

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Diseño y construcción de un espumador de leche en frío de  
bajo costo con capacidad de dos tazas para uso en  
cafeterías  
Dispositivos tecnológicos**

**Gino Andrés Romo Re**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 9 de mayo de 2016

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño y construcción de un espumador de leche en frío de bajo costo con  
capacidad de dos tazas para uso en cafeterías**

**Gino Romo**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Michel Vargas, Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 9 de mayo de 2016

## **Derechos de Autor**

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

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

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Gino Andrés Romo Re

Código: 00103077

Cédula de Identidad: 1719140509

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2016

## RESUMEN

Este proyecto surge de la motivación de implementar una máquina espumadora de leche de bajo costo para la cafetería Casserole ubicada en la ciudad de Quito. Esta cafetería se la puede categorizar como de tamaño mediano y quiere innovar con bebidas espumantes frías para tener una ventaja competitiva. En el mercado nacional, existen varias opciones de máquinas espumadoras de grado industrial a costos elevados. Estos espumadores de grado industrial generalmente utilizan vapor, por cuanto dificultan la elaboración de bebidas espumadas frías. Por tal razón, este trabajo busca satisfacer esta necesidad a través del diseño y construcción de una máquina espumadora de leche en frío de bajo costo. Este reporte muestra el proceso de diseño, dimensionamiento y construcción de este equipo usando herramientas informáticas; así como diversos procesos de fabricación y montaje, tales como: fresado, torneado, soldado, entre otros. De igual manera, se incluyen las conexiones de un circuito eléctrico sencillo para energizar el sistema y producir el movimiento de agitación mecánica. Finalmente, se realiza pruebas de funcionamiento para calibración y ajuste de parámetros, lográndose un correcto desempeño del equipo al producir dos tazas de leche espumada en 6 minutos. La máquina ha sido diseñada con un variador de velocidad de agitación que permite controlar la cantidad de espuma producida. Puede llegar a funcionar a una velocidad máxima de 4500 rpm. El diseño de la máquina permite el correcto mantenimiento y desinfección del aparato. Finalmente, la producción de la máquina dentro del país se logró con un costo bajo de \$91.30, comparado con el costo de alrededor de \$300 (incluidos aranceles y costos de importación) de una máquina de características similares.

Palabras clave:

Espumador

Leche

Diseño

Construcción

Bebidas con leche

## ABSTRACT

This project arises from the motivation to implement a low-cost milk frother for Casserole Cafeteria located in the city of Quito. This business is categorized as a medium-size cafeteria that wants to provide frothy-milk-foam-based cold beverages to develop a competitive advantage. In the domestic market, there are several options of foaming machines of an industrial grade which are very expensive. Since these industrial grade machines generally use steam for creating the foam, they hinder the production of these cold beverages. Therefore, this project tries to mitigate this problem through the design and construction of an inexpensive cold milk frother. This report shows the process of designing, sizing and construction of this machine using different manufacturing and assembly processes, such as milling, turning, welding, among others. In addition, a simple circuit is included for energizing the system and providing the power to produce the mechanical agitation. Finally, performance testing for calibration and parameter setting is pursued. Proper performance is achieved after a few adjustments: two cups of frothed milk in 6 minutes. The agitation velocity can be varied impacting in the amount of milk foam produced. The maximum agitation velocity is 4500 rpm. The implemented design allows for proper maintenance and disinfection of the unit. Finally, the local production of this piece of equipment is achieved with a low cost of \$ 91.30 compared to a cost of \$ 300 (including all costs related to overseas shipment and fees) for a machine with similar characteristics.

Keys words:

Frother

Milk

Design

Construction

Milk drinks

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	9
Desarrollo del Tema .....	14
<i>Criterios de diseño</i> .....	14
<i>Diseño</i> .....	14
Fabricación .....	30
Pruebas De Funcionamiento .....	44
Costos.....	49
Conclusiones y Recomendaciones.....	50
Referencias Bibliográficas .....	51
Anexo A: Planos De Conjunto Y De Taller Del Espumador Diseñado.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de la leche fría entera.....	10
Tabla 2: Bacterias supervivientes después de limpiar la superficie .....	12
Tabla 3: Materiales para la fabricación del espumador.....	16
Tabla 4: Piezas compradas localmente para el espumador .....	16
Tabla 5: Características de la máquina.....	19
Tabla 6: Velocidad de giro en rpm del agitador a distintos voltajes de alimentación al motor en vacío.....	46
Tabla 7: Efectividad de generación de espuma en relación al tiempo de agitación. Resultados obtenidos a una velocidad de giro de alrededor de 4500 rpm. ....	47
Tabla 8: Análisis de costos en la producción de la máquina.....	49

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Jarra diseñada en CAD .....	20
Figura 2: Pivote de la jarra diseñado en CAD .....	21
Figura 3: Base diseñada en CAD .....	22
Figura 4: Base soldada con los soportes de la tapa inferior diseñada en CAD .....	23
Figura 5: Pivote de la base diseñado en CAD .....	24
Figura 6: Motor importado de la librería de Inventor .....	25
Figura 7: Sujetador para el motor diseñado en CAD .....	26
Figura 8: Pieza soporte entre motor e imanes diseñado en CAD .....	27
Figura 9: Pieza superior del soporte entre imanes y eje del motor para cerrar el sistema tipo cubo .....	28
Figura 10: Pieza base del agitador donde se coloca el espiral diseñado en CAD .....	29
Figura 11: Ensamble de partes y máquina terminada en 3D en el programa Inventor .....	30
Figura 12: Tomado del libro de Groover, estilos de desbaste (Groover, 2010) .....	33
Figura 13: Torneado del soporte para el motor en duralón .....	34
Figura 14: Torneado para el pivote de la jarra y la base en acero AISI 304 .....	35
Figura 15: Corte de la pieza terminada .....	36
Figura 16: Desbaste para el maquinado del pivote .....	37
Figura 17: Soporte y pivote terminados de maquinar .....	38
Figura 18: Fresadora realizando agujero en la jarra .....	39
Figura 19: Especificación de preparación de junta a tope para soldar chapa de acero AISI 304 .....	40
Figura 20: Pivote y base soldada .....	40
Figura 21: Proceso de impresión 3D .....	42
Figura 22: Agitador terminado obtenido por proceso de impresión 3D .....	42
Figura 23: Sujetador de imanes en el eje del motor con imanes incluidos .....	43
Figura 24: Piezas separadas en el diseño de Inventor para observar su ubicación .....	43
Figura 25: Máquina terminada .....	44
Figura 26: Medición de revoluciones con tacómetro láser .....	45
Figura 27: Cantidad de espuma vs tiempo en el proceso de espumado a 4500rpm .....	47
Figura 28: Espuma realizada por la maquina en 6 minutos .....	48



## INTRODUCCIÓN

El expendio de bebidas cremosas de café y bebidas derivadas ha tenido una excelente acogida a nivel mundial por su agradable textura y sensación al paladar. Esta especial textura se logra utilizando leche espumada, en vez de crema u otros aditivos. Normalmente, para la generación de grandes cantidades de leche espumada, las cafeterías utilizan máquinas que inyectan vapor de agua en la leche para generar la espuma. La leche espumada luego es combinada con la bebida caliente y se obtiene una bebida de consistencia cremosa. Actualmente, existe la tendencia de preparar bebidas cremosas frías que presentan una cierta dificultad al ser preparadas por métodos que utilizan vapor de agua. La razón fundamental es la inestabilidad de la espuma caliente al contacto con líquidos fríos. Para remediar esta situación, se ha diseñado máquinas espumadoras de leche en frío.

### **Espumado de Leche**

El proceso de espumado se explica por el encapsulamiento de aire por grasa emulsificada que se observa como millones de pequeñas burbujas de aire separadas por finas paredes de líquido que las rodean (Margarita, 2012)(Huppertz, 2010). La principal característica para poder espumar cualquier líquido es que éste posea agentes espumantes (estabilizantes) que, en el caso de la leche, son las proteínas. Las proteínas de la leche se sitúan en las delgadas paredes de las burbujas formando una estructura elástica que impide que éstas colapsen, manteniendo la firme y cremosa textura buscada (Huppertz, 2010). Consecuentemente, la leche entera promueve la mayor creación de espuma por su alto contenido graso y proteínico de alrededor de 4.8% respectivamente (Murad, n.d.). Por cuanto, permite la formación de burbujas de una manera más adecuada y rápida. Las características de la leche entera se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Características de la leche fría entera

<b>Características de la leche fría entera</b>	<b>Cantidades</b>
calorías	59 a 65 kcal
carbohidratos	4.8 a 5 gr.
proteínas	3 a 3.1 gr.
grasas	3 a 3.1 gr.

## **Espumadores de leche**

Una máquina espumadora en general tiene la función de agitar un líquido con características físicas y químicas adecuadas que permitan obtener un espumante como resultado de la creación de burbujas de aire estabilizadas por películas delgadas de fluido. Al agitar dentro de un contenedor o recipiente, el líquido es sometido a una fuerza por cizallamiento que genera la espuma. La operación puede ser realizada en frío o caliente.

Existen 3 tipos de espumadores en el mercado: el electromecánico, el de vapor y el manual. El espumador electromecánico funciona por medio de agitación a través de un rotor a altas revoluciones (normalmente trabajan a velocidades desde 2500rpm). Pueden ser inalámbricos, de costo moderado y generalmente son de uso doméstico por la cantidad de espuma obtenida. El de vapor, como su nombre lo indica, utiliza vapor para espumar la leche y la caliente. Son de gran capacidad, alto costo, y relativamente peligrosas por el contacto cercano del personal con vapor de agua presurizado y caliente. Finalmente, el espumador manual produce espuma a través de agitación de una malla dentro de la leche. La producción de espuma depende de la velocidad que la persona pueda llegar a agitar esta malla con su mano. Son categorizados como de uso doméstico personal por la baja capacidad de generación de espuma y son propensos a los derrames por mala operación. Tienen un bajo costo. De estas máquinas, la más cercana a resolver la necesidad propuesta en este proyecto es

el espumador electromecánico. Por cuanto, se estudia brevemente sus características en la sección siguiente.

## **Espumador electromecánico**

Un espumador estándar de este tipo está compuesto desde la parte superior por los siguientes componentes: tapa superior, jarra, base, motor, soporte del motor, componentes electrónicos, controles de mando y tapa inferior de la base. Los equipos comerciales normalmente tienen la jarra unida al sistema de motor y control electrónico (Prestazion, 2016). Si bien esto hace que la máquina sea más atractiva a la vista, en la práctica no permite un fácil mantenimiento, limpieza y esterilización de las partes en contacto con la leche.

En general, los espumadores domésticos de este tipo tienen un costo aproximado de 100 a 200 dólares americanos en el exterior (Ebay, 2016) que sumando un 50% compuesto de aranceles de importación, desaduanización y transporte (Teran, 2014) pueden llegar a un costo aproximado de 150 a 300 dólares.

En el Ecuador, no existe una industria dedicada a la producción de máquinas espumadoras de leche. Los equipos comercializados localmente son fabricados en América del Norte y Europa por empresas como Severin, Philips, Nesspreso, Caso, JATA, Clatronic, entre otras. Severin es la compañía líder en el mercado con una gran variedad y calidad de modelos, los cuales difieren entre sí por características importantes como: la correcta operación, mantenimiento y limpieza del equipo.

## **Materiales para manejo y tratamiento de leche**

Según los lineamientos de la FDA (Food & Drug Administration) en Estados Unidos para la selección de materiales para el tratamiento y procesamiento de comida, se recomienda aquellos que tengan una baja proliferación de bacterias. Un estudio realizado por J.G DAVIS (2012) para evaluar la cantidad de bacterias que sobreviven en diferentes superficies de contacto expuestas a la leche después de ser limpiadas correctamente demostró que el acero inoxidable es el segundo material más apropiado en aplicaciones de esta índole dentro del grupo analizado como se ve en la tabla 2. El acero inoxidable es superado solamente por el vidrio para la manipulación de leche envejecida (Inoxidables, n.d.).

Tabla 2: Bacterias supervivientes después de limpiar la superficie

<b>Bacterias supervivientes después de limpiar las superficies en contacto con leche envejecida</b>	
<b>Superficie</b>	<b>Recuento por contacto por cm<sup>2</sup></b>
vidrio	0.4
acero inoxidable	2.2
esmalte vítreo	2.3
aluminio	4
poli estireno	8.9
esmalte	15.8
plástico laminado	26.2
madera	39
polietileno	48.5

Por otro lado, el uso de acero inoxidable en los sistemas de la industria alimenticia ha sido extenso debido a sus propiedades nobles, ya que permite un procesamiento adecuado de alimentos. Las características principales del acero inoxidable es la elevada resistencia a la corrosión, resistencia a la temperatura, capacidad anti-patogénica, entre otras (Cenidox, n.d.).

Por estas razones no necesita de recubrimientos que pueden requerir de cuidados especiales, evitando desprendimientos de partículas y otros daños asociados.

### **Objetivo general**

- El propósito de este proyecto de titulación es el de diseñar y construir una máquina espumadora de leche en frío de bajo costo con una capacidad de espumar 400 ml (2 tazas de 200 ml c/u) de leche líquida.

### **Objetivos específicos**

- Su diseño deberá considerar una fácil y total desinfección de los elementos en contacto con la leche.
- El equipo será construido con mano de obra y tecnología ecuatoriana.
- Su producción deberá tener un costo inferior al de importación de un equipo de similares características.

## DESARROLLO DEL TEMA

### Criterios de diseño

- Dado que se prevee un gran volumen de venta de bebidas espumadas frías, se considera fabricar una máquina completamente dedicada a este propósito. El prototipo deberá tener un costo inferior al ofertado localmente o al de una posible importación directa de un equipo de categoría semi-industrial.
- A más de reducir los costos involucrados, se considera como parámetro principal de diseño la facilidad de esterilización de los componentes en contacto con la leche. Por cuanto, el sistema eléctrico y motriz de la máquina estarán separados de la jarra.
- Se considera utilizar acero inoxidable para fabricar la jarra por sus excelentes propiedades para procesamiento de alimentos.

### Diseño

El método escogido para espumar la leche y poder fabricar la máquina planteada es el de agitación mecánica por medio de una hélice tipo espiral que gira a altas revoluciones. Este método permite espumar leche fría (alrededor de  $-2^{\circ}\text{C}$  al salir de la nevera) obteniendo una consistencia más cremosa. La hélice tipo espiral trabaja de manera óptima en este proceso por su mayor perímetro y condiciones geométricas adecuadas para la generación de burbujas.

Después de realizar una lluvia de ideas, la máquina a desarrollar está concebida como una jarra, dentro de la cuál gira un agitador (hélice tipo espiral). Dado que se requiere que los componentes se puedan limpiar adecuadamente, éstos deben ser independientes y

desmontables. Por tanto, se ideó un sistema magnético para transferir el torque del motor al agitador. Para ello, se decidió colocar el sistema motriz (motor eléctrico, el selector de encendido y apagado, el transformador de corriente para energizar el motor, y el sistema de imanes acoplados al eje motriz) dentro de una base resistente. Esta base contendrá también un sistema electrónico para poder regular la velocidad de giro (rpm) del motor a través del voltaje de trabajo. Mientras tanto, el agitador –también magnético- deberá girar dentro de la jarra sobre un pivote guía. Para garantizar el centramiento y movimiento adecuado de las partes, tanto la base como la jarra poseen un pivote guía que permite un acople adecuado entre sí. A su vez, dentro de este pivote se ubica el sistema motriz magnético que permite el movimiento de la hélice tipo espiral dentro de la jarra.

Tomando en cuenta las recomendaciones de la FDA, se decide utilizar acero inoxidable para la construcción de esta máquina. Para que funcione de manera óptima el sistema motriz magnético planteado, se selecciona un acero inoxidable AISI 304. Este acero austenítico es paramagnético (“no magnéticos”), por lo que no interactúa con campos electromagnéticos (Cenidox, n.d.)(Ugitech, n.d.). Los procesos de construcción para el prototipo se han seleccionado considerando un bajo costo y disponibilidad en el mercado local. Estos procesos son: torneado, fresado, corte con plasma, soldadura e impresión 3D.

En la tabla 3, se listan los materiales utilizados para la construcción del espumador.

Tabla 3: Materiales para la fabricación del espumador

<b>Materiales</b>	<b>Medidas[mm]</b>
Tubo de Acero AISI 304	60X100
Duralón	60X50
Plancha Acero AISI 304	250X250
Jarra Acero AISI 304	450X450
Resorte de Acero AISI 304	5X2X102
Plástico PLA para impresión 3D	De acuerdo a modelo

En la tabla 4, se listan los componentes comprados localmente que se instalarán en el espumador.

Tabla 4: Piezas compradas localmente para el espumador

<b>Piezas compradas localmente</b>	<b>Medidas[mm]</b>
Motor eléctrico 9V y 20 mA (Mabuchi)	32X20
Control de encendido	15X25X25
Imanes de Neodimio	5X5X3
Transformado de 120V a 9V	universal
Cable de conexión paralelo	1000

Por razones de costo, se decidió comprar una jarra de acero inoxidable AISI 304 existente en el mercado para ser modificada de acuerdo a lo requerido por el sistema (sistema de pivote en el fondo de la misma).

## **Dimensionamiento**

El equipo espumador de leche en frío es un sistema de agitación rápida, en el cual su dimensionamiento se basa en mecánica de fluidos. Se conoce que una agitación rápida necesita un flujo turbulento ( $Reynolds > 10000$ ), para lo cual se procede a la realización de los



cálculos necesarios que nos dará la potencia requerida para mezclar a régimen turbulento un líquido miscible como lo es la leche:

Parámetros de diseño:

$N = 2500$  RPM (Huppertz, 2010)

$D_{\text{rotor}} = 0,03$  m

Densidad de la leche =  $1032$  kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad de la leche =  $0.00030591486$  kg s/m<sup>2</sup> (Castillo, 2006)

Cálculos:

Con los parámetros ya establecidos, se procede a sacar la potencia del motor que se requiere para esta aplicación. Primero, se debe calcular el número de Reynolds de la leche mezclada con el agitador arriba descrito:

Número de Reynolds

$$N_R = n * \vartheta * \frac{D^2}{\mu}$$

Potencia

$$P = \frac{K}{g_c} (\vartheta * n^3 * D^2)$$

Donde:

$N_R$  es el número de Reynolds

P es la potencia

$n$  es número de rotaciones por segundo

$\vartheta$  es la densidad de la leche

D es el diámetro del roto

$\mu$  es la viscosidad de la leche

$g_c$  es el factor de conversión de unidades

Cálculos numéricos:

$$N_R = n * \vartheta * \frac{D^2}{\mu} = 41.44(1032) \frac{0.03^2}{0.000305914} = 1.25 \times 10^5$$

Este número de Reynolds, al ser mayor a 10000, nos permite determinar que el fluido se encuentra en un estado turbulento para el diámetro del rotor elegido: por lo que la leche va a espumar de una manera adecuada (White, 2010). Con este valor y la tabla de rotores para mezclar líquidos especificada en el libro de White, se obtiene el factor K(White, 2010) que es el número de potencia para poder dimensionar la potencia del motor.

$$P = \frac{5}{9.81} (1032 * 41.46^3 * 0.03^2) = 0.9241 \left[ Kg \frac{m}{s} \right]$$

Por medio de una transformación de unidades, se obtiene la potencia en HP y Watts

$$P = 0.012 \text{ Hp} = 9 \text{ [W]} \text{ (White, 2010)}$$

## Modelado Geométrico de la máquina

El concepto del prototipo es diseñado mediante el software Inventor (Adobe, 2015) que permite realizar el modelado geométrico y simulación respectiva de las partes, para luego obtener los planos de construcción y generar el ensamble final del sistema en 3D. Una vez obtenidos estos planos, se procede a la elaboración de las piezas. Para esto se requirió planificar los procesos de fabricación de acuerdo a los materiales de construcción, así como identificar los componentes a ser adquiridos. La máquina cuenta con un total de 10 piezas diseñadas en Inventor que podemos ver detalladamente en las figuras a continuación. El sistema propuesto consta de: jarra de acero inoxidable y tapa, motor de 550W, alambre para energización, base de acero inoxidable con tapa, selector de encendido y apagado, imanes y su sistema de sujeción al eje de motor, y rotor (hélice tipo espiral con soporte).

Las características de la máquina como motor, dimensiones y capacidades se listan en la tabla 5.

Tabla 5: Características de la máquina

<b>Características de la máquina</b>	
Color/Material	Gris(acero)
Capacidad	1000 ml
Potencia	Aprox. 10 W
Tamaño espiral	5X2X102 [mm]

La jarra fue modelada utilizando la geometría de la jarra adquirida localmente, pero con un pequeño cambio en el fondo de la misma (ver figura 1.). En este lugar se realiza un

agujero, en el que posteriormente se soldará la pieza pivote guía (pieza que se conjugará con el pivote de la base).



Figura 1: Jarra diseñada en CAD

En la figura 2, podemos observar el diseño del pivote que va a ir soldado en el fondo de la jarra. Este elemento es torneado a partir de un eje.

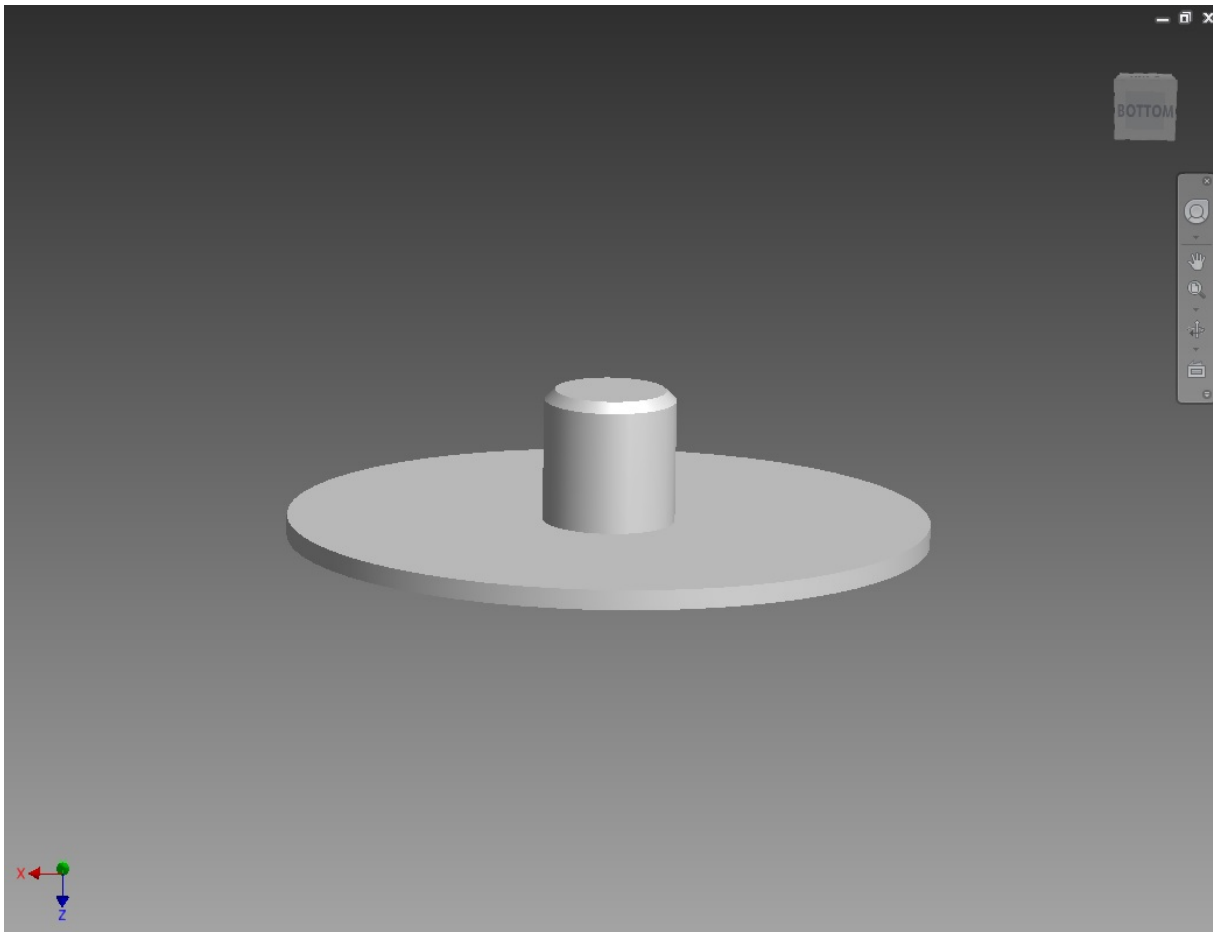


Figura 2: Pivote de la jarra diseñado en CAD

La base diseñada (figura 3) es simplemente un cuadrado de medidas seleccionadas, de tal manera que permita ubicar todos los elementos motrices y electrónicos del sistema. Dentro de la base, se encuentran soldados los soportes para permitir la sujeción de la tapa inferior (figura 4).

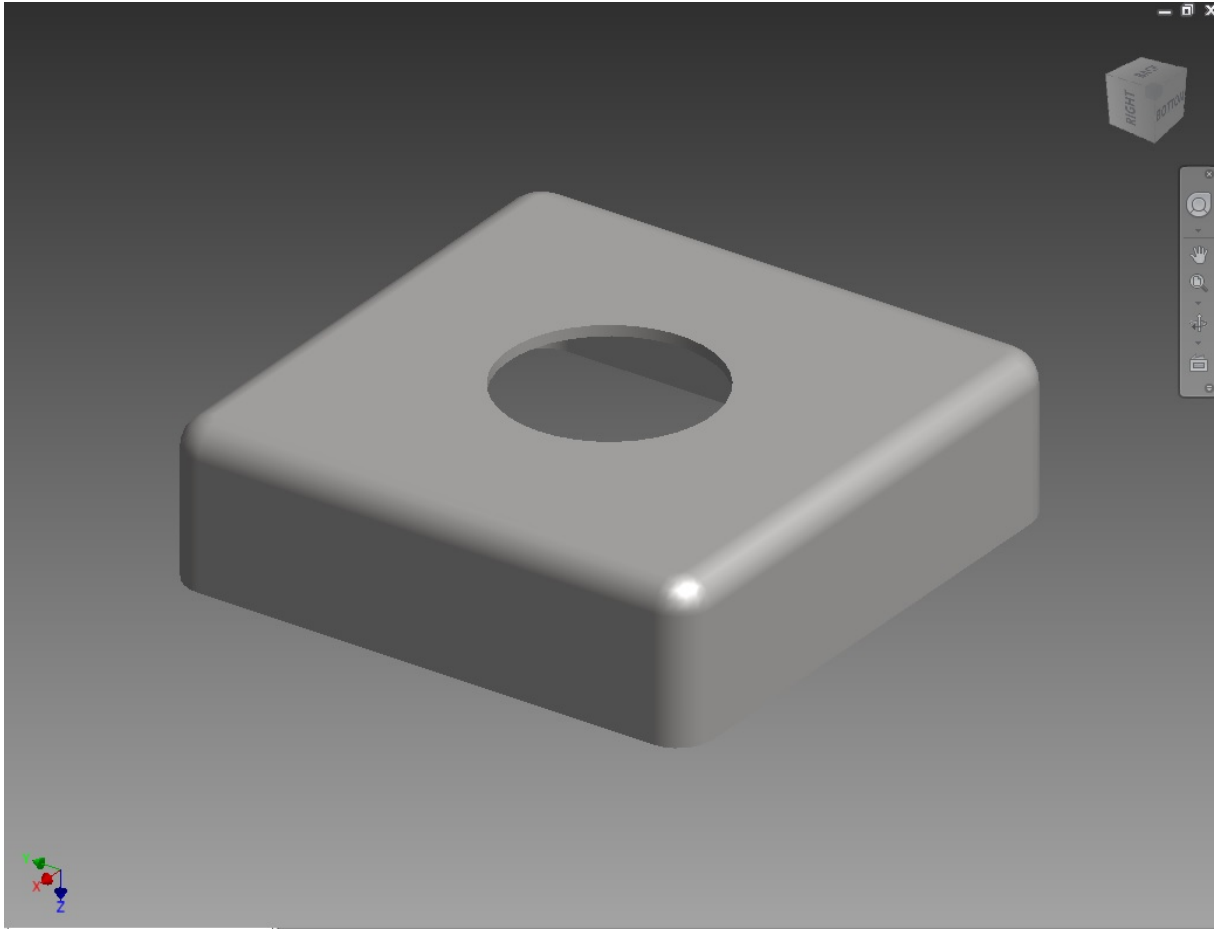


Figura 3: Base diseñada en CAD

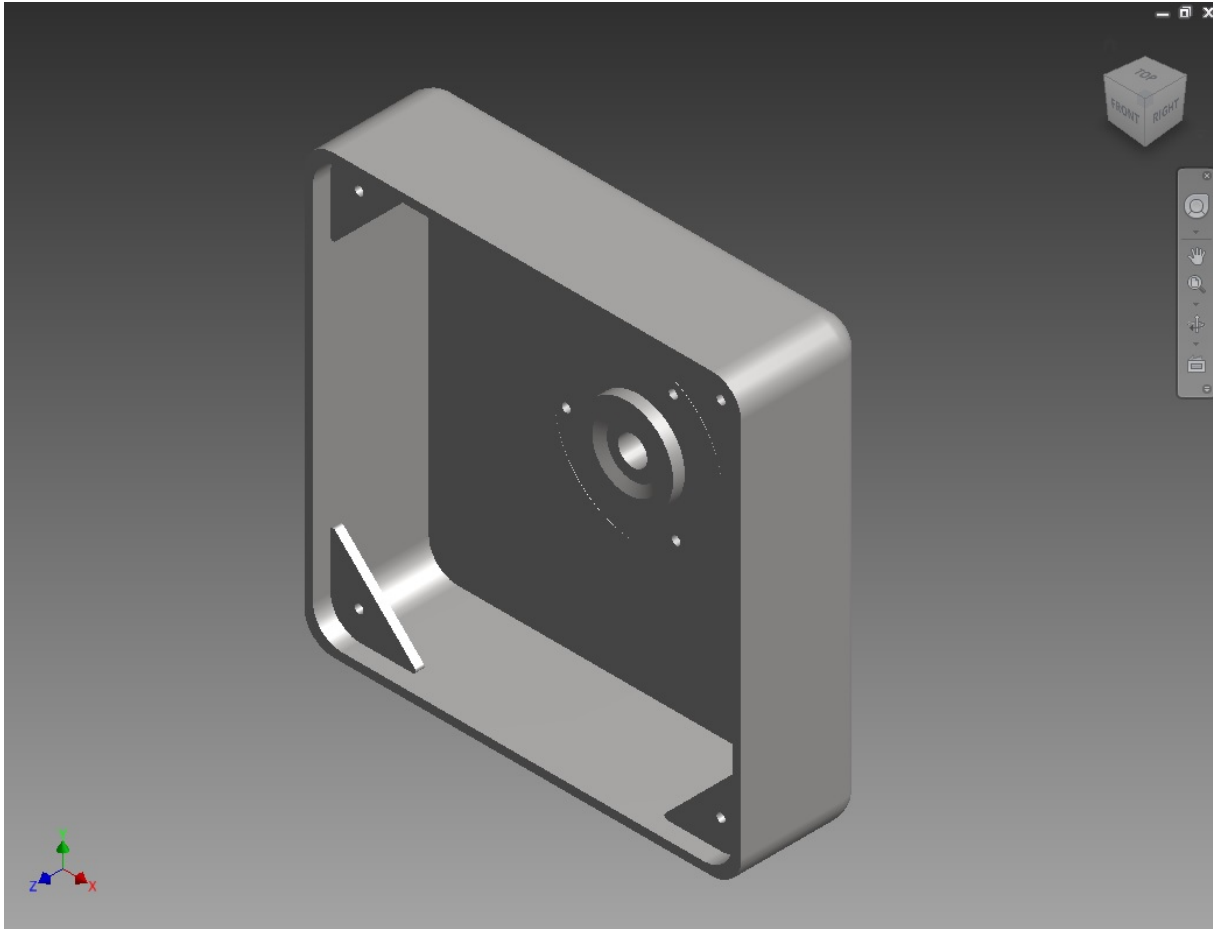


Figura 4: Base soldada con los soportes de la tapa inferior diseñada en CAD

El pivote para la base (figura 5) es un pivote diseñado con dimensiones un poco menores a las del pivote de la jarra, ya que uno tiene que entrar dentro del otro para guiar el correcto acoplamiento jarra-base. El ajuste planificado para este ensamble es de una décima de milímetro.



Figura 5: Pivote de la base diseñado en CAD

El gráfico del motor utilizado en la máquina es diferente al presentado en Inventor. Esto se debe a que se importó un diseño de motor encontrado en la librería del programa informático, ajustándolo a los tamaños requeridos (figura 6).



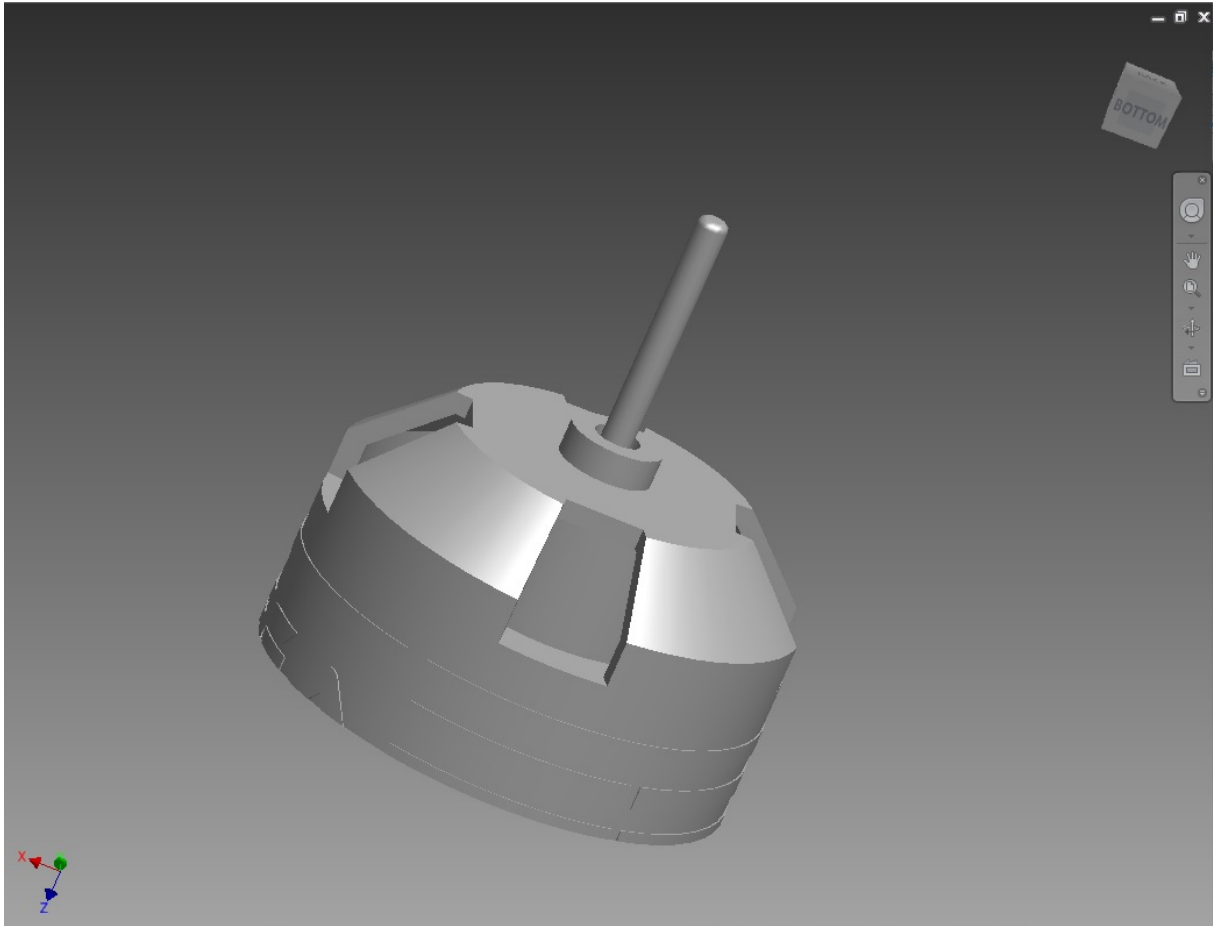


Figura 6: Motor importado de la librería de Inventor

Para la sujeción correcta del motor (para así evitar descentramiento, deslizamiento y otros errores), se diseñó una pieza en duralón como se observa en el modelo CAD (figura 7).

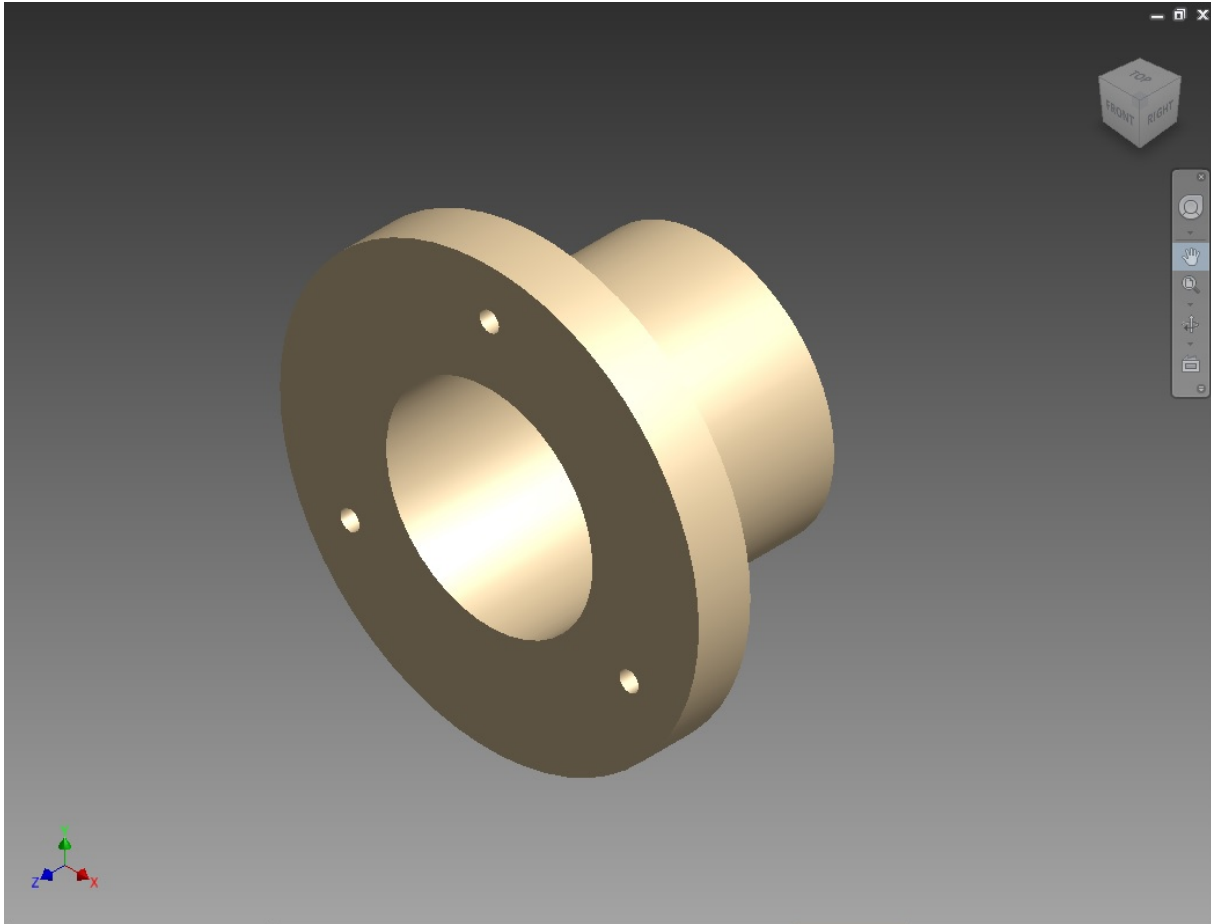


Figura 7: Sujetador para el motor diseñado en CAD

También se diseñó pequeñas piezas donde los imanes van a ser insertados para estar acoplados al eje del motor. Estas piezas son dos separadas (figura 8. y figura 9.). Estas piezas permiten que los imanes permanezcan solidarios al eje. Las binchas van a encerrar a los imanes como un cubo de sujeción.

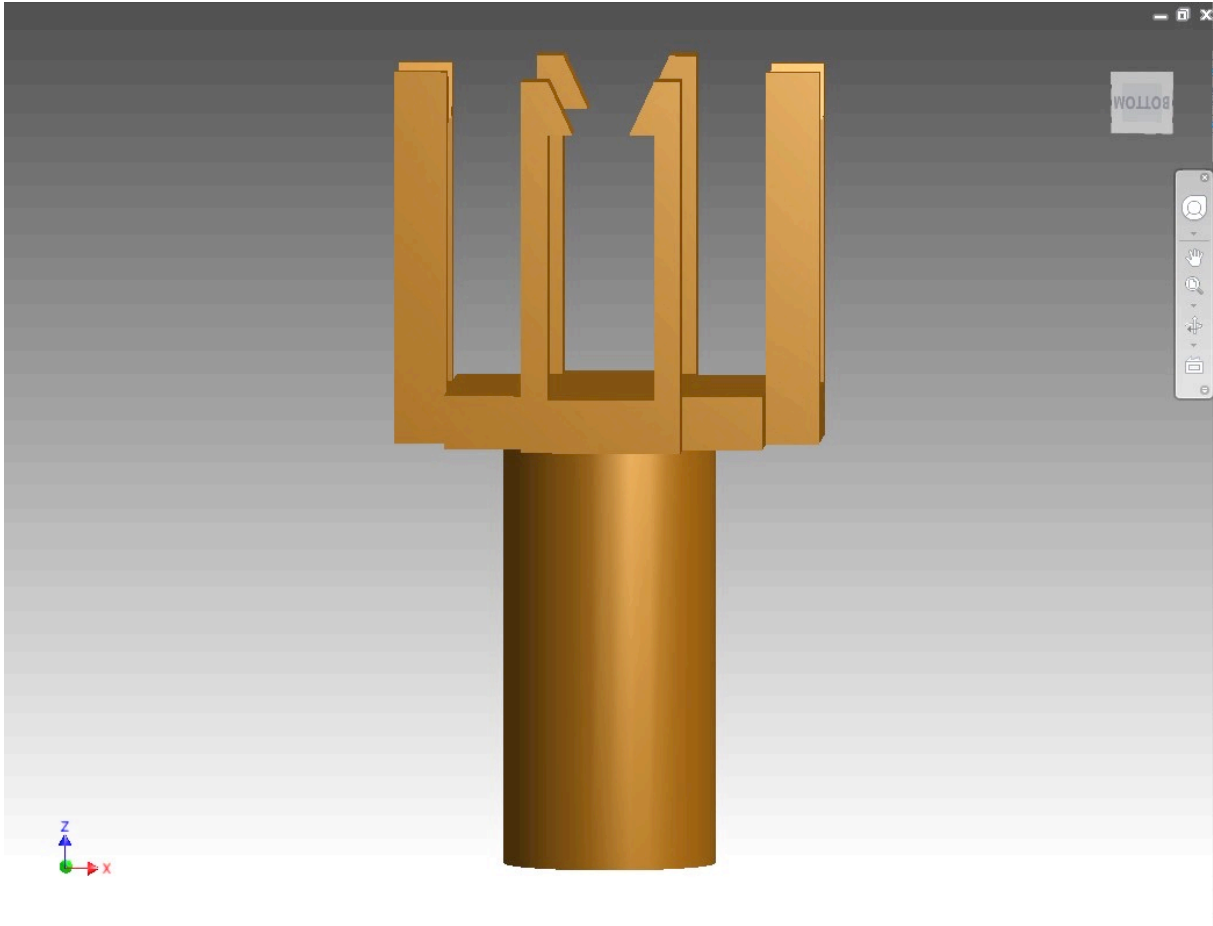


Figura 8: Pieza soporte entre motor e imanes diseñado en CAD

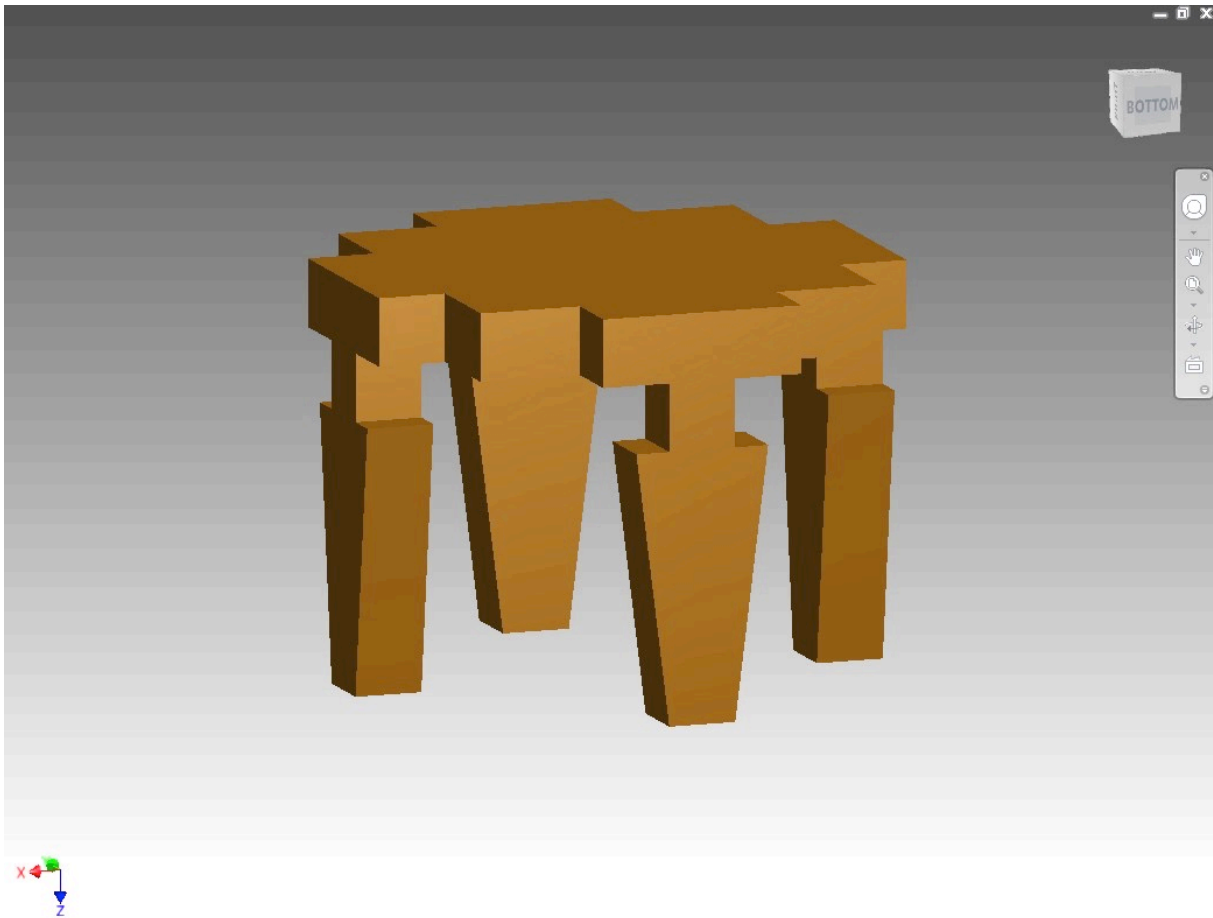


Figura 9: Pieza superior del soporte entre imanes y eje del motor para cerrar el sistema tipo cubo

Para concluir con el proceso de diseño de piezas, el agitador se modela. de tal manera de poder colocar los imanes en sus cuatro esquinas como se observa en la figura 10; así como el espiral de acero inoxidable AISI 304 a su alrededor con una pequeña guía.

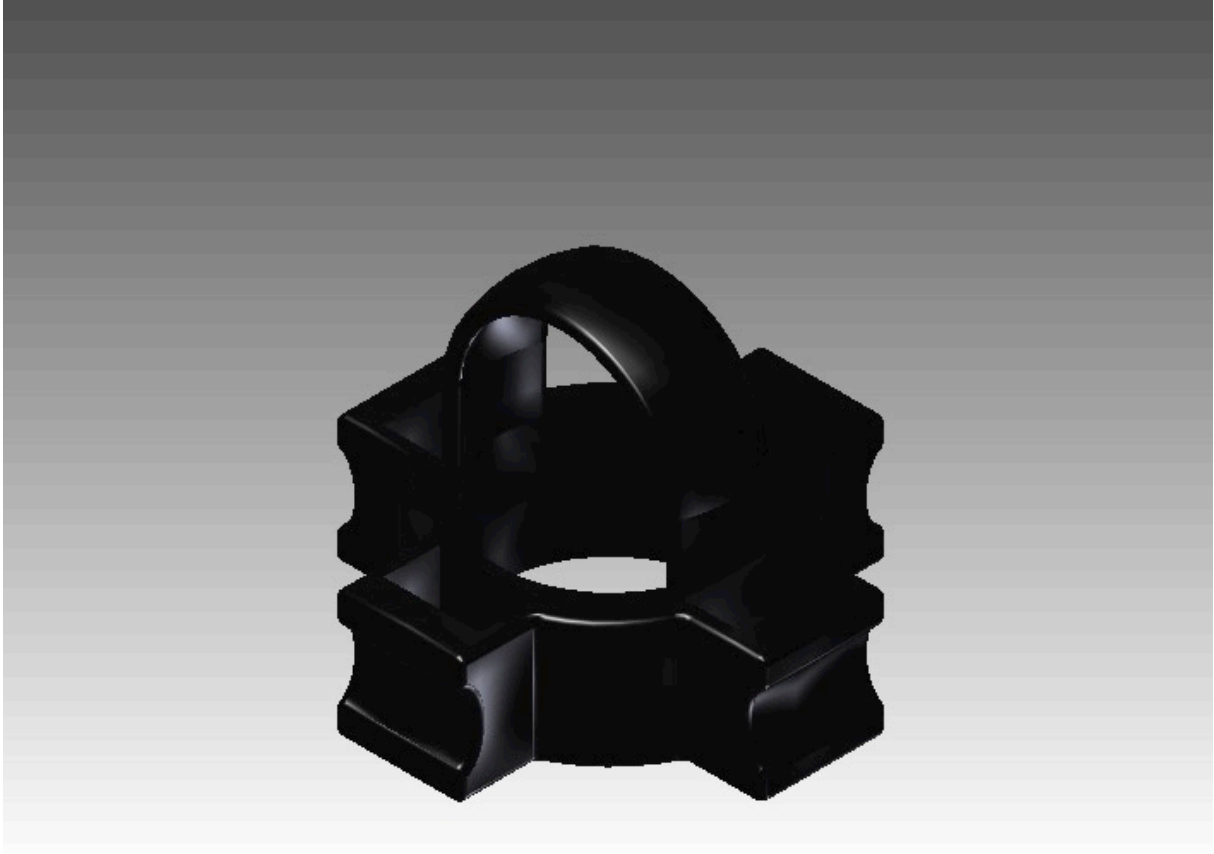


Figura 10: Pieza base del agitador donde se coloca el espiral diseñado en CAD

Finalmente, para poder observar el sistema en su totalidad se procede a realizar el ensamble con todas las partes generadas en el programa Inventor. En este proceso, se colocada todas y cada una de las piezas en la posición en la que deberán ser ensambladas. De esta manera, se verifica ajustes y acoples incorrectos. En la figura 11, se puede observar el diseño y ensamble final de la máquina.

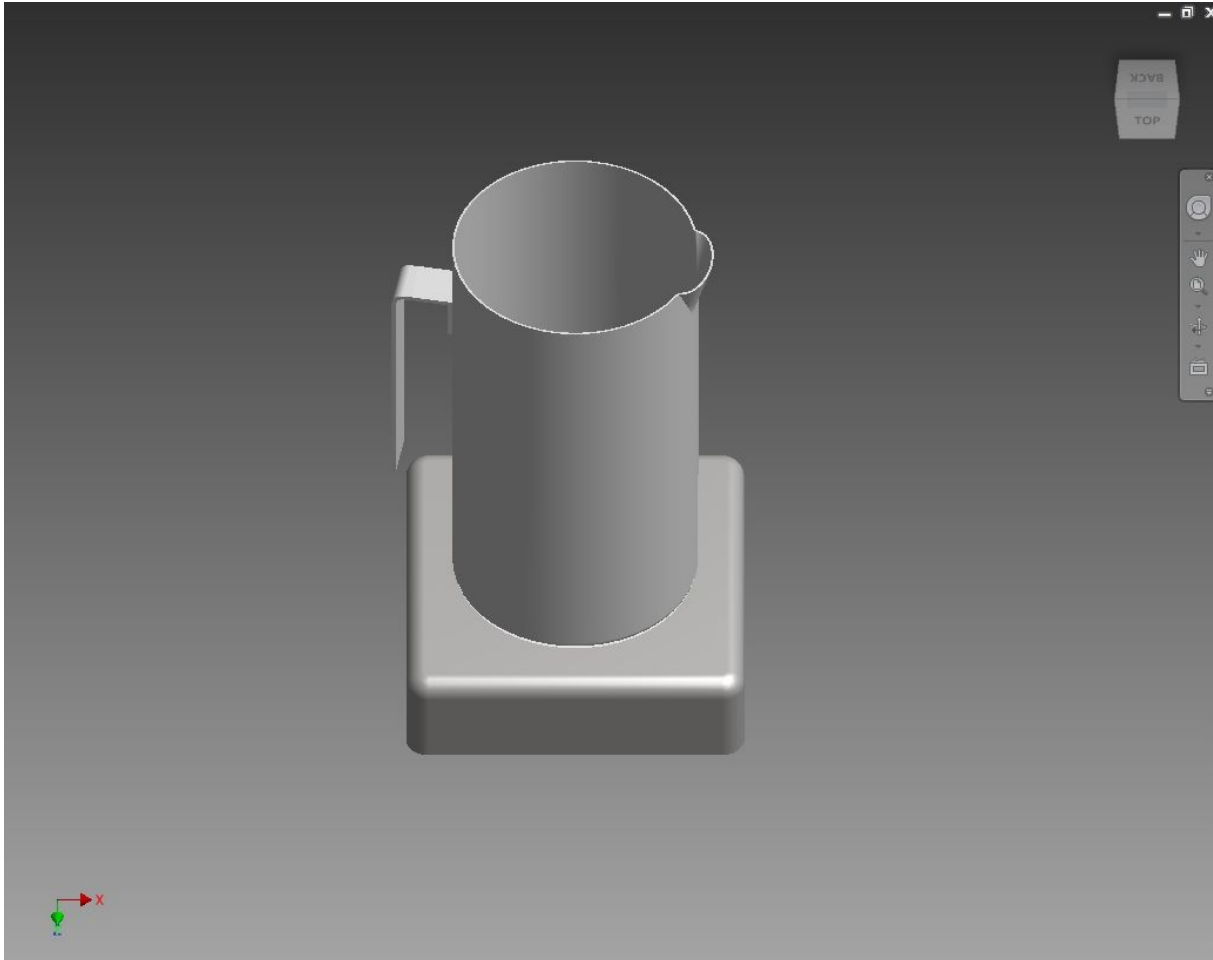


Figura 11: Ensamble de partes y máquina terminada en 3D en el programa Inventor

Los planos de taller con todas las especificaciones requeridas para su fabricación se encuentran en el anexo A al final del documento.

## **Fabricación**

Una vez realizado el dimensionamiento y diseño asistido por INVENTOR, se procede a la fabricación mediante maquinado de piezas y partes del equipo, a través de los siguientes procesos de mecanizado:

Torneado:

Para el proceso de torneado en acero AISI 304, se utilizó un eje de 60 [mm] de diámetro que es el vendido comercialmente y fue maquinado a las dimensiones especificadas en los planos. Para este eje, se hicieron los siguiente cálculos:

Avance de desbaste recomendado para acero AISI 304 = 0.4 [mm/rev]

Velocidad de corte recomendada = 175 [m/min]

(Herriko, 2011)

Para poder sacar la velocidad de corte, se usa la siguiente fórmula:

$$n_{rpm} = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$$

$$n_{rpm} = \frac{1000 * 175}{\pi * 60} = 928.40 \left[ \frac{rev}{min} \right]$$

Para calcular el tiempo de maquinado, se usa la siguiente ecuación:

$$T_m = \frac{\pi * D * L}{fv}$$

Donde:

D es el diámetro inicial de la pieza

L es el largo de la pieza

F es el avance para el material

V es la velocidad de corte

Se obtiene:

$$T_m = \frac{\pi * 60 * 40}{0.4 * 175} = 107.71[seg] = 1.79[min]$$

Este tiempo calculado para el maquinado de la pieza de acero inoxidable AISI 304, es especificado para una herramienta de corte Corocut de profundidad de 2[mm] en un torno CNC. Cabe recalcar que para el maquinado real se usó un torno manual.

Para el maquinado de la pieza de soporte del motor, se usó como material el duralón. Por cuanto, se requiere de las siguientes características ya tabuladas(Esinger, 2013) para calcular tiempos de maquinado y velocidad de corte.

Ángulo de incidencia = 5-10

Ángulo de arranque = 5-8

Ángulo de colocación de herramienta = 10

Velocidad de corte = 150-500 [rpm]

Avance = 0.1-0.3

Con estos datos, podemos calcular:

Velocidad de corte:

$$V = \frac{500(\pi)(60)}{1000} = 94.24[\frac{m}{min}]$$

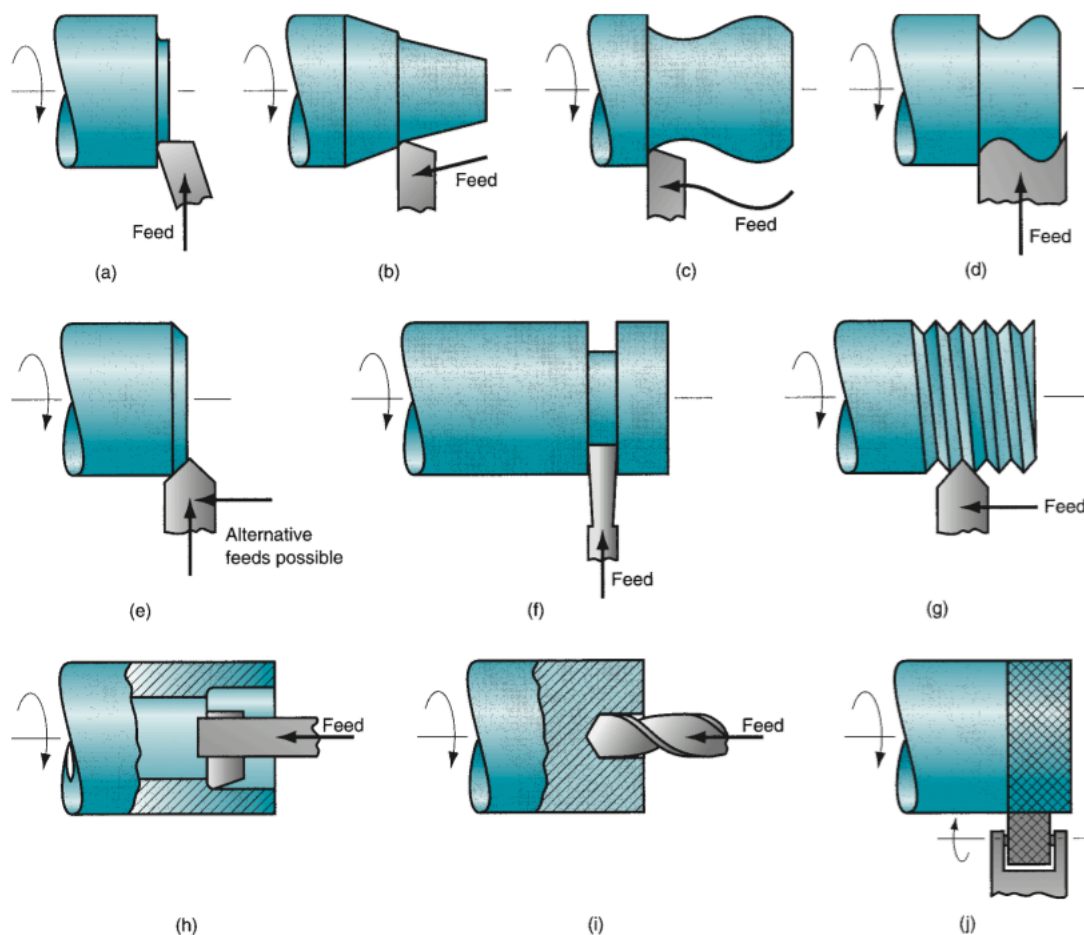
Tiempo de maquinado:

$$T_m = \frac{\pi * 60 * 60}{0.2 * 94.24} = 500.04[seg] = 3.43[min]$$



Este tiempo de maquinado es estimado para cualquier fabricación (manual, CN o CNC) de manera teórica. Sin embargo, el torno usado en la fabricación de la pieza fue un torno manual y el tiempo de maquinado varía un poco.

Las herramientas de corte para la fabricación de piezas en el torneado depende de lo que se pretende realizar en la misma: si se trata de maquinado bordes internos o externos, hacer un desbaste o una ranura, dar una forma específica, eliminar aristas vivas, etc. (Herriko, 2011). Algunas operaciones estándar se pueden observar en la figura 12.



**FIGURE 22.6** Machining operations other than turning that are performed on a lathe: (a) facing, (b) taper turning, (c) contour turning, (d) form turning, (e) chamfering, (f) cutoff, (g) threading, (h) boring, (i) drilling, and (j) knurling.

Figura 12: Tomado del libro de Groover, estilos de desbaste (Groover, 2010)

En las figuras a continuación, se puede observar el proceso de fabricación de las diferentes piezas. Los parámetros de corte han sido calculados y se utiliza el diseño en Inventor para obtener sus dimensiones.



Figura 13: Torneado del soporte para el motor en duralón



Figura 14: Torneado para el pivote de la jarra y la base en acero AISI 304



Figura 15: Corte de la pieza terminada

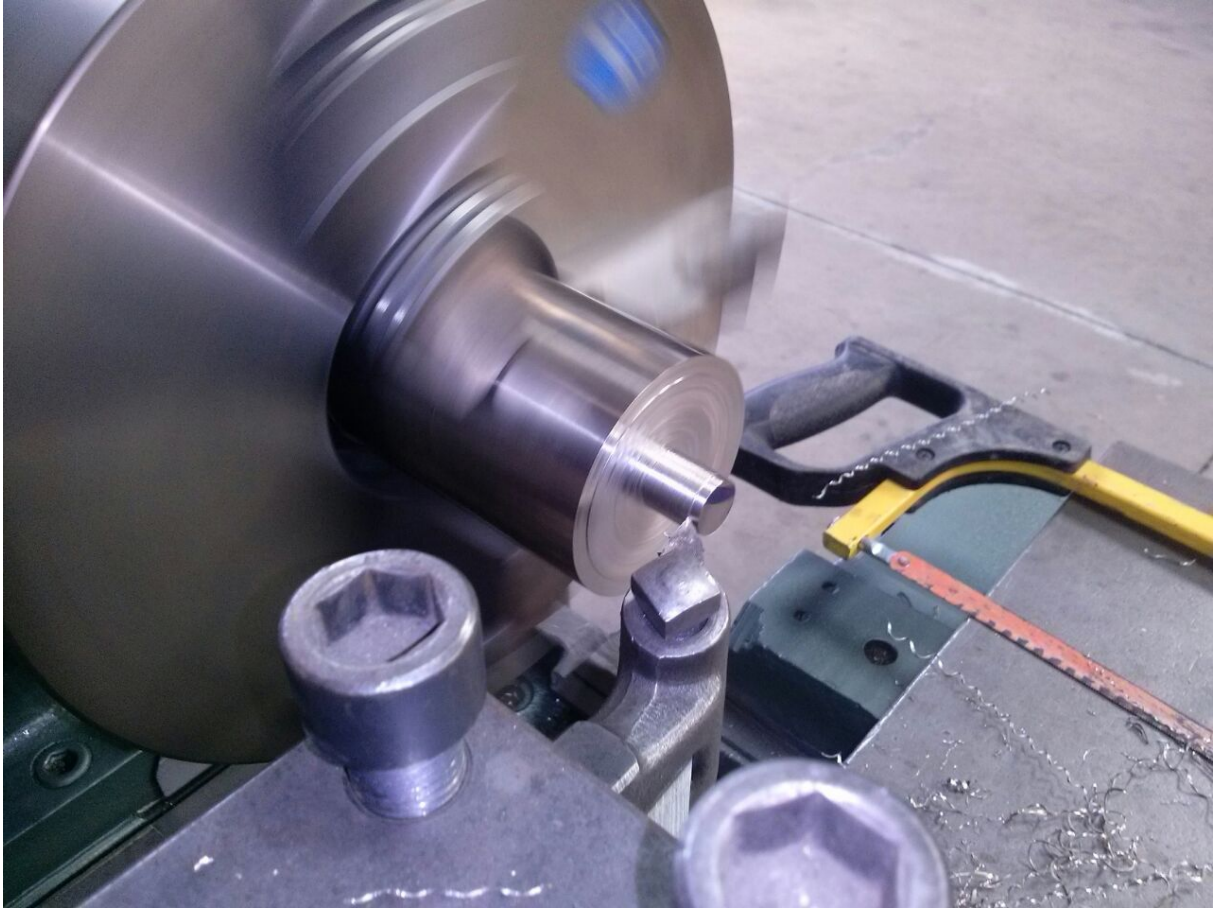


Figura 16: Desbaste para el maquinado del pivote



Figura 17: Soporte y pivote terminados de maquinar

### **Fresado:**

El proceso de fresado que se usó en la construcción de esta máquina fue sencillo. Se realizó un agujero en el fondo de la jarra adquirida localmente para posteriormente soldar el pivote (ver figura 18). En este proceso se hizo un cálculo de tiempo de maquinado similar al que se hizo para el torneado.



Figura 18: Fresadora realizando agujero en la jarra

Para este proceso se utilizó una herramienta de corte de cara (Groover, 2010), la cual permite el desbaste directo en una forma circular y centrada.

### **Soldadura:**

El proceso de soldadura usado en la fabricación de la máquina fue para unir las piezas de los pivotes tanto a la base como a la jarra. Para ello, se especificó la preparación de junta según la figura 19. El proceso de soldadura es de arco eléctrico con electrodo de Tungsteno y gas protector de Argón (TIG), usando material de relleno especificado igual al de base: acero AISI 304 (Gómez, 1986).

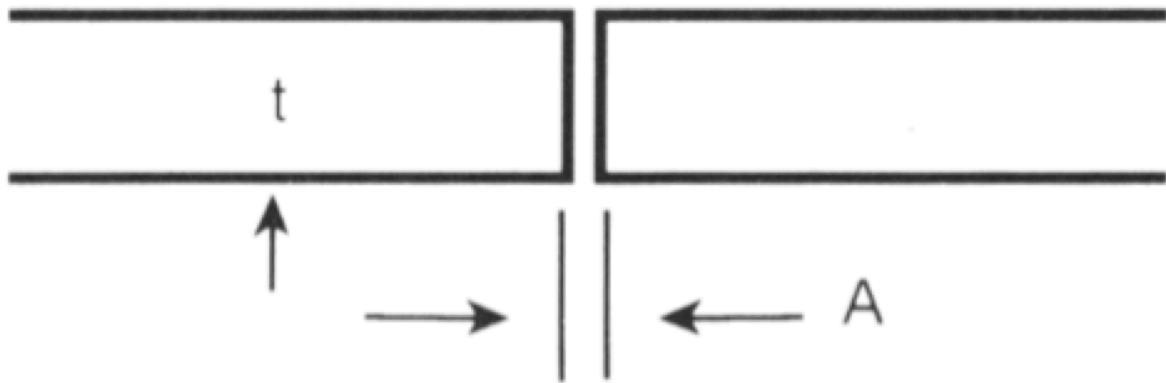


Figura 19: Especificación de preparación de junta a tope para soldar chapa de acero AISI 304  
Donde A puede tomar valores desde 0.8 a 2.2 mm y t un valor máximo de 3.2mm.



Figura 20: Pivote y base soldada



## **Impresión 3D**

La fabricación de las piezas del agitador y el sujetador de imanes que va acoplado al eje del motor se la realizó a través de impresión 3D con un polímero inocuo y biodegradable (PLA). Este método permite fabricar piezas complicadas de una manera rápida y efectiva en bajas cantidades. Esta impresión debe ser realizada por una impresora profesional, ya que se debe tener una calidad superior para que estas piezas posean medidas correctas con tolerancias adecuadas (discrepancias máximas de 0.1 milímetros para nuestra aplicación). En las figuras 21, 22 y 23 podemos observar el proceso de impresión y las piezas terminadas.

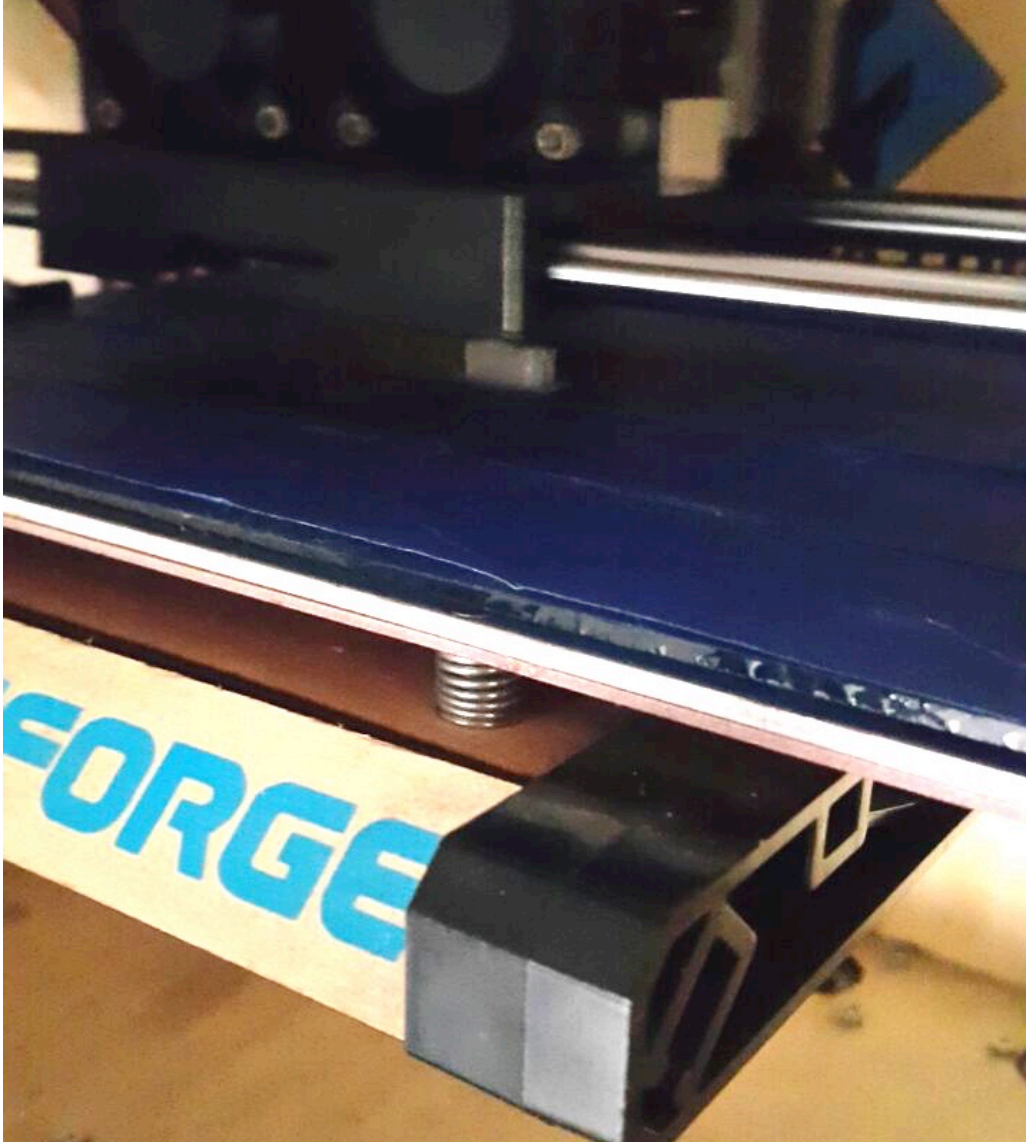


Figura 21: Proceso de impresión 3D



Figura 22: Agitador terminado obtenido por proceso de impresión 3D

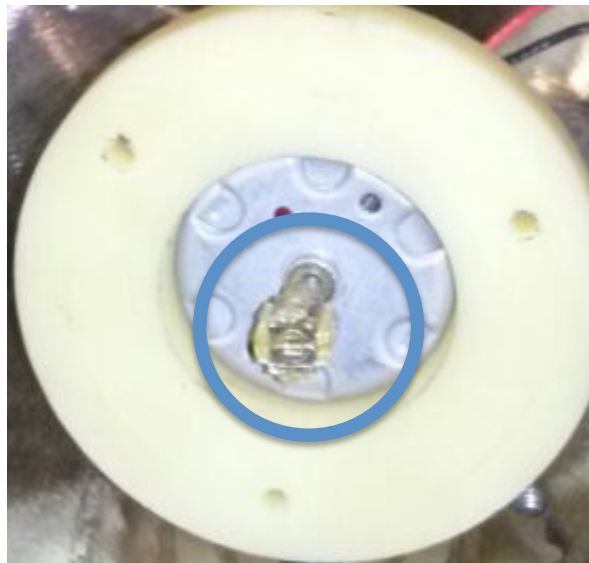


Figura 23: Sujetador de imanes en el eje del motor con imanes incluidos

En la figura 24, se puede observar el despiece del sistema realizado en Inventor. En él, se puede determinar la posición de las diferentes partes del sistema.

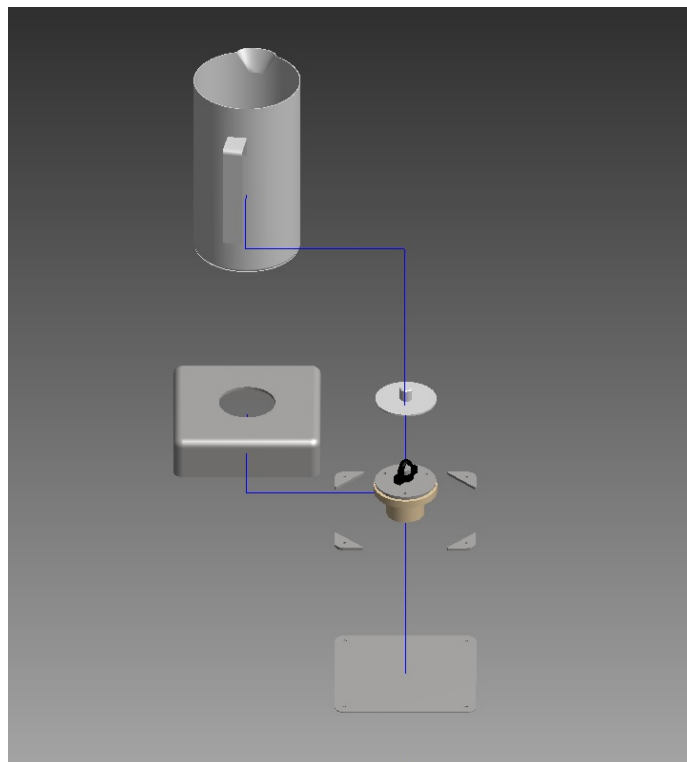


Figura 24: Piezas separadas en el diseño de Inventor para observar su ubicación

Finalmente, al realizar el ensamble completo de todas las piezas, se llega a obtener la máquina con la misma forma y dimensiones que la diseñada en Inventor; como se puede observar en la figura 25.



Figura 25: Máquina terminada

## Pruebas De Funcionamiento

La primera prueba que se realizó fue comprobar que el agitador girara de forma estable dentro de la jarra. Una vez garantizado este funcionamiento, se procedió a realizar la medición de revoluciones en las que se espuma la leche. Este ensayo fue ejecutado en la

máquina llamada prueba de jarras que se encuentra en el laboratorio de química de la Universidad San Francisco de Quito. Lastimosamente, esta prueba no generó los resultados requeridos, debido a que la velocidad de giro del agitador en esta prueba apenas llega a 300 rpm (valor que no permite obtener un flujo turbulento necesario para la creación de burbujas en la leche con el agitador diseñado).

Se procedió luego a comprobar la velocidad de giro del agitador, usando un tacómetro láser (ver figura 26). Por este método, se identificó el número de rpm equivalentes a los diferentes voltajes enviados al motor. Por tanto, se obtuvo una curva de calibración para controlar la velocidad de giro del agitador a través de variar el voltaje administrado al motor. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos.



Figura 26: Medición de revoluciones con tacómetro láser

Tabla 6: Velocidad de giro en rpm del agitador a distintos voltajes de alimentación al motor en vacío.

	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
<b>Voltaje [V]</b>	rpm	rpm	rpm	rpm
3	1870	1913	1915	1899.333333
4.5	2226	2653	2599	2492.666667
6	2731	3183	3172	3028.666667
7.5	3661	3668	3603	3644
9	4120	4114	4077	4103.666667

Después de realizar varias pruebas de espumado con leche entera a temperatura de -2 °C, podemos observar que la espuma empieza a crecer desde los primeros segundos que se enciende la máquina (con potencia mínima de 3 voltios/ 1899 rpm). Al aumentar la velocidad de giro, se acelera el proceso de producción de espuma. A alrededor de las 4500 rpm con una cantidad de dos tazas(400ml) de leche fría, se observa que la producción total de espuma aumenta significativamente y de una manera no lineal. Por tal razón, se monitoreó la efectividad en la producción de espuma. Para ello, se realizaron mediciones de la cantidad de espuma obtenida (en volumen) a partir de la misma cantidad de líquido (400 ml). A tres diferentes tiempos, se replicaron tres veces las medidas de la espuma generada versus el líquido remanente, obteniendo los resultados presentados en la tabla 7.

Tabla 7: Efectividad de generación de espuma en relación al tiempo de agitación. Resultados obtenidos a una velocidad de giro de alrededor de 4500 rpm.

Tiempo [min]	Volumen [ml]			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
<b>1 min</b>				
Leche líquida remanente	398	395	392	395
Espuma	25	30	34	29.7
<b>3 min</b>				
Leche líquida remanente	335	350	360	348.3
Espuma	290	300	330	306.7
<b>6 min</b>				
Leche líquida remanente	180	200	220	200
Espuma	680	700	750	710

Los resultados de la tabla 7 se presentan gráficamente en la figura 27. Los valores reportados son los promedios de la medición y los errores presentados son una desviación estándar calculada entre los valores medidos. Se puede observar que a mayor tiempo de agitación, mayor crecimiento total de espuma.

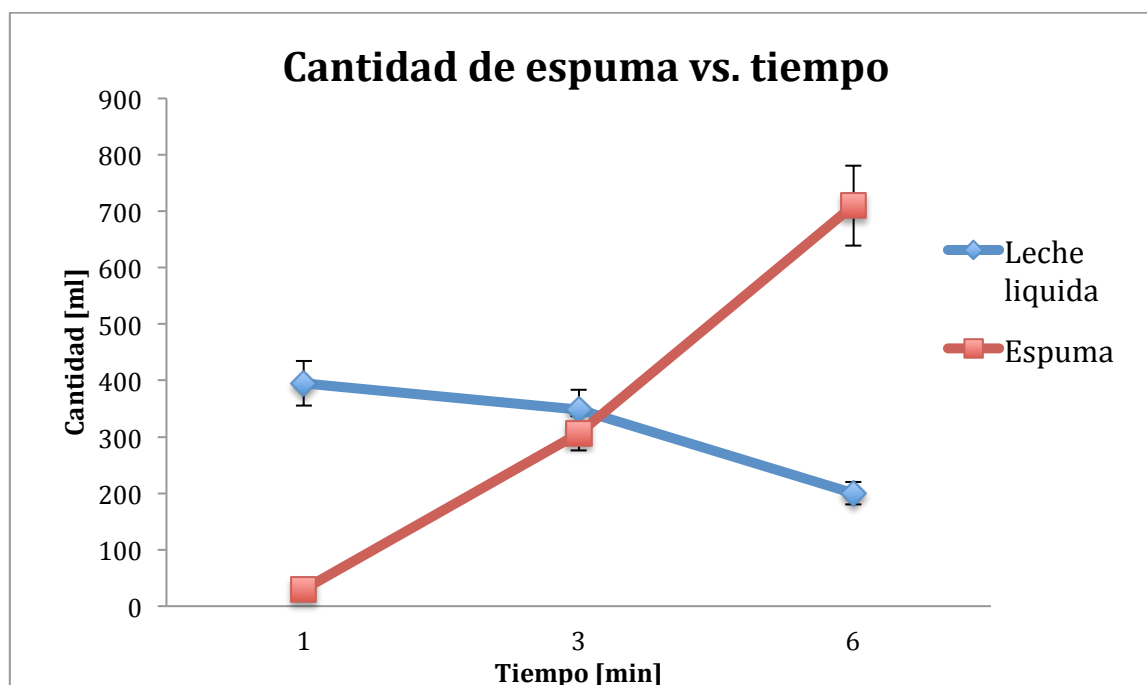


Figura 27: Cantidad de espuma vs tiempo en el proceso de espumado a 4500rpm

A las rpm máximas de funcionamiento de la máquina (4500), se observa que en un tiempo de 6 minutos aproximadamente se puede generar una espuma con un volumen de 3.5 veces el del líquido agitado. Es decir, si se espuma 400 ml de leche fría durante 6 minutos, se logra obtener alrededor de 700 ml de espuma con un líquido remanente de 300 ml. En las mismas condiciones, en tres minutos se pueden generar 6 veces el volumen de espuma. Por tanto, dependiendo de la cantidad requerida de espuma, se puede modificar/controlar las condiciones necesarias para optimizar la rentabilidad de la máquina. Adicionalmente, se verificó que la estabilidad de la espuma generada en las pruebas anteriores sea de más de 30 minutos. Lográndose, en su totalidad esta condición. Cabe destacar que las pruebas de espumado se realizaron únicamente con leche entera fría que tiene un contenido graso y proteico alto facilitando la generación espuma. Sin embargo, otros tipos de leche también pueden ser espumados, aunque en este proyecto no se realizaron estas pruebas.



Figura 28: Espuma realizada por la maquina en 6 minutos



## Costos

Al finalizar la fabricación y montaje de la máquina se realizó un análisis de los costos involucrados, tanto de materiales como de mano de obra para su fabricación. Los resultados se listan en la tabla 8.

Tabla 8: Análisis de costos en la producción de la máquina

<b>Materiales</b>	<b>Costos</b>
Jarra	\$12.00
Impresion piezas 3D	\$6.80
Motor Mabuchi	\$8.00
Duralón	\$10.00
Eje de acero AISI 304	\$14.00
Mano de obra + tiempo de maquina (4 horas maquinado total)	\$20.00
Tornillos	\$0.25
Espiral acero inoxidable	\$1.00
Transformador variable	\$6.60
Botón de encendido	\$0.45
Imanes neodimio (6 unidades)	\$6.00
Plancha acero inoxidable AISI 304 180x180x3	\$5.00
Plancha acero inoxidable AISI 304 140x140x1	\$1.20
<b>Total</b>	<b>\$91.30</b>

En donde, se puede observar que el costo total de fabricación de la máquina localmente es de \$91.30 dólares americanos. En contraste, el precio de una máquina de características similares importada es de alrededor de \$300. Por cuanto, el precio de producción es mucho menor y justifica su fabricación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar la realización de este proyecto de diseño y construcción de una máquina espumadora de leche en frío, podemos concluir que se logró los objetivos planteados:

- ✓ Se logró diseñar en su totalidad la máquina en el programa Inventor.
- ✓ Utilizando capacidades locales de manufactura se construyó y ensambló satisfactoriamente la máquina diseñada.
- ✓ La espumadora de leche cumple con su objetivo de espumar leche fría para el consumo humano con un diseño que permite fácil limpieza y desinfección de sus partes en contacto con la leche (puede ser desinfectada en lavadoras de platos y soporta temperaturas por sobre los 130 °C estipulados para la sanitización).
- ✓ Se provee de un control de velocidad de agitación para mitigar los efectos de los posibles cambios de contenido graso y proteínico de la leche a espumar.
- ✓ Se logró fabricar una máquina espumadora de leche nacional de costos inferiores a los de importación de una máquina de similares características.
- ✓ Se concluye que esta máquina brinda las posibilidades de generar un proyecto de emprendimiento a futuro dentro del país.
- ✓ De ser necesaria la producción en masa de este equipo, se recomienda realizar la fabricación de la jarra con el pivote incluido y de la base con su pivote, a través de procesos de conformado mecánico sin arranque de material como troquelado y embutido. En el caso de componentes plásticos, se podría realizar un proceso de inyección.
- ✓ Se recomienda realizar pruebas de desgaste de los componentes impresos en 3D para determinar el tiempo de vida útil y su confiabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adobe. (2015). Inventor.
- Castillo, J. D. D. L. (2006). Tablas de viscosidad, (x).
- Cenidox. (n.d.). manual-acero-inoxidable.
- Ebay. (2016). Milk Frother.
- Esinger. (2013). Directrices de mecanizado de plásticos técnicos.
- Gómez, M. (1986). Soldadura de los Aceros.
- Groover, M. P. (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing. *John Wiley & Sons, Fourth*, 493. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Herriko, E. (2011). Herramientas de corte. *Mecánica, Dpto D E Ingeniería*, 12, 1–27.
- Huppertz, T. (2010). Foaming properties of milk: A review of the influence of composition and processing. *International Journal of Dairy Technology*, 63(4), 477–488. <http://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00629.x>
- Inoxidables, I. D. E. L. O. S. A. (n.d.). Mantenimiento y Limpieza del Acero Inoxidable, (511).
- Margarita. (2012). ¿Por qué se forma mejor la espuma en la leche si está fría?
- Murad, S. (n.d.). La Leche y sus propiedades nutricionales.
- Prestazion, H. (2016). Las mejores espumadoras de leche automáticas para los amantes del café. Retrieved January 1, 2016, from <http://hogar.prestazion.com/cocina/cafe-y-te/las-mejores-espumadoras-leche-automaticas-los-amantes-del-cafe>
- Teran, E. (2014). Conozca las tres formas para importar productos en Ecuador. Quito. Retrieved from <http://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-importacion-courier-aduana.html>
- Ugitech. (n.d.). El magnetismo y el acero inoxidable.
- White, F. (2010). Fluid Mechanics. *McGraw-Hill, New York*, 862. <http://doi.org/10.1111/j.1549-8719.2009.00016.x>.Mechanobiology

**Anexo A: Planos De Conjunto Y De Taller Del Espumador  
Diseñado**