [m]

N_f = factor de seguridad [-]

$k_f, k_{fs}, k_{fm}, k_{fsm}$ = concentradores de esfuerzo en fatiga [-]

M_a, M_m = momento alternante y medio en fatiga respectivamente [Nm]

T_a, T_m = torque alternante y medio en fatiga respectivamente [Nm]

S_f = esfuerzo de fluencia del material corregido a fatiga [Pa]

S_{ut} = esfuerzo límite de ruptura del material [Pa]

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{32(3)}{\pi} \left[\frac{\sqrt{\frac{3}{4}(2(0.08))^2}}{430 \times 10^6} \right] \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.00214 [m] = 2.14 [mm]$$

Como parte del diseño se debe siempre verificar que la velocidad de rotación del motor no entre en resonancia con la frecuencia natural del eje y del agitador. La ilustración 2.9 muestra el conjunto y en la tabla 2.7 los modos de resonancia.

Tabla 2.7. Resultados de la simulación [Elaboración Propia]

Modo	Hz	RPM
1 a 5	0	0
6	0,00015	0,009
7	0,02931	1,7586
8	0,041	2,46

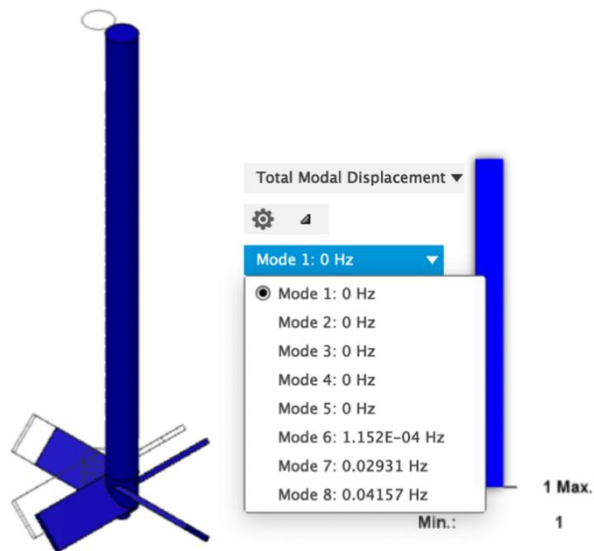


Figura 2.9. Simulación de frecuencia natural del sistema eje agitador [Elaboración propia]

2.6.5 Pérdidas y tiempo de remoción

2.6.5.1 Pérdidas en las paredes del recipiente

Para la selección del suministro del sistema de calentamiento y la determinación de los tiempos involucrados, es necesario conocer las pérdidas existentes en el sistema. El calor de salida debe ser < 7% del calor de entrada, esto es:

$$q_{out} < 0.07 * q_{in}$$

- El calor de entrada total es la suma del calor suministrado y el trabajo del agitador, en otras palabras:

$$q_{in} = q_{resistencia} + W_{impeller}$$

- Se toma un factor de seguridad de N = 1.5

Debido a que las propiedades del aceite, junto con la mezcla de cera varían de acuerdo con la temperatura a la que se encuentren, se estableció como consideración de diseño que el agitador moverá el aceite precalentado. Debido a esto, se toman las propiedades del aceite a 70°C, mientras que las de los otros materiales pueden ser establecidas como las mostradas en la tabla 2.8 al no variar significativamente con la temperatura.

Tabla 2.8. Propiedades de materiales involucrados en el equipo [Elaboración Propia]

Material	Conductividad Térmica K (W/m °K)	Viscosidad Cinemática ν (m ² /s)	Capacidad Calorífica c_p (W/kg °K)
Aceite @70°C	0.163	1.366×10^{-5}	2.314
Acero Inoxidable	58	-	-
Aislamiento	0.03	-	-

La transferencia de calor por las paredes puede ser hallada como el flujo lineal a través de una tubería. De esta manera, se establecieron las distintas resistencias térmicas debido a los materiales como se muestra en la tabla 2.9. Además, en esta tabla se definen geometrías que ayudaron en los cálculos.

Tabla 2.9. Ecuaciones de Transferencia de Calor [Elaboración Propia]

Resistencias Térmicas	Geometrías Definidas	Parámetros Térmicos
$R_{ac} = \frac{1}{h_{ac} 2p r_{ac} L}$ (2.9)	$A_1 = \pi D_T L$ (2.12)	$T_{\infty, ac} = 70^\circ C$
$R_{ai} = \frac{\ln(r_{ai}/r_{ac})}{2p k_{ai} L}$ (2.10)	$r_{ai} = r_{ac} + e_{ai}$ (2.13)	$T_{s, th} = 40^\circ C$
$R_{th} = \frac{\ln(r_{th}/r_{ai})}{2p k_{th} L}$ (2.11)	$r_{th} = r_{ai} + e_{th}$ (2.14)	-

Donde:

R_i = Resistencia térmica del material i

r_i = radio de material i

e_i = espesor de material i

k_i = conductividad térmica de material i

h_{ac} = coeficiente convectivo del aceite

$T_{\infty,ac}$ = temperatura libre de aceite

$T_{s,th}$ = temperatura superficial externa de Termolón

*sub-indices i (*ac: aceite, ai: acero inoxidable, th: thermolon, T: tanque*)

Para hallar el coeficiente convectivo h_{ac} , se consideró nuevamente al tanque como una tubería de flujo constante. Ya que el número de Reynolds depende de la viscosidad cinemática del fluido, se tomó la temperatura que cause la menor viscosidad cinemática. Esta temperatura se muestra en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Viscosidad cinemática de distintos aceites vegetales a distintas temperaturas [Rojas et al., 2013]

Temperatura °C	Viscosidad Cinemática [m ² /s]				
	Algodón	Canola	Girasol	Maíz	Soya
20	5.638E-05	1.021E-04	6.953E-05	7.504E-05	6.567E-05
30	3.614E-05	6.673E-05	4.546E-05	4.925E-05	4.400E-05
40	2.370E-05	4.444E-05	3.140E-05	3.206E-05	3.065E-05
50	1.721E-05	3.195E-05	2.333E-05	2.283E-05	2.260E-05
60	1.286E-05	2.305E-05	1.742E-05	1.755E-05	1.654E-05
70	9.881E-06	1.723E-05	1.366E-05	1.336E-05	1.268E-05

Seguido, se utilizaron las ecuaciones proporcionadas por (Benz, 2017):

$$N_{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2.15)$$

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \quad (2.16)$$

$$N_{Nu} = K(N_{Pr})^{1/3}(N_{Re})^{1/3} \quad (2.17)$$

$$h = \frac{N_{Nu}k}{T} \quad (2.18)$$

Donde:

N_{Pr} = Número de Prandtl [-]

N_{Re} = Número de Reynolds [-]

N_{Nu} = Número de Nusselt [-]

C_p = Capacidad calorífica del aceite @70°C [J/kg°K]

μ = Viscosidad dinámica del aceite @70°C [Pa.s]

k = conductividad térmica del aceite @70°C [W/m°K]

ρ = densidad del aceite @70°C [kg/m³]

D = Diámetro del tanque [m]

N = Velocidad de rotación del agitador [rps]

T = Diámetro del tanque [m]

K = constante de agitador (para el caso del seleccionado, toma el valor de 1)

h = coeficiente convectivo del aceite @70°C [W/m²°K]

$$N_{Pr} = \frac{C_p\mu}{k} = \frac{2.31(12.18 \times 10^{-3})}{0.16} = 156.66 [-]$$

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu} = \frac{(0.08)^2 (5) (917.69)}{12.18 \times 10^{-3}} = 2724.85 [-]$$

$$N_{Nu} = K(N_{Pr})^{1/3}(N_{Re})^{1/3} = 1(156.66)^{1/3}(2724.85)^{1/3} = 74.46 [-]$$

$$h = \frac{N_{Nu}k}{T} = \frac{74.66(0.16)}{(0.23)} = 53.84 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$$

Nota: Todas las propiedades anteriormente descritas fueron obtenidas de (Rojas et al., 2013). Para efecto de cálculos se tomó el promedio de los valores a 70°C de los distintos tipos de aceite vegetales.

Se define el coeficiente universal de transferencia de calor como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ac}} + \frac{r_{ac}}{k_{ai}} \ln\left(\frac{r_{ai}}{r_{ac}}\right) + \frac{r_{ac}}{k_{th}} \ln\left(\frac{r_{th}}{r_{ai}}\right)} \quad (2.19)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{53.84} + \frac{0.115}{16.3} \ln\left(\frac{0.116}{0.115}\right) + \frac{0.115}{0.03} \ln\left(\frac{0.126}{0.116}\right)} = 2.98 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$$

Y finalmente se pueden definir las pérdidas como:

$$q_{out} = N UA_1 \Delta T = UA_1 (T_{\infty,ac} - T_{s,th}) \quad (2.20)$$

$$q_{out} = NUA_1 (T_{\infty,ac} - T_{s,th}) = 1.5(2.98)(0.144)(70 - 20) = 35.927 [W]$$

Es importante notar que este calor depende íntegramente de las propiedades del aislamiento, es por ende que se analizaron varios materiales a distintos espesores para llegar a la selección final. Fue necesario también considerar el calor requerido para calentar tanto la pieza como la cera de la pieza a removerse. Las ecuaciones son descritas como:

$$q_{cera,pieza} = \frac{mC_p \Delta T}{t} \quad (2.21)$$

Donde:

$q_{cera,pieza}$ = pérdidas en la pieza y la cera al momento de calentarse [W]

m = masa del componente correspondiente [kg]

C_p = capacidad calorífica del material [J/kg $^\circ$ K]

ΔT = variación de temperatura del componente [$^\circ$ C o $^\circ$ K]

t = tiempo de calentamiento [s]

$$q_{cera} = mc_{p,cera} \Delta T = 0.05(3250)(50) = 7.519 [W]$$

$$q_{pieza} = mc_{p,pieza} \Delta T = 0.066(2900)(50) = 8.907 [W]$$

2.6.5.2 Tiempo de remoción

El tiempo de calentamiento del aceite puede ser hallado realizando un análisis de energía de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} &= \frac{dU}{dt} \\ \dot{Q} + \dot{W} &= \frac{dU}{dt} \\ \dot{Q} + \dot{W} &= \frac{mC_p dT}{dt} \end{aligned}$$

Donde se puede considerar al calor de entrada como:

$$\dot{Q} = UAT$$

De esta manera:

$$\begin{aligned} UAT + \dot{W} &= \frac{mC_p dT}{dt} \\ \frac{UA}{mC_p} T + \frac{\dot{W}}{mC_p} &= \frac{dT}{dt} \\ \frac{UA}{mC_p} \left(T + \frac{\dot{W}}{UA} \right) &= \frac{dT}{dt} \end{aligned}$$

Asumiendo U y \dot{W} como constantes:

$$\begin{aligned} \frac{UA}{mC_p} \int_0^t dt &= \int_{T_0}^T \frac{dT}{\left(T + \frac{\dot{W}}{UA} \right)} \\ \frac{UA}{mC_p} t &= \ln \left(\frac{T + \frac{\dot{W}}{UA}}{T_0 + \frac{\dot{W}}{UA}} \right) \end{aligned}$$

Finalmente, de esta manera se obtiene el tiempo de calentamiento

$$t = \frac{mC_p}{UA} \ln \left(\frac{T + \frac{\dot{W}}{UA}}{T_0 + \frac{\dot{W}}{UA}} \right) \quad (2.22)$$

Donde:

t = tiempo de calentamiento [s]

m = masa del aceite en el recipiente [kg]

C_p = capacidad calorífica del aceite [J/kg°K]

U = coeficiente universal de transferencia de calor [W/m²°K]

A = área de contacto entre resistencia y tanque [m²]

\dot{W} = potencia mecánica ejercida por el agitador [W]

T_0 = temperatura inicial o temperatura ambiente (20°C)

T = temperatura final de calentamiento (70°C)

Esta ecuación depende íntegramente del área de contacto y del coeficiente universal de transferencia de calor. El área de contacto viene definida por la geometría de la resistencia, pero el coeficiente universal puede ser obtenido mediante la tabla 2.10. proporcionada por (Nagata, 1975).

Tabla 2.11. Coeficientes universales de transferencia de calor [Elaboración Propia]

Fluido de Proceso	Coeficiente de Diseño [W/m ² °K]	
	Suave o no Agitación	Buena Agitación
Aceite Vegetal	300-488	455-795

Se puede tomar un promedio en suave agitación como $U = 385$ [W/m²°K]

$$t = \frac{mC_p}{UA} \ln \left(\frac{T + \frac{\dot{W}}{UA}}{T_0 + \frac{\dot{W}}{UA}} \right) = \frac{7.68(2.31)}{385(0.007)} \ln \left(\frac{70 + \frac{0.82}{385(0.007)}}{20 + \frac{0.82}{385(0.007)}} \right) = 1080.53 [s]$$
$$= 18.01 [min]$$

2.7 Selección de componentes

2.7.1 Componentes Mecánicos

2.7.1.1 Tanque

Considerando el mercado de ollas de acero inoxidable, se realizó la compra de una olla de SS304, con un diámetro interno de 230mm, un alto de 265mm y espesor de 1mm como reemplazo del tanque diseñado previamente.

2.7.1.2 Estructura

Para la estructura, se consideró usar tubos cuadrados debido a su bajo costo y conveniente momento de inercia. Las dimensiones de los tubos se escogieron en base a lo disponible en el mercado actual, precio y proveedores. Esto finalmente, llevó a la selección del perfil cuadrado de 30x30x2 mm de acero estructural A36. Luego, asegurando la sujeción correcta, se usó soldadura 6013 para unir una plancha de acero en la parte inferior de la base de la estructura. Para efecto de estética, 4 planchas de acero fueron empernadas a los lados de la base para asegurar un equipo compacto.

2.7.1.3 Accesorios

En base al cálculo realizado del torque soportado por el eje, se puede seleccionar un acople flexible ranurado de aluminio para ejes de motores. Este acople es fácilmente encontrado en el mercado y el modelo seleccionado (similar al AFP1218 de DISAI) soporta un torque máximo de 0.25 Nm, lo cual brinda un factor de seguridad de 4.

Finalmente, en base al cálculo de las pérdidas, se nota que se seleccionó Termolón como el aislamiento preferido para limitar las pérdidas, así como el espesor de 10mm, el cual es estándar y de costo relativamente bajo.

2.7.2 Componentes eléctricos y de control

2.7.2.1 Motor

Teniendo en cuenta los motores que se encuentran en el mercado, y considerando que es un motor de baja potencia, se seleccionó un motor DC de 12V con un reductor a 300 RPM. Debido a que se ofrecen motores con torque y potencia establecida, el motor seleccionado tiene un torque de 0.5 Nm y una potencia de 16W, el cual supera fácilmente la potencia y torque necesarios.

2.7.2.2 Resistencias de calentamiento

Una vez conocidas las pérdidas se seleccionó el método de transferencia de calor más rentable, eficiente y fácil de controlar. Este sistema fue el de una resistencia eléctrica de contacto, proveniente de una hornilla eléctrica comercial. La potencia establecida es de 1000W a 110V por lo que se cumplió la condición de pérdidas previamente mencionada. Esta se colocó debajo de la olla, así generando calor y elevando la temperatura del aceite.

2.7.2.3 Controlador

Mediante la matriz de decisión del capítulo 2 se seleccionó el Arduino UNO para realizar el control de temperatura y control del motor eléctrico. Debido a esta selección, los sensores y módulos a usarse debieron ser compatibles con esta placa. Estos sensores son fácilmente obtenibles en el mercado local y cumplen con el bajo costo necesario para el proyecto.

2.7.2.4 Sensor de temperatura

Se seleccionó el sensor DS18B20 compatible con la placa Arduino UNO. Este sensor es de bajo costo, fácil de instalar y posee una precisión y sensibilidad satisfactoria para el control de temperatura.

2.7.2.5 Relevador

Para poder controlar el suministro de temperatura, se requirió de un relevador que va a encender y apagar la resistencia. Se usó un módulo relevador SRD-05VDC-SL-C, compatible con la placa, el cual resiste la corriente que pasa por las resistencias. En nuestro caso se trata de una resistencia de 1000W a 110V. Esto implica una corriente de 9.08A.

2.7.2.6 Controlador para el motor

Se necesitó también de un controlador de velocidad del motor DC, para realizar el prendido y apagado de la misma. Se usó el módulo Puente H L298n de 3A, el cual controla la velocidad del motor usando PWM.

2.8 Control y código

El control general del equipo fue realizado mediante un código programado en la placa Arduino. Su función, es la de encender el movimiento del motor junto con el paso de corriente por la resistencia. Para el motor, esto se realiza mediante una señal PWM al módulo controlador mientras el módulo está energizado a fase (en nuestro caso, se utilizó un transformador de 9V proveniente de una router wifi). En el caso de la resistencia, una señal digital es enviada al relevador permitiendo el paso de corriente a través de la resistencia mientras esta esté conectada a fase (en este caso, se realizaron conexiones directas a un enchufe de pared con el cableado indicado). Finalmente, para automatizar el uso general, todas las conexiones a fase fueron agrupadas y conectadas en paralelo a un interruptor que energiza directamente mediante un cable al toma corriente del laboratorio.

Para controlar la temperatura, el código lee continuamente las lecturas del sensor DS18B20, elimina ruidos en estas y verifica continuamente la permanencia de la temperatura en el rango de 58°C a 64°C. Debido a la inercia térmica inherente del aceite, el relevador es abierto una vez que la temperatura alcanza los 58°C apagando así la hornilla eléctrica. Luego, el sistema se permite elevar la temperatura a 64°C y cuando esta desciende a

56°C nuevamente, el relevador es cerrado y la resistencia provee calor nuevamente. En la ilustración 2.10, se muestran las conexiones seguidas para el control total del prototipo. La hornilla eléctrica es representada por el foco en esta ilustración.

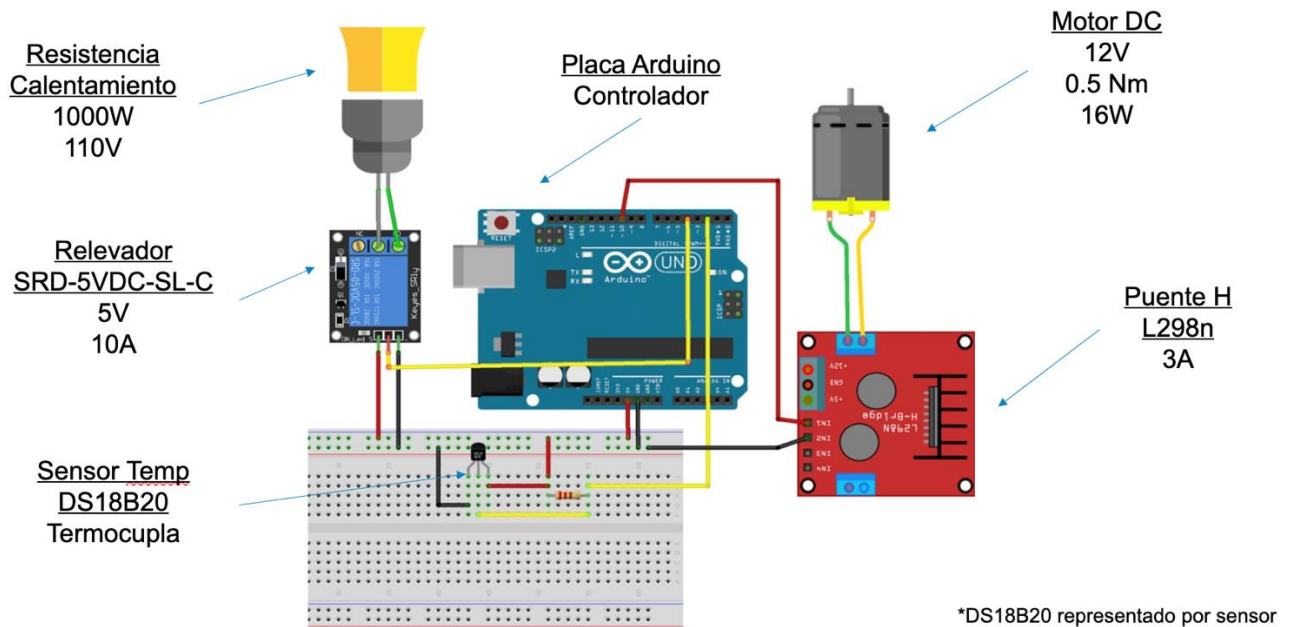


Figura 2.10. Conexión de control con sus componentes respectivos [Elaboración propia]

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Construcción

3.1.1 Planos

Los planos de los elementos del prototipo se encuentran en el Apéndice C. En estos se aprecia la vista en explosión de los componentes, el listado de partes y los planos de construcción de la estructura. El ensamble del prototipo es sencillo siguiendo los planos mostrados.

3.1.2 Proceso de construcción

Previo a la construcción del prototipo, se realizaron las compras necesarias de materiales, herramientas, elementos mecánicos, eléctricos y de control, como se puede ver en la Ilustración 3.1.



Figura 3.1. Compras de materiales. De izquierda a derecha, caneca de aceite para freír y motor DC 12V [Elaboración Propia]

Una vez comprados los materiales, se soldaron los tubos para formar la estructura y se construyeron los deflectores como se muestra en la Ilustración 3.2.



Figura 3.2. Fabricación de estructura y deflectores [Elaboración Propia]

Paralelo a la construcción de la estructura, se realizó el análisis de conexiones y elementos de control necesarios para el control de la temperatura y velocidad del motor. Se realizaron las conexiones debidas y se escribió el código para el control completo del sistema. En la Ilustración 3.3 se muestran imágenes del proceso inicial de pruebas de control del sistema.

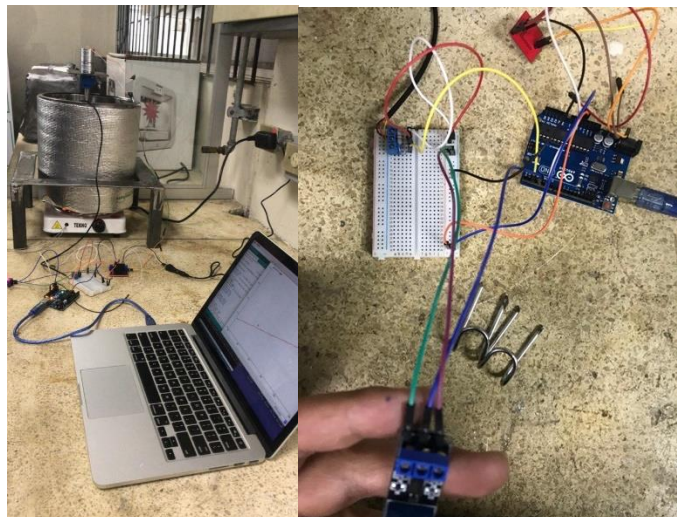


Figura 3.3. Conexiones y pruebas de sistema de control [Elaboración Propia]

Una vez terminada la estructura, se realizaron agujeros en la placa base superior para el ensamblaje del motor eléctrico, acople, eje y agitador. A su vez, la olla fue recubierta con Termolón en toda su periferia mediante el uso de cemento de contacto para asegurar una eficaz adherencia.

Ensamblado todo, se realizaron adiciones de estética al sistema, como, por ejemplo, una caja metálica para elementos de control y la adición de platinas rectangulares para recubrimiento de la parte inferior de la estructura, como se muestran en la ilustración 3.4. Finalmente, se terminó el prototipo final como se muestra en la ilustración 3.5.

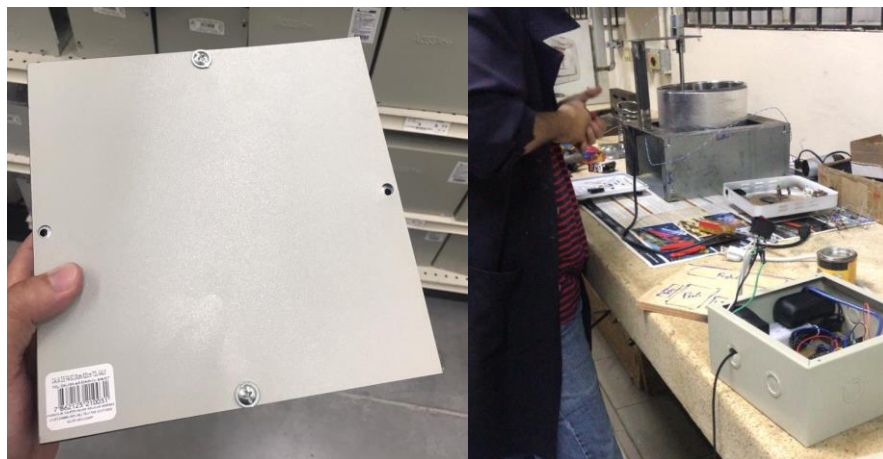


Figura 3.4. Mejora en parte estética del prototipo [Elaboración Propia]



Figura 3.5. Prototipo ensamblado [Elaboración Propia]

3.2 Pruebas y Análisis de resultados

Se realizaron impresiones para realizar pruebas y comparaciones de los métodos de remoción empleados por el laboratorio:

- Situación Previa: Convección forzada con aire caliente, usando una secadora.
- Situación Actual: Convección forzada con aceite caliente, usando el prototipo construido.

Los criterios con los que se compararon fueron los siguientes:

1. Tiempos de remoción
2. Acabado

3.2.1 Tiempos de remoción

Se realizó el procedimiento como se muestra a continuación:

1. Se imprimieron dos piezas idénticas de varias geometrías manufacturada por el equipo Projet 3510 SD.
2. Se tomaron tiempos de:
 - a. Remoción de cera con el uso de la secadora.
 - b. Remoción de cera con el prototipo.
3. Se realizó la comparación de tiempos de remoción.

La tabla 3.1 muestra la geometría y el tiempo de remoción de ella para las dos situaciones. Se puede ver que con el uso del prototipo se reduce el tiempo de remoción del material de soporte en un 60-70%

Tabla 3.1. Tiempos de remoción para las dos situaciones [Elaboración Propia]

Impresión	Situación	Fluido	Tiempo de remoción (min)
Cilindro	Secadora	Aire	25
	Prototipo	Aceite	10
Cubo	Secadora	Aire	15
	Prototipo	Aceite	5

3.2.2 Acabado

El acabado se califica de manera cualitativa. Se puede observar en la Ilustración 3.6, que el acabado de la secadora para ambas impresiones es de peor calidad que la del prototipo, mostrando residuos blancos de cera en varias partes de la pieza. Esto se debe a que en el aceite la impresión se encuentra inmersa y con el agitador se genera la convección forzada en toda la pieza. En el caso de la secadora, el flujo y velocidad afectan un área puntual, que no recubre el volumen completo de la pieza, de esta manera causando resultados no uniformes.

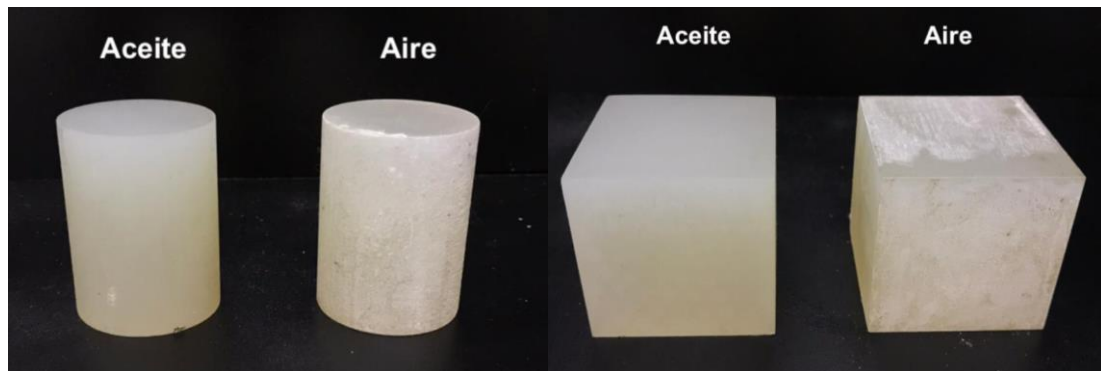


Figura 3.6. Comparación de Remoción de cera por tipo de fluido [Elaboración Propia]

3.3 Pruebas de eficiencia

3.3.1 Prueba Dimensional

Las pruebas dimensionales consistieron en medir la pieza antes y después de colocarla dentro del equipo, con el fin de probar que se remueve un alto porcentaje de cera y se obtienen las dimensiones establecidas en el dibujo CAD. Para efecto de esta prueba se seleccionaron 3 placas de 30mm x 50mm de lado x 1, 2 y 3 mm de espesor. Estas tres placas fueron colocadas simultáneamente en el tanque y dejadas por un tiempo de 10 min sugerido de remoción por parte de la literatura (Yin et al., 2018). Su selección se debe a que para estos espesores la deformación por temperatura es un concentrador de esfuerzo, por lo que deformación plástica puede suceder. A continuación, en las ilustraciones 3.7, 3.8 y 3.9, se muestran las placas, su deflexión y su medición de espesor, respectivamente.

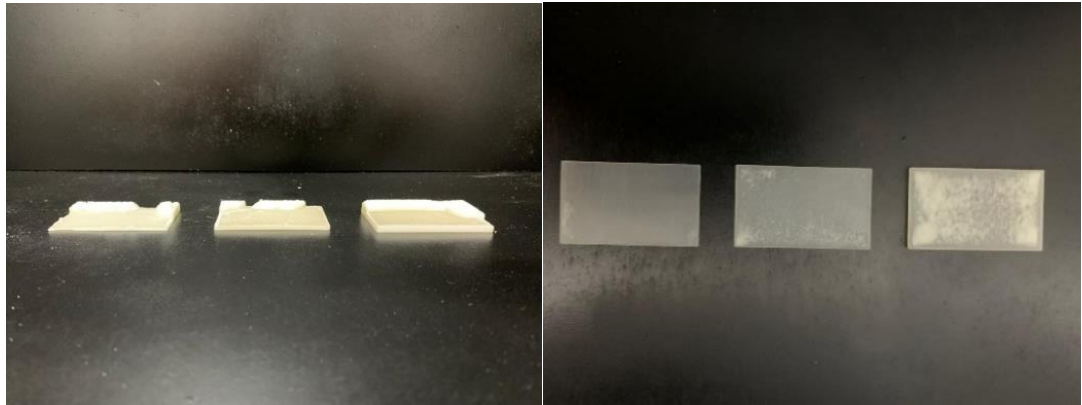


Figura 3.7. Placas de prueba dimensional con y sin cera removida [Elaboración Propia]



Figura 3.8. Comprobación de deflexión en placas. De arriba a abajo: placa 1mm, placa 2mm, placa 3mm espesor [Elaboración Propia]

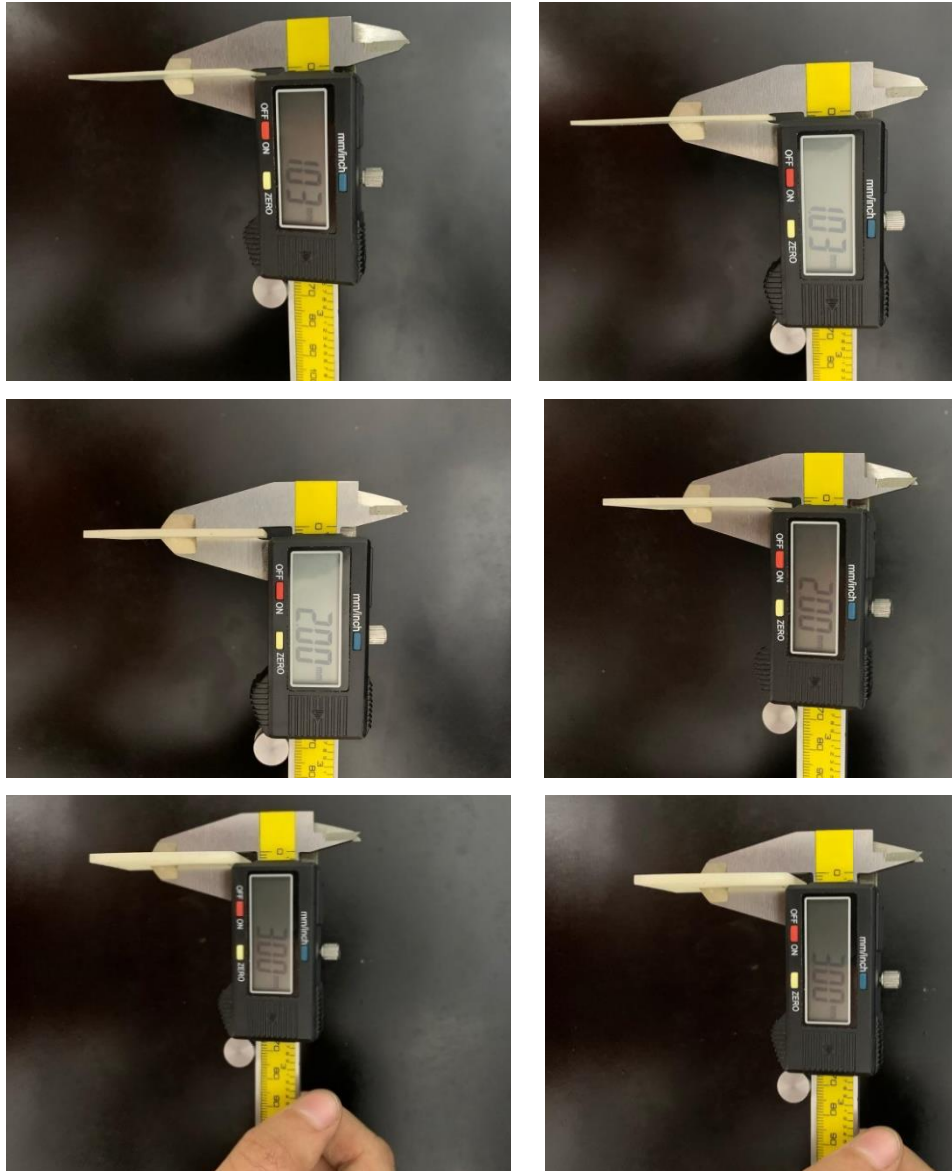


Figura 3.9. Mediciones directas de espesores luego de proceso de remoción para cada pieza impresa [Elaboración Propia]

3.3.2 Pruebas de pesaje

Esta prueba consiste en pesar antes y después de colocar la pieza dentro de la máquina. Se comparan datos de la cantidad de polímero que se usó proporcionados por el software de fábrica de la impresora, con las lecturas registradas en una balanza. Para las pruebas de pesaje se usó una balanza de joyería, la cual tiene una resolución de 0.001gr mostrada en la ilustración 3.10.



Figura 3.10. Pesaje de impresión de una pletina 200x400x1mm [Elaboración Propia]

Se puede observar en la tabla 3.2, que en general, el porcentaje de error es muy bajo, cerca del 1%. Esto puede relacionarse con la resolución de la impresora, donde defectos de impresión pueden ocurrir que varíen la cantidad real de material empleado en el proceso.

Tabla 3.2. Resultados de pesaje de piezas después de remoción [Elaboración Propia]

Pieza Impresa	Peso Teórico	Peso Real	Error %
Varillas 3mm	0,323	0,325	0,619
Varillas 2mm	0,139	0,14	0,719
Varillas 1mm	0,034	0,034	0,000
Pletinas 30x40x2* mm	3,197	3,223	0,813
Pletinas 30x40x2 mm	3,419	3,414	0,146
Pletinas 30x40x1 mm	1,72	1,731	0,640
Transformador	101,801	102,728	0,911
Chiang Rai	14,687	14,801	0,776
Mitad del Mundo	64,201	64,812	0,952
Norte Dame	24,316	24,512	0,806
Taj Mahal	77,268	78,018	0,971
Coliseo Romano	46,807	47,235	0,914
Sagrada Familia	33,419	33,752	0,996
Squirtle	15,876	16,022	0,920
Baby Yoda	13,032	13,128	0,737
Cilindro 20x40	32,062	32,391	1,026
Cubo 40	72,516	73,302	1,084
Engrane	24,566	24,821	1,038

3.3.3 Pruebas de tiempo de remoción de material de soporte

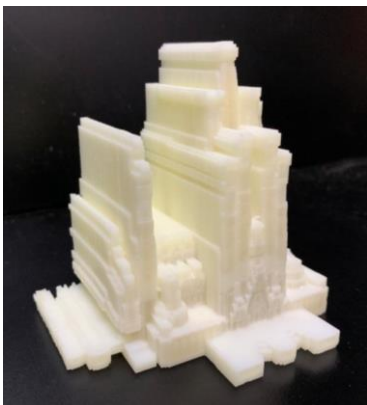
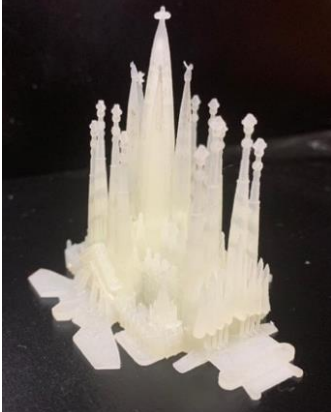
La última prueba consistió en colocar diferentes tipos de geometrías y realizar pruebas de tiempo de remoción, con el fin de recopilar información y dar un tiempo de remoción general. Con la finalidad de utilizar geometrías aleatorias, se utilizó la temática de monumentos famosos de alta resolución. Las piezas impresas antes y después de la remoción se presentan en la ilustración 3.11.



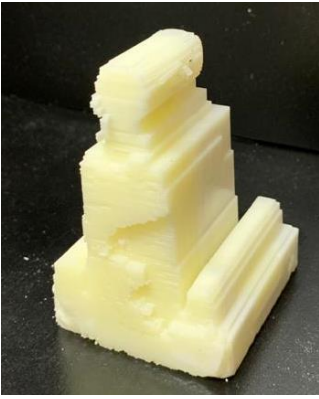
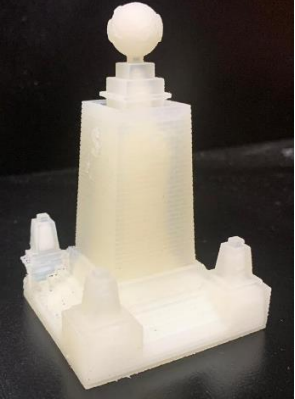

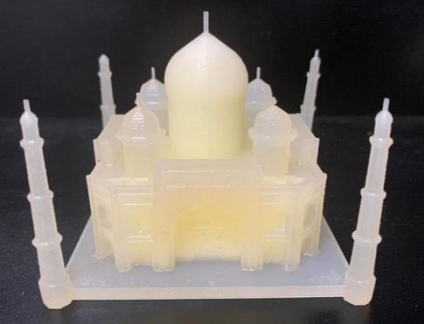
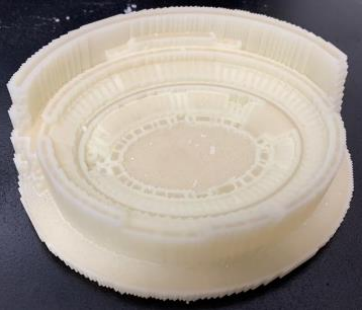
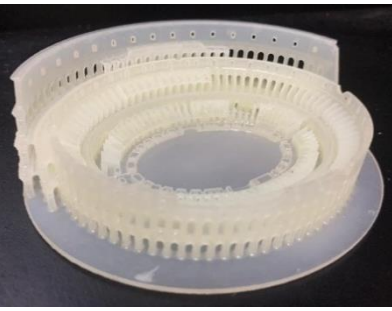


Figura 3.11. Monumentos impresos para prueba de tiempo general de remoción [Elaboración Propia].

Se puede observar en la tabla 3.3 las piezas antes de la remoción y después de la remoción con el prototipo, junto con sus respectivos tiempos de remoción de material de soporte. Se observa una tendencia del tiempo de calentamiento del medio o el aceite de aproximadamente 18-21 min y dependiendo de la cantidad y de cera en la pieza, el tiempo de estadía dentro del equipo aumenta, como se puede observar si comparamos los monumentos.

Tabla 3.3. Monumentos impresos de geometrías complejas [Elaboración Propia]

Antes	Después	Descripción
		<p><u>Sagrada Familia</u> Tiempo de calentamiento @70°C 20.2 min</p>
		<p>Tiempo de remoción 15:41 min</p>

		<p><u>Chiang Rai</u> T de calentamiento @70°C 19:11 min</p>
		<p>Tiempo de remoción 14:24 min</p>
		<p><u>Monumento a la Mitad del Mundo</u> Tiempo de calentamiento @70°C 18:50 min</p>
		<p>Tiempo de remoción 11:00 min</p>
		<p><u>Taj Mahal</u> Tiempo de calentamiento @62.5°C 19:25 min</p>
		<p>Tiempo de remoción final 17:43 min</p>
		<p><u>Coliseo Romano</u> T de calentamiento @62.5°C 19:25 min</p>
		<p>Tiempo de remoción final 23:41 min</p>

3.4 Efectos del proceso

3.4.1 Tratamiento térmico en piezas

Al realizar el retiro de la impresión del prototipo esta tiene una velocidad de calentamiento muy elevada debido a que pasa del fluido a 60-70°C a temperatura ambiente de 25°C, lo que realiza un tipo de tratamiento térmico a la pieza. Este tratamiento genera un cambio en la estructura interna del material, el cual se manifiesta como un cambio de tonalidad en la pieza como se puede observar en la ilustración 3.12. Para corroborar este efecto, la placa superior de la ilustración 3.12 fue dejada en el tanque toda una noche para que se enfríe lentamente en el aceite, mientras que la placa inferior de la ilustración 3.12 fue removida inmediatamente.



Figura 3.12. Comparación de velocidades de enfriamientos [Elaboración Propia]

3.4.2 Saturación de mezcla

Para corroborar la eficiencia del uso del aceite y los efectos medioambientales que podría tener su uso, se analizó el punto de saturación de la cera en el aceite causando que el fluido se torne inoperable y deba cambiarse. La tabla 3.4 adjunta, muestra las masas de cera removidas a lo largo de las distintas pruebas realizadas. Finalmente, se corroboró la sugerencia de (Sarbojeet, 2016) donde se menciona que la v_d de la mezcla sobresaturada al 10% en masa se eleva significativamente, aumentando los esfuerzos transmitidos hacia el motor seleccionado.

Tabla 3.4. Saturación de cera en la mezcla [Elaboración Propia]

Pieza Impresa	Cantidad	Masa Pieza (g)	Masa cera (g)	Masa cera total (g)
Varillas 3mm	6	0.324	0.809	4.854
Varillas 2mm	6	0.145	0.544	3.264
Varillas 1mm	6	0.037	0.282	1.692
Pletinas 300x500x2*	6	3.197	8.791	52.746
Pletinas 300x500x2	6	3.419	8.639	51.834
Pletinas 300x500x1	6	1.71	8.473	50.838
Transformador	1	101.8	92.301	92.301
Chiang Rai	1	14.687	30.849	30.849
Mitad del Mundo	1	64.201	42.323	42.323
Norte Dame	1	24.316	35.99	35.99
Taj Mahal	1	77.268	81.741	81.741
Coliseo Romano	1	46.807	71.711	71.711
Sagrada Familia	1	33.419	69.629	69.629
Squirtle	1	15.876	9.314	9.314
Baby Yoda	1	13.032	6.767	6.767
Cilindro 20x40	1	32.062	11.569	11.569
Cubo 40	1	72.516	15.411	15.411
Engrane	1	24.566	21.597	21.597
Total				654.43
Masa de aceite (g)				7679
Saturación m/m%				8.522

Como puede notarse, las pruebas realizadas llevaron al aceite a un punto cercano a la sobresaturación. Esto es evidenciado con lo mostrado en la ilustración 3.13.



Figura 3.13. De izquierda a derecha: Muestras de aceite saturado, muestra de cristales de cera sin aceite [Elaboración Propia]

Nota: Una vez que la pieza sale de la impresora, esta debe ser removida del platillo con una espátula. Este proceso en muchas ocasiones causa la ruptura de la cera, por lo que la cantidad real de cera que ingresa al tanque de aceite por lo general no es el mostrado por el software.

3.5 Análisis de Costos

En la tabla 3.5 se muestra los elementos con sus respectivos costos para la construcción del prototipo, se puede observar que el costo total es de \$248.21.

Tabla 3.5. Descripción de costos para la construcción del prototipo [Elaboración Propia]

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio
Motor DC	12V 300 RPM alto torque	1	\$ 24,50
Olla Aluminio	Diámetro 250mm y Alto 200mm	1	\$ 40,00
Termolón	Aislante 10mm espesor	1 metro	\$ 11,77
Tubo Cuadrados	30mm x 2mm espesor	6 metros	\$ 10,27
Eje Macizo	1/2 pulg AISI 304	0.6 kg	\$ 3,19
Eje macizo	1 pulg x 300mm, SAE 1018		\$ 4,84
Resistencia de calentamiento	Hornilla 1000W a 11V	1	\$ 13,00
Rejillas	150 mm x 100 mm x 100 mm	1	\$ 3,00
Arduino	Controlador	1	\$ 20,00
Sensor temperatura	DS18B20	1	\$ 4,50
Modulo Relé	1CH 5VDC / Corriente Max 10A	1	\$ 3,50
Platinas deflectores	Platinas 30x300mm AISI 304	6	\$ 8,09
Estructura	Platinas A36	5	\$ 6,80
Protoboard	30 filas, 10 columnas	1	\$ 3,00
Puente H	L298n	1	\$ 5,50
Borneras	Azul 3 patas	1	\$ 1,00
Cable	Calibre 14	3 m	\$ 2,00
Transformador	AC/DC 12V	1	\$ 5,50
Jumpers	-	20	\$ 2,00
Hembra de fuente	Para transformador AC/DC 12V	1	\$ 2,00
Aceite	Aceite vegetal para freír	10L	\$ 10,00
Caja Eléctrica	Estética	1	\$ 5,75
Tornillo	Perforadoras de acero	16	\$ 3,00
Mano de obra	Soldadura y acabado	1	\$ 55,00
		Total	\$ 248,21

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

4.1.1 Prueba Dimensional

En la prueba dimensional, se pudo notar que las medidas de las piezas impresas se encuentran en un rango correcto de acuerdo con los dibujos CAD, por lo que se puede inferir que la capa del material de soporte se encuentra totalmente removida.

4.1.2 Prueba de Pesaje

Dentro de esta prueba, las lecturas tomadas de peso demostraron errores porcentuales menores al 1% en el peso mostrado por el programa. Debido a estos resultados, se pudo comprobar la remoción significativa de material de soporte. Cabe recalcar que el valor mostrado en el programa es una estimación teórica, durante la operación, condiciones no deseadas se pueden presentar.

4.1.3 Piezas de geometría compleja

Se puede apreciar en la tabla 3.3 que la calidad de la pieza impresa es sumamente alta, mostrando detalles complejos con claridad. El resultado de la remoción puede corroborarse en la tabla 3.4 donde estas piezas fueron pesadas, obteniendo pesos significativamente cercanos a los teóricos proporcionados por el software del equipo, de hecho, con un error del 1%. Este resultado implica que la calidad de la remoción es constante hasta para piezas complejas. Se nota también en la tabla 3.4 que los tiempos de remoción crecen en base a la cantidad de cera a removerse y presente en la mezcla. Esto es indicativo de que la saturación de la mezcla esta correlacionada con los tiempos y calidad de remoción.

4.1.4 Eficiencia del prototipo

Con las pruebas realizadas, se puede concluir que el prototipo realiza su función de manera correcta, efectiva y rápida. Sin embargo, para la medición de eficiencia, se tiene que comparar el desempeño del equipo con la situación previa con la que se removía el soporte de las impresiones en el laboratorio CAMPRO, la cual era usando una secadora de mano.

Dentro de la comparación, la medición de la eficiencia se radica en los tiempos de remoción, la remoción completa del material de soporte y el acabado de la pieza. Como se describió en la parte de resultados y las pruebas efectuadas, las impresiones de geometría compleja no se podían remover con el uso de la secadora, debido a que no puede remover rincones de ciertas impresiones por la complejidad que esta presenta. En términos de tiempos de remoción, la tabla 3.3, nos da un indicio de la mejora en los tiempos, se tiene una mejora del 60 – 70%. Adicionalmente, el prototipo puede remover mayor cantidad de piezas al mismo tiempo, y en términos de acabado, esto se lo puede ver cualitativamente en la Ilustración 3.10, donde se observa que el acabado es mayor al usar el prototipo.

4.1.5 Costos del prototipo

Dentro de la contemplación de la solución del problema, uno de los criterios importantes es el costo. Como se especificó en la sección de resultados con la tabla 3.7, el costo del prototipo fue de \$248,21, lo cual, si se compara con el costo de otros removedores, el precio es exactamente 1/4 de lo que se encuentra en el mercado, lo cual puede brindar más rentabilidad y accesibilidad de las impresiones con este tipo de tecnología.

4.1.6 Implicaciones del diseño en la industria de la manufactura aditiva

El prototipo de remoción de material de soporte se puede involucrar directamente en los productos producidos por las impresoras de la tecnología MJP. Los factores influenciados por este equipo son los factores

de costos por pieza impresa, tiempos de entrega y de impresión, reducción de exposición de personas con el material y mejoras de acabado y remoción completa del soporte en la pieza impresa.

Comenzando por los costos, reducir los pasivos industriales permiten la integración de la tecnología al mercado popular, haciendo del sistema MJP aún más atractivo para el consumidor. Así mismo, la reducción en tiempos de entrega para piezas manufacturadas de esta manera, permiten que la producción en masa de productos usando esta tecnología sea más viable y rentable. Para el caso de la seguridad de operadores, reducir el contacto con la cera caliente y el material de la pieza permite reducir riesgos de operación en la industria, lo cual siempre es deseado. Finalmente, el hecho de que la calidad de remoción sea tan alta permite tener seguridad de que los productos generados sean atractivos para los consumidores causando piezas de cualquier geometría.

4.1.7 Lecciones Aprendidas

- La revisión de las unidades cuando se efectúan los cálculos es esencia y no debe descuidarse. Debido a un error de unidades, se realizó una compra innecesaria dentro del proceso de construcción y ensamble.
- Previo a la compra y construcción, se tiene que asegurar absolutamente todo y considerar cuestiones de diseño, como, por ejemplo: realizar un diseño con alta mantenibilidad, o fácil mantenimiento, pensar en cómo se puede maniobrar de manera sencilla el equipo, maniobras posibles para el armado y desarmado de los componentes

4.2 Recomendaciones

Como recomendaciones para la realización de un segundo prototipo o producto final, se tienen:

- Colocar una pantalla donde se pueda revisar la temperatura que se encuentra dentro el aceite.
- Utilizar indicadores de operación, tales como LEDs, para tener una mejor interacción equipo-usuario.
- Realizar un rediseño de la estructura, de tal manera que se obtenga un diseño más estéticamente atractivo y compacto.
- Añadir utensilios y accesorios al equipo para una mejor interacción del usuario.
- Colocar una válvula de desfogue con una sección de filtrado de aceite, para realizar de manera más sencilla la limpieza del aceite.
- Hacer un estudio de las propiedades físicas del material, así como estudios de tratamiento térmico, para observar el cambio de microestructura y propiedades mecánicas para realización de piezas funcionales en el mercado.
- En el caso de necesitar un mejor acabado y evitar los tratamientos térmicos por enfriamiento, entonces se puede colocar como parte del post-procesamiento el uso de un segundo fluido a temperaturas un poco menor al del aceite o fluido del prototipo, y realizar un enfriamiento lento.
- Es posible la reutilización del aceite por medio de un filtrado periódico una vez que la saturación es visible en la mezcla. De ser posible, este procedimiento debería seguirse siempre, de tal manera que se reduzcan los impactos que la disposición de la mezcla puede tener en el medio ambiente.

4.2.1 Procedimiento de uso y mantenimiento óptimo

El procedimiento de uso del prototipo se encuentra en el apéndice B. Dentro del procedimiento, este describe los pasos a seguir para el uso del equipo y ciertas sugerencias previas a su uso, para evitar errores humanos y daños al prototipo, así como las piezas impresas dentro de este. Como adjunto adicional, en este mismo apéndice se encuentran sugerencias de mantenimiento para ampliar la vida útil tanto del prototipo como del futuro equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- 3DSystems Product. (2012). *Post Processing Operation Guide and Best Practices for parts built on the ProJet™ 3500 and 5000 Professional 3D Printers*. 1–9.
- Benz, G. (2017). Optimize Heat Transfer of Viscous Fluids in Agitated Vessels. *CEP*. Retrieved from <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2017/december/optimize-heat-transfer-viscous-fluids-agitated-vessels>
- Kayode Coker, A. (2001). *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design* (AKC technology, Ed.). Houston: Gulf Professional Publishing.
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017, August 9). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, Vol. 117, pp. 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Nagata, S. (1975). *Mixing Principles & Agitation*.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (Cuarta Edi). McGraw-Hill.
- Paul, E. L., Atiemo-obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2003). *HANDBOOK OF INDUSTRIAL MIXING* Edited by.
- Poole, J. W., & Mangelsdorf, T. A. (1932). Solubilities of Oil and Waxes in Organic Solvents. III. *Industrial and Engineering Chemistry*, 24(11), 1215–1218. <https://doi.org/10.1021/ie50275a003>
- Pushkar, K., Subodh, C., & Karunakaran, K. P. (2018). (PDF) Multi-jet Fluid Deposition in 3D Printing: A Review. *International Conference on Engineering Technology*, 5. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/328019378_Multi-jet_Fluid_Deposition_in_3D_Printing_A_Review
- Rojas, E. E. G., Coimbra, J. S. R., & Telis-Romero, J. (2013). Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties*, 16(7), 1620–1629. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604889>
- Sarbojeet, J. (2016). *Crystallization Behavior of Waxes*. Utah State University.
- Solids Control. (2012). How to choose right agitator size for tank ? .
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological

benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275–285.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>

Yin, P., Hu, B., Yi, L., Xiao, C., Cao, X., Zhao, L., & Shi, H. (2018). Engineering of removing sacrificial materials in 3D-printed microfluidics. *Micromachines*, 9(7), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/mi9070327>

APÉNDICE A

Para la selección de los elementos requeridos para el diseño y construcción del equipo se utilizaron matrices de decisiones aplicando “Weighted Scoring Method”. La escala empleada para calificar es descrita en la tabla A.1.

Tabla A.1. Tabla de escalas de comparación de criterios. [Elaboración Propia]

Escala	
1	Igual de importante
5	Mas importante
9	Mucho más importante
0,2	Menos importante
0,11	Mucho menos importante

La carta morfológica, es un tipo de lluvia de ideas para la solución del problema. Se seleccionaron los componentes más importantes, como, por ejemplo: tipo de agitador, posición de agitador, etc. de los cuales se seleccionaron las más convenientes como se puede observar en la tabla de soluciones.

Matriz de decisión de cada aspecto de la carta morfológica

- ***Agitador***

El agitador es la parte esencial de un sistema de agitación, debido a que este elemento es el que genera el tipo de movimiento y mezclado del sistema. Se realizó primero una tabla con los criterios de comparación para realizar la selección, como se muestra en la tabla A.2. Luego, se realiza una ponderación con la escala de la tabla A.1, para poder sacar un peso del criterio y así establecer la importancia de cada uno. Con estos pesos relativos, se realiza la matriz de decisión mostrada en la tabla A.3, que nos muestra el peso de cada criterio y la ponderación que se ha dado a cada uno dependiendo del agitador.

Tabla A.2. Comparación de los criterios de selección del agitador. [Elaboración Propia]

Comparación de criterios del agitador						
	Eficiencia de agitador	Potencia requerida	Manufactura sencilla	Costo de manufactura	Total	Peso
Eficiencia de agitador	1,00	0,20	0,20	1,00	2,40	0,08
Potencia requerida	5,00	1,00	5,00	0,20	11,20	0,39
Manufactura sencilla	5,00	0,20	1,00	1,00	7,20	0,25
Costo de manufactura	1,00	5,00	1,00	1,00	8,00	0,28
					28,80	

Tabla A.3. Matriz de decisión del agitador. [Elaboración Propia]

Criterios	Peso	Cuchilla inclinada		Cuchillas rectas		Tipo Ancla	
		Ponderación	Total	Ponderación	Total	ponderación	Total
Eficiencia de agitador	0,08	8,00	0,67	10,00	0,83	4,00	0,33
Potencia requerida	0,39	10,00	3,89	3,00	1,17	5,00	1,94
Manufactura sencilla	0,25	6,00	1,50	10,00	2,50	3,00	0,75
Costo de manufactura	0,28	6,00	1,67	10,00	2,78	5,00	1,39
			7,72		7,28		4,42

Se observa que el agitador más adecuado para nuestro equipo es el agitador de cuchillas inclinadas.

- **Posición del agitador**

La posición del agitador es un elemento muy importante en el sistema de agitación. De esto depende el tipo de flujo, dirección de agitación, la mantenibilidad, el proceso de ensamble y elementos extra que se le colocan simplemente por estar colocados en diferentes posiciones. Por lo que se debe considerar todo aquello en la tabla de criterios, como se lo muestra en la tabla A.4.

Una vez obtenido el peso de cada criterio se realiza la matriz de decisión para la selección de la posición del agitador, que se muestra en la tabla A.5.

**Tabla A.4. Comparación de los criterios de selección de la posición del agitador.
[Elaboración Propia]**

Comparación de criterios de la posición del agitador						
	Ensamble sencillo	Mantenibilidad alta	Bajo Costo	Manufactura sencilla	Total	Peso
Ensamble sencillo	1,00	1,00	0,20	0,20	2,40	0,08
Mantenibilidad alta	1,00	1,00	1,00	5,00	8,00	0,28
Bajo Costo	5,00	1,00	1,00	5,00	12,00	0,42
Manufactura sencilla	5,00	0,20	0,20	1,00	6,40	0,22
					28,80	

Tabla A.5. Matriz de decisión de la posición del agitador. [Elaboración Propia]

Criterios	Peso	Superior		Inferior		Lateral	
		ponderación	Total	ponderación	Total	ponderación	Total
Ensamble sencillo	0,08	10,00	0,83	7,00	0,58	4,00	0,33
Mantenibilidad alta	0,28	10,00	2,78	6,00	1,67	3,00	0,83
Bajo Costo	0,42	10,00	4,17	7,00	2,92	4,00	1,67
Manufactura sencilla	0,22	10,00	2,22	5,00	1,11	3,00	0,67
			10,00		6,28		3,50

Se muestra como resultado que la posición superior es la más conveniente para nuestro diseño.

- **Resistencia de calentamiento**

Se requiere saber que tipo de resistencia de calentamiento es la mejor para nuestro diseño debido a la limitación de espacio, disponibilidad que se encuentra en el mercado, costos, y el ensamble de la misma, por lo que se realizó la comparación de criterios mostrada en la tabla A.6, como se realizó anteriormente con los otros aspectos.

Tabla A.6. Comparación de los criterios de selección de la resistencia de calentamiento. [Elaboración Propia]

Comparación de criterios de la selección de la Resistencia de calentamiento							
	Disponibilidad local	Bajo Costo	Eficiencia	Ensamble sencillo	Mantenibilidad alta	Total	Peso
Disponibilidad local	1,00	0,20	1,00	5,00	5,00	12,20	0,30
Bajo Costo	5,00	1,00	1,00	1,00	5,00	13,00	0,32
Eficiencia	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	9,00	0,22
Ensamble sencillo	0,20	1,00	0,20	1,00	1,00	3,40	0,08
Mantenibilidad alta	0,20	0,20	1,00	1,00	1,00	3,40	0,08
						41,00	

Tabla A.7. Matriz de decisión de la resistencia de calentamiento. [Elaboración Propia]

Criterios	Peso	Tipo Abrazadera		Tipo Hornilla		Tipo Varilla	
		ponderación	Total	ponderación	Total	ponderación	Total
Disponibilidad local	0,30	8,00	2,38	10,00	2,98	9,00	2,68
Bajo Costo	0,32	6,00	1,90	10,00	3,17	7,00	2,22
Eficiencia	0,22	9,00	1,98	8,00	1,76	10,00	2,20
Ensamble sencillo	0,08	10,00	0,83	10,00	0,83	6,00	0,50
Mantenibilidad alta	0,08	10,00	0,83	10,00	0,83	7,00	0,58
			7,92		9,56		8,17

Como se puede observar en la tabla A.7, la resistencia tipo hornilla fue la seleccionada.

- **Aislamiento**

Debido a que eliminar pérdidas en el sistema de calentamiento reduce costos por energía eléctrica, se tiene que colocar un aislamiento para que la energía térmica no se disipe en el ambiente. Sin embargo, en el mercado se encuentran algunos tipos de aislantes térmicos, por lo que se debe realizar una comparación de criterios como se puede muestra en la tabla A.8, para la realizar la matriz de decisión.

Tabla A.8. Comparación de los criterios de selección del aislamiento térmico.

[Elaboración Propia]

Comparación de criterios de la selección del aislamiento					
	Disponibilidad local	Costo	Eficiencia Aislamiento	Total	Peso
Disponibilidad local	1,00	0,20	5,00	6,20	0,33
Costo	5,00	1,00	5,00	11,00	0,59
Eficiencia Aislamiento	0,20	0,20	1,00	1,40	0,08
				18,60	

Tabla A.9. Matriz de decisión del aislante térmico. [Elaboración Propia]

Criterios	Peso	Piralu		Lana mineral de roca		Termolón	
		ponderación	Total	ponderación	Total	ponderación	Total
Disponibilidad local	0,33	8,00	2,67	4,00	1,33	10,00	3,33
Costo	0,59	7,00	4,14	6,00	3,55	10,00	5,91
Eficiencia Aislamiento	0,08	10,00	0,75	9,00	0,68	10,00	0,75
			7,56		5,56		10,00

Se puede observar que el Termolón es la que tiene el puntaje más alto, por lo que se selecciona ese aislante térmico.

- **Control**

El punto de fusión del material de soporte se encuentra alrededor de los 60-70 °C, y la resina polimérica ya solidificada tiene una distorsión térmica aproximadamente a los 80-90°C. Hay diferentes tipos de controladores dentro del mercado, por lo que se realiza una comparación en los criterios el cual se muestra en la tabla A.10, y con su debido peso se realiza la matriz de decisión del controlador como se observa en la tabla A.11.

Tabla A.10. Comparación de los criterios de selección del controlador. [Elaboración Propia]

Comparación de criterios de la selección del control eléctrico					
	Costo	Disponibilidad local	Programación Sencilla	Total	Peso
Costo	1,00	1,00	5,00	7,00	0,45
Disponibilidad local	1,00	1,00	5,00	7,00	0,45
Programación Sencilla	0,20	0,20	1,00	1,40	0,09
				15,40	

Tabla A.11. Matriz de decisión del controlador. [Elaboración Propia]

Criterios	Peso	Arduino		PLC		Raspberry	
		ponderación	Total	ponderación	Total	ponderación	Total
Costo	0,45	10,00	4,55	1,00	0,45	5,00	2,27
Disponibilidad local	0,45	10,00	4,55	8,00	3,64	8,00	3,64
Operación Sencilla	0,09	10,00	0,91	7,00	0,64	8,00	0,73
			10,00		4,73		6,64

Se puede observar en la tabla A.11, que el controlador seleccionado y de más alto puntaje es el Arduino.

APENDICE B

Procedimiento de uso de Removedor de cera

1. Colocar las piezas dentro de la malla de soporte de pieza.
2. Paralelo a la colocación de la pieza en la malla de soporte, colocar también el sensor de temperatura DS18B20, dentro de ella.
3. Tomar la malla de soporte de pieza, con las piezas impresas y con alguna pinza o gancho, colocar la malla lo más alejado del agitador posible, para evitar golpes y daños en las piezas y agitador.
4. Acercar el sensor de temperatura lo más posible a las piezas impresas, para asegurar una buena lectura de temperatura de remoción.
5. Conectar y encender el equipo.
6. Esperar a que la temperatura llegue a 60-70°C en 15-20 min de espera, dependiendo de la cantidad de gramos de cera que tiene disuelto el aceite.
7. Revisar visualmente la remoción de la cera y esperar aproximadamente 10min.
8. Apagar el equipo.
9. Realizar un lavado con agua tibia y jabón a la pieza, luego dejar secar.

Nota 1: Es primordial que el sensor se encuentre dentro del tanque antes del encendido del equipo ya que, de ocurrir algún mal funcionamiento en algún componente de control, la resistencia se podría mantener encendida causando un peligro de quemadura o incendio.

Nota 2: Previo a la inmersión de la pieza impresa por la impresora Project 3510 SD, se tiene que remover la mayor cantidad de cera de manera mecánica, sin romper o dañar la misma pieza. En el caso de tener piezas de bajo espesor o secciones frágiles, no se recomienda remover de manera mecánica la cera.

Mantenimiento de componentes del Removedor de cera

Periódicamente se debe realizar una limpieza de los componentes para verificar corrosión o suciedad acumulada que pueda afectar a la transferencia de calor:

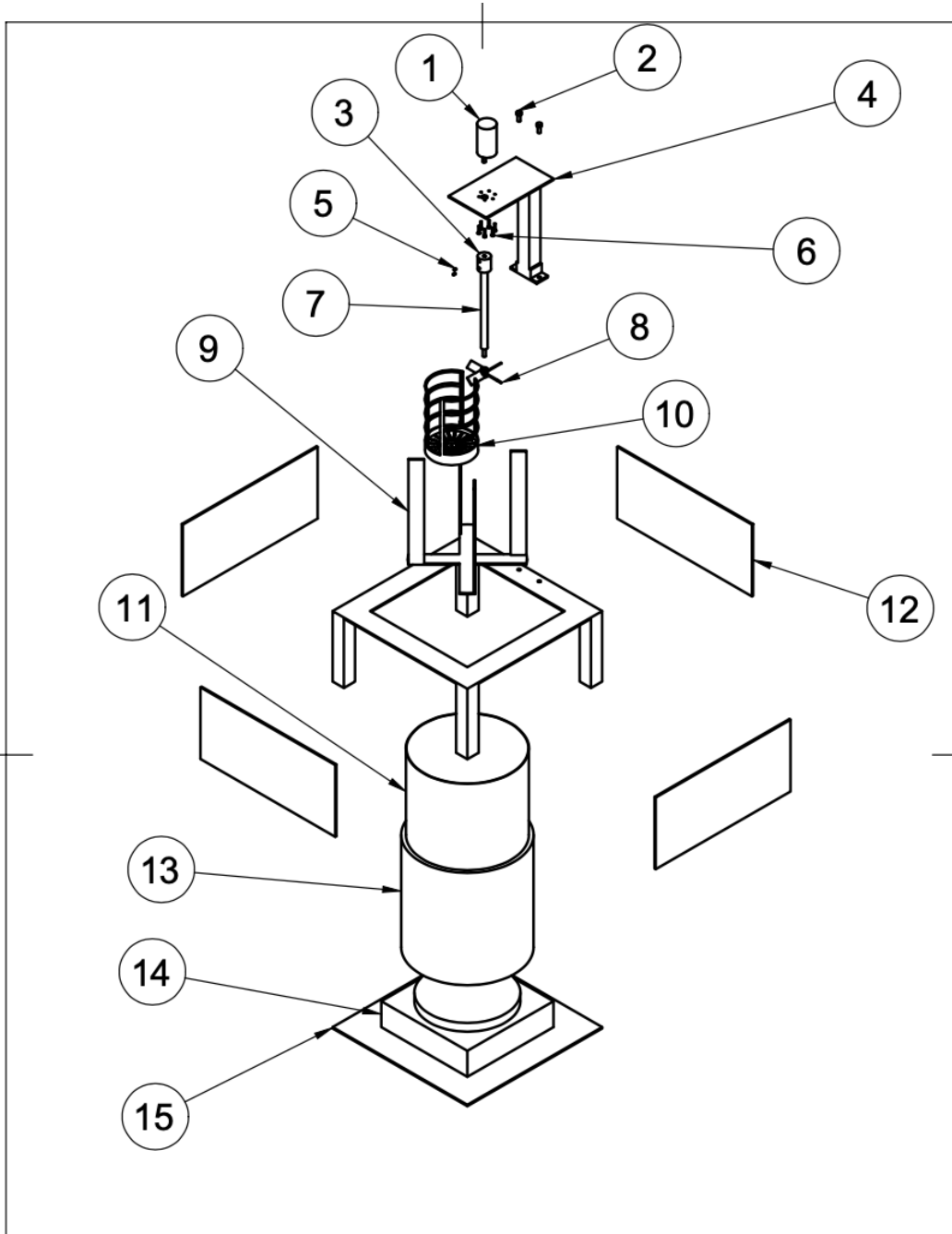
1. Asegurarse que componentes no estén calientes
2. Desconectar terminales de motor y remover columna
3. Remover tanque y limpiar superficies con un trapo mojado con jabón
4. Abrir el cobertor trasero y soplar aire desde la parte superior de la estructura para remover residuos del calentamiento de la resistencia
5. Verificar estado de componentes
6. Limpiar con una tela de ser necesario
7. Remover acople del eje y limpiar agitador y eje con agua con jabón

Una vez que la mezcla esté sobresaturada:

1. Abrir panel eléctrico
2. Conectar el Arduino a la computadora y leer temperatura
3. Desconectar terminales de motor y encender el equipo
4. Permitir que la temperatura se eleve hasta 40C
5. Apagar equipo
6. Conectar terminales de motor, desconectar conexión de resistencia y encender el equipo
7. Permitir que la mezcla se homogenice hasta que la cera se disuelva levemente
8. Apagar equipo, remover columna del motor y deflectores
9. Remover tanque y filtrar con una malla gruesa y luego fina
10. Dejar reposar por 3h

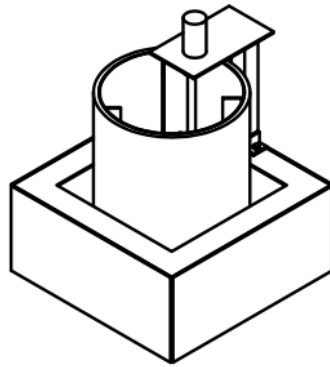
APENDICE C

Plano 1. Planos en explosión del prototipo.



Dept. ESPOL	Technical reference	Created by Wu & Chica	1/14/20	Approved by	
		Document type PLANOS	Document status		
		Title PROTOTIPO SISTEMA DE REMOCION DE CERA	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/10	

Plano 2. Componentes del prototipo.

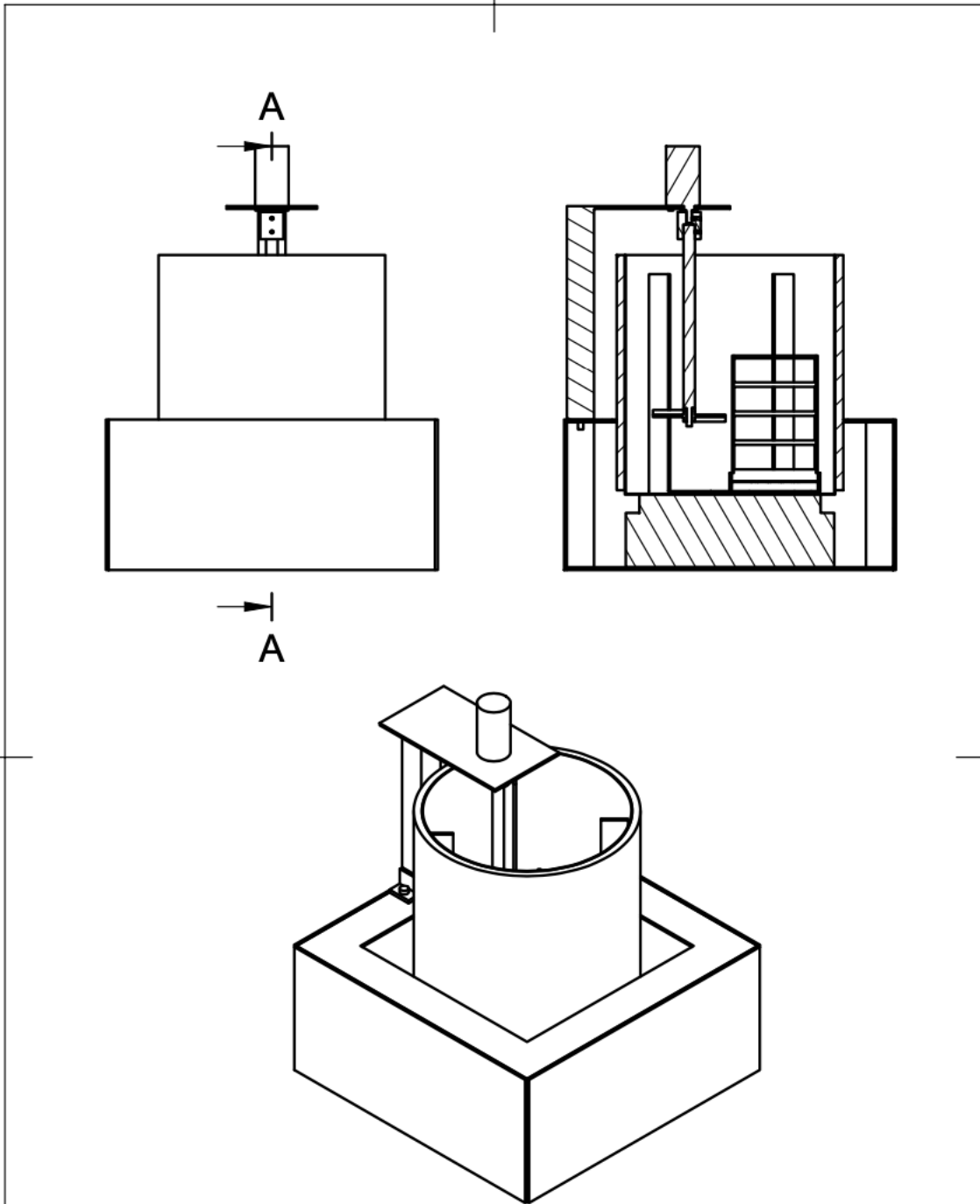


15	1	Plancha Base	360x360x1 mm	
14	1	Resistencia Calentamiento	Hornilla 1000W	
13	1	Aislante	10mm de espesor	Termolón
12	4	Planchas	360x160x1 mm	
11	1	Tanque	Ø230 - 1mm Espesor	AISI 304
10	1	Malla soporte de pieza	Ø100mm x Altura 158 mm / Rejilla de utensilios de cocina	AISI 304
9	1	Deflectores		AISI 304
8	1	Agitador	Cuchillas inclinadas 45°	ABS
7	1	Eje Principal		AISI 304
6	6	Pernos	M3x15mm	Acero
5	2	Prisioneros	M3	Acero
4	1	Viga vertical soporte		ASTM A36
3	3	Acople		SAE 1018
2	2	Pernos	M6	Acero
1	1	Motor	DC 12V 300 RPM 5.6 kg/cm	
No	Cant.	Parte	Descipcion	Material

LISTA DE COMPONENTES

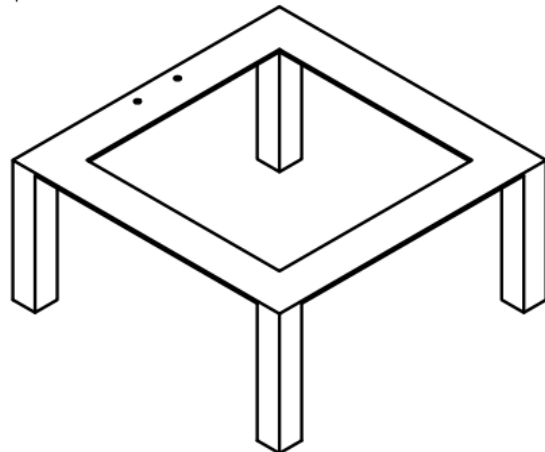
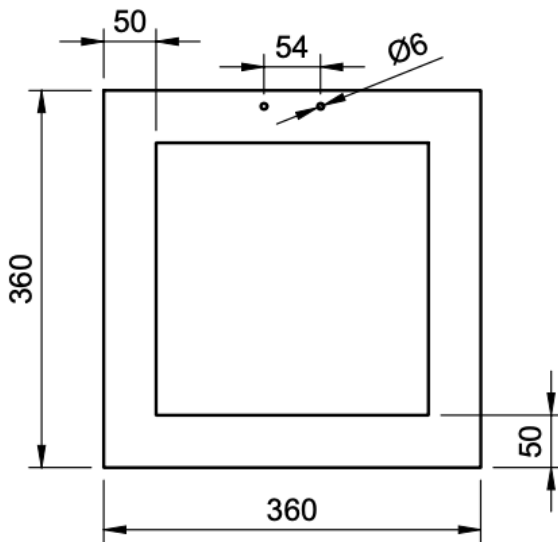
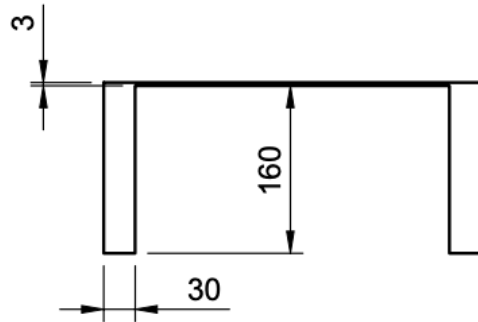
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by Wu & Chica	1/14/20	Approved by
		Document type PLANOS	Document status	
		Title PROTOTIPO SISTEMA DE REMOCION DE CERA	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 2/10

Plano 3. Ensamble del prototipo.



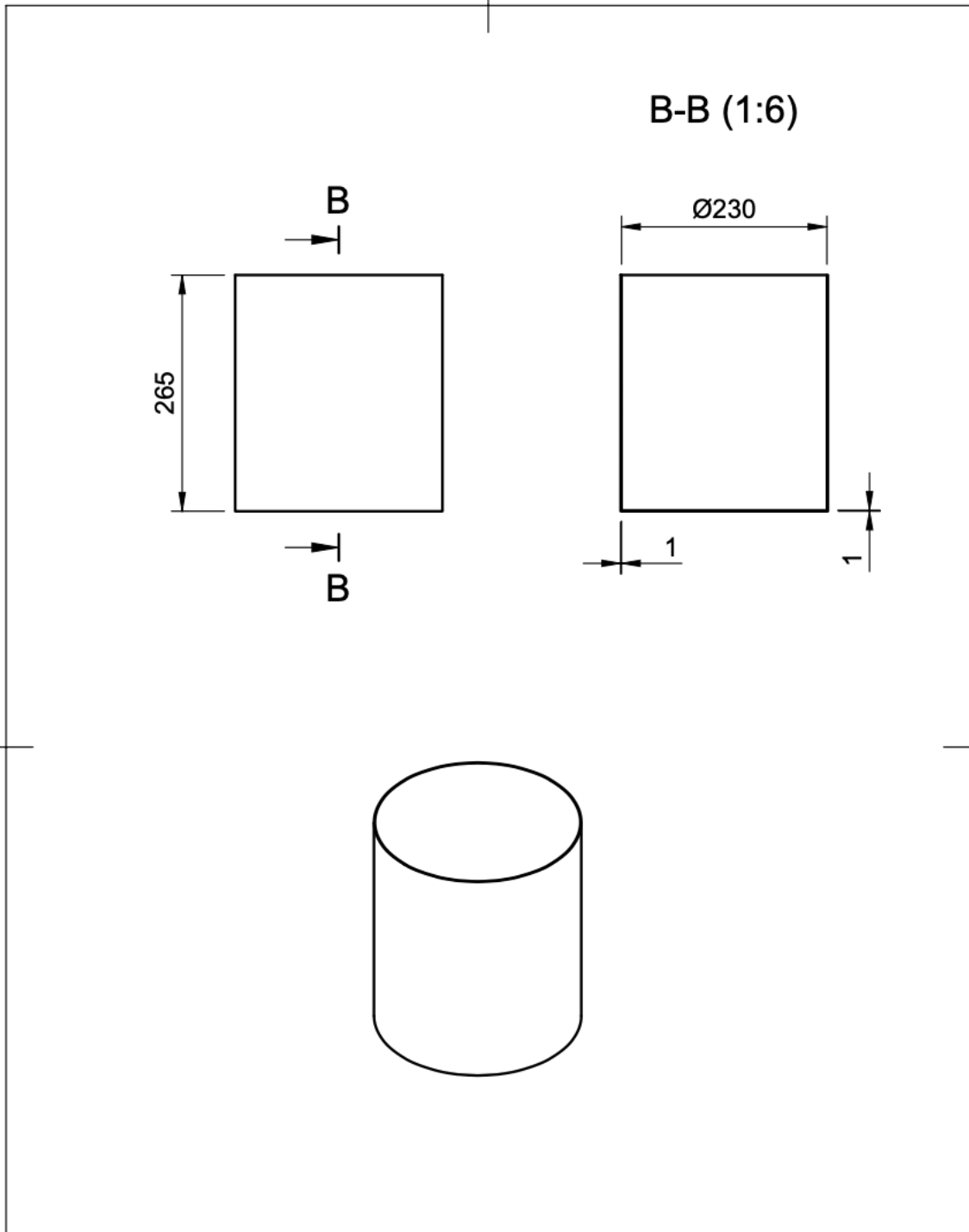
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by	
		Document type PLANOS	Document status		
		Title PROTOTIPO SISTEMA DE REMOCION DE CERA	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 3/10	

Plano 4. Estructura base.



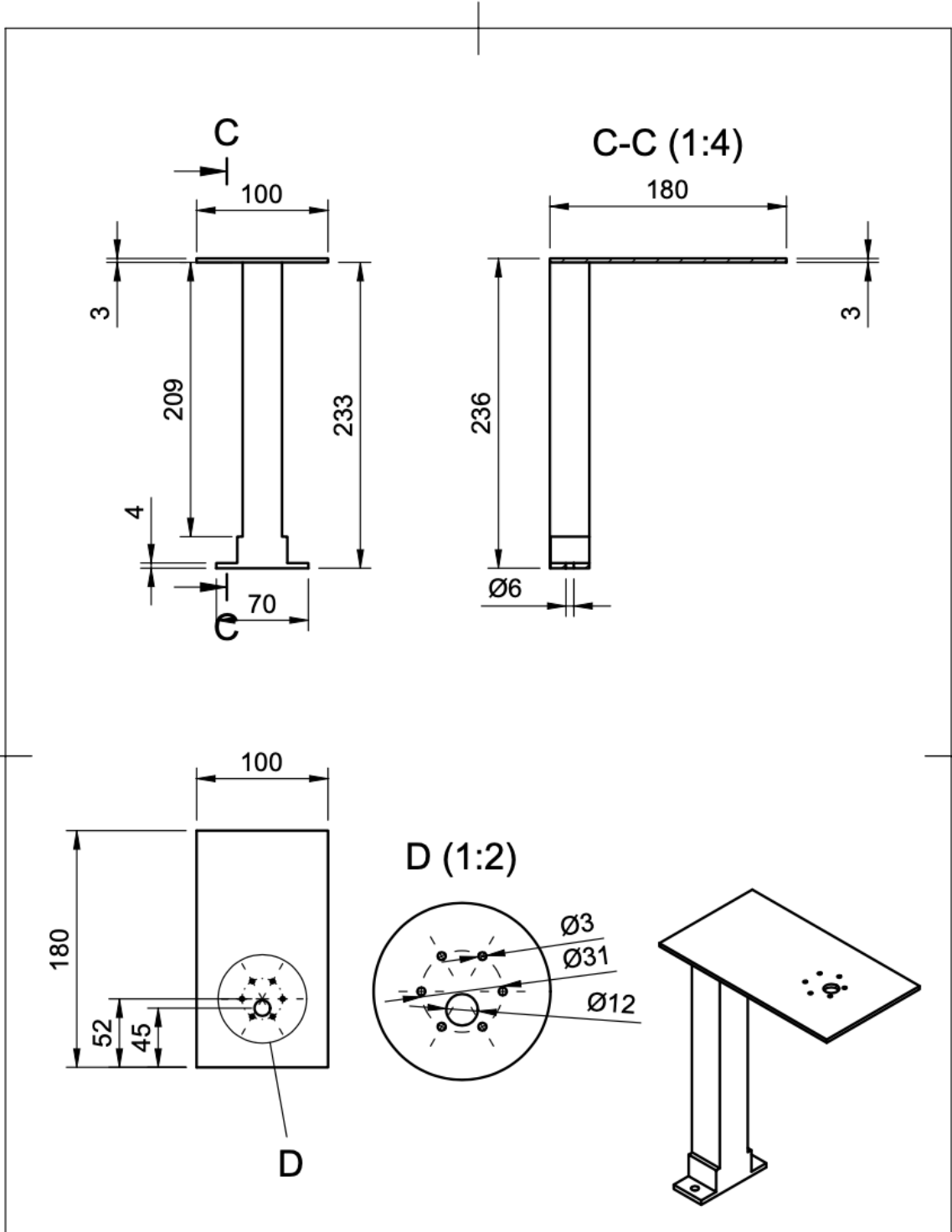
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by	
		Document type PLANOS	Document status		
		Title ESTRUCTURA BASE	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 4/10	

Plano 5. Tanque.



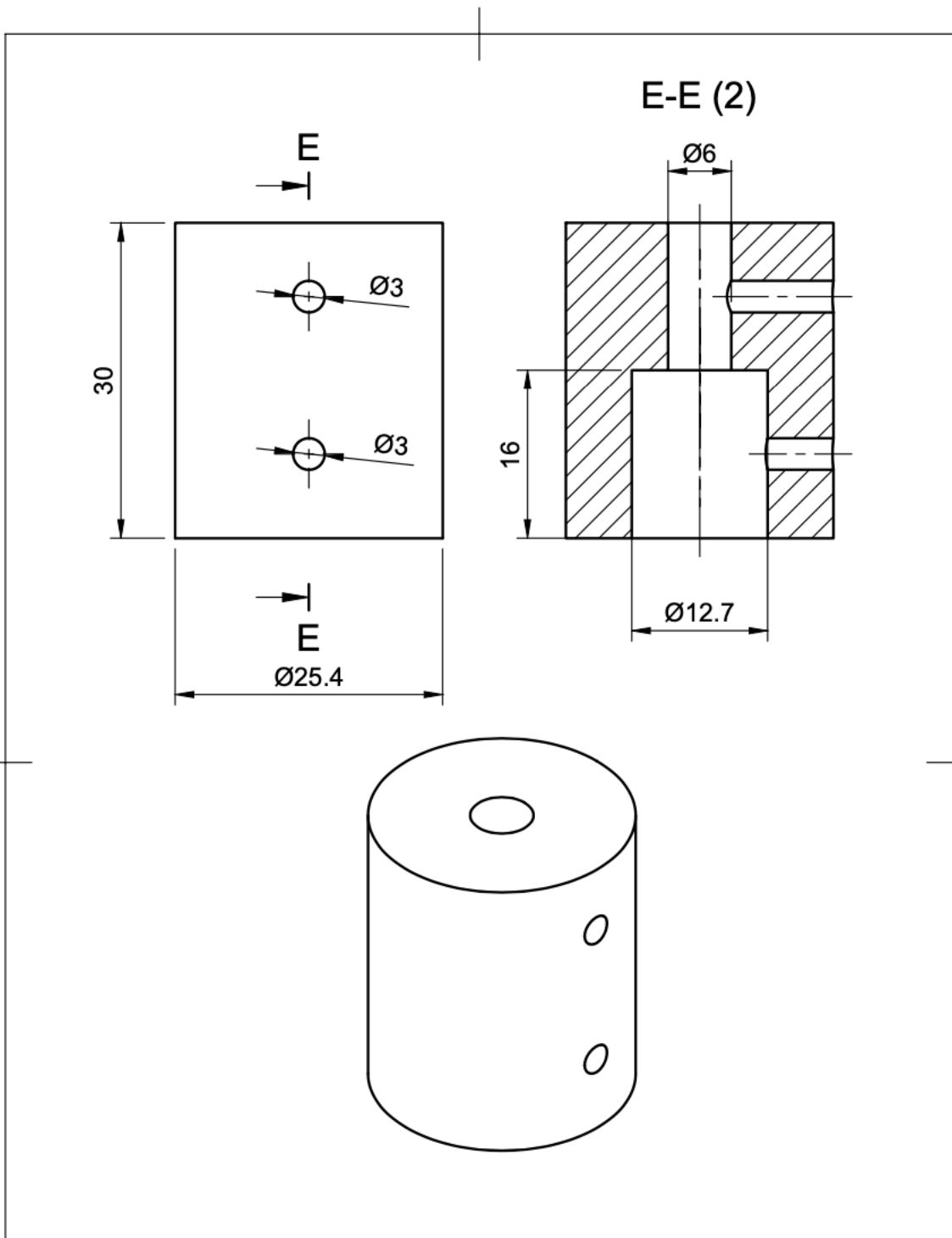
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by
		Document type PLANOS	Document status	
		Title TANQUE	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 5/10

Plano 6. Viga soporte vertical.



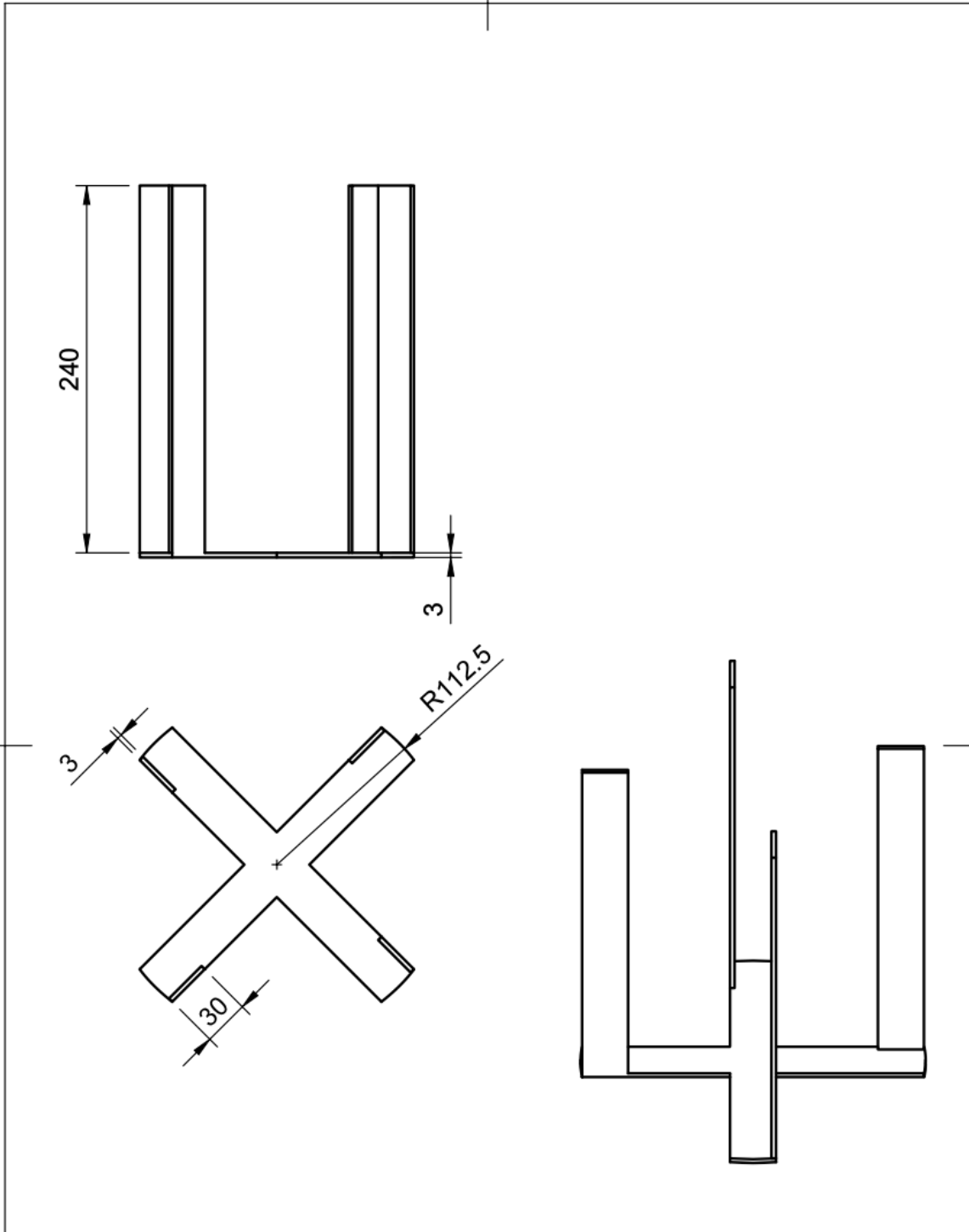
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by
		Document type PLANOS	Document status	
		Title VIGA SOPORTE	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 6/10

Plano 7. Acople.



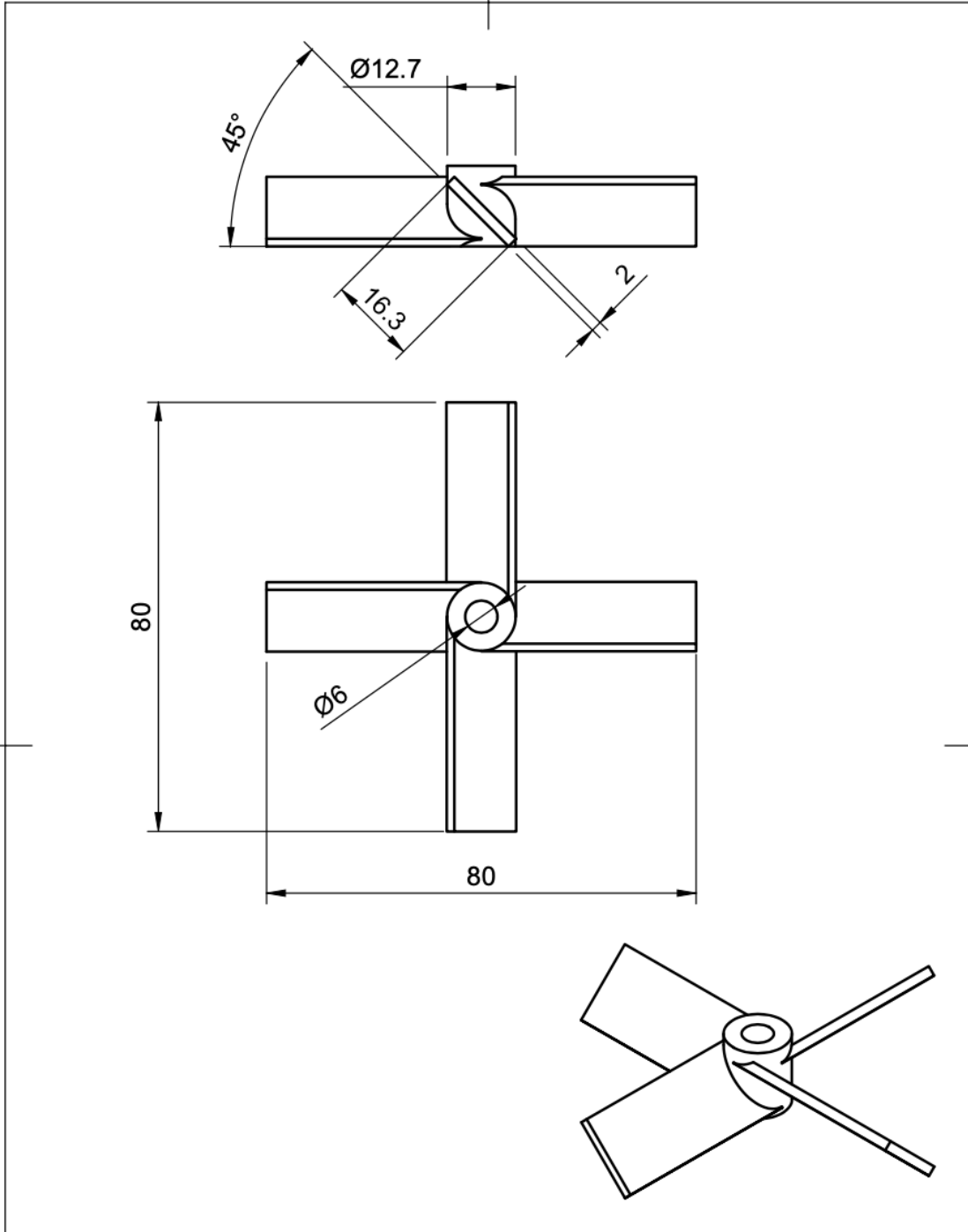
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by
		Document type PLANOS	Document status	
		Title ACOPLE	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 7/10

Plano 8. Deflectores.



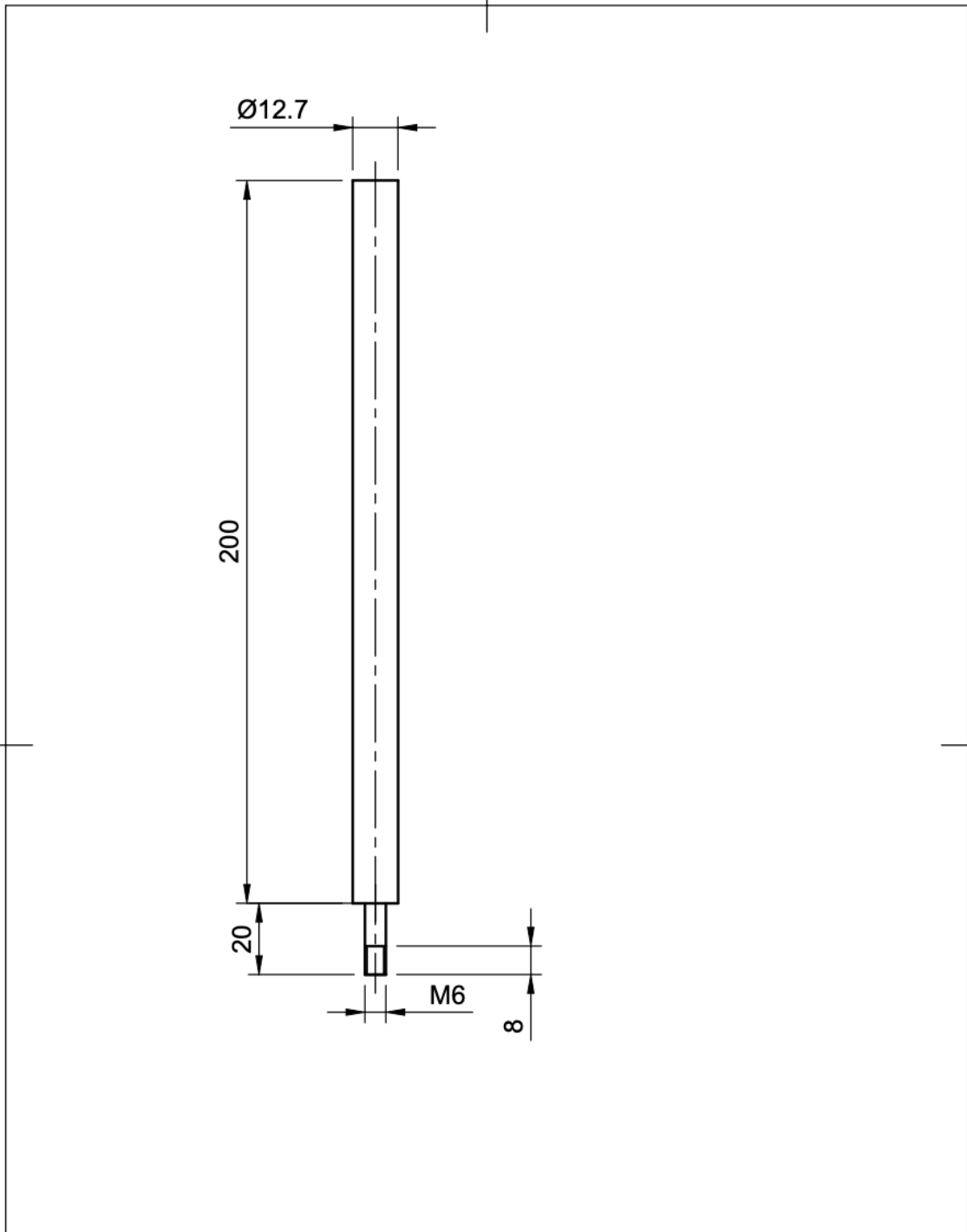
Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by
		Document type PLANOS	Document status	
		Title DEFLECTORES	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 8/10

Plano 9. Agitador



Dept. ESPOL	Technical reference	Created by WU & CHICA	1/14/20	Approved by	
		Document type PLANOS	Document status		
		Title AGITADOR ESCALA 1:1	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 9/9	

Plano 10. Eje principal



Dept. ESPOL	Technical reference	Created by Hung Wu	1/14/20	Approved by	
		Document type PLANOS	Document status		
		Title EJE PRINCIPAL	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 10/10	