

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño de un sistema de extracción mecánica de aceite de semilla
Jatropha Curcas para fabricación de biodiesel”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

José Antonio Monard Monteverde

Fernando Arturo Soria Proaño

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Carlos Monteverde Flores, por su experticia en el campo de la agricultura y el manejo de la semilla *Jatropha Curcas*.

Al Ing. José Monteverde Enríquez, por su asesoramiento externo en el desarrollo de este documento.

Al Ing. Jorge Begué Pollini, por su colaboración en el maquinado de los elementos mecánicos de este proyecto.

DEDICATORIA

José Antonio Monard Monteverde:

A mis padres, hermanas y abuelos

A La Banda Mecánica

A mis amigos

Fernando Arturo Soria Proaño:

A las corrientes convectivas primordiales

que dieron origen a la primera proteína

que pudo autoreplicarse, permitiendo el

origen y evolución de las especies

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

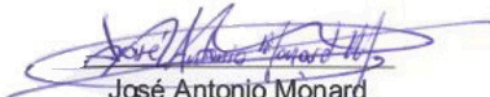
José Antonio Monard Monteverde

Fernando Arturo Soria Proaño

Dr. Juan Peralta Jaramillo

Dra. Emérita Delgado Plaza

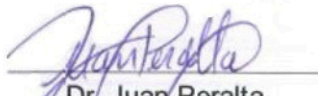
y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



José Antonio Monard
Monteverde



Fernando Arturo Soria
Proaño



Dr. Juan Peralta
Jaramillo



Dra. Emérita Delgado
Plaza

RESUMEN

El presente proyecto consiste en el rediseño, reconstrucción y evaluación de un mecanismo de extracción mecánica de aceite vegetal puro de la semilla de la planta *Jatropha Curcas*, comúnmente conocida como *piñón de tempate* o *jatrofa*. Estas semillas, que son tóxicas, poseen un alto contenido de aceite con excelentes propiedades químicas, volviéndolas aptas para uso directo como combustible en motores de combustión interna por compresión o para la fabricación de biodiesel a través de un proceso de transesterificación. Además de esto, la torta proteínica, que son los residuos de las semillas compactados luego del proceso de compresión, sirve como fertilizante natural o para la producción de biogás.

Para mitigar los inconvenientes presentes en el sistema de extracción, que son principalmente el atascamiento de las partes mecánicas y de los residuos a la salida del proceso, así como la compresión ineficiente que genera aceite con sedimentos, se realizó una lluvia de ideas, las cuales fueron bosquejadas y posteriormente analizadas con el fin de escoger la más apropiada, que cumpla con los requerimientos deseados.

Basándose en modelos matemáticos existentes en la bibliografía, que relacionan el diámetro interno de la jaula, la altura de semillas vertidas y la deformación de las mismas para obtener la fuerza mínima de compresión, se realizaron las simulaciones de esfuerzos-deformaciones, obteniéndose los valores de máxima extracción de aceite con la mínima presión requerida. Posterior al proceso de mecanización de los elementos, se realizaron las pruebas de extracción de aceite.

Finalmente se calculó la eficiencia de extracción de aceite en la relación a la masa de semillas comprimidas, la fluctuación del tiempo de producción con respecto a extracciones previas y la variación de la presión utilizada para lograr dicha extracción con relación a operaciones anteriores. Se constató que la cantidad de aceite extraído está dentro del rango de extracción de pruebas pasadas, con una reducción de tiempo de 55%; y que sólo fue necesario aplicar un 33% de la presión original, disminuyendo la cantidad de impurezas y por ende logrando mejorar la calidad del aceite.

Palabras Clave: *Jatropha Curcas*, aceite, extracción, compresión, tiempo de producción

ABSTRACT

The current project consists of the redesign, reconstruction and evaluation of a mechanical extraction system for pure vegetal oil from the *Jatropha Curcas* plant's seed, commonly known as *piñón de tempate* or *jatrofa*. These seeds, which are toxic, possess a high level of oil with excellent chemical properties, making them suitable for direct use as fuel in internal combustion engines by compression or for biodiesel production through a transesterification process. Besides, the protein cake, which is the compacted seed residues after the compression process, serves as natural fertilizer or for biogas production.

To mitigate the present drawbacks in the extraction system, which are mainly the jamming of the mechanical parts and the residues at the final stage of the process as well as the inefficient compression that generates oil with sediment, a brainstorming phase took place and those ideas were sketched and later analyzed in order to choose the most appropriate one, which meets the desired requirements.

Based on existing mathematical models in the bibliography, which relate the internal diameter of the cage, the height of the poured seeds and the deformation of them to obtain the minimum compression force, stress-strain simulations were made to obtain the maximum oil extraction with the smallest required pressure. Following the machining of the components, the oil extraction tests were conducted.

Lastly, the oil extraction efficiency was calculated in relation to the amount of compressed seeds, the fluctuation of production time related to previous extractions and the variation of the pressure used for the extraction in past operations. The amount of oil extracted was within the range of past tests with a reduction in production time of 55%. Additionally, only 33% of the original pressure was required, diminishing the amount of impurities, thus increasing the quality of the oil.

Keywords: *Jatropha Curcas*, oil, extraction, compression, production time.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Marco teórico	3
1.3.1 Descripción del equipo existente	5
1.3.2 Descripción de la planta Jatropha Curcas	8
1.3.3 Descripción del aceite de semilla	8
1.3.4 Usos de la planta Jatropha Curcas	9
CAPÍTULO 2	11
2. METODOLOGÍA	11
2.1 Alternativas	12
2.1.1 Pistón	12
2.1.2 Plato de salida	13
2.1.3 Filtro	14
2.2 Selección de la mejor alternativa	15
2.2.1 Selección del pistón	15
2.2.2 Selección del plato	16
2.2.3 Selección de filtro	17
2.3 Diseño detallado	17
2.4 Criterio de Diseño	22
CAPÍTULO 3	29
3. RESULTADOS	29
CAPÍTULO 4	43

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA.....	42
APÉNDICES.....	42

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
PBV	Plan del Buen Vivir
FACT	Fuels from Agriculture in Communal Technology
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
SCTD	Schumacher Centre for Technology and Development
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo

SIMBOLOGÍA

Kg/h	Kilogramos por hora
MPa	Mega Pascales
°C	Grado Celsius
cm	Centímetros
mm^2/s	Milímetros cuadrados por segundo
kg/m^3	Kilogramos por metro cúbico
MJ/kg	Mega Joule por kilogramo
σ	Esfuerzo
ϵ	Deformación unitaria
mm	Milímetros
N	Newton
Psi	Pound per square inch (Libra por pulgada cuadrada)
g	Gramos
ml	Mililitros
\$/hora	Dólares por hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diseño de forma del cabezal	6
Figura 1.2 Diseño de forma del pistón	6
Figura 1.3 Esquema de acople de los dientes	6
Figura 1.4 Plato de salida	7
Figura 1.5 Camisa térmica	7
Figura 1.6 Plato de recolección	8
Figura 1.7 Usos de la Jatropha	10
Figura 2.1 Metodología del diseño	11
Figura 2.2 Pistón original	12
Figura 2.3 Pistón-Modelo 1	12
Figura 2.4 Pistón-Modelo 2	13
Figura 2.5. Pistón-Modelo 3	13
Figura 2.6. Plato-Modelo 1	14
Figura 2.7. Plato-Modelo 2	14
Figura 2.8. Filtro-Modelo 1	15
Figura 2.9. Filtro Malla Fina.....	15
Figura 2.10. Vista Isométrica Pistón Definitivo	18
Figura 2.11. Vista Frontal Pistón Definitivo.....	18
Figura 2.12. Vista Isométrica Plato Salida	19
Figura 2.13. Vista Frontal Plato Salida	19
Figura 2.14. Ensamble del sistema	20
Figura 2.15. Impresión de una sección de la cabeza del pistón	21
Figura 2.16. Sección de la cabeza del pistón	21
Figura 2.17. Cabeza del pistón impresa en 3D	21
Figura 2.18. Verificación de dimensión de la cabeza del pistón en la jaula de ardilla	22
Figura 2.19. Curvas de ingeniería y de esfuerzo-deformación unitaria real para materiales dúctiles: a) acero al bajo carbono, b) acero templado al alto carbono ...	23
Figura 2.20. Factor geométrico de concentración de esfuerzos K_t para un eje con filete de hombro en tensión axial	23
Figura 2.21. Analogía fuerza-flujo de piezas con contorno.....	24

Figura 2.22. Densidad de la energía interna de deformación en una pieza flexionada.....	25
Figura 2.23. Variación de los factores experimentales C y G con respecto al diámetro D del plato.....	27
Figura 3.1. Simulación de pistón bajo carga.....	29
Figura 3.2. Efecto de la altura del canal sobre el esfuerzo máximo de Von Mises y la deformación Y del plato	30
Figura 3.3. Simulación de plato bajo carga	31
Figura 3.4. Simulación de deformación en el plato	31
Figura 3.5 Estado pistón Mayo 2017	32
Figura 3.6 Estado jaula de ardilla Mayo 2017	32
Figura 3.7 Proceso de maquinado del pistón	33
Figura 3.8 Condición final del pistón Agosto 2017	33
Figura 3.9 Deformación de base de jaula de ardilla	34
Figura 3.10 Proceso de rectificación de la jaula	34
Figura 3.11 Condición final de la jaula Agosto 2017	35
Figura 3.12 Proceso de refrentado y perforación del plato	35
Figura 3.13 Condición final del plato Agosto 2017	36
Figura 3.14 Ensamble final	36
Figura 3.15 Balanza digital	37
Figura 3.16 Semillas de Jatropha disponibles	37
Figura 3.17 Recipiente para aceite extraído.....	37
Figura 3.18 Sistema cargado con semillas	38
Figura 3.19 Extracción de aceite.....	38
Figura 3.20 Aceite extrayéndose	39
Figura 3.21 Masa de aceite extraído	39
Figura 3.22 Aceite total extraído	40
Figura 3.23 Torta proteínica al final de la operación	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades del aceite.....	8
Tabla 1.2. Ficha técnica Jatropha Curcas	9
Tabla 2.1. Matriz de decisión para pistón	16
Tabla 2.2. Matriz de decisión para filtro	17
Tabla 2.3. Cantidad promedio determinada de coeficientes de esfuerzo de comportamiento mecánico, coeficientes de fuerza de comportamiento mecánico y coeficientes de compresión	26
Tabla 3.1 Desglose de costos para la construcción del equipo extractor de aceite	42

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el planeta está sufriendo un aumento en temperatura global debido a un incremento de gases de efecto invernadero desde la época de la revolución industrial. En años recientes se ha buscado alternativas para los combustibles que se usan en la industria con el fin de reducir estas emisiones. Los biocarburantes son una de las opciones más prominentes y por lo tanto buscar reducir el costo de su manufactura es crucial. Una de las materias primas para elaborar biodiesel es el aceite extraído de la semilla de la planta *Jatropha Curcas*.

La *Jatropha Curcas L.* es una planta de origen tropical, de la familia Euphorbiaceae, capaz de adaptarse y crecer bajo condiciones climatológicas extremas, desde zonas con altas precipitaciones anuales a regiones de sequía severa. Considerada como maleza y usada típicamente como cerca viva, esta planta posee gran variedad de usos artesanales, pero el más destacado es la aplicación del aceite extraído de sus semillas para la generación de energía limpia.

Como lo dicta el Plan del Buen Vivir sobre impulsar la transformación de la matriz productiva en su objetivo número 10: *“La transformación de la matriz productiva supone una interacción con la frontera científico-técnica, en la que se producen cambios estructurales que direccionan las formas tradicionales del proceso y la estructura productiva actual, hacia nuevas formas de producir que promueven la diversificación productiva en nuevos sectores, con mayor intensidad en conocimientos, bajo consideraciones de asimetrías tecnológicas entre países (eficiencia schumpeteriana) y con un rápido crecimiento de la demanda interna y externa que promueva el trabajo (eficiencia keynesiana o de crecimiento)”*, el empleo de este óleo para la fabricación de biodiesel significaría una nueva fuente de energía para maquinarias que funcionen en base a este combustible alternativo.

Con esto no sólo se estaría cumpliendo el objetivo 11 del PBV: *“Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial*

y *tecnológica*” al utilizar nuevas fuentes de energía limpia, sino que también el objetivo 7: “*Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global*” al reducir la contaminación generada por el uso de combustibles fósiles.

El aprovechamiento de este recurso en zonas rurales de nuestro país donde existan grandes cultivos de esta planta significaría la generación de puestos de trabajo para sus habitantes, lo que beneficiaría enormemente a la comunidad ya que se podría llegar a cubrir la demanda energética de la misma e incluso, de darse el caso de un exceso de producción de aceite, reflejaría un ingreso económico adicional.

En Ecuador, los principales sembríos de la jatrofa se los puede encontrar en las provincias de Carchi e Imbabura en la región Sierra y en Manabí y Guayas en el Litoral. [3] En la actualidad existe un plan piloto para sustituir el uso de combustibles fósiles por biocombustibles para la generación de energía eléctrica en las islas Galápagos a partir de aceite de piñón originario de la provincia de Manabí y el diseño del sistema de extracción que se propone en este proyecto serviría de base para futuras aplicaciones en el mismo.

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable de la ESPOL cuenta con un extractor mecánico vertical de aceite, el cual fue diseñado a partir de un sistema de extracción horizontal y al ser el primero en su tipo, no fue esquematizado basándose en literatura técnica específica, motivo por el cual constantemente presenta problemas durante su operación. Una vez detectadas las falencias en el equipo, nace la responsabilidad de corregirlas, rediseñando y evaluando cada opción, para encontrar aquella con la que el mecanismo alcance su más óptimo funcionamiento.

1.1 Descripción del problema

El mecanismo de extracción mecánica, al haber sido adaptado de un sistema convencional de extracción horizontal, presenta varias fallas inesperadas, entre ellas:

- El cabezal se traba durante la compresión debido a una extracción incompleta, dejando residuos de semillas en el cilindro.
- La torta proteínica se solidifica y se atasca en el plato, a la salida del sistema.
- Durante el proceso de compresión, el plato se hunde y se atora en la jaula de ardilla.
- El aceite sale con residuos debido a una extracción ineficiente, los mismos que obstruyen el tubo de salida del aceite.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Rediseñar el sistema de extracción mecánica de aceite de la semilla de la planta *Jatropha Curcas*

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Rediseñar el cabezal móvil del sistema, con el fin de mejorar el proceso de compresión.
- ✓ Rediseñar el plato inferior para evitar el atascamiento de residuos a la salida.
- ✓ Acoplar un filtro colador dentro de la jaula de ardilla para eliminar impurezas durante el proceso de extracción del aceite.

1.3 Marco teórico

Como lo indica Mendoza en su tesis de grado en el año 2011: *“En general existen dos sistemas de extracción, uno mecánico mediante el uso de maquinarias para prensado y otro químico con el uso de disolventes. En ambos sistemas, las semillas deben ser previamente limpiadas, descascarilladas, troceadas y molidas.*

La cantidad de aceite que se puede extraer de un número determinado de semillas está íntimamente relacionado con el método de extracción aplicado y de las condiciones en las que se encuentren las mismas antes de la operación así como el tratamiento previo al cual están sujetas las semillas. A nivel internacional se han adaptado una serie de maquinarias para la extracción del aceite de piñón como las prensas tipo Expeller que están diseñadas para trabajar con pequeñas y grandes cantidades de grano y una máquina manual tipo Bielenberg, usada principalmente en países africanos, sin embargo, los estudios señalan que hay que mejorar la regulación de las prensas y la preparación a la cual debe ser sometida la semilla previa la extracción". Más información sobre las prensas tipo Expeller y tipo Bielenberg se encuentra en el Apéndice A de este documento.

Nolasco detalla los métodos de extracción en su proyecto de graduación del 2015: "Los principales métodos de extracción son mecánicos, utilizando una prensa hidráulica o una prensa impulsada por motor y los métodos químicos utilizando solventes orgánicos como n-hexano. El hexano tiene un porcentaje de extracción de 45%-47%, siendo superior entre los solventes orgánicos derivados de petróleo. El método de aprisionamiento trifásico logro un rendimiento en semilla de piñón de 36 g de aceite/100 g de semilla representando una extracción del 81%. De igual manera el prensado motorizado puede extraer 22.98 g de aceite/100 g de semilla. Se notó que precalentar la semilla por 5 min a 60°C incremento de 77.8 a 79.8% la extracción de aceite en base 58.3% contenido de grasa total para la variedad Kalimantan.

Las prensas de tornillo están clasificadas en prensas de tornillo tipo colador ("strainer") o de orificio en cilindro ("cylinder hole").

La primera se compone de un tornillo sin fin con diámetro ascendente dentro del barril compuesto por varios discos o barras con una separación específica. Está diseñada para una operación a escala industrial con un rango de 15 hasta 2000 kg/h de semilla. El aceite sale por la abertura entre

estos discos modificables, generando diferentes presiones adecuadas al tipo de material prensado.

La prensa orificio en cilindro tiene como diferencia la salida al ser esta una boquilla de un diámetro específico formando pellets. La presión depende del tipo de boquilla y velocidad del tornillo. Su capacidad de procesamiento es de menor volumen al ser de 100 kg/h de semilla aproximadamente. Estas prensas tienen una alta capacidad productiva sin embargo su capacidad de extracción es baja con 30-38% del aceite total. El prensado hidráulico o pistón es de gran utilidad en zonas de bajos recursos. Sin embargo no es rentable debido a su baja capacidad de extracción y alto requerimiento de mano de obra. La capacidad de extracción es 60-65% de aceite, con un 86.1% como máximo utilizando 15 MPa de presión, 90°C en la extracción y un contenido de humedad de 4%. Siendo estas las condiciones adecuadas para obtener dicho rendimiento”.

1.3.1 Descripción del equipo existente

El equipo de extracción está conformado por un cabezal cilíndrico, donde las semillas son comprimidas por un pistón. Éste último recibe la fuerza necesaria para llevar a cabo la extracción del aceite por parte de una prensa hidráulica. El aceite es extraído de forma radial y es recogido en la parte inferior por un sistema de captación que termina en un tubo de salida. Por último, la torta proteínica resultante del proceso evacúa el sistema a través de un orificio en el centro del plato de salida. Se destaca que todos los componentes del equipo son hechos en acero SAE 4340.

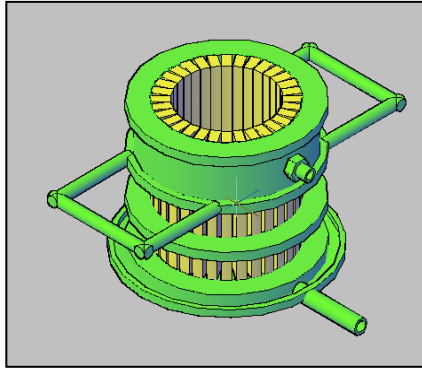


Figura 1.1 Diseño de forma del cabezal

Fuente: CDTS, 2015

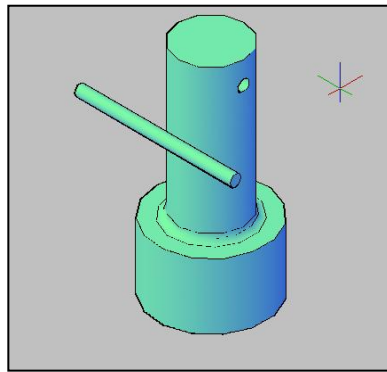


Figura 1.2 Diseño de forma del pistón

Fuente: CDTS, 2015

Al aumentar la resistencia a la deformación de las semillas (variación de sus propiedades con el paso del tiempo), el equipo cuenta con un sistema interno de paso intersticial (apertura de canales entre los dientes) de 32 dientes cónicos. Este conjunto es denominado *jaula de ardilla*.

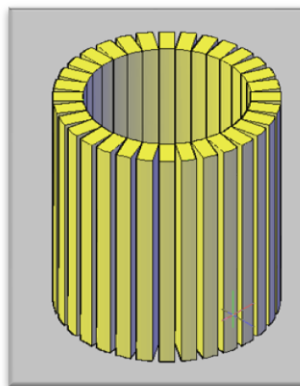


Figura 1.3 Esquema de acople de los dientes

Fuente: CDTS, 2015

Del otro lado de la torta se encuentra el plato de salida, que es el encargado de contrarrestar la presión ejercida por el pistón para el proceso de extracción de aceite. El diámetro de agujero de salida en su centro es variable y junto con el paso intersticial, juega un papel crucial en la eficacia de la extrusión.

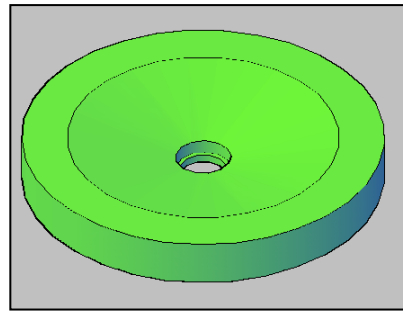


Figura 1.4 Plato de salida

Fuente: CDTS, 2015

Con el fin de obtener una extracción completa de las diferentes fases de aceite se hace necesario el uso de una camisa térmica, que no es otra cosa que una resistencia eléctrica, en la parte superior de la jaula de ardilla, para disminuir la viscosidad del aceite producido por el calentamiento térmico de la masa bajo extrusión. Este calentamiento (entre 60 y 70 grados Celsius) debe ser regulado para no modificar otras propiedades del aceite.

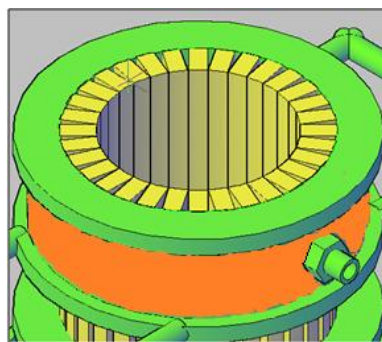


Figura 1.5 Camisa térmica

Fuente: CDTS, 2015

El aceite extraído de las semillas sale radialmente por los espacios entre los dientes de la jaula de ardilla y recorre el canal de la corona superior hasta llegar al plato inferior que funciona como recolector final.

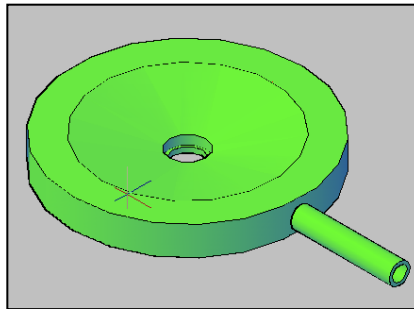


Figura 1.6 Plato de recolección

Fuente: CDTS, 2015

1.3.2 Descripción de la planta *Jatropha Curcas*

Procedente de América Latina, la planta en la que se encuentra la semilla es un arbusto cuya altura varía entre 3-5 metros. Las semillas tienen una forma ovoide con un promedio largo de 3 cm y un ancho promedio de 2 cm. Estas semillas vienen en grupos de tres, una vez removidas estas contienen entre 35% y 37% de aceite cada una. [2]

1.3.3 Descripción del aceite de semilla

A partir de las investigaciones realizadas, se conoce que una hectárea produce hasta 8 toneladas de semillas de lo cual se puede extraer hasta 2800 litros de aceite. [10]

Tabla 1.1. Propiedades del aceite

Viscosidad Cinemática (40°C)	33.89 mm ² /s
Densidad	0.917 kg/m ³
Humedad	0.05%
Punto de inflamación	268°C
Acidez	5.920%

Fuente: Lafargue-Pérez, Barrera-Vaillant, & Assuncao-Nascimento, 2012

La ficha técnica de la *Jatropha* se muestra a continuación:

Tabla 1.2. Ficha técnica *Jatropha Curcas*

Parámetro	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo	Fuente
Rendimiento de semilla.	tonelada seca / hectárea	0.3	1.5	6	Documento de posición del desarrollo de proyectos de <i>Jatropha</i> a grande escala, FACT. Junio, 2007.
Requerimiento de lluvia para la producción de semillas.	milímetros / año	600	1,000	1,500	Documento de posición del desarrollo de proyectos de <i>Jatropha</i> a grande escala, FACT. Junio, 2007.
Contenido de aceite de semillas.	% de la masa	-	34%	40%	<i>Jatropha</i> , producción de biodiesel y uso, W. Achten et al, 2008.
Rendimiento de aceite después de prensado.	% de la masa de semillas de insumo	-	34%	40%	Diversas fuentes.
Contenido energético por kilogramo de aceite.	MJ/kg		37		

Fuente: FACT, 2009

1.3.4 Usos de la planta *Jatropha Curcas*

Los registros históricos muestran que la *Jatropha* fue utilizada por los indios nativos de Centroamérica y quizás de América del Sur en la medicina herbaria. Ya en el año 1836, las semillas fueron exportadas a Portugal y Francia y el aceite se utilizaba para el alumbrado de la calle y la producción de jabón. Actualmente, la *Jatropha* tiene muchos otros usos, los cuales se detallan en la figura a continuación: [4]

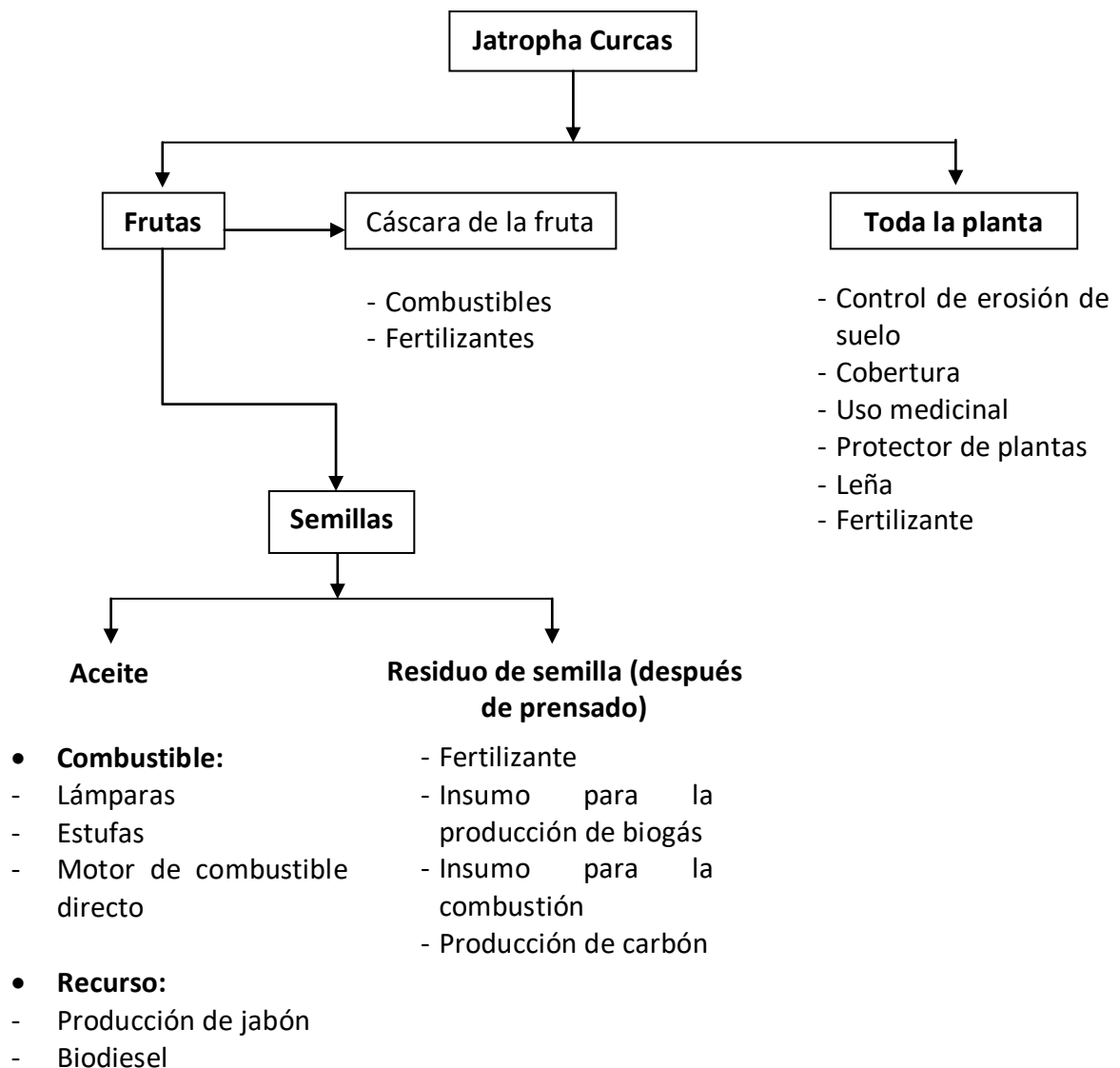


Figura 1.7 Usos de la Jatropha

Fuente: FACT, 2009

Es necesario indicar que el aceite contiene componentes venenosos por lo tanto no se considera un alimento comestible. La planta de la semilla es comúnmente usada para regresar la fertilidad a suelos erosionados, ya que forma una relación simbiótica con el mismo, incrementando su capacidad de absorción de nutrientes y agua. [4] De igual forma, los residuos de semillas usados como abono generan aporte de nutrientes al suelo. El uso principal del aceite de la semilla de *Jatropha Curcas* es para el desarrollo de biocarburante. [19]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se explorarán las opciones para resolver los problemas del extractor mencionados en el capítulo 1. Primero, se verán las alternativas para el pistón encargado de comprimir las semillas. Luego, se mencionarán los distintos platos sugeridos para la solución. A continuación, se revisarán las opciones para el mecanismo de filtrado del aceite. Una vez revisadas todas las alternativas propuestas, se escogerán las mejores usando matrices de decisión en las cuales se darán pesos o valores para cada categoría que se consideró importante. Finalmente, se expondrán los criterios de diseños en los cuales se basan las decisiones.

Se presenta a continuación la metodología del diseño a aplicarse en la elaboración de este proyecto:

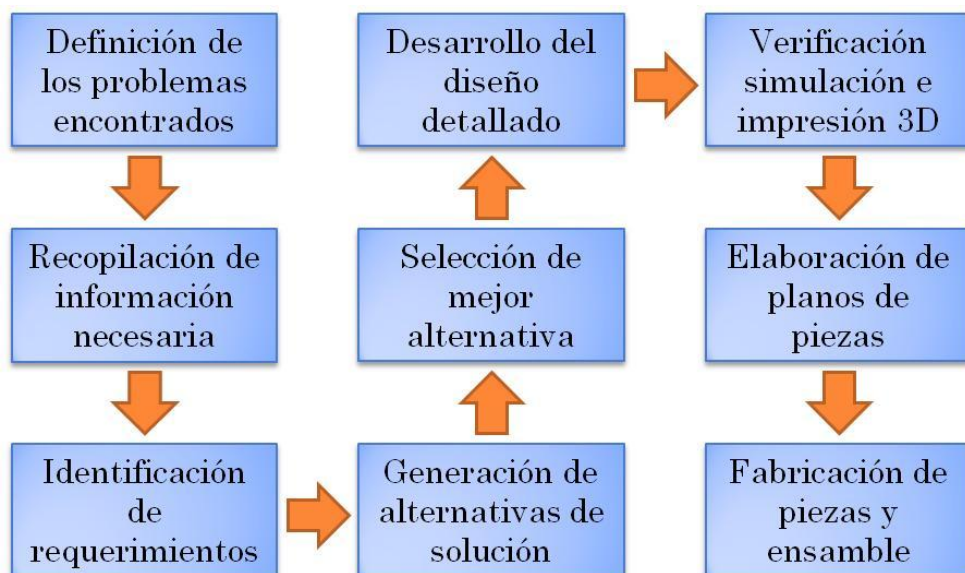


Figura 2.1 Metodología del diseño

Elaboración propia

2.1 Alternativas

2.1.1 Pistón

Con la ayuda del software Inventor 2016 de Autodesk, se realizaron diagramas tanto del pistón original, mostrado en la figura 2.2 como de posibles pistones soluciones cuyas geometrías fueran modificadas para coincidir con los criterios de diseño deseados.

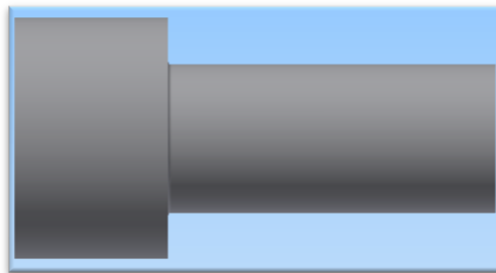


Figura 2.2 Pistón original

Elaboración propia

La primera opción para el cabezal rediseñado se muestra en la figura 2.3, la cual propone aumentar el área de contacto entre éste y el plato de salida de los residuos, al hacer cónico un extremo del mismo. A pesar de esto, el diseño presenta una falla: el cambio brusco de diámetro supone un concentrador de esfuerzos en esta sección, incrementando la posibilidad de que una fractura aparezca en la periferia de esta sección. En la sección 2.4 se hablará sobre los concentradores de esfuerzos.

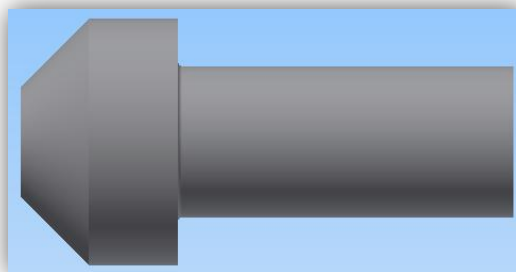


Figura 2.3 Pistón-Modelo 1

Elaboración propia

La falla fue tomada en consideración para un segundo diseño del pistón, esta se puede ver en la figura 2.4, donde el cambio de diámetro fue aminorado al realizar una rebaja conoidal. Además de esto, se afinó la inclinación del cono, con la misma inclinación que la del plato de salida.

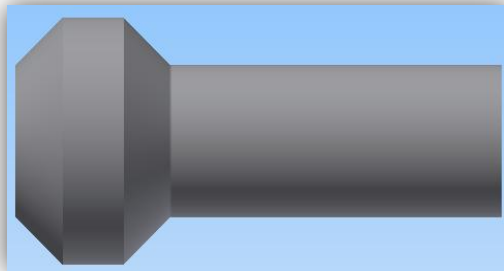


Figura 2.4 Pistón-Modelo 2

Elaboración propia

La opción para pistón mostrada en la figura 2.5 propone mejorar el diseño actual “suavizando” los esfuerzos dentro del elemento mediante una reducción cónica. Adicionalmente, la inclusión de un chaflán en la sección más grande ofrece un mejor contacto del pistón al plato.

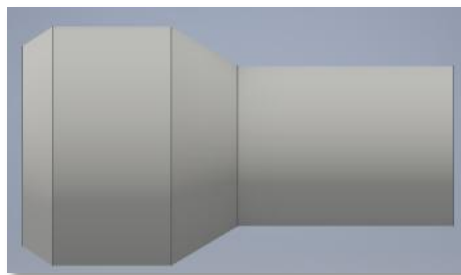


Figura 2.5. Pistón-Modelo 3

Elaboración propia

2.1.2 Plato de salida

El plato de salida actual presenta problemas al no salir todo el material sólido en el proceso de extracción. Para resolver esto se proponen las siguientes opciones. En la figura 2.6, se muestra un plato con varias perforaciones más pequeñas para mejorar la salida del producto sólido.

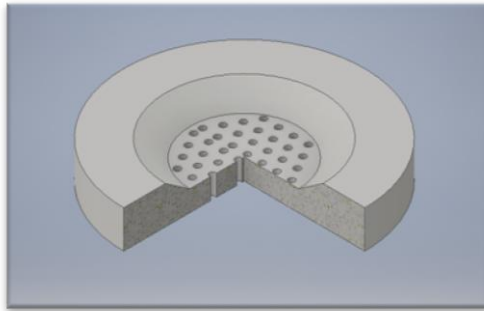


Figura 2.6. Plato-Modelo 1

Elaboración propia

La figura 2.7 presenta un plato sólido sin perforaciones, con dos diámetros diferentes. El menor es igual al diámetro interno de la jaula de ardilla y el mayor corresponde al diámetro externo de la misma. Posee además 2 canales en su parte inferior, los cuales irán montados en los rieles sobre los cuales la jaula descansa. Este diseño servirá tanto como plato de salida para la torta y como soporte para el equipo.

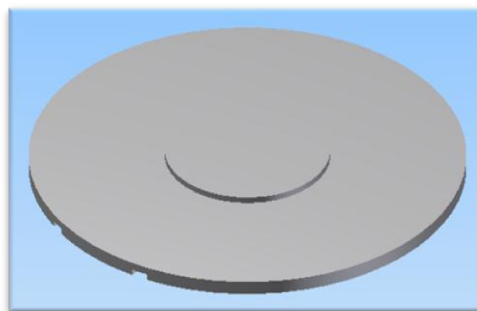


Figura 2.7. Plato-Modelo 2

Elaboración propia

2.1.3 Filtro

El filtro se encargará de mantener residuos sólidos fuera del aceite extraído. Para lograr esto se puede maquinar un filtro con agujeros pequeños en frente de las rendijas del extractor. Adicionalmente, se puede usar una malla fina de la misma manera para evitar contaminar el aceite. La figura 2.8 muestra la primera opción para el filtro mientras que la figura 2.9 ilustra la segunda alternativa.

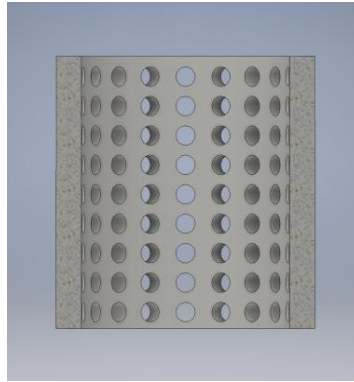


Figura 2.8. Filtro-Modelo 1

Elaboración propia



Figura 2.9. Filtro Malla Fina

Elaboración propia

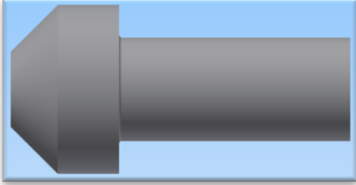
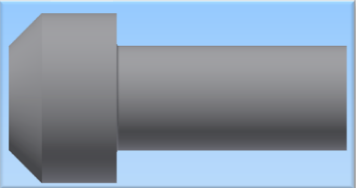
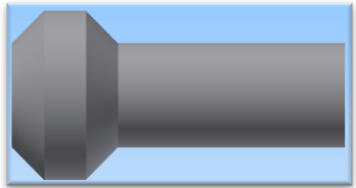
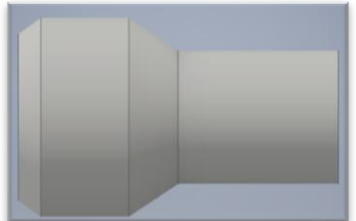
2.2 Selección de la mejor alternativa

2.2.1 Selección del pistón

Aquí se usará el método de la matriz de decisión en donde se asignará un puntaje a cada característica de importancia asignada. En el pistón se consideró el costo de producción, maquinabilidad, eficacia.

- Costo de producción: El costo total según la cantidad de material a maquinar del pistón disponible hasta la alternativa mostrada.
- Maquinabilidad: Cuánto material se debe maquinar del pistón original para obtener la opción mostrada.
- Eficacia: Cuanto aceite es capaz de extraer dada su geometría.

Tabla 2.1. Matriz de decisión para pistón

Modelo	Costo Producción	Maquinabilidad	Eficacia	Total
	4	2	2	8
	4	2	4	10
	2	3	3	8
	2	3	2	7

Elaboración propia

De acuerdo a esta matriz, la solución con mayor puntaje es el modelo 2. Esta solución brinda un costo de producción y maquinabilidad media, pero con una eficacia alta para extraer aceite al tener una mayor área de contacto.

2.2.2 Selección del plato

Se decidió seleccionar el modelo 2 del plato, mismo que se muestra en la figura 2.7, considerando que existen modelos matemáticos desarrollados con esta geometría, con los cuales nos guiaremos para los cálculos y experimentación. Los papers científicos que muestran estos experimentos se encuentran referenciados en la bibliografía de este documento.

2.2.3 Selección de filtro

De forma similar a como se determinó el pistón a usar en la sección previa, se elegirá el filtro a ser usado en este equipo. Las características de interés para estas opciones son el costo, peso del componente. Se propone maquinar con el mismo material: acero SAE 4340.

Tabla 2.2. Matriz de decisión para filtro

Modelo	Costo Producción	Peso	Total
	3	2	5
	5	3	8

Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 2.2, la opción de malla fina es la ganadora, por lo tanto esta será la opción a usar por su bajo costo y peso ligero.

2.3 Diseño detallado

Luego de tomar las medidas de los componentes del equipo, diseñar las piezas en Autodesk Inventor y realizar las simulaciones y análisis respectivos, se determinó lo siguiente:

- Sólo es necesaria una reducción cónica en la cabeza del pistón, mas no en la falda del mismo, puesto que los esfuerzos reales a los que

estará sujeto son mínimos. Se hablará de estos esfuerzos en la siguiente sección.

- La inclusión de la malla fina como filtro adicional para el aceite extraído representa una disminución en el diámetro de la cabeza del pistón y para el diámetro del plato de salida.

Las figuras 2.10 y 2.11 muestran a continuación el diseño final del pistón a utilizarse en el equipo, sus vistas isométrica y frontal. El plano con las dimensiones del mismo se encuentra en el apéndice C.1.

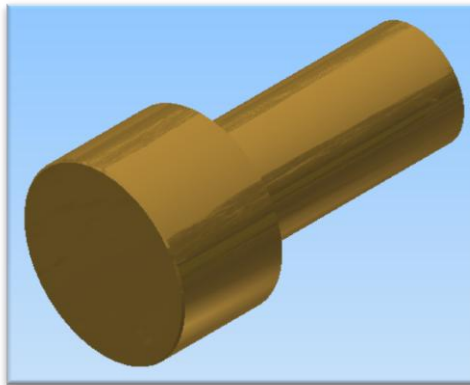


Figura 2.10. Vista Isométrica Pistón Definitivo

Elaboración propia

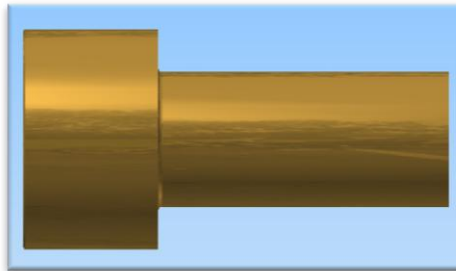


Figura 2.11. Vista Frontal Pistón Definitivo

Elaboración propia

En las figuras 2.12 y 2.13 se muestran el diseño final del plato de salida a utilizarse en el equipo, con sus vistas isométricas y frontales. El plano con sus dimensiones se encuentra en el apéndice C.2.

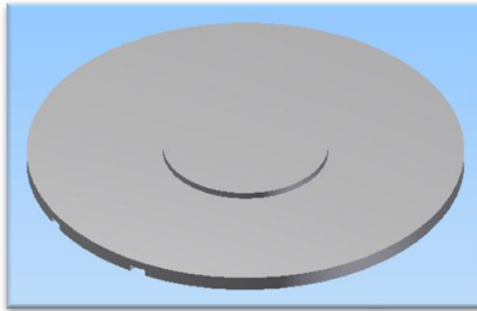


Figura 2.12. Vista Isométrica Plato Salida

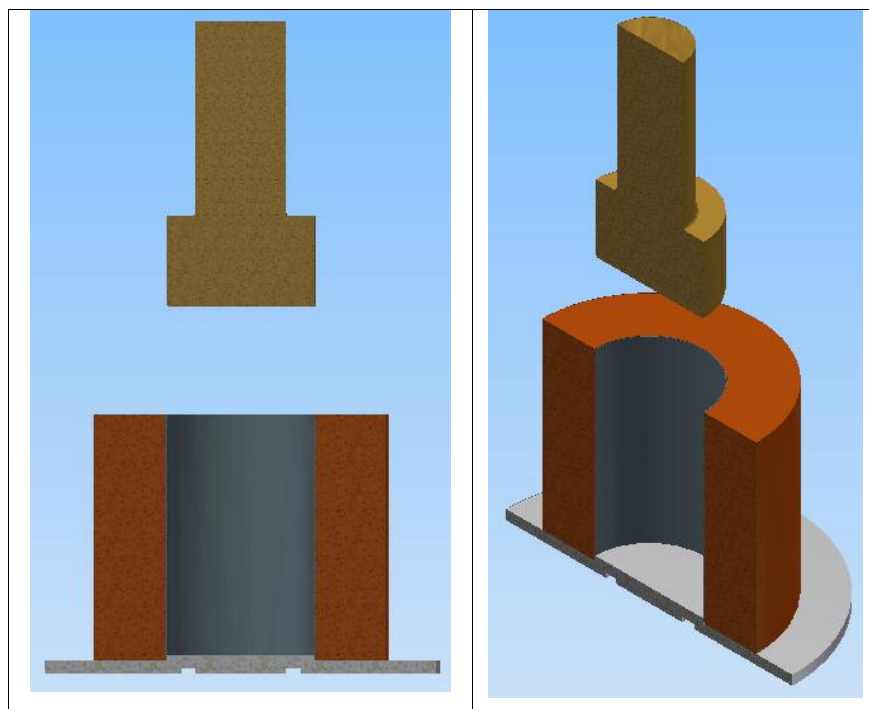
Elaboración propia



Figura 2.13. Vista Frontal Plato Salida

Elaboración propia

Con la finalidad de comprobar que las piezas estuvieran correctamente diseñadas y no exista interferencia en el ensamble final de las mismas, se realizó un ensamble virtual previo en Autodesk Inventor y se comprobó que efectivamente los elementos fueron esquematizados con precisión, como se muestra en la figura 2.14.



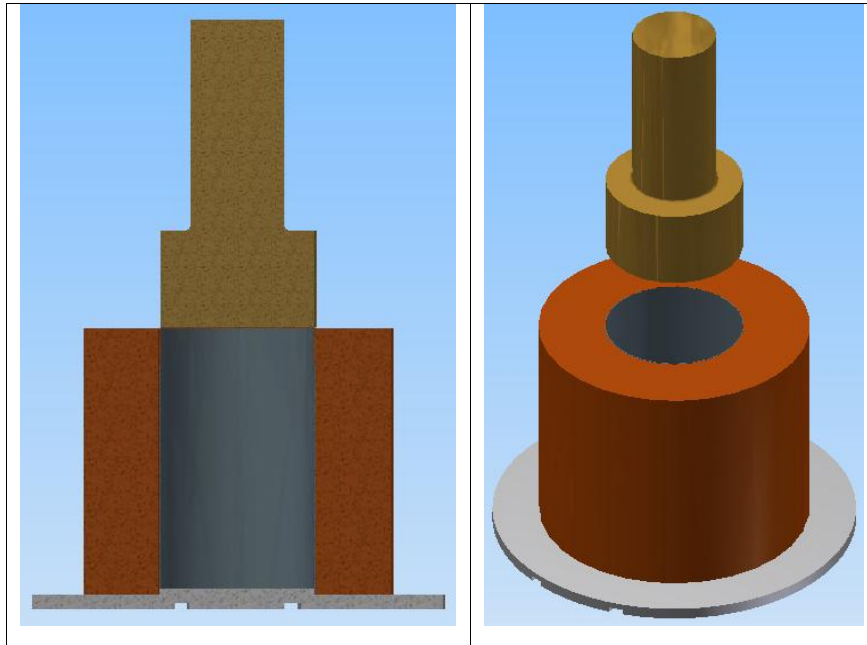


Figura 2.14. Ensamble del sistema

Elaboración propia

El material del pistón corresponde al acero al carbono SAE 4340, mismo que se usa para la fabricación de cigüeñales. Este material será maquinado mediante un torno para obtener la forma descrita en la figura 2.11. El plato también usará el mismo método de fabricación a partir del mismo material. Las propiedades mecánicas de este acero se encuentran en la tabla adjunta en el apéndice B.

Previo al maquinado se realizará un prototipado mediante impresión 3D a escala real para asegurar que todas las piezas encajen correctamente en el equipo real. Este paso adicional permitirá evaluar cualquier detalle pasado por alto durante la simulación virtual y además dará la seguridad que la pieza maquinada operará de forma correcta.

Con la ayuda de una impresora 3D marca MakerBot, modelo Replicator Mini, número de serie M50006139, propiedad de Fernando Soria (figura 2.15), se procedió a imprimir la cabeza del pistón, siendo ésta la parte más importante ya que posee el diámetro necesario para que el resto de piezas encajen a la perfección. Debido al tamaño de la impresora, se optó por imprimir la cabeza en 4 partes iguales como se observa en la figura 2.16.

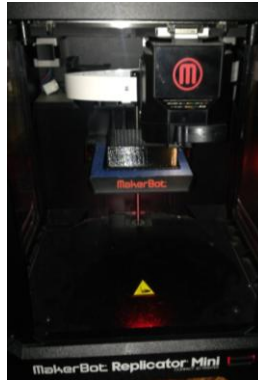


Figura 2.15. Impresión de una sección de la cabeza del pistón

Elaboración propia



Figura 2.16. Sección de la cabeza del pistón

Elaboración propia

Una vez impresas las 4 partes, se las unió mediante cemento de contacto (figura 2.17) y se comprobó que calzara de manera efectiva en la jaula de ardilla como se puede apreciar en la figura 2.18. Al no existir inconvenientes derivados de fricción o atasco del pistón se procedió con el maquinado, teniendo la certeza de que se cumplen las especificaciones requeridas.

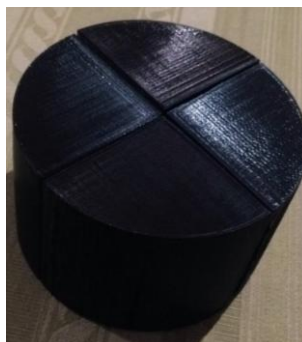


Figura 2.17. Cabeza del pistón impresa en 3D

Elaboración propia



Figura 2.18. Verificación de dimensión de la cabeza del pistón en la jaula de ardilla

Elaboración propia

2.4 Criterio de Diseño

En la sección 2.15 de la cuarta edición de *Diseño de Máquinas*, Norton habla sobre Concentración del Esfuerzo y establece que “*cualquier cambio en la geometría de la sección transversal de un elemento mecánico, provocará concentraciones de esfuerzos localizados*”. Cambios repentinos deberían eliminarse o ser minimizados como sea posible en el diseño. Los materiales dúctiles son más propensos a ceder localmente en estos concentradores, mientras que el resto de la geometría que esté lejos permanecerá debajo del punto de fluencia. Durante esas fallas locales, se provoca un cambio de pendiente en el aumento significativo de los esfuerzos. Esto se puede ver claramente en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria (figura 2.19), donde en el rango plástico los esfuerzos aumentan lentamente a medida que más de la sección transversal es deformada, hasta su eventual punto de ruptura.

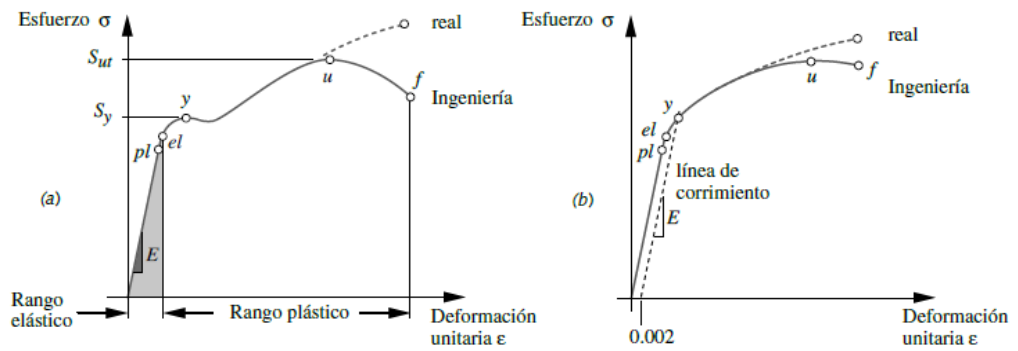


Figura 2.19. Curvas de ingeniería y de esfuerzo-deformación unitaria real para materiales dúctiles: a) acero al bajo carbono, b) acero templado al alto carbono

Fuente: Norton, 2011

Uno de los desafíos más grandes que un diseñador debe enfrentar es la reducción de concentradores de esfuerzos. Una regla de pulgar para recordar durante el diseño es que una esquina mientras más puntiaguda sea, y más grande sea el cambio de sección, la concentración de esfuerzos será más severa. El análisis de estas curvas de concentradores de esfuerzos se puede ver en la figura 2.20.

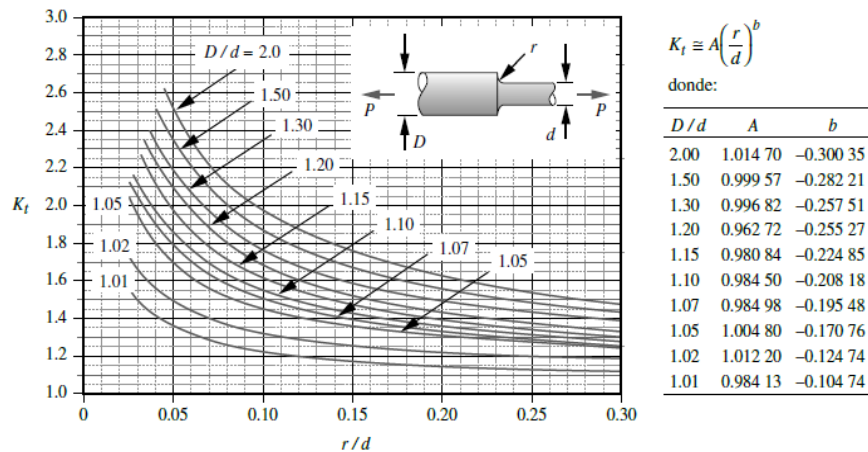


Figura 2.20. Factor geométrico de concentración de esfuerzos K_t para un eje con filete de hombro en tensión axial

Fuente: Norton, 2011

Estos criterios se pueden resumir en dos puntos:

1. Evitar en lo posible cambios repentinos en la sección transversal del diseño.
2. Esquinas puntiagudas deberán ser evitados por completo y usar radios de transición lo más grande posible.

Una forma de tener una perspectiva más visual del estado de esfuerzos en un diseño consiste en realizar una analogía de “fuerza-flujo”. Esta visualización relaciona las fuerzas que actúan en una pieza de forma similar a las líneas de flujo de un fluido ideal compresible pasando por un ducto de secciones distintas. Este diagrama muestra una concentración en las regiones más pequeñas (figura 2.21).

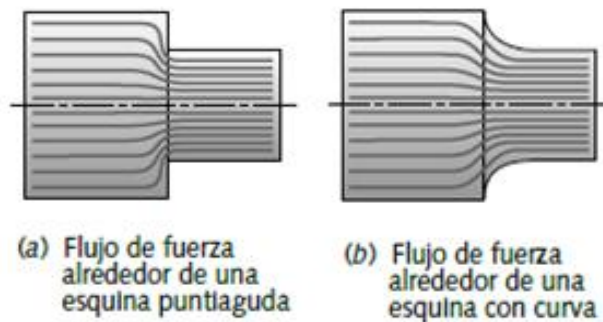


Figura 2.21. Analogía fuerza-flujo de piezas con contorno

Fuente: Norton, 2011

Para calcular el esfuerzo al que estará sometido el pistón, se aplica el criterio de la energía de distorsión de Von Mises-Hencky. La energía total de deformación U en una unidad de volumen (densidad de la energía de deformación) asociada con cualquier esfuerzo se define como “*el área bajo la curva de esfuerzo-deformación unitaria, hasta el punto donde se aplica el esfuerzo, como se indica en la figura 2.22 para un estado de esfuerzos unidireccional*”.

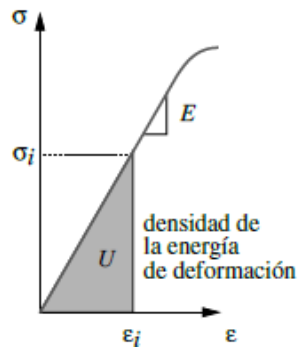


Figura 2.22. Densidad de la energía interna de deformación en una pieza flexionada

Fuente: Norton, 2011

El criterio de Von Mises-Hencky compara esta energía de distorsión por unidad de volumen con la resistencia a la fluencia del material. Existen casos en los que están presentes esfuerzos de tensión y cortante combinados, actuando sobre un mismo punto. Definir un esfuerzo efectivo que sirva para representar la combinación de esfuerzos es, a menudo, lo más conveniente. El enfoque de la energía de distorsión proporciona un buen medio para hacer esto en materiales dúctiles. El *esfuerzo efectivo de Von Mises* σ' se define como “*el esfuerzo de tensión uniaxial que crearía la misma energía de distorsión que la combinación real de los esfuerzos aplicados*”. Este enfoque permite tratar casos de esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante, como si fueran resultado de una carga de tensión pura.

El software utiliza este criterio para la simulación, siendo esto beneficioso porque es el más preciso y el de mayor confiabilidad comparado con otros.

Las fuerzas que se usarán en la simulación deberán ser estimadas de forma correcta. Dado que el material a ser compactado no es homogéneo por los espacios entre las semillas, se deberá usar un modelo matemático distinto a los típicos vistos en los métodos de manufactura tradicionales. Según el trabajo de David Herak, Abraham Kabutey, Monika Divisova y Satya Simanjuntak se puede utilizar el siguiente modelo específicamente para la compactación de semillas de *Jatropha Curcas* dado un diámetro específico de la jaula de compresión y la deformación a la que se desea llegar.

$$F = CD^2 * \left[\tan \left(G \frac{x}{H} \right) \right]^2 \quad (ec. 1)$$

donde:

- D es el diámetro interno de la jaula en [mm]
- H es la altura inicial de semilla dentro de la jaula en [mm]
- C y G son constantes experimentales [adimensionales]
- X es la deformación de las semillas en [mm]
- F es la fuerza necesaria para comprimir las semillas en [N]

En la tabla 2.3 se registran valores promedios para C y G en función del diámetro. El valor máximo visto corresponde a un diámetro de 100mm. La jaula del equipo en cuestión tiene un diámetro interno correspondiente a 126mm, por lo tanto se deberá hacer una extrapolación para estas constantes.

Tabla 2.3. Cantidad promedio determinada de coeficientes de esfuerzo de comportamiento mecánico, coeficientes de fuerza de comportamiento mecánico y coeficientes de compresión

D (mm)	C _A (N mm ²)	A _{DA} (kN)	G _A (-)
60	1.06 ± 0.21	3.82 ± 0.74	2.03 ± 0.07
80	0.85 ± 0.11	5.42 ± 0.71	2.09 ± 0.09
100	1.16 ± 0.09	11.63 ± 0.90	1.96 ± 0.04

D – inner diameter of pressing vessel, C_A – average stress coefficient of mechanical behaviour, A_{DA} – average force coefficient of mechanical behaviour, G_A – average compression coefficients.

Fuente: Herak, 2013

Ya que para este equipo se busca tener la máxima extracción de aceite posible se hará uso del trabajo de David Herak, Abraham Kabutey y Petr Hrabe en el que determinaron el punto de extracción máxima para estas semillas. Según este trabajo, el punto de extracción máxima se da a una deformación de 0.96 de la altura inicial de las semillas en la jaula.

Conociendo la deformación necesaria, se puede estimar la compresión vertical, X. Para esto se usará el concepto de deformación real: [6]

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{H}{x}\right) \quad (\text{ec. 2})$$

En la figura 2.23 se muestra la variación de los factores experimentales C y G de la tabla 2.3 en función del diámetro D del plato. Las ecuaciones que aproximan las tendencias lineales para cada factor servirán para extrapolar los mismos para el diámetro deseado.

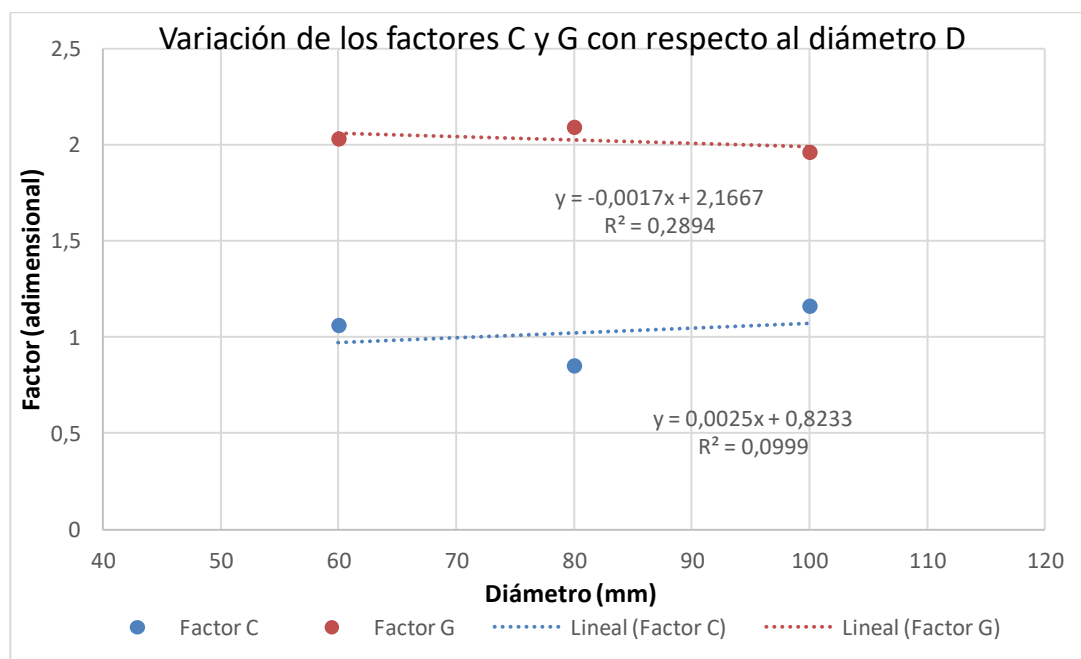


Figura 2.23. Variación de los factores experimentales C y G con respecto al diámetro D del plato

Elaboración propia.

De la extrapolación mencionada se obtuvieron valores promedio para C y G de 1.14 y 1.95, respectivamente. Usando estos resultados se obtiene un valor para x de 65mm partiendo de una altura inicial de 171mm (ec.2). Con esto se puede estimar la fuerza (ec. 1) para la máxima extracción de aceite con un valor de 15,533N. La prensa hidráulica sólo recibe valores de presión para el proceso, por lo tanto, este valor debe ser estimado. Para esto se utiliza la definición de presión. [6]

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{ec. 3})$$

donde:

- F es la fuerza de compresión en [N]
- A el área transversal a la fuerza F en [mm^2]

Usando esto se estima una presión necesaria de 1.24 MPa o 180 Psi.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones de esfuerzos-deformaciones realizadas para el diseño final escogido en el capítulo 2 de cada elemento del sistema, las condiciones de las piezas al inicio y al final del desarrollo de este proyecto, las pruebas experimentales realizadas y un breve análisis de costos para la elaboración de este sistema.

De acuerdo con el criterio de energía de distorsión, el esfuerzo equivalente de Von Mises (11 MPa) en el cambio de sección se encuentra muy por debajo del esfuerzo de fluencia del acero SAE 4340 (855 MPa) propuesto para el pistón como se puede observar en la figura 3.1. Esto genera suficiente confianza para mantener este cambio de sección y descartar un cambio hacia una sección cónica el cual no mejoraría mucho este esfuerzo. Además el rediseño de sección de esquina recta a esquina curva no es necesario ya que los esfuerzos que el análisis muestra son muy inferiores al esfuerzo de fluencia del material.

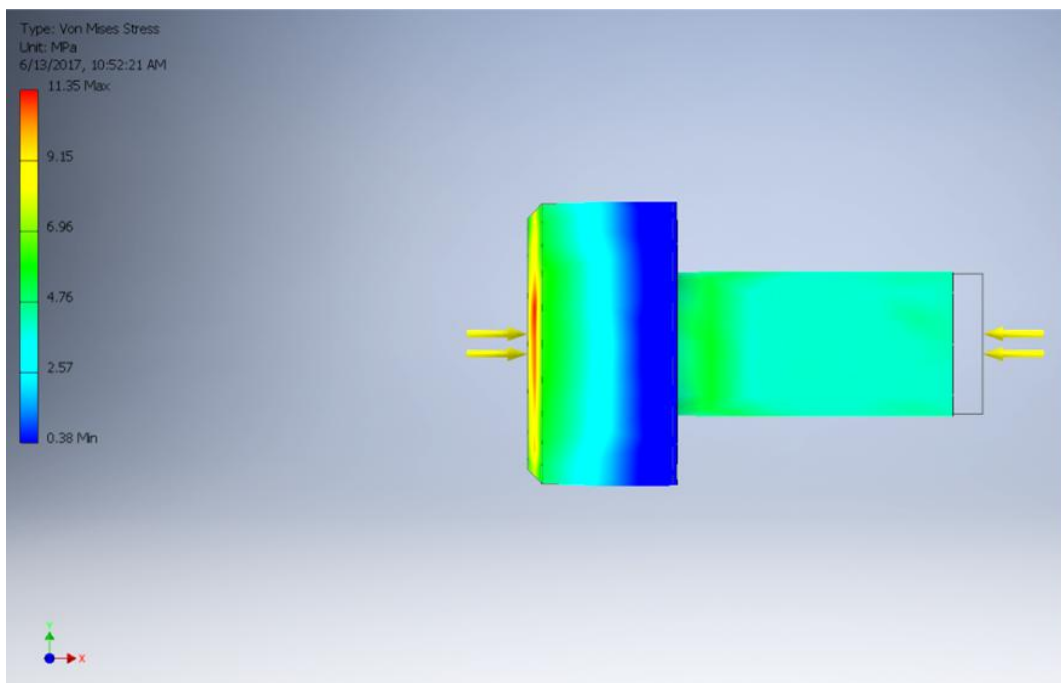


Figura 3.1. Simulación de pistón bajo carga

Elaboración propia

Para el dimensionamiento de los canales y altura del disco interno del plato se recurrió a una experimentación computacional en la que definimos un parámetro de diseño donde la altura de la parte superior del disco sería igual a la altura de los canales. Con esto se procedió a simular con altura de 2, 3, 4, 5, 6, 7 mm para un plato de un espesor total de 16mm. Los resultados de esta experimentación se pueden ver en la figura 3.2. Aquí se puede observar que el esfuerzo de Von Mises disminuye a medida que aumenta la altura definida y tiende a una asíntota en aproximadamente 74MPa. La deformación en vertical del plato presenta un comportamiento parabólico. A partir de este gráfico se decidió escoger una altura de 5mm ya para este valor, el esfuerzo de Von Mises es el mínimo (72.7MPa) manteniendo una deformación de 0.01139mm.

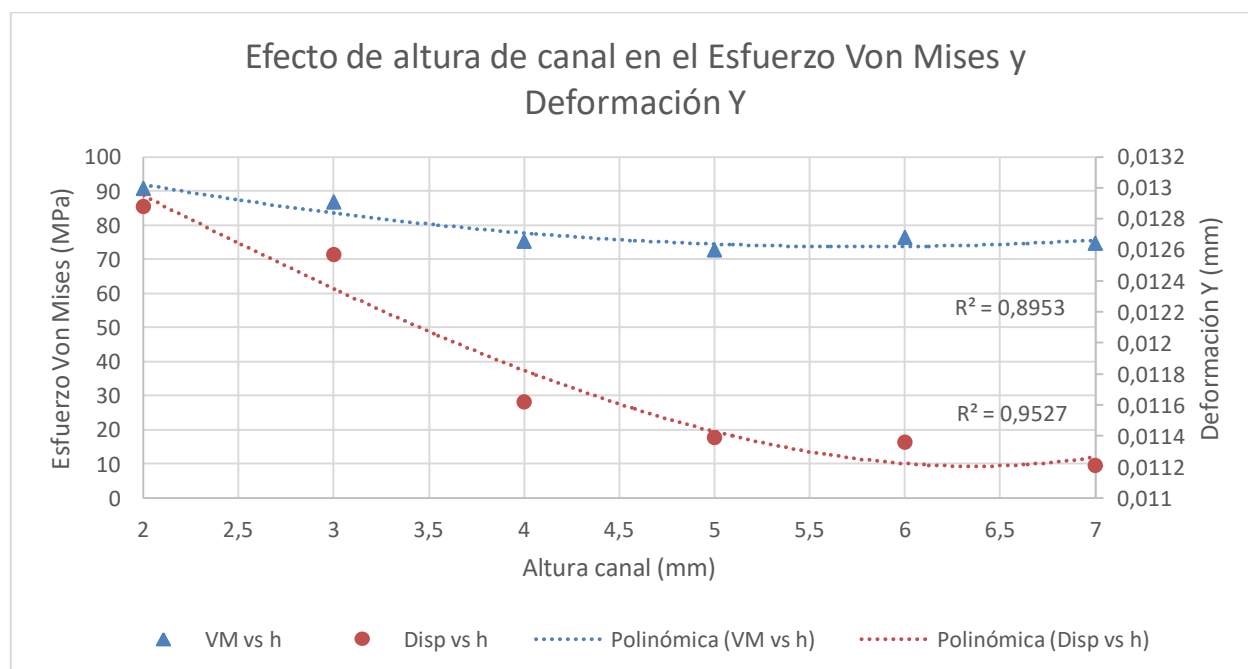


Figura 3.2. Efecto de la altura del canal sobre el esfuerzo máximo de Von Mises y la deformación Y del plato

Elaboración propia.

El plato escogido soportara la carga estimada para la compresión correspondiente a 800 Psi. El efecto se puede ver en la figura 3.3 donde se refleja el esfuerzo máximo de 72.72MPa. Esto muestra un factor de seguridad de 10.7 lo cual es más que satisfactorio para este elemento.

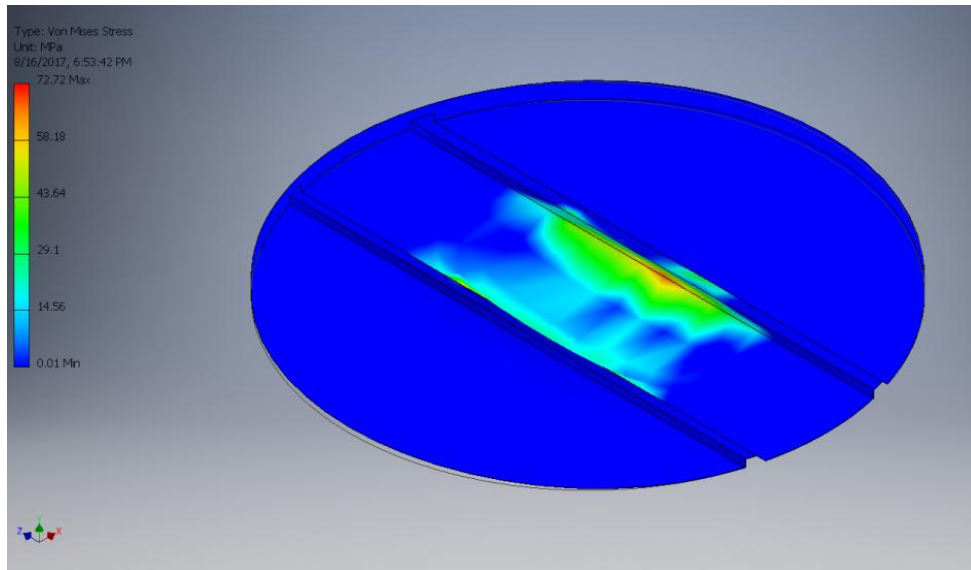


Figura 3.3. Simulación de plato bajo carga

Elaboración propia

Un parámetro que hemos considerado importante para el diseño del plato corresponde a la deformación máxima que este vaya a experimentar. Para esto hemos optado por restringir la deformación a 0.0035 del diámetro interno de la jaula (126.7mm), es decir que la deformación máxima satisfactoria corresponderá a 0.44mm [11]. De acuerdo con la simulación realizada, la deformación máxima tiene un valor estimado de 0.01139mm. Este resultado muestra que el elemento mecánico no pasará del límite propuesto.

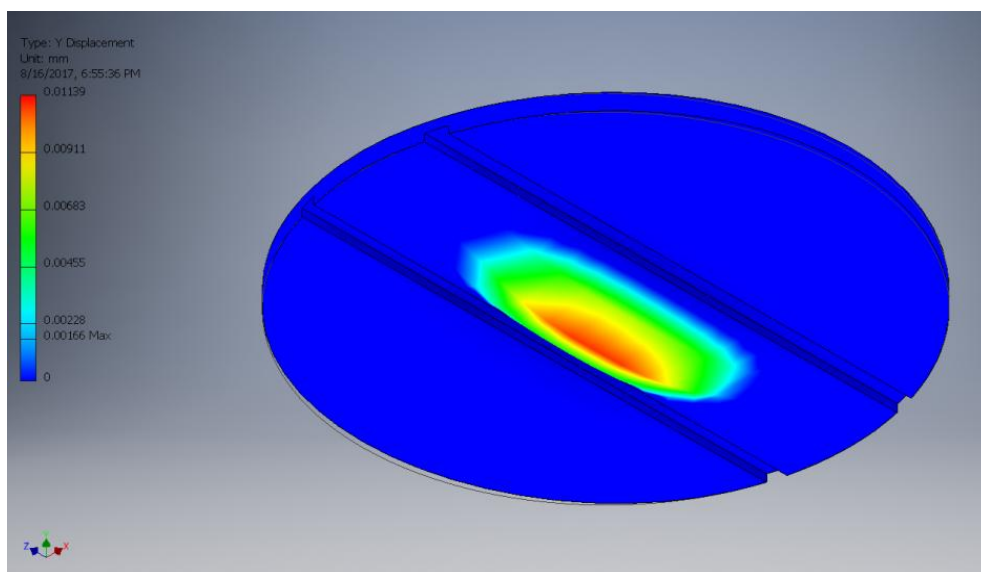


Figura 3.4. Simulación de deformación en el plato

Elaboración propia

Los elementos mecánicos del equipo fueron limpiados y aplicados un posterior un baño químico dadas las condiciones en las que se encontraban. En las figuras 3.5 y 3.6 se pueden apreciar el estado del pistón y la jaula de ardilla al inicio de este proyecto.



Figura 3.5 Estado pistón Mayo 2017

Elaboración propia



Figura 3.6 Estado jaula de ardilla Mayo 2017

Elaboración propia

El mecanizado del pistón y la condición final del mismo se detallan a continuación en la figura 3.7 y figura 3.8, respectivamente.

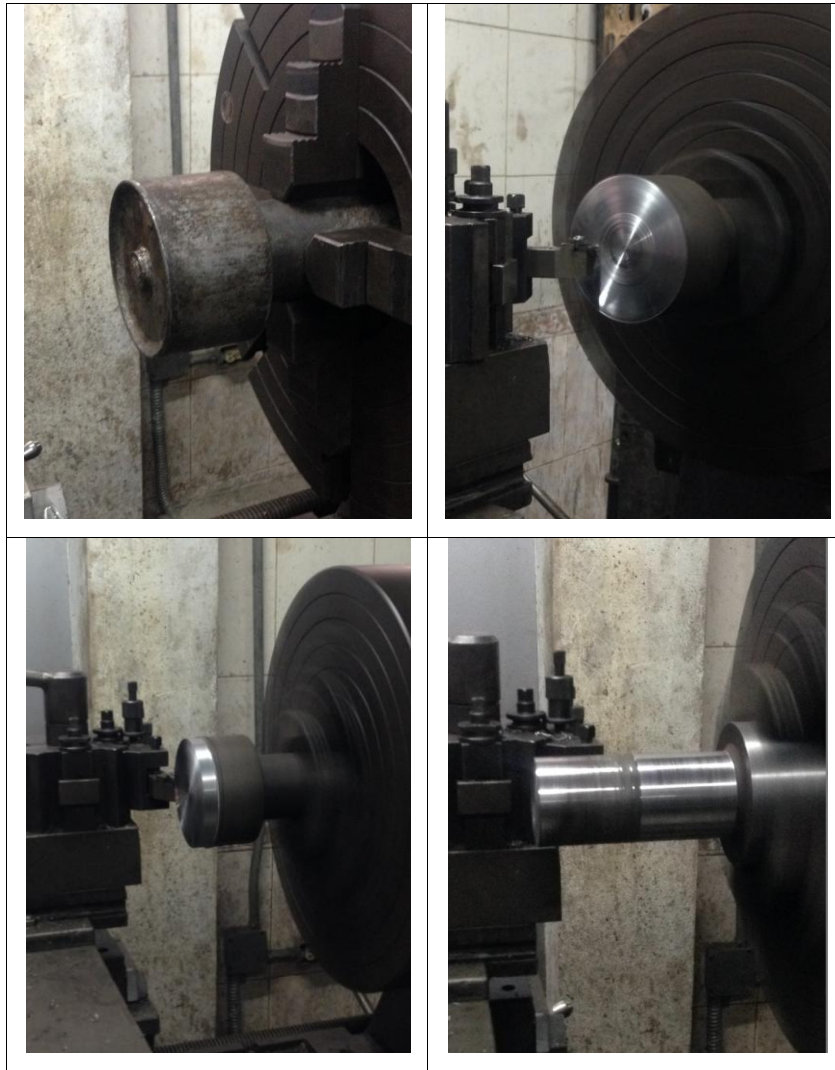


Figura 3.7 Proceso de maquinado del pistón

Elaboración propia



Figura 3.8 Condición final del pistón Agosto 2017

Elaboración propia

A la jaula de ardilla se le realizó una rectificación en la parte inferior ya que ésta presentaba una deformación en su base ocasionada por pruebas previas de extracción (figura 3.9) y dos perforaciones de 1mm de diámetro y 1mm de profundidad a 180° de separación entre cada una. El proceso de rectificado se lo presenta en la figura 3.10 y el acabado final en la figura 3.11.



Figura 3.9 Deformación de base de jaula de ardilla

Elaboración propia

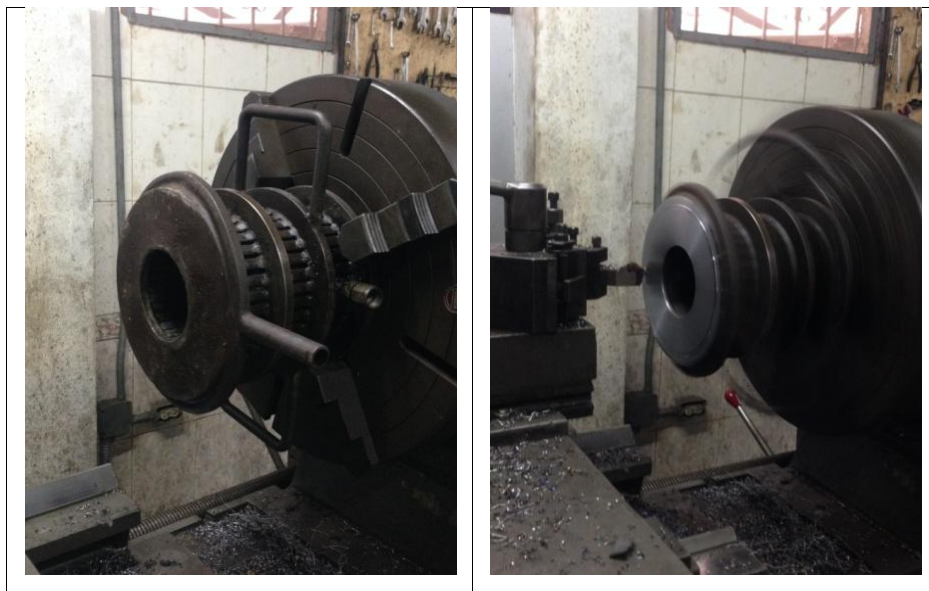


Figura 3.10 Proceso de rectificación de la jaula

Elaboración propia



Figura 3.11 Condición final de la jaula Agosto 2017

Elaboración propia

Al plato se le realizó un refrentado con el fin de retirar el óxido superficial y hacer planas ambas caras, además de colocarle dos pernos de 1mm de diámetro que servirán como guías para la jaula (figura 3.12). El plato maquinado se muestra en la figura 3.13.

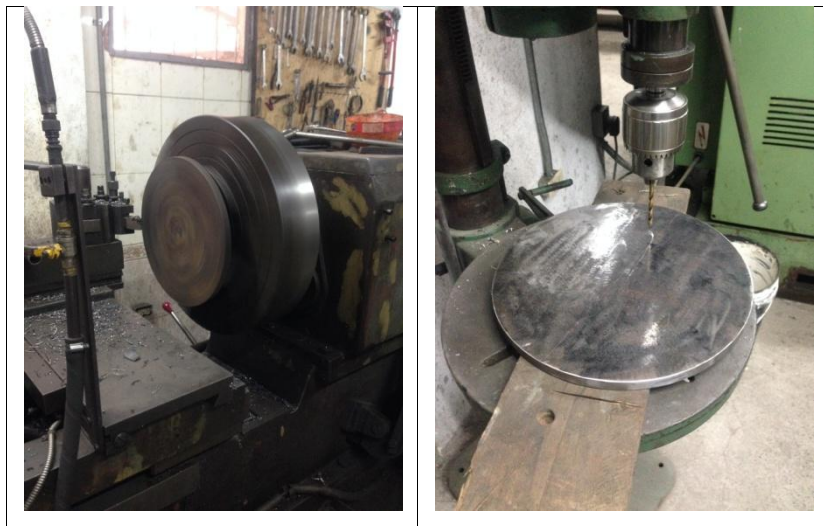


Figura 3.12 Proceso de refrentado y perforación del plato

Elaboración propia



Figura 3.13 Condición final del plato Agosto 2017

Elaboración propia

Finalmente, se procedió a ensamblar todas las piezas en la estructura (figura 3.14), y posteriormente se efectuó la prueba de extracción de aceite de una cantidad determinada de semillas.



Figura 3.14 Ensamble final

Elaboración propia

Con la ayuda de una balanza digital marca CAS, modelo 50001NF, número 1007378, capacidad de 5000g y con precisión 0.1g, propiedad de la Dra. Emérita Delgado (figura 3.15), se midió 2185 g de semillas de *Jatropha Curcas* (figura 3.16) para el ensayo.



Figura 3.15 Balanza digital

Elaboración propia



Figura 3.16 Semillas de Jatropha disponibles

Elaboración propia

El recipiente utilizado para la recolección de aceite fue una botella plástica de 600ml de capacidad y una masa de 16.1g (figura 3.17).



Figura 3.17 Recipiente para aceite extraído

Elaboración propia

Con el sistema cargado (figura 3.18), se inició el proceso de compresión y al cabo de 27 minutos, tiempo considerado desde la carga de las semillas al equipo, se logró la extracción de aceite como se aprecia en las figuras 3.19 y 3.20.



Figura 3.18 Sistema cargado con semillas

Elaboración propia



Figura 3.19 Extracción de aceite

Elaboración propia



Figura 3.20 Aceite extrayéndose

Elaboración propia

Finalizada la recolección del aceite, se procedió a pesar la botella con la cantidad de aceite extraído (figura 3.21), obteniendo como resultado un peso total de 190.6g. Restándole la masa de la botella de 16.1g (figura 3.17), se consigue una masa de aceite extraído igual a 174.5g.

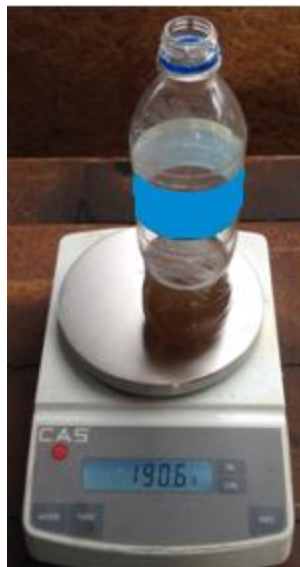


Figura 3.21 Masa de aceite extraído

Elaboración propia



Figura 3.22 Aceite total extraído

Elaboración propia

Finalmente, se retiró manualmente el pistón del sistema y se removi6 el filtro junto con la torta de forma r6pida y sencilla, sin inconvenientes de atascamiento. Tanto la malla con la torta como la torta sola se las puede observar en la figura 3.23.



Figura 3.23 Torta proteínica al final de la operación

Elaboración propia

Durante el proceso de mecanizado se pens6 en una soluci6n m6s adecuada para el funcionamiento del plato con la que obtendr6amos el mismo comportamiento que en el dise1o original. Este plato final es el mostrado en los resultados de este cap6tulo y el plano con sus dimensiones se encuentra en el ap6ndice C.3.

Al realizar las pruebas experimentales, la compresión de las semillas disminuyó considerablemente comparada con pruebas anteriores. Esta reducción se dio principalmente debido a que el diseño propuesto, con el plato plano, aumenta el área de contacto en la parte inferior de la torta, a diferencia de la geometría cónica y agujero central del plato usado previamente. Esto permite tener una mejor extracción con una menor presión.

De las pruebas realizadas se determinó que el porcentaje de extracción es del 8% (ec. 4). En base a las pruebas realizadas se estima una reducción en un 55% del tiempo original de extracción de aceite (60 minutos) equivalente a 27 minutos utilizando la ec.5. Todo esto fue realizado a una presión 66% menor (estimado con la ec.6) que la que se trabajaba inicialmente. Esto implica que el motor de la prensa ahora consumía 26% menos energía para lograr la extracción de aceite, esto calculado con la ec.7.

$$\eta_{extracción} = \frac{\text{masa de aceite (g)}}{\text{masa de semillas (g)}} \times 100 = \frac{174.5}{2185.6} \times 100 = 7.98\% \quad (\text{ec. 4})$$

$$\% \Delta t = \frac{t_{antes} - t_{actual}}{t_{antes}} \times 100 = \frac{60 - 27}{60} \times 100 = 55\% \quad (\text{ec. 5})$$

$$\% \Delta p = \frac{p_{antes} - p_{actual}}{p_{antes}} \times 100 = \frac{600 - 200}{600} \times 100 = 66\% \quad (\text{ec. 6})$$

$$\begin{aligned} \% \Delta P &= \left(1 - \frac{P_{actual}}{P_{antes}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{p_{actual} * t_{antes}}{p_{antes} * t_{actual}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{200 * 60}{600 * 27} \right) \times 100 \\ &= 26\% \quad (\text{ec. 7}) \end{aligned}$$

Se consultó en el mercado local el precio de la materia prima para la construcción de cada parte del equipo extractor de aceite. El valor por kg de acero SAE 4340 corresponde a \$1.30. El costo promedio de mano de obra para el mecanizado, consultado también en el mercado local, corresponde a 40 \$/hora. Para estimar el costo de elaboración de cada pieza, se consideraron diferentes horas de trabajo para cada una. El tiempo de mecanizado para el pistón fue de aproximadamente

dos horas, mientras que la mecanización de la jaula duró una jornada laboral entera (ocho horas) y el plato tuvo un tiempo de manufactura de una hora y media. Los valores de materia prima, mano de obra y los costos totales por cada parte son presentados en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Desglose de costos para la construcción del equipo extractor de aceite

Materia prima	Costo (\$)
Plato	13,96
Pistón	15,11
Jaula	19,50
Barra perfil L	8,00

Mano de obra	Costo (\$)
Torneado pistón	80,00
Elaboración de Jaula	320,00
Elaboración de plato	60,00

Costo total por partes (\$)	
Pistón	95,11
Jaula	339,50
Plato	73,96
Imprevistos (10%)	50,86
Costo total del Equipo (\$)	559,43

Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo final, se presentan las conclusiones del proyecto así como las recomendaciones a seguir para futuras pruebas de extracción de aceite con el equipo diseñado.

De las pruebas realizadas, se concluye lo siguiente:

1. El diseño final del pistón permite un proceso de compresión de semillas más eficiente y por otro lado se logra evitar el problema de atascamiento del elemento de compresión.
2. El diseño del plato inferior y la inclusión del filtro eliminaron la dificultad de retirar la torta residual del sistema.
3. Se verificó que el plato inferior no sufrió ningún tipo de deformación visible como en casos anteriores, motivo por el cual no hubo atascamiento alguno.
4. Se observó, mediante decantación visual, que el aceite recolectado presenta un menor grado de impurezas en comparación a pruebas anteriores, Esta disminución en la cantidad de sólidos insolubles se debe a la implementación de la malla de acero inoxidable como filtro colador.
5. El proceso fue mejorado en términos de producción logrando duplicar la cantidad de aceite extraído por hora.
6. La presión para el proceso de extracción de aceite de las semillas se redujo en un 66% de la presión original de trabajo, logrando una reducción del consumo de energía del sistema.

Se recomienda seguir los pasos que se muestran a continuación para prevenir complicaciones durante la operación:

1. Llenar la jaula con semillas hasta la altura marcada para garantizar que el pistón se quede centrado y se aplique la fuerza de diseño.

2. Mantener cerrado el equipo hasta el final de la operación. El abrirlo elimina el contacto superficial entre torta y plato, creando un vacío por el cual la presión se disipa, comprometiendo la integridad de la operación
3. Una vez que el aceite empieza a fluir, dejar que éste viaje hasta el recipiente.
4. De ser necesario mover el equipo, se debe hacerlo con el pistón removido.
5. Cambiar regularmente filtro colador para asegurar la obtención de aceite limpio.
6. Nunca, bajo ninguna circunstancia, proceda a compactar las semillas con el pistón desalineado o con la estructura inclinada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Betancur Prisco, J. C. (2014). *Análisis de los factores relevantes en la extracción mecánica de aceite de Jatropha Curcas, cultivadas en la subregión occidental de Antioquia (Colombia)*. Medellín: Universidad EAFIT.
2. BIODISOL. (s.f.). *Jatropha curcas (physic nut, pinhão manso, tempate)*. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de <http://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/jatropha-curcas-physic-nut-pinhao-manso-tempate/>
3. CDTS. (2015). *Descripción del Sistema de Extracción de Aceite*. Guayaquil: ESPOL.
4. FACT. (2009). *Jatropha Handbook*. Eindhoven: FACT.
5. Ferchau, E. (2000). *Equipment for decentralized cold pressing of oil seeds*. Kammergaardsvej: Nordic Folkecenter for Renewable Energy.
6. Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México D.F.: McGraw-Hill.
7. Herak, D., Kabutey, A., & Hrabec, P. (2013). *Oil point determination of Jatropha curcas L. bulk seeds under compression loading*. Ámsterdam: Elsevier.
8. Herak, D., Kabutey, A., Divisova, M., & Simanjuntak, S. (2013). *Mathematical model of mechanical behaviour of Jatropha curcas L. seeds under compression loading*. Ámsterdam: Elsevier.
9. INIAP. (s.f.). *Piñón*. Recuperado el 12 de Mayo de 2017, de <http://www.iniap.gob.ec/web/pinon/>
10. Lafargue-Pérez, F., Barrera-Vaillant, N., Chitue de Assuncao-Nascimento, J., Díaz-Velásquez, M., & Rodríguez-Martínez, C. (2012). *Caracterización físico-química del aceite vegetal de Jatropha curcas L.* Santiago de Cuba: Universidad de Oriente.
11. Martín, J. A. (22 de Agosto de 2014). NEC-SE-HM. *Estructuras de Hormigón Armado*. Quito, Pichincha, Ecuador: Norma Ecuatoriana de la Construcción.
12. Mendoza Vargas, J. J. (2011). *Estudio de factibilidad para producción de materia prima, extracción artesanal, comercialización de aceite y derivados del piñón Jatropha curcas*. Manta: Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

13. Nolasco Guzmán, E. D. (2015). *Evaluación de cuatro métodos de extracción de aceite de la semilla de piñón (Jatropha curcas) var. Cabo verde y cuantificación de sus ésteres de forbol*. Tegucigalpa: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
14. Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall.
15. Peralta, J., Delgado, E., Aveiga, G., & Barriga, A. (2015). *Desarrollo del sistema de extracción de aceite vegetal puro de Jatropha Curcas para uso como combustible directo o para fabricación de biodiesel*. Guayaquil: ESPOL.
16. SCTD. (2008). *Oil extraction*. Warwickshire: Practical Action.
17. SENPLADES. (2003). *Objetivos Nacionales del Buen Vivir*. Recuperado el 21 de Mayo de 2017, de <http://www.buenvivir.gob.ec/objetivos-nacionales-para-el-buen-vivir>
18. Toral, O. C., Iglesias, J. M., Montes de Oca, S., Sotolongo, J. A., García, S., & Torsti, M. (Agosto de 2008). *Jatropha curcas L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba*. Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942008000300001
19. Viaintermedia.com. (1 de Octubre de 2007). *Cie Automotive compra una empresa guatemalteca especializada en el cultivo de Jatropha*. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de <http://www.energias-renovables.com/biocarburantes/cie-automotive-compra-una-empresa-guatemalteca-especializada>

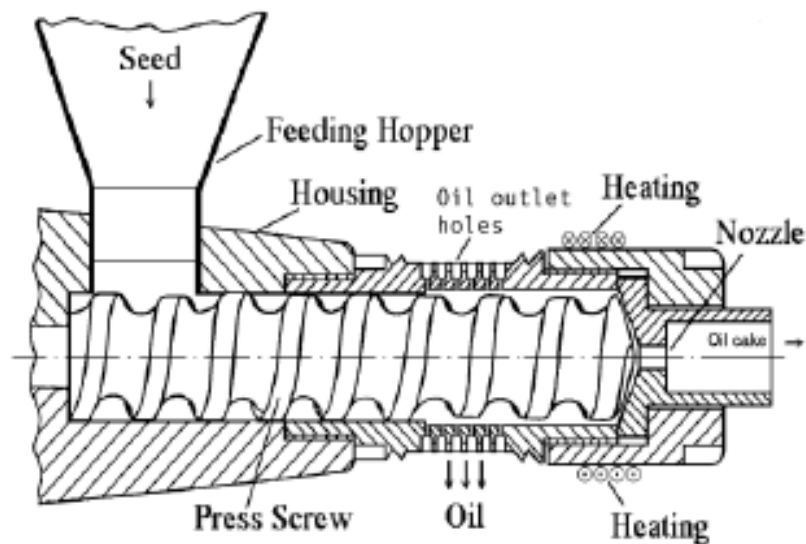
APÉNDICES

Apéndice A.1. Esquema de prensa tipo Expeller	49
Apéndice A.2. Prensa tipo Ram Bielenberg	50
Apéndice B.1. Propiedades mecánicas de algunos aceros	52
Apéndice C.1. Plano final del pistón	54
Apéndice C.2. Plano final de plato de salida	55
Apéndice C. 3. Plano final de plato de salida alterno.....	56

APÉNDICE A
SISTEMAS TRADICIONALES DE EXTRACCIÓN DE ACEITE

PRENSA TIPO EXPELLER

También conocida como prensa de tornillo, cuenta con un tornillo sinfín dentro de una camisa, encargado de transportar las semillas y aumentar la presión sobre ellas, desplazando el aire y reduciendo el espacio entre ellas, hasta llegar a una restricción (boquilla), donde el aceite fluye por el espacio entre el tornillo y la camisa hasta salir por los agujeros de salida en la parte inferior. La extracción por medio de este mecanismo se ve afectada por varios factores como la velocidad de rotación, geometría del tornillo y camisa, temperatura, diámetro de la boquilla, porcentaje de humedad, entre otras.



Apéndice A.1. Esquema de prensa tipo Expeller

Fuente: Ferchau, 2000

PRENSA TIPO RAM BIELENBERG

Prensa manual que combina un pistón y un cilindro o camisa para comprimir las semillas y lograr la extracción del aceite de las mismas, típicamente usada para producciones pequeñas y por lotes y en zonas rurales dada la poca o nula disponibilidad de energía eléctrica.



Apéndice A.2. Prensa tipo Ram Bielenberg

Fuente: SCTD, 2008

APÉNDICE B
TABLA DE ACEROS

Tabla E-10 Propiedades mecánicas de algunas aleaciones y herramientas de acero

Datos de varias fuentes.* Valores aproximados. Consulte a los fabricantes de material para mayor información

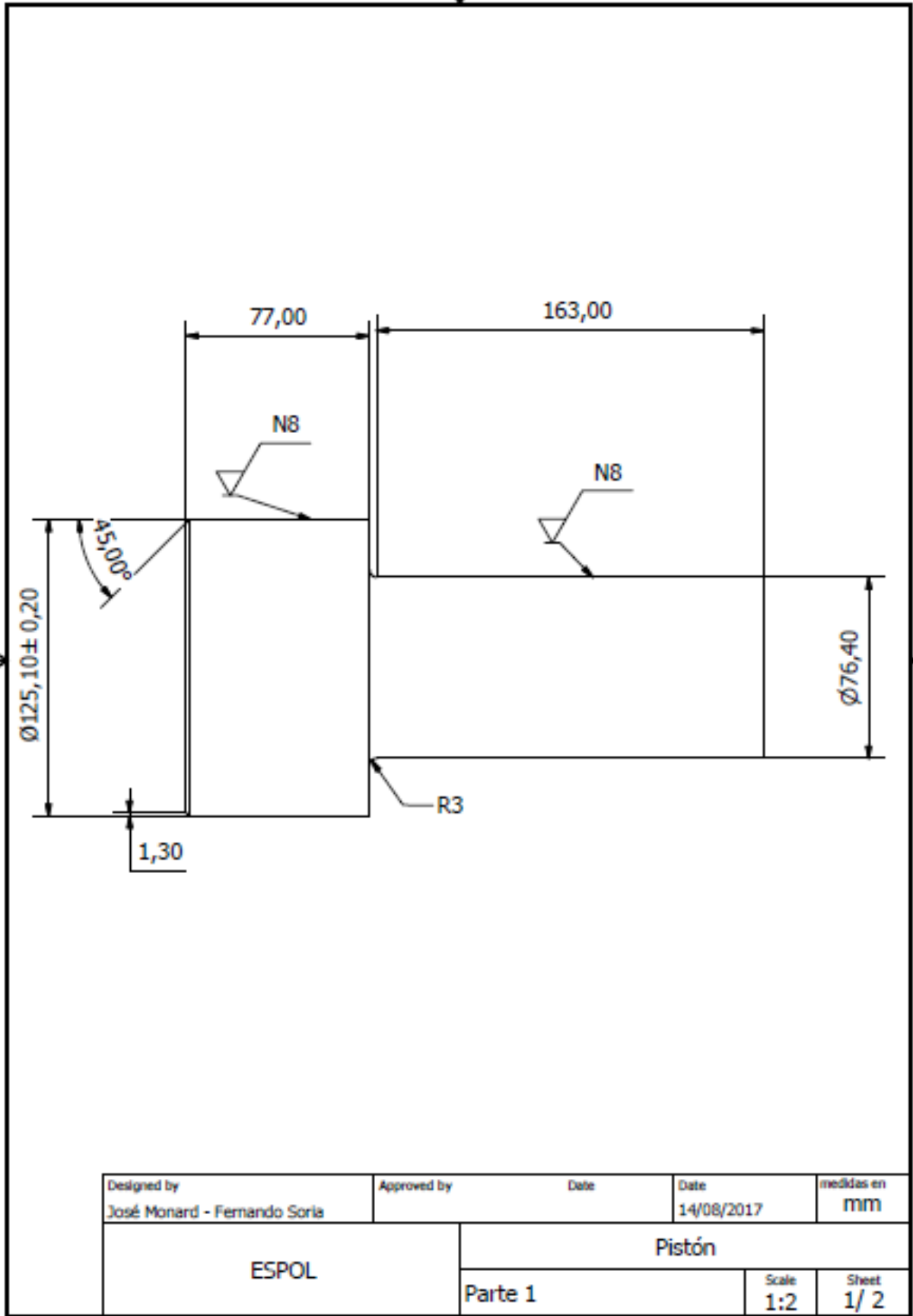
Número SAE/AISI	Condición	Resistencia a la fluencia por tensión (0.2% de deformación remanente)		Resistencia última a la tensión		Elongación en 2 in %	Dureza Rockwell o Brinell
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1340	recocido	63	434	102	703	25	204HB
	templado y revenido	109	752	125	862	21	250HB
4027	recocido	47	324	75	517	30	150HB
	templado y revenido	113	779	132	910	12	264HB
4130	recocido @ 1 450 °F	52	359	81	558	28	156HB
	normalizado @ 1 650 °F	63	434	97	669	25	197HB
	templado y revenido @ 1 200 °F	102	703	118	814	22	245HB
	templado y revenido @ 800 °F	173	1 193	186	1 282	13	380HB
	templado y revenido @ 400 °F	212	1 462	236	1 627	10	41HB
4140	recocido @ 1 450 °F	61	421	95	655	26	197HB
	normalizado @ 1 650 °F	95	655	148	1 020	18	302HB
	templado y revenido @ 1 200 °F	95	655	110	758	22	230HB
	templado y revenido @ 800 °F	165	1 138	181	1 248	13	370HB
	templado y revenido @ 400 °F	238	1 641	257	1 772	8	510HB
4340	templado y revenido @ 1 200 °F	124	855	140	965	19	280HB
	templado y revenido @ 1 000 °F	156	1 076	170	1 172	13	360HB
	templado y revenido @ 800 °F	198	1 365	213	1 469	10	430HB
	templado y revenido @ 600 °F	230	1 586	250	1 724	10	486HB
6150	recocido	59	407	96	662	23	192HB
	templado y revenido	148	1 020	157	1 082	16	314HB
8740	recocido	60	414	95	655	25	190HB
	templado y revenido	133	917	144	993	18	288HB
H-11	recocido @ 1 600 °F	53	365	100	689	25	96HRB
	templado y revenido @ 1 000 °F	250	1 724	295	2 034	9	55HRC
L-2	recocido @ 1 425 °F	74	510	103	710	25	96HRB
	templado y revenido @ 400 °F	260	1 793	290	1 999	5	54HRC
L-6	recocido @ 1 425 °F	55	379	95	655	25	93HRB
	templado y revenido @ 600 °F	260	1 793	290	1 999	4	54HRC
P-20	recocido @ 1 425 °F	75	517	100	689	17	97HRB
	templado y revenido @ 400 °F	205	1 413	270	1 862	10	52HRC
S-1	recocido @ 1 475 °F	60	414	100	689	24	96HRB
	templado y revenido @ 400 °F	275	1 896	300	2 068	4	57HRC
S-5	recocido @ 1 450 °F	64	441	105	724	25	96HRB
	templado y revenido @ 400 °F	280	1 931	340	2 344	5	59HRC
S-7	recocido @ 1 525 °F	55	379	93	641	25	95HRB
	templado y revenido @ 400 °F	210	1 448	315	2 172	7	58HRC
A-8	recocido @ 1 550 °F	65	448	103	710	24	97HRB
	templado y revenido @ 1 050 °F	225	1 551	265	1 827	9	52HRC

* Machine Design Materials Reference Issue, Penton Publishing Cleveland Ohio: Metals Handbook, ASM, Materials Park, Ohio.

Apéndice B.1. Propiedades mecánicas de algunos aceros

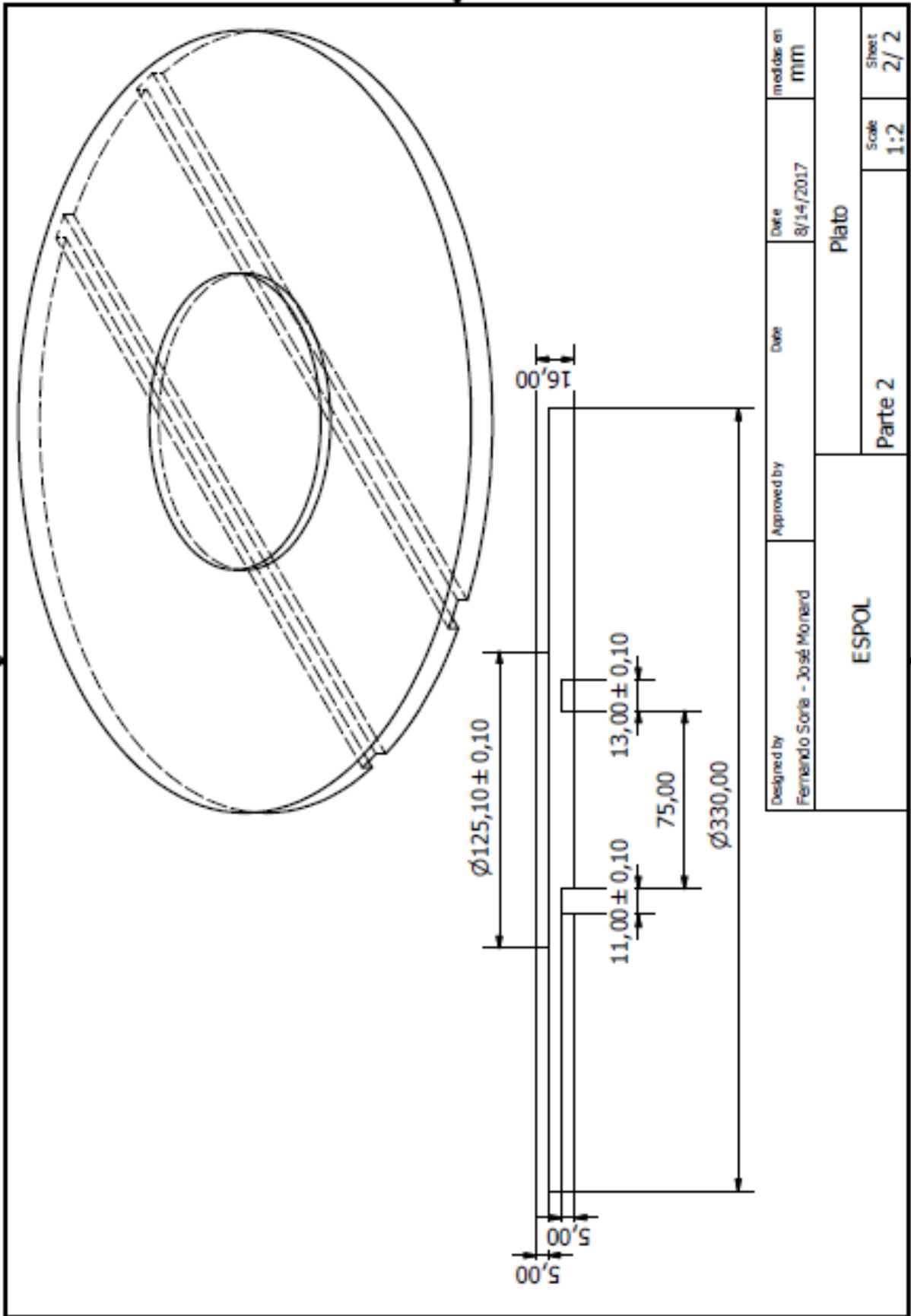
Fuente: Norton (2011)

APÉNDICE C
PLANOS DE ELEMENTOS



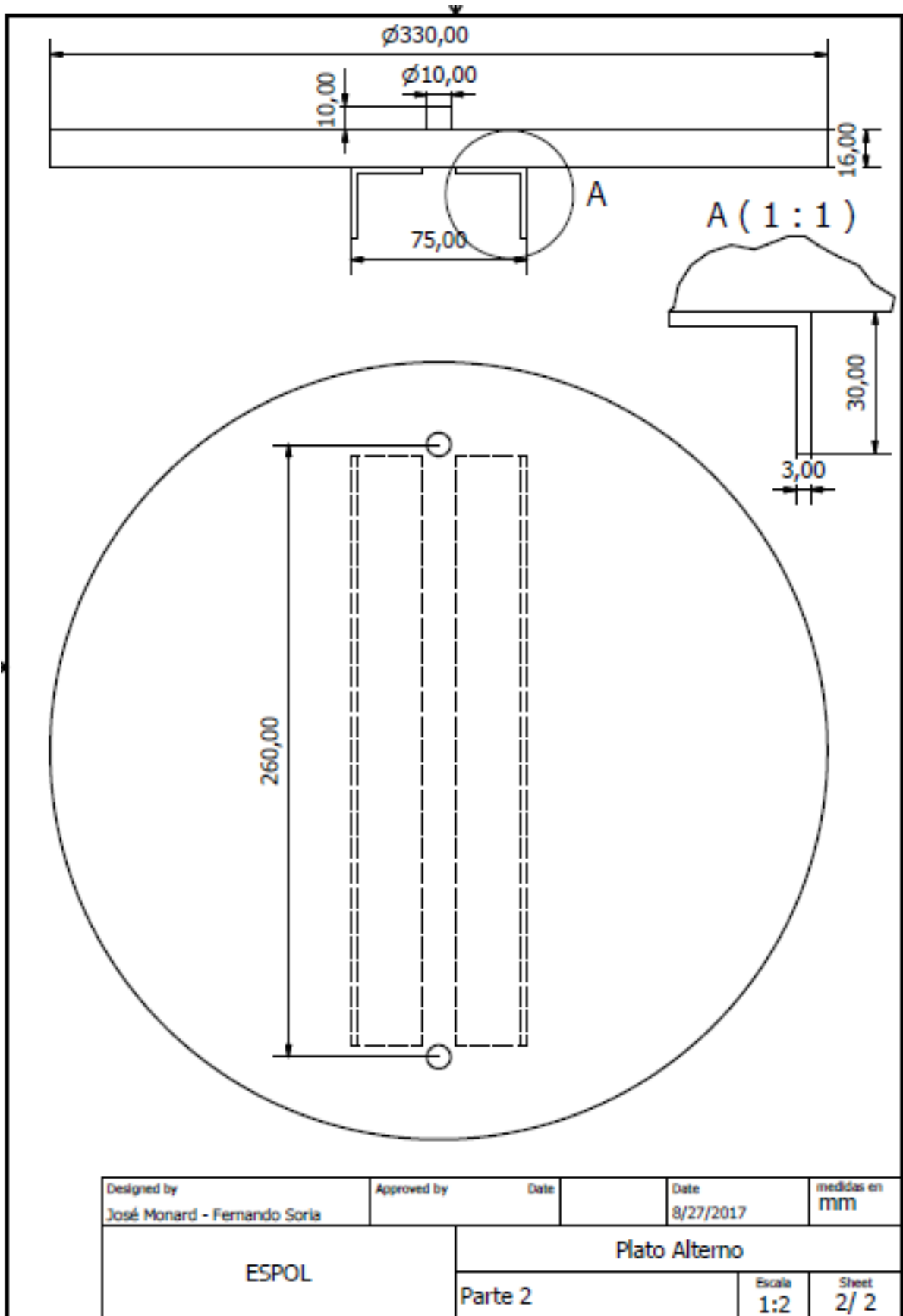
Apéndice C.1. Plano final del pistón

Elaboración propia



Apéndice C.2. Plano final de plato de salida

Elaboración propia



Apéndice C. 3. Plano final de plato de salida alternativo

Elaboración propia