

Diseño y construcción de un dispositivo para la elaboración de granos de propelente solido en la construcción de motores de cohete aficionado

Diego Fernando Castro Torres y Deyber Iván Manrique Escobar

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

Ricardo Alfonso Jaimes Rolón

MSc. Ingeniería Mecánico,

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga, Santander

2024

Dedicatoria

A mis queridos padres. Este logro académico es el resultado del incansable esfuerzo que han dedicado a proporcionarme las oportunidades que, con dificultades, ellos mismos se forjaron. Papá, el sueño que compartimos de ser ingenieros lo he hecho realidad para ti. Este logro les pertenece a ustedes. Esta tesis es un tributo a su valioso legado y a la eterna admiración que siento por ustedes.

In Memoriam

En honor a mi tío Benjamín, quien desde pequeño me quiso
como si fuera su propio hijo y me brindó su amor
incondicional hasta el último de sus días.
Siempre soñó con estar a mi lado en este día y llamarme ingeniero.
Este logro académico también está dedicado a su memoria,
en agradecimiento por todo lo que hizo por mí.

Diego Fernando Castro Torres

A mi hermano Alejandro Manrique Escobar que está en el cielo, por permitirme haber llegado hasta este punto, por todo su apoyo y amor. A mis padres por su apoyo y por creer en mí.

Deyber Iván Manrique Escobar

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todos y cada uno de los que han contribuido y ayudado en la obtención de este logro, esto no habría sido posible sin ustedes, gracias de todo corazón.

Primeramente, a Dios, quien me guía con su mano con planes que solo él conoce, gracias por darme el entendimiento, la sabiduría y la fortaleza para dar cada uno de los pasos hasta llegar a la meta, ayudándome a superar cada uno de los desafíos e impulsándome a seguir mejorando.

A mis padres, su amor incondicional, confianza en mí, y apoyo han sido los pilares en mi vida, espero hacerlos sentir en todo momento orgullosos de tenerme como hijo. No encuentro palabras suficientes para agradecer cada pequeño detalle que han dedicado con esmero para formarme como persona y como hijo. A mi hermana y mi cuñado, por siempre estar prestos a ayudarme, brindándome todo su apoyo, disposición y conocimiento.

A mi amada Jennifer, gracias por ser mi compañera de viaje, por darme todo tu apoyo incondicional y comprensión, gracias por motivarme en aquellos días donde necesitaba un empujón extra, gracias por creer en mí y amarme tanto.

A mis tíos y familiares, gracias por hacerme sentir tan querido, gracias porque a pesar de la distancia siempre siento su apoyo y me hacen sentir que están orgullosos de mí, gracias por esas largas charlas y grandes consejos.

A mis profesores, compañeros de carrera y amigos, gracias por compartir sus conocimientos y consejos, fueron fundamentales en cada uno de mis días en este proceso.

Diego Fernando Castro Torres

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia dentro de mi universidad.

Gracias a mi universidad por permitirme convertirme y ser un profesional en lo que me apasiona.

Gracias a mis padres por cada aporte económico que fue de gran ayuda para poder cumplir este sueño.

Gracias a mi hermano por su esfuerzo y sus ganas de verme triunfar.

Por último, gracias a cada persona que hizo parte de este proceso.

Deyber Iván Manrique Escobar

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 Justificación	18
3 Marco teórico	18
3.1 Antecedentes	18
3.1.1 Diseño y evaluación conceptual de un motor cohete de combustible sólido (Brito, 2011)	18
3.1.2 Análisis y diseño de la cámara de combustión de un motor cohete (Garzón, 2002).....	19
3.1.3 Análise de bates propelentes KNSU produzidos utilizando compactação a frio e sinterização (Wanderson, 2021).....	20
3.2 Referentes Teóricos	20
3.2.1 Cohetes	20
3.2.2 Sistemas de producción en serie.....	25
3.2.3 Tratamiento físico en propelentes	25
3.2.4 Tratamiento térmico en propelentes	25
4 Diseño metodológico	26
4.1 Análisis y selección de alternativas	26
4.1.1 Alternativa uno	26
4.1.2 Alternativa dos.....	27
4.1.3 Alternativa tres	28
4.1.4 Alternativa cuatro	29

4.2	Selección de la alternativa a usar	29
5	Diseño y construcción.....	32
5.1	Presentación general de la maquina.....	32
5.2	Sistema de prensado.....	33
5.2.1	Moldes	33
5.2.2	Simulación CAE.....	36
5.3	Sistema de potencia.....	46
5.3.1	Mecanismo Cigüeñal-Biela	49
5.3.2	Diseño del mecanismo de Accionamiento	58
5.3.3	Apoyos y Rodamientos.....	76
5.3.4	Motorreductor.....	80
5.3.5	Bastidor.....	83
5.4	Sistema hidráulico.....	85
5.5	Sistema eléctrico y de control	89
6	Resultados	94
7	Análisis de viabilidad.....	96
7.1	Costos.....	96
7.2	Análisis de viabilidad (Automatización de la prensa hidráulica)	97
7.3	Análisis de viabilidad (Moldes).....	100
8	Manual de usuario y recomendaciones	101
9	Conclusiones	102
	Referencias bibliográficas.....	104

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Conociendo los cohetes	21
Figura 2. Diferencias entre cohetes sólidos y cohetes líquidos	22
Figura 3. Partes de un cohete de propelente sólido.....	23
Figura 4. Influencia del núcleo en la combustión.....	24
Figura 5. Representación esquemática de la alternativa 1	26
Figura 6. Representación esquemática de la alternativa 2	27
Figura 7. Representación esquemática de la alternativa 3	28
Figura 8. Representación esquemática de la alternativa 4	29
Figura 9. Modelo 3D diseño	32
Figura 10. Moldes sistema de prensado.....	34
Figura 11. Explosionado Moldes de 1 in y 2 in	34
Figura 12. Explosionado Moldes de 1/2 in y 3/4 in.....	35
Figura 13. Placa - D.C.L.	36
Figura 14. Placa - Análisis CAE.....	37
Figura 15. Molde Pieza Centro D.C.L	38
Figura 16. Molde Pieza Centro - Análisis CAE.....	39
Figura 17. Molde Pieza Extractor D.C.L.	40
Figura 18. Molde Pieza Extractor - Análisis CAE.....	40
Figura 19. Molde Pieza Contenedor de material D.C.L.	41
Figura 20. Molde Pieza Contenedor de material - Análisis CAE.....	42
Figura 21. Molde Pieza Punzón D.C.L.	43
Figura 22. Molde Pieza Punzón - Análisis CAE.....	43
Figura 23. Molde Piezas Anillo Centro y Base D.C.L.....	44
Figura 24. Molde Piezas Anillo centro y Base - Análisis CAE.....	45
Figura 25. Principio de pascal.....	47
Figura 26. Modelo 3D Mecanismo Cigüeñal-Biela.....	49
Figura 27. Cigüeñal parte derecha	51
Figura 28. Esquema Biela.....	51

Figura 29. Fuerza máxima en cigüeñal	53
Figura 30. Momento máximo Cigüeñal	53
Figura 31. Mecanismo Cigüeñal-Biela D.C.L	54
Figura 32. Dimensiones Mecanismo Cigüeñal-Biela	55
Figura 33. Pistón Menor Diámetro D.C.L	55
Figura 34. Biela D.C.L.....	56
Figura 35. Cigüeñal D.C.L.....	57
Figura 36. Partes del Cigüeñal	59
Figura 37. Mecanismo Cigüeñal, biela y pistón	60
Figura 38. Propiedades Acero 4140.....	64
Figura 39. Cigüeñal D.C.L Fuerzas	66
Figura 40. Diagrama Vector cortante.....	67
Figura 41. Diagrama Momento Flector Máximo.....	67
Figura 42. Momento flector máximo muñón.....	68
Figura 43. Modelo 3D Biela	73
Figura 44. Propiedades acero 4140 en SolidWorks	74
Figura 45. Simulación estática Biela	75
Figura 46. Factor de seguridad estático Biela.....	75
Figura 47. Ciclo de vida simulación estática Biela.....	76
Figura 48. Esquema Chumacera SNR	77
Figura 49. Selección de rodamiento HK1412 SKF de la biela.....	78
Figura 50. Capacidades de carga de rodamiento HK1412 de la biela	79
Figura 51. Selección de rodamiento HK0509 SKF de la biela.....	80
Figura 52. Capacidades de carga de rodamiento HK0509 SKF de la biela.....	80
Figura 53. Motorreductor MI30-632-4 Modelo 3D.....	81
Figura 54. Especificaciones del motorreductor MI30-632-4 TECHTOP.....	83
Figura 55. Modelo 3D Bastidor	84
Figura 56. Configuración inicial del sistema hidráulico.....	85
Figura 57. Sistema de bombeo inicial.....	86
Figura 58. Réplica del sistema de bombeo	86
Figura 59. Acople inicial del sistema de bombeo.....	87

Figura 60. Primer tramo de conexiones	87
Figura 61. Segundo tramo de conexiones	88
Figura 62. Sistema eléctrico y de control.....	89
Figura 63. Arrancador directo CHINT NQ3.....	91
Figura 64. Conexión 220V	91
Figura 65. Conexión de motor en delta.....	92
Figura 66. Componentes de la interfaz de usuario.....	93
Figura 67. Ubicación del sistema eléctrico y de control.....	94
Figura 68. Extracción del grano fabricado.....	94
Figura 69. Resultado final Granos de propelente.....	95
Figura 70. Grano de 2in a 1000 psi y a 500 psi	95
Figura 71. Portada manual de usuario.....	102

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Análisis de alternativas	30
Tabla 2 Ponderación de las alternativas	31
Tabla 3. Placa - Análisis CAE (Resultados)	37
Tabla 4. Molde Pieza Centro - Análisis CAE (Resultados).....	39
Tabla 5. Molde Pieza Extractor - Análisis CAE (Resultados).....	41
Tabla 6. Molde Pieza Contenedor de material - Análisis CAE (Resultados)	42
Tabla 7. Molde Pieza Punzón - Análisis CAE (Resultados).....	44
Tabla 8. Molde Piezas Anillo centro - Análisis CAE (Resultados)	45
Tabla 9. Molde Piezas Base - Análisis CAE (Resultados)	45
Tabla 10. Componentes del sistema de potencia	49
Tabla 11. Características del motorreductor MI30-632-4 TECHTOP.....	82
Tabla 12. Costos totales del proyecto	96
Tabla 13. Costos automatización	98
Tabla 14. Costo de la estructura de la prensa hidráulica comparación	98
Tabla 15. Costo de sistema hidráulico y de control comparación	99
Tabla 16. Costo de mano de obra y gastos externos comparación	99
Tabla 17. Resumen costos proyecto automatización de prensa hidráulica 20 Ton	99
Tabla 18. Costos por cada conjunto de moldes.....	100
Tabla 19. Costo de fabricación molde para compactación de pulvimetalurgia comparación	101

Listado de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Planos

Apéndice B. Manual de Usuario

Apéndice C. Códigos de control y automatización C++

Resumen

Título: Diseño y construcción de un dispositivo para la elaboración de granos de propelente sólido en la construcción de motores de cohete aficionado*

Autor: Diego Fernando Castro Torres y Deyber Iván Manrique Escobar**

Palabras Clave: Motores de cohetes, Motor de propelente sólido, Propelente sólido en cohetes.

Descripción:

El presente documento muestra el diseño y la construcción de un dispositivo para la elaboración de granos de propelente sólido para el semillero de investigación SCUA perteneciente a la UIS. Este proyecto tiene como finalidad estandarizar, facilitar y optimizar el proceso de fabricación actual, otorgando así al semillero, mejores medios para la formación de profesionales con pasión por la investigación e innovación.

Se presentan también los requerimientos usados como punto de partida para el diseño y selección de componentes del equipo. Seguidamente, se detalla paso a paso el cálculo y análisis de los componentes para garantizar que el equipo cuente con la capacidad de fabricar granos de propelente sólido a una presión de hasta 1.000 psi.

El equipo cuenta con cuatro juegos de moldes que permiten fabricar granos con diámetros de 1/2 in, 3/4 in, 1 in y 2 in con alturas de hasta 4 cm. Adicionalmente el equipo permite fabricar los granos aplicando la presión deseada por el usuario, pudiendo variar esta con presiones menores o iguales a 1.000 psi. Debido a la naturaleza del equipo y su uso en un entorno educativo y de aprendizaje, el equipo posee dispositivos y barreras de seguridad con el fin de salvaguardar la integridad de quien lo opere.

Por otra parte, se consideró pertinente la elaboración del manual de usuario, indicando la forma correcta y segura de operar el equipo.

Finalmente se desarrolló un análisis de viabilidad económica en dos secciones, teniendo en cuenta la automatización del equipo y el diseño de los moldes; concluyendo que nuestro diseño es factible.

* Trabajo de grado

** Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. Magíster en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Design and construction of a device for the production of solid propellant grains in the construction of amateur rocket engines*

Author(s): Diego Fernando Castro Torres and Deyber Iván Manrique Escobar**

Key Words: Rocket Engines, Solid Propellant Motor, Solid Propellant in Rockets.

Description:

This paper shows the design and construction of a device for the production of solid propellant grains for the SCUA research seedbed belonging to the UIS. The aim of this project is to standardize, facilitate and optimize the current manufacturing process, thus providing the seedbed with better means for the training of professionals with a passion for research and innovation.

The requirements used as a starting point for the design and selection of equipment components are also presented. Next, the step-by-step calculation and analysis of the components is detailed to ensure that the equipment has the ability to manufacture solid propellant grains at a pressure of up to 1,000 psi.

The equipment has four sets of molds that allow you to manufacture grains with diameters of 1/2", 3/4", 1" and 2" with heights up to 4 cm. Additionally, the equipment allows the manufacture of the grains by applying the pressure desired by the user, which can vary with pressures less than or equal to 1,000 psi. Due to the nature of the equipment and its use in an educational and learning environment, the equipment is equipped with safety devices and barriers in order to safeguard the integrity of whoever operates it.

On the other hand, it was considered pertinent to prepare the user manual, indicating the correct and safe way to operate the equipment.

Finally, an economic feasibility analysis was developed in two sections, taking into account the automation of the equipment and the design of the molds; concluding that our design is feasible.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. Master's Degree in Mechanical Engineering

Introducción

A lo largo del desarrollo de la civilización humana, uno de los más grandes sueños que ha tenido el ser humano es poder explorar más allá de nuestro cielo azul, con el fin de alcanzar esta meta, a lo largo de las últimas décadas, se han desarrollado grandes inventos y dispositivos que han permitido al hombre, alcanzar grandes hitos como lo fueron lanzar el primer satélite artificial en 1957, enviar al primer hombre al espacio en 1961 y llegar a la luna en 1969.

Estos grandes logros no se volvieron realidad al primer intento, ni se desarrollaron creando grandes cohetes para destruir y recopilar información, la ingeniera desde hace muchos años descubrió que, para analizar situaciones complejas, no era necesario recurrir a condiciones donde se cumplieran exactamente esas condiciones, en lugar de eso, se podía recurrir a crear sistemas similares a escalas menores que permitieran estudiar estas situaciones en entornos controlados.

La Universidad Industrial de Santander (UIS), como uno de los grandes pilares de la educación en Colombia también ha optado por implementar esta estrategia para que los futuros ingenieros, puedan comprender y avanzar en el estudio de estas situaciones, para esto ha conformado el Semillero de Investigación Aeroespacial (SCUA), donde uno de sus campos de investigación es el estudio de cohetes con uso de combustible de propelente sólido, para dar cumplimiento a las condiciones de investigación necesarias para este campo, se requiere elaborar diversos prototipos y numerosas pruebas que permitan recabar datos necesarios, en aras de suplir esta necesidad, el semillero SCUA ha adquirido una prensa mecánica y un torno para preparar el combustible requerido, pero este, además de ser un proceso demorado, no supe la demanda actual de propelente. Por lo tanto, surge la necesidad de tener un sistema de producción y suministro de

combustible continuo, que permita el estudio sin retardos por falta de disponibilidad de propelentes preparados para el proceso de experimentación.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea la siguiente pregunta problema: ¿Qué requerimientos se necesitan para el diseño y construcción de un dispositivo para la elaboración de granos de propelente solido en la construcción de motores de cohete aficionado, que permita la producción de granos en serie para instalar en tubos de PVC estandarizados desde $\frac{1}{2}$ a 2 pulgadas, con la finalidad de estudiar y comprender a menor escala los fenómenos en la industria aeroespacial?

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo que cumpla con el ciclo de prensado y producción en serie de granos de propelente sólido para la construcción y estudio de cohetes en la categoría de aficionados, de tal modo que el semillero SCUA de la Universidad Industrial de Santander desarrolle tecnologías que se puedan aplicar en la investigación del área aeroespacial.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un dispositivo para la elaboración de granos de propelente que cumpla con los siguientes requisitos:
 - Producción de granos en serie.
 - Moldes acoplables e intercambiables según la geometría de grano deseada para instalar en tubos de PVC estandarizados desde ½ a 2 pulgadas.
 - Estandarización en la presión ejercida para la producción de grano mediante sistema de medición por dinamómetro de fuerza.
 - Seguridad para el operario mediante barreras de protección.
- Establecer un análisis de viabilidad mediante costos para la construcción del dispositivo.
- Realización de manual instructivo de usos y cuidados del dispositivo.

2 Justificación

Este proyecto se encuentra orientado a contribuir con el aprendizaje y la experimentación de los estudiantes del semillero SCUA de la Universidad Industrial de Santander, en el área de diseño y construcción aeroespacial, buscando la manera de optimizar y facilitar el proceso de fabricación de los granos de propelente usados en los motores de coherería, debido a que el proceso actualmente empleado es manual y consta de varias fases lo cual retrasa la implementación de estos en los prototipos.

Por lo tanto, implementando como proceso de mejora, un sistema de producción en serie se mejora los tiempos de experimentación y disponibilidad, permitiendo así acelerar el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

De esta manera, el impacto educativo que otorga este proyecto consiste en incentivar al estudiantado en su búsqueda continua de aprendizaje practico y de esta manera promover el avance tecnológico en campos a fines como aeronáutica y aeroespacial.

3 Marco teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 Diseño y evaluación conceptual de un motor cohete de combustible sólido (Brito, 2011)

El presente proyecto se basa en el diseño del sistema de propulsión para el referido cohete sonda y su evaluación mediante CFD.

En primera instancia, se emplean modelos teóricos idealizados con el fin de representar condiciones aproximadas al modelo real, posteriormente se realiza pre-dimensionamiento de componentes del cohete y seguidamente son analizados mediante resistencia mecánica, por último, se valida el diseño usando simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) usando ANSYS CFX y mediante los resultados hacer las correcciones necesarias en el diseño.

Este proyecto aporta información relevante sobre las dimensiones óptimas de fabricación, así como formulas y conceptos necesarios para el diseño.

3.1.2 Análisis y diseño de la cámara de combustión de un pequeño motor cohete (Garzón, 2002)

Este proyecto tuvo como objetivo principal, modelar los fenómenos de combustión al interior de un cohete y hallar las relaciones entre temperatura presión y composición de los gases de escape para poder diseñar dicha cámara.

Con el fin de lograr el objetivo, el proyecto como primer paso determina los cálculos termodinámicos necesarios para la cámara de combustión, posteriormente, para seleccionar el mejor propelente según las especificaciones, se procede a simular y caracterizar las diversas mezclas para poder graficar y comparar el comportamiento de cada una, seguidamente, teniendo en cuenta lo anterior, se diseña la cámara de combustión, y por último se simulan los gases al interior de la cámara, y con esta información se concluye la configuración óptima de la cámara de combustión y los componentes del propelente.

Este proyecto contribuye al entendimiento de los fenómenos que ocurren durante todo el proceso de combustión del cohete, siendo así de gran importancia para este proyecto, debido a que este estudio genera datos pertinentes para la elaboración del diseño.

3.1.3 Análise de bates propelentes KNSU produzidos utilizando compactação a frio e sinterização (Wanderson, 2021)

El objetivo principal de este proyecto fue, estudiar la sustitución de la etapa de fusión del grano por una etapa de sinterización del polvo compactado.

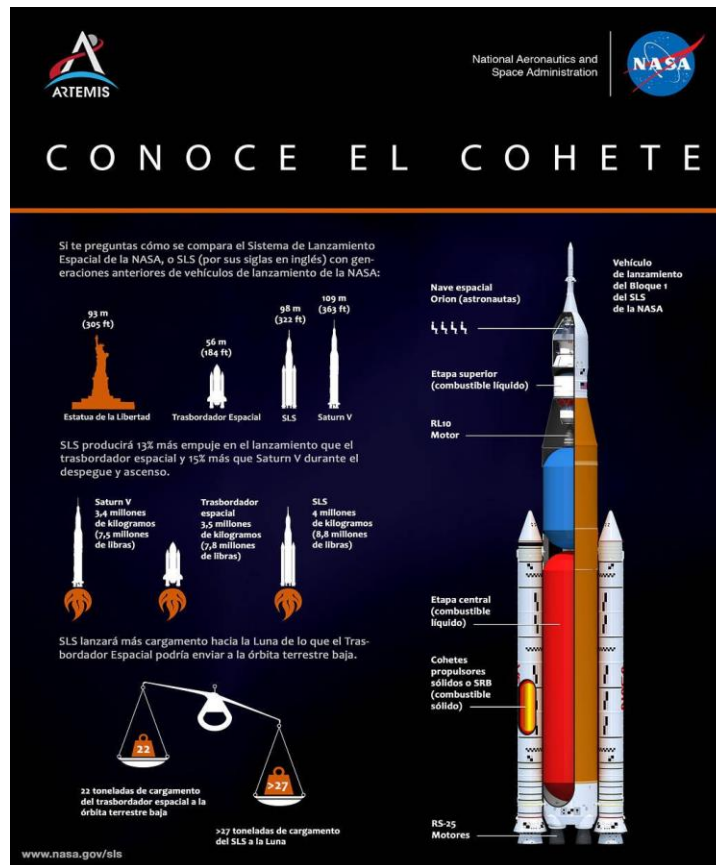
En primera estancia, para el desarrollo del estudio se utilizaron propelentes sólidos KNSU, producidos a través de prensado en frío, para posteriormente seguir con el proceso de sinterizado, los compuestos del propelente fueron Sacarosa y Nitrato de potasio, recomendados por NAKKA (1984) siendo 65/35. Posteriormente se hicieron ensayos mecánicos y de higroscopicidad, por último, se graficaron los datos obtenidos de los ensayos para comparar la calidad de grano de los propelentes estudiados.

Este proyecto aporta de manera significativa metodologías innovadoras para la fabricación de propelentes sólidos haciendo uso de procesos de sinterizado, pertinentes para la fabricación óptima de propelentes, teniendo en cuenta la comparación realizada respecto al prensado en frío.

3.2 Referentes Teóricos

3.2.1 Cohetes

Los cohetes son artefactos diseñados para viajar fuera de la atmósfera terrestre y al espacio. Pueden transportar vehículos exploradores, satélites, suministros, astronautas y más (California Academy of Science, s.f). De acuerdo con la (NASA, 2011), un cohete produce empuje quemando combustible. La mayoría de los motores de cohete convierten el combustible en gas caliente. Al expulsar el gas por la parte trasera del motor, el cohete avanza.

Figura 1.*Conociendo los cohetes*

Nota: Tomado de (NASA, 2021).

3.2.1.1 Tipos de cohetes. Los cohetes pueden clasificarse según el tipo de propulsión que usan para generar el empuje necesario para su vuelo.

- **Cohetes con motor de propulsión química.** Estos cohetes se caracterizan por basarse en el proceso químico de la combustión, donde se requiere de los 3 elementos fundamentales, comburente, combustible y oxígeno. Estos motores pueden clasificarse en dos tipos, propulsor sólido y propulsor líquido.

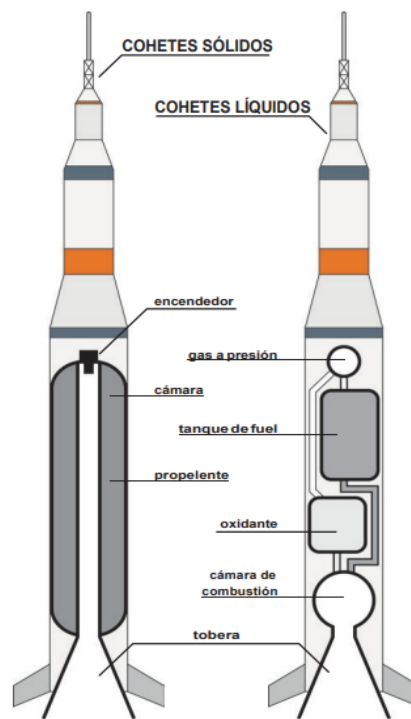
○ **Cohete de propelente sólido.** Este tipo de cohetes resalta debido a que compacta el combustible y el oxidante conjuntamente, y el material obtenido de este proceso es llamado grano. Su funcionamiento consiste en llenar la cámara perfectamente con el grano, dejando un orificio que permita llevar a cabo la ignición.

○ **Cohete de propelente líquido.** Contrario al propelente sólido, este tipo de cohetes lleva el combustible y el oxidante en compartimentos diferentes, y mediante una bomba son enviados a la cámara de combustión para realizar el proceso que permite la propulsión.

Una de las diferencias más significativas entre el propelente sólido y el líquido consiste en que la propulsión en el propelente sólido es continua y termina cuando se quema todo el grano, en cambio en el propelente líquido, mediante válvulas se puede controlar el proceso de combustión.

Figura 2.

Diferencias entre cohetes sólidos y cohetes líquidos



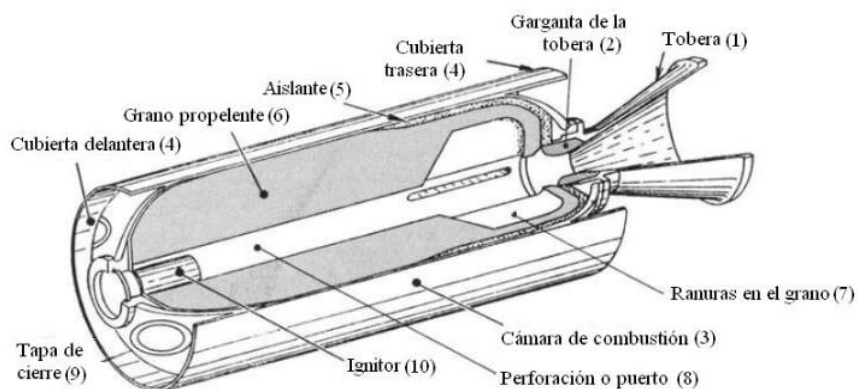
Nota: Tomado de (Planetario de Aragon, 2019).

- **Cohete nuclear.** Es un método aun en desarrollo que consiste en usar explosiones nucleares para generar empuje, en vez de usar la combustión
- **Cohete a iones.** Este método consiste en usar la ionización como método de propulsión, su funcionamiento se basa en que los átomos quedan cargados eléctricamente después de haber quitado los electrones.

3.2.1.2 Características del cohete de propelente sólido. El cohete de propelente sólido tiene un diseño básico, lo que permite la facilidad de construcción y experimentación.

Figura 3.

Partes de un cohete de propelente sólido



Nota: Tomado de (Brito, 2011).

El combustible del propelente sólido puede estar conformado por una lista mediana de componentes, (Brito, 2011) nos resume una lista de los componentes más usados:

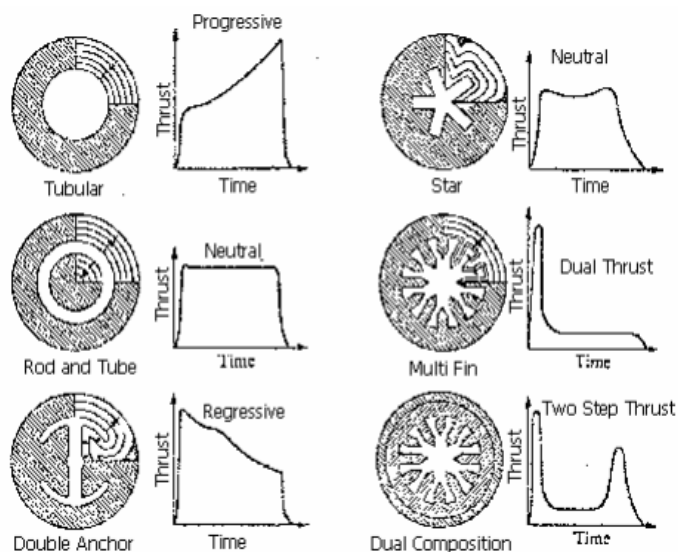
1. Nitrato de Potasio / Sacarosa (o KN / SU).
2. Nitrato de Potasio / Sorbitol (o KN / SO).
3. Nitrato de Potasio / Dextrosa (o KN / DX).
4. Zinc / Azufre (o Micrograin).

5. Pólvara negra (KN / Carbón / Azufre).
6. Nitrato de Amonio / polímero HTPB / Magnesio (o AN / HTPB / Mg).
7. Nitrato de amonio / Uretano (o AN/UR).
8. Perclorato de amonio / Silicona II.
9. Perclorato de amonio / polímero PBAN / Epoxy / Aluminio.
10. Perclorato de amonio / polímero HTPB / Aluminio.
11. Perclorato de amonio / PVC (o AP / PVC).
12. Perclorato de potasio / Sacarosa (o PP / SU).
13. Perclorato de potasio / Epoxy.
14. Perclorato de potasio / Asfalto.

Según (Nakka, 2014): “El empuje (y presión de cámara) que el motor genera es proporcional al área en combustión en cualquier instante particular del tiempo.” Por lo tanto, resulta de gran importancia tener en cuenta el diseño de grano que se usa en el cohete.

Figura 4.

Influencia del núcleo en la combustión



Nota: Tomado de (Nakka, 2014).

3.2.2 *Sistemas de producción en serie*

Se conoce así a la cadena de producción, donde se encarga de producir numerosas cantidades de la misma pieza siguiendo un orden continuo y determinado de fabricación.

3.2.3 *Tratamiento físico en propelentes*

3.2.3.1 Prensado de material. El prensado es un proceso que se realiza con el fin de reducir la porosidad del material, y consiste en compactar el material a altas presiones.

3.2.3.2 Inyección de material. Este proceso consiste en calentar o fundir el material que se desea inyectar, posteriormente se introduce a altas presiones al molde del cual se desea tomar forma.

3.2.4 *Tratamiento térmico en propelentes*

3.2.4.1 Fundición. La fundición consiste en llevar el material hasta su punto de fusión, con el fin de que este cambie de estado, generalmente se hace esto para luego ingresar el material en un molde y que este tome esa forma.

3.2.4.2 Sinterizado. Según (Wanderson, 2021), “el proceso de sinterización es el calentamiento por debajo de la temperatura de fusión de un determinado material compactado, técnica ampliamente utilizada para la producción de materiales con alta densidad y mejores propiedades mecánicas.”

4 Diseño metodológico

4.1 Análisis y selección de alternativas

Después de realizar un estudio acerca de los sistemas de producción en serie y motores de combustible de propelente sólido, se proponen tres alternativas que cumplen con los requerimientos deseados por el semillero SCUA.

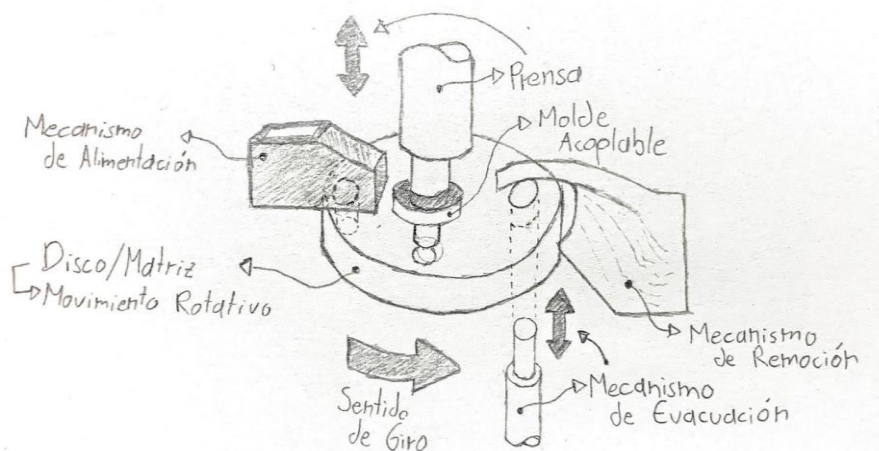
4.1.1 Alternativa uno

La alternativa uno consiste en un sistema tipo revolver, el cual consta de un disco o matriz con perforaciones que funciona mediante movimiento rotativo, permitiendo que se realicen en simultáneo diferentes operaciones, mientras el disco rota se llevan a cabo tres operaciones:

1. Alimentación: El sistema se encarga de ingresar la cantidad requerida de propelente para generar un grano.
2. Prensado en frío: El equipo se encarga de prensar el propelente hasta la presión indicada.
3. Salida: Por medio de un mecanismo de evacuación se retira el grano compactado.

Figura 5.

Representación esquemática de la alternativa 1



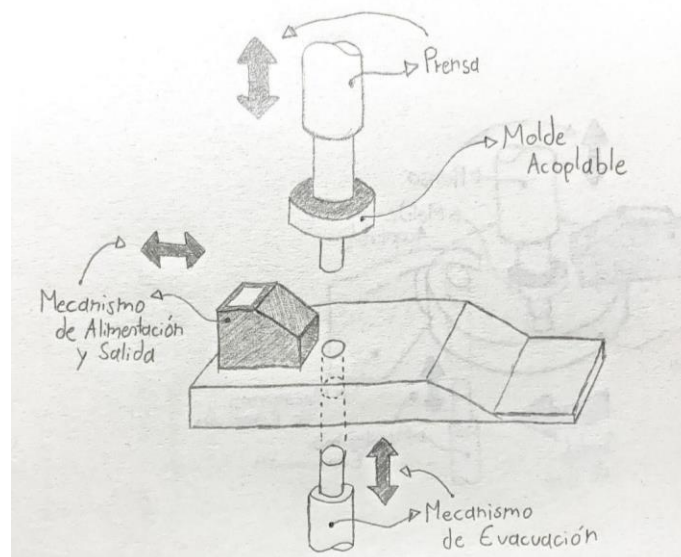
4.1.2 Alternativa dos

Por su parte, la segunda alternativa cuenta con un sistema producción lineal en serie, esta posee la misma idea de funcionamiento que la primera, solo que ahora trasladada desde un sistema rotacional a un sistema lineal y posteriormente el grano es sinterizado, el cual está comprendido por tres etapas:

1. Alimentación y salida: El sistema se encarga de agregar la cantidad de propelente requerida al mismo tiempo que retira el grano compactado.
2. Prensado en frio y expulsión del grano: Posteriormente al ingreso de material, el punzón se encarga de bajar y compactar el grano, una vez compactado el sistema se encarga de expulsar el grano a nivel de la superficie para que el mecanismo de alimentación y salida se encargue de retirar el grano y proporcionar el material necesario para continuar con el ciclo.
3. Sinterizado: La última etapa consta de preparar manualmente varios granos en una bandeja para introducirlos en un horno con el fin de completar el ciclo de sinterizado.

Figura 6.

Representación esquemática de la alternativa 2



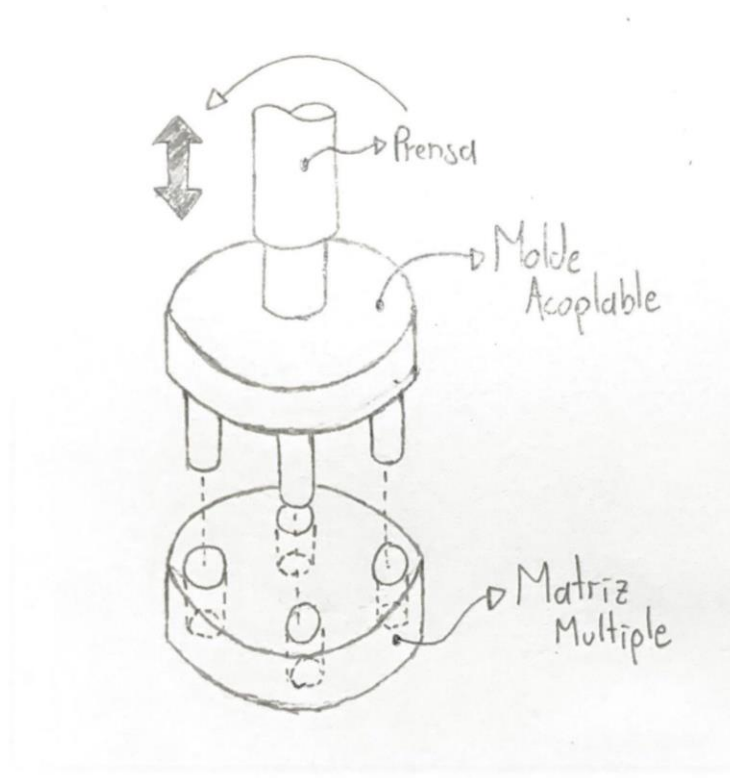
4.1.3 Alternativa tres

La alternativa tres se basa en un diseño tipo matriz múltiple, la cual se compone por dos placas, una superior y una inferior, donde la placa inferior se encuentra apoyada en el bastidor del sistema y la parte superior se acopla al punzón de la prensa, esta alternativa consta de tres operaciones desarrolladas consecutivamente:

1. Alimentación: El operario ingresa, en cada orificio de la matriz, la cantidad de propelente que se requiere para producir el grano.
2. Prensado en frio: El pistón se encarga de accionar los moldes compactando así el propelente y generando varios granos simultáneamente.
3. Salida: El operario procede a retirar de manera manual los granos compactados.

Figura 7.

Representación esquemática de la alternativa 3



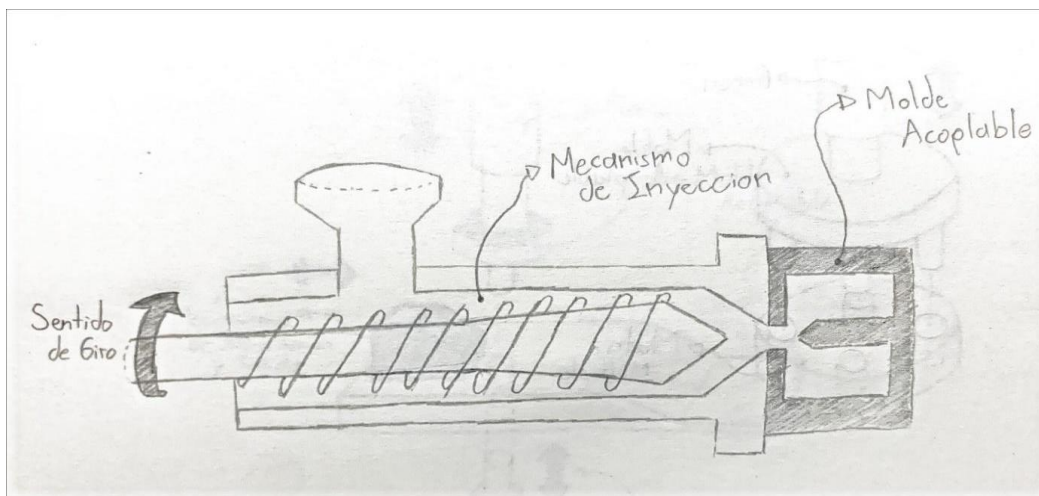
4.1.4 Alternativa cuatro

Finalmente, la alternativa cuatro consta de un ciclo centrado en la fundición en lugar del prensado, esta alternativa consta de dos etapas que se desarrollan en serie:

1. Fundición: El operario se encarga de preparar la mezcla de propelente, para posteriormente fundirla y convertirla en una masilla.
2. Inyección: Posteriormente el operario debe ingresar la masilla en el mecanismo de inyección para que este sea inyectado en el molde del tamaño seleccionado.

Figura 8.

Representación esquemática de la alternativa 4



4.2 Selección de la alternativa a usar

Posteriormente al estudio y la propuesta de las alternativas, es necesario realizar un proceso de selección que permita seleccionar cual se ajusta mejor a la necesidad, teniendo en cuenta las fortalezas y debilidades de cada una.

Los criterios para evaluar las alternativas fueron seleccionados teniendo en cuenta el lugar donde se instalará el dispositivo, el tipo de operarios que usaran la maquina y la optimización que se aporta al sistema actual.

Con el fin de evaluar los criterios de la mejor manera, se asigna la siguiente puntuación:

Tabla 1.

Análisis de alternativas

	Criterio		Valor	
	Regular		1	
	Aceptable		2	
	Bueno		3	
	Muy Bueno		4	

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Autonomía	Solo requiere intervención del operario para llenar el almacenamiento de material 4	Requiere intervención del operario para llenar el almacenamiento de material y transportarlo al horno 3	Requiere intervención humana para su funcionamiento 1	Requiere intervención humana para su funcionamiento 1
Seguridad	No requiere intervención humana durante el funcionamiento, pero tiene muchos elementos móviles 3	Requiere mínima intervención humana durante el funcionamiento y consta de pocos elementos 3	Existe riesgo de operación debido a que el operario debe retirar los granos contenidos en los moldes 2	Existe riesgo de operación debido a que el operario debe fundir el material y manipular el inyector 2
Eficiencia	Realiza los tres procesos simultáneamente 4	Realiza la producción en tres procesos 3	Debe hacer los tres procesos uno después del otro y requiere operario 1	Realiza la producción en dos procesos 4
Economía	Alto costo de fabricación debido a materiales y elementos de control 2	Costos no muy altos debido a su construcción sencilla 3	Bajos costos de Fabricación debido a la simplicidad de los moldes 4	Alto costo de fabricación debido a materiales y elementos de control 2

Volumen	Sistema robusto y grande	2	Sistema ligero y pequeño	4	Sistema robusto y pesado	2	Sistema voluminoso	2
Calidad del grano	Permite espacios considerables entre las partículas	2	Grano homogéneo con espacios mínimos entre partículas	4	Permite espacios considerables entre las partículas	2	Grano homogéneo en toda su estructura	4
Puntaje total	17		20		12		15	

Adicionalmente se presenta la selección mediante ponderación, debido a que todos los criterios no tienen el mismo grado de importancia e influencia sobre la selección

Tabla 2

Ponderación de las alternativas

Parámetros	Ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4	
		Puntaje	Ponderado	Puntaje	Ponderado	Puntaje	Ponderado	Puntaje	Ponderado
Autonomía	20%	4	0,8	3	0,6	1	0,2	1	0,2
Seguridad	25%	3	0,8	3	0,75	2	0,5	2	0,5
Eficiencia	20%	4	0,8	3	0,6	1	0,2	4	0,8
Economía	10%	2	0,2	3	0,3	4	0,4	2	0,2
Volumen	5%	2	0,1	4	0,2	2	0,1	2	0,1
Calidad de grano	20%	2	0,4	4	0,8	2	0,4	4	0,8
Total	100%	17	3,1	20	3,25	12	1,8	15	2,6

Teniendo en cuenta las dos tablas que se usaron para el proceso de selección, se determina que la alternativa que se ajusta mejor a las necesidades estipuladas es la alternativa dos.

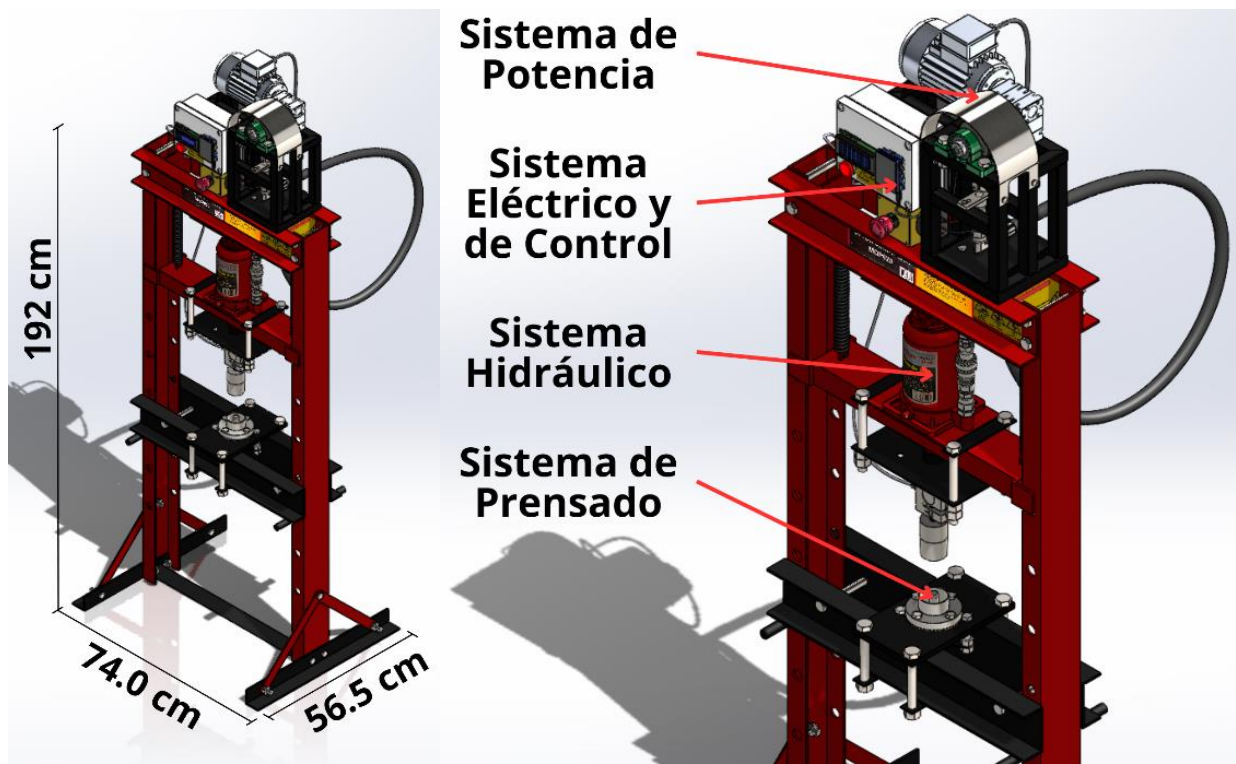
5 Diseño y construcción

5.1 Presentación general de la maquina

A continuación, se muestra la maquina diseñada para la elaboración de granos de propelente sólido que cumple con los requerimientos del semillero SCUA. En la Figura 9 se ilustran las dimensiones finales del diseño CAD de la maquina y los subsistemas que posee el diseño.

Figura 9.

Modelo 3D diseño



El equipo fue contruido para el semillero SCUA de la UIS, donde el semillero ya contaba con una prensa hidraulica convencional de 20 Ton y apartir de esta se desarrolló la construccion y adecuacion de los sistemas necesarios, el equipo cuenta con la capacidad de fabricar granos de

propelente sólido a 1.000 psi, las dimensiones se encuentran ilustradas en la Figura 9. El equipo cuenta con la capacidad de modificar la presión a la que se desean fabricar los granos, adicionalmente tiene la capacidad de usarse como prensa automática y funcionar aplicando la carga que se desee programar.

Los materiales seleccionados para el equipo fueron los siguientes:

- Bastidor del sistema de potencia: Tubería estructural grado C 25X25
- Pieza de acople del sistema de potencia: Acero ASTM A36
- Elementos del conjunto Cigüeñal - Biela : AISI 4140
- Guarda cigüeñal: Acero galvanizado
- Camisa del sistema hidráulico : AISI 4140
- Conjunto de moldes: Acero Inoxidable 304
- Piezas de acople del sistema de prensado: Acero ASTM A36

El equipo está compuesto de diferentes sistemas, expuestos a continuación:

- Sistema de potencia
- Sistema eléctrico y de control
- Sistema hidráulico
- Sistema de prensado

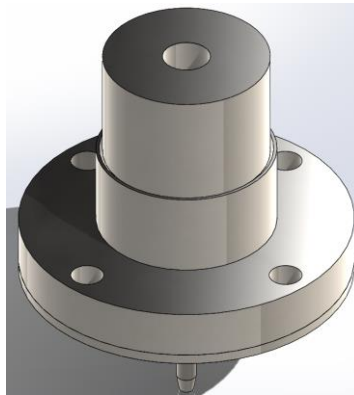
5.2 Sistema de prensado

5.2.1 Moldes

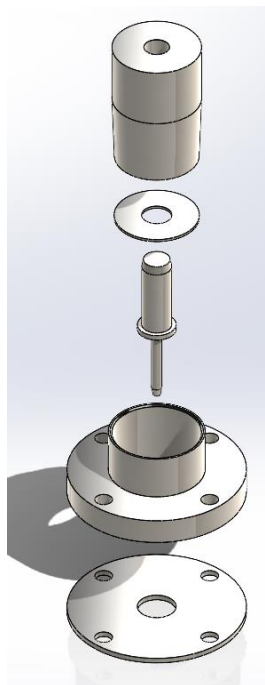
Como se estableció en los objetivos, el sistema de prensado consta de 4 juegos de moldes para los tamaños estipulados, $\frac{1}{2}$ in, $\frac{3}{4}$ in, 1 in y 2 in. En las Figura 10 y Figura 11 se ilustran las partes correspondientes a los juegos de moldes de 1 in y 2 in.

Figura 10.

Moldes sistema de prensado

**Figura 11.**

Explosionado Moldes de 1 in y 2 in

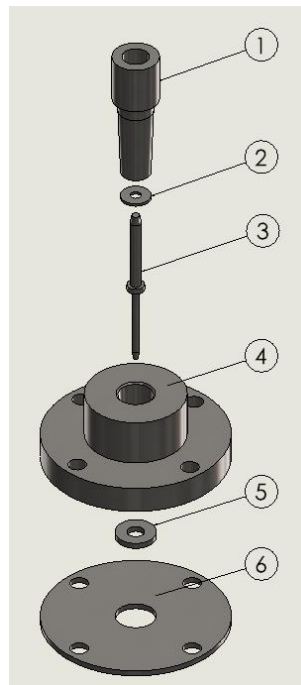


Los moldes correspondientes a los tamaños de $\frac{1}{2}$ in y $\frac{3}{4}$ in obedecen a la misma construcción, únicamente se agrega una pieza complementaria, para contrarrestar la diferencia de diámetros de los expulsores. En la Figura 12 se ilustran las partes correspondientes a los juegos de moldes de $\frac{1}{2}$ in y $\frac{3}{4}$ in, se describen desde la superior hasta la inferior.

1. Punzón
2. Extractor
3. Centro
4. Contenedor de material
5. Anillo central
6. Base

Figura 12.

Explosionado Moldes de 1/2 in y 3/4 in



Los moldes de $\frac{1}{2}$ in y $\frac{3}{4}$ in se encuentran conformados por 6 piezas, y los moldes de 1 in y 2 in por 5 piezas. Se intercambian según el tamaño de grano que se desee fabricar.

La base y el anillo central se encargan de tener contacto con la parte inferior del propelente y ofrecer una base sólida e inmóvil para el material a trabajar, el contenedor de material, como su nombre lo indica, se encarga de contener el material y dar la forma externa deseada al material, el extractor permite extraer de forma fácil y practica el material prensado, el centro, se encarga de dar la forma interna al material para cumplir con la geometría deseada y por último, el punzón se encarga de descender y comprimir el material hasta que quede prensado adecuadamente.

Debido a que los materiales empleados para fabricar los propelentes suelen ser altamente corrosivos, los moldes están fabricados en acero inoxidable 304 debido a que este brinda las características necesarias para trabajar estos materiales.

Sutton & Biblarz (2010) indican que la presión aplicada para prensar los propelentes debe estar en el rango entre 50 y 1.000 psi. Por lo tanto, las piezas están diseñadas para trabajar en este rango de presiones, procurando así que la fabricación de los granos sea óptima.

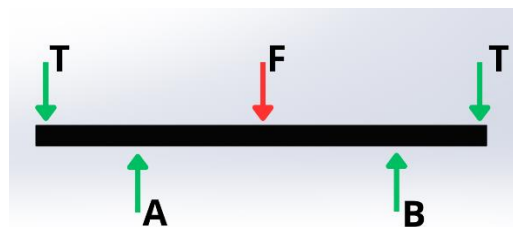
5.2.2 Simulación CAE

A continuación, se ilustran los resultados de los principales elementos que tienen lugar en el sistema de prensado. Los análisis se obtienen del software SOLIDWORKS Simulation.

5.2.2.1. Placa. En la Figura 13, se observan las cargas a las que está sometida la pieza, donde T indica la fuerza ejercida por los tornillos, A y B son las fuerzas obtenidas por los apoyos y F es la fuerza que está aplicando el equipo sobre la pieza.

Figura 13.

Placa - D.C.L.



En la Figura 14, junto con la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos al someter la placa inferior a las diferentes cargas que actúan sobre ella.

Figura 14.

Placa - Análisis CAE

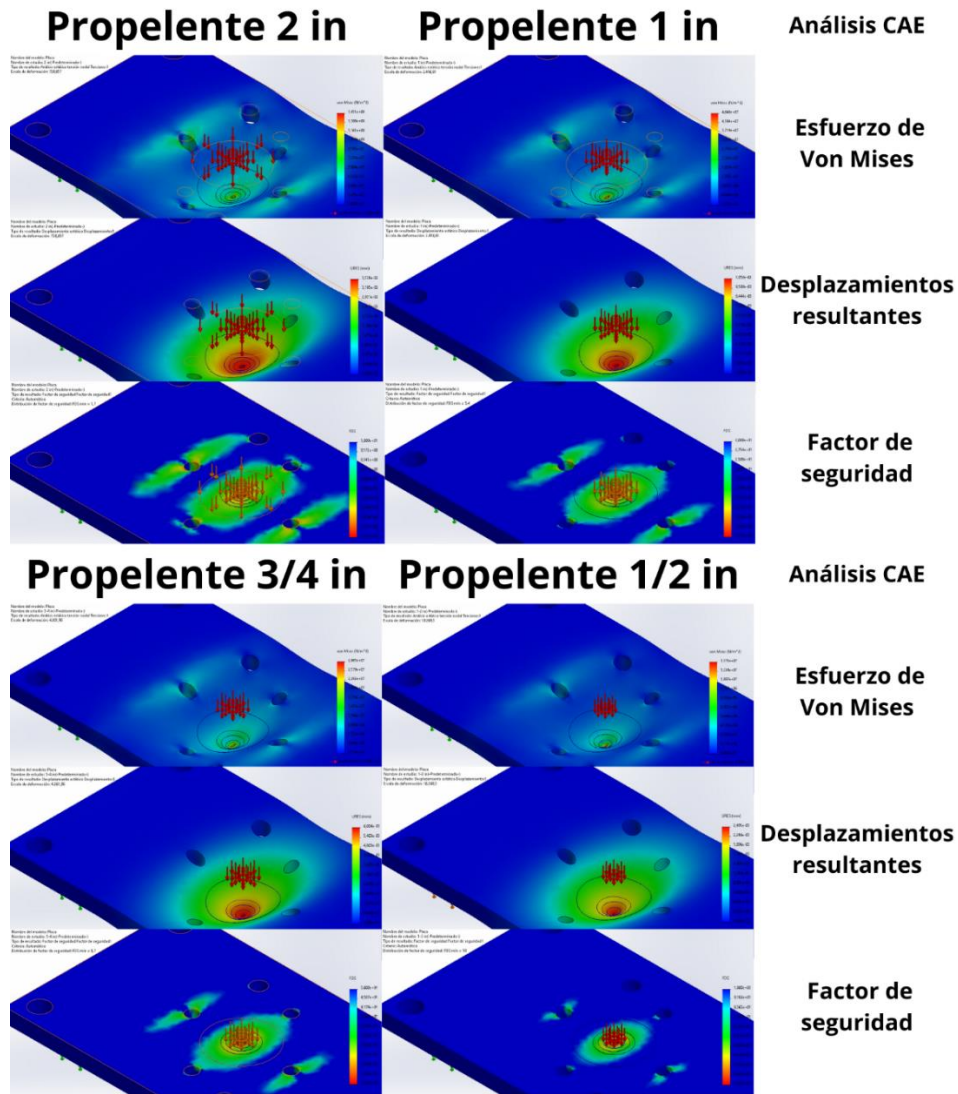


Tabla 3.

Placa - Análisis CAE (Resultados)

Análisis CAE				
Pieza :	Placa			
Material :	Acero A36			
Carga :	1.000 psi			
Aplicación :	2 in	1 in	3/4 in	1/2 in
Esfuerzo Máximo	145,1 MPA	46,48 MPA	28,65 MPA	13,71 MPA
Desplazamiento Máximo	0,03538 mm	0,01056 mm	0,006004 mm	0,002495 mm
Factor de seguridad Mínimo	1,7	5,4	8,7	18

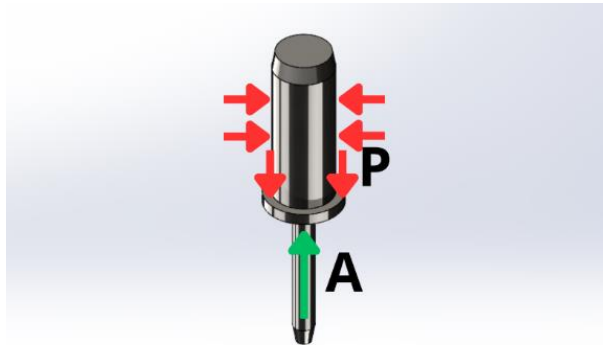
Como se observa a partir de los resultados descritos en la Tabla 3, los valores más críticos se dan al momento de fabricar los propelentes de 2 in, donde el factor de seguridad mínimo es 1,7, garantizando así que sea una pieza segura, y como se observa, tener desplazamientos máximos muy pequeños.

5.2.2.2 Moldes.

- **Centro.** En la Figura 15 se ilustran las fuerzas a las que está sometida esta pieza, siendo P la presión a la que está sometida y A la fuerza resultante por el apoyo sobre el que esta la pieza.

Figura 15.

Molde Pieza Centro D.C.L



Adicionalmente, en la Figura 16 y la Tabla 4 se presenta la información obtenida de los análisis CAE a los que fue sometida la pieza.

Figura 16.

Molde Pieza Centro - Análisis CAE

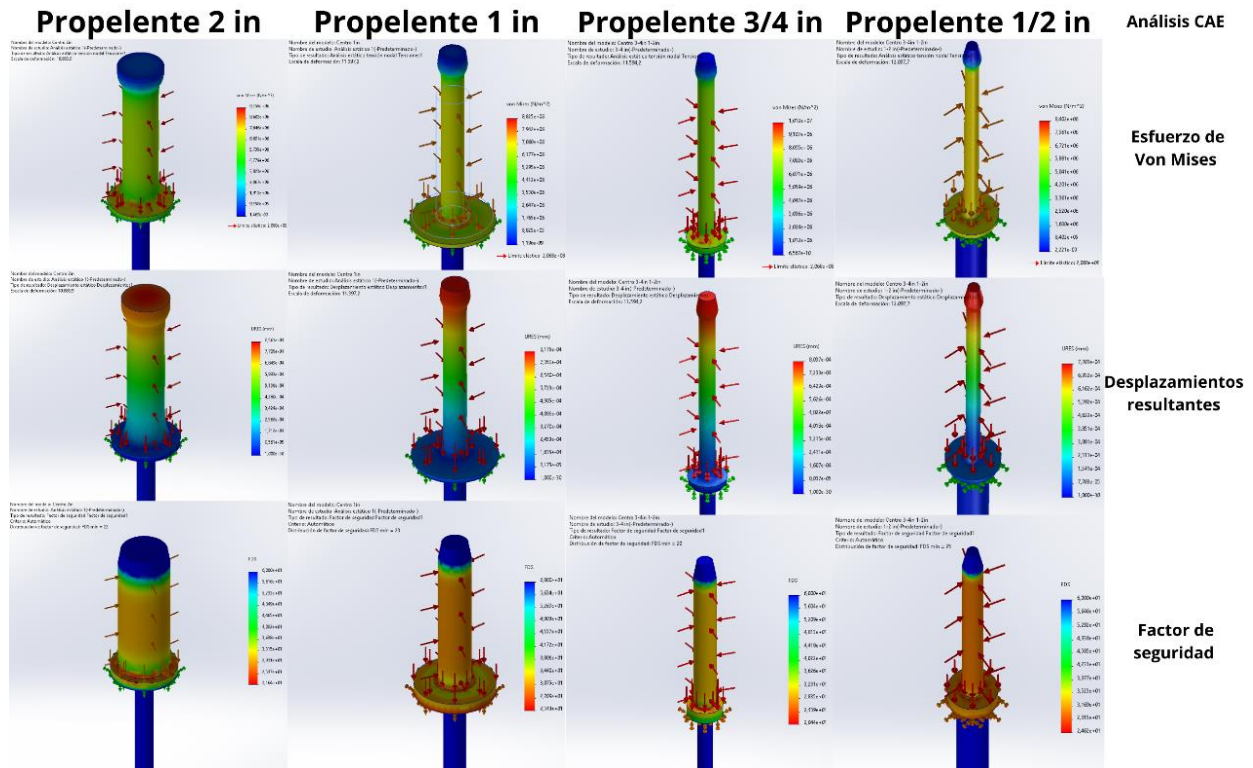


Tabla 4.

Molde Pieza Centro - Análisis CAE (Resultados)

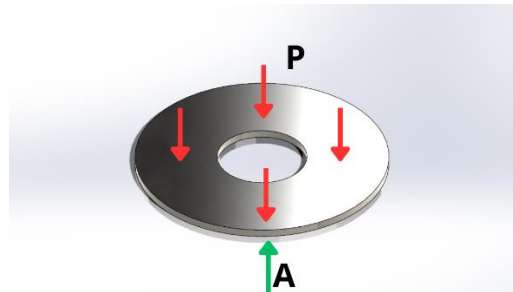
Análisis CAE				
Pieza :	Centro			
Material :	Acero 304			
Carga :	1.000 psi			
Aplicación :	2 in	1 in	3/4 in	1/2 in
Esfuerzo Máximo	9,558 MPA	8,825 MPA	10,12 MPA	8,402 MPA
Desplazamiento Máximo	0,0008561 mm	0,0008175 mm	0,0008037 mm	0,0007703 mm
Factor de seguridad Mínimo	22	23	20	25

Como se observa en la Tabla 4, el esfuerzo máximo se da en el centro del conjunto de moldes de 3/4 in, y este a su vez cuenta con un factor de seguridad de 20, garantizando así que la pieza cumpla adecuadamente su función.

- Extractor.** En la Figura 17, igualmente, se ilustran las fuerzas que actúan sobre esta pieza, siendo P la presión que ejerce el material prensado sobre la pieza y A, la fuerza resultante del apoyo sobre el que esta esta pieza.

Figura 17.

Molde Pieza Extractor D.C.L.



En la Figura 18 y la Tabla 5, se muestran los resultados obtenidos al realizar los mismos análisis CAE que se les hicieron a las piezas anteriores.

Figura 18.

Molde Pieza Extractor - Análisis CAE

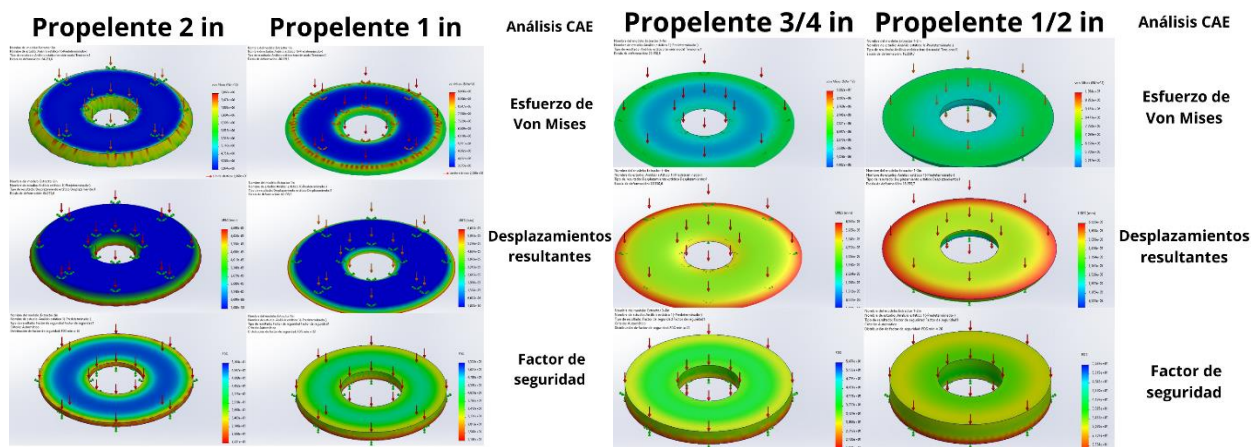
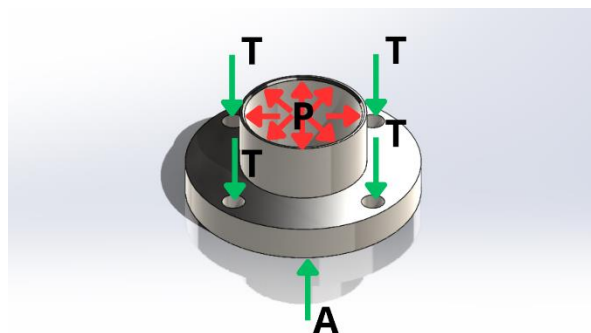


Tabla 5.*Molde Pieza Extractor - Análisis CAE (Resultados)*

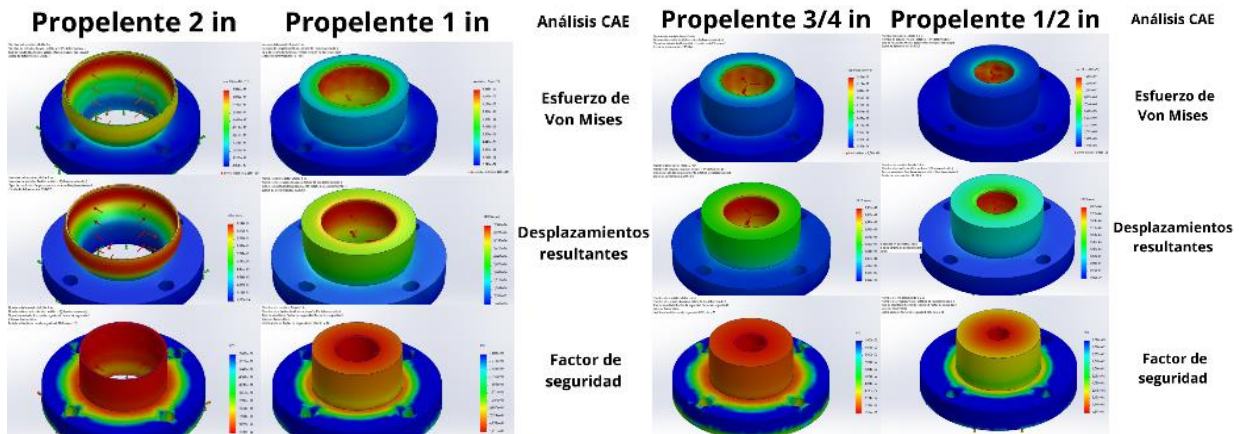
Análisis CAE				
Pieza :	Extractor			
Material :	Acero 304			
Carga :	1.000 psi			
Aplicación :	2 in	1 in	3/4 in	1/2 in
Esfuerzo Máximo	7,860 MPA	9,466 MPA	1,002 MPA	1,054 MPA
Desplazamiento Máximo	0,00006698 mm	0,00006620 mm	0,00006561 mm	0,00006323 mm
Factor de seguridad Mínimo	26	22	21	20

Según los datos obtenidos en la Tabla 5, el factor de seguridad mínimo es de 20 y se encuentra en el extractor de 1/2 in, garantizando que sea una pieza segura.

- **Contenedor de material.** En la Figura 19, se muestra el D.C.L. correspondiente a esta pieza, donde P, como en el elemento anterior, indica la presión ejercida por el material que se *está* compactando, T indica la fuerza resultante de la unión con tornillos y A indica la fuerza resultante del apoyo sobre el que esta la pieza, en este caso, se observa que P se encuentra distribuida uniformemente sobre la cara interna de la pieza.

Figura 19.*Molde Pieza Contenedor de material D.C.L.*

En la Figura 20 y la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar estas fuerzas mediante simulación CAE.

Figura 20.*Molde Pieza Contenedor de material - Análisis CAE***Tabla 6.***Molde Pieza Contenedor de material - Análisis CAE (Resultados)*

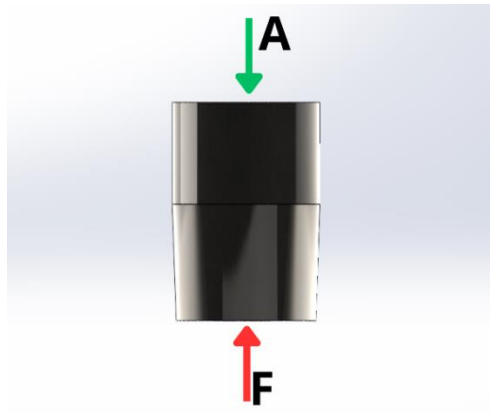
Análisis CAE				
Pieza :	Moldes			
Material :	Acero 304			
Carga :	1.000 psi			
Aplicación :	2 in	1 in	3/4 in	1/2 in
Esfuerzo Máximo	89,85 MPA	14,66 MPA	13,63 MPA	12,56 MPA
Desplazamiento Máximo	0,01122 mm	0,0007745 mm	0,0004964 mm	0,0003018 mm
Factor de seguridad Mínimo	2,3	14	15	16

Como se ilustra en la Tabla 6, el molde que está soportando un esfuerzo mayor significativamente con respecto a los demás es el de 2 in, asegurando un factor de seguridad de 2,3, este tamaño de molde fue el primero en diseñarse, dando de esta manera la geometría mínima para trabajar y poder diseñar a partir de este los demás moldes, por este motivo como se ilustra, el factor de seguridad en los otros tamaños es significativamente mayor.

- **Punzón.** Como se ilustra en la Figura 21, el punzón está sometido a dos fuerzas, F , indicando la fuerza que ejerce el material que está siendo comprimido, y A , indicando la fuerza resultante generada por el tornillo mediante el cual está conectado el punzón al resto del equipo.

Figura 21.

Molde Pieza Punzón D.C.L.



La pieza es sometida a análisis CAE, los resultados se ilustran en la Figura 22 y la Tabla 7.

Figura 22.

Molde Pieza Punzón - Análisis CAE

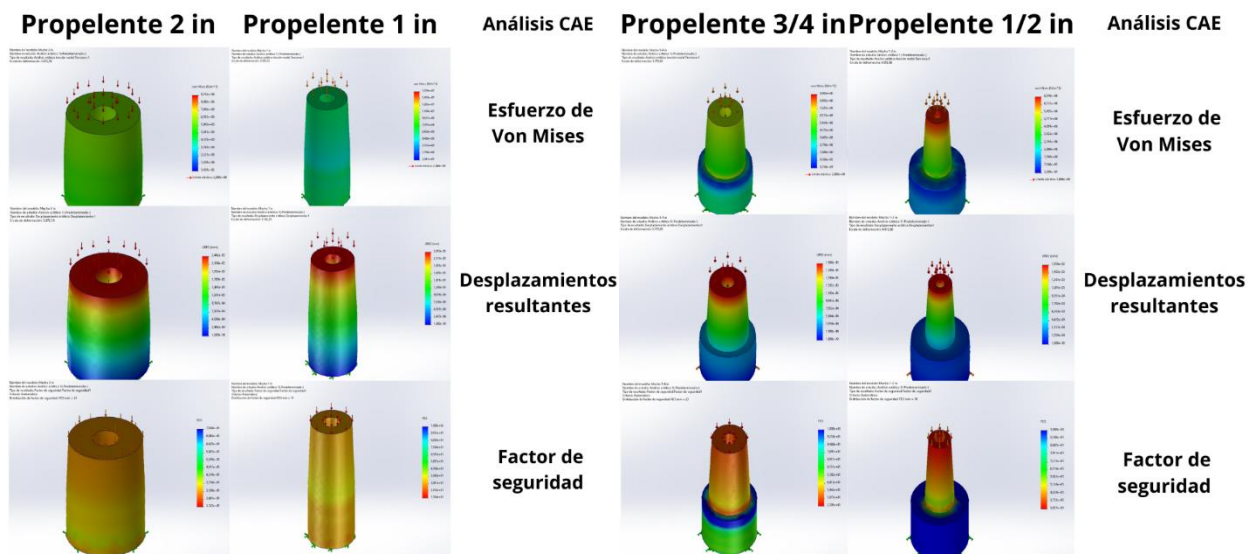
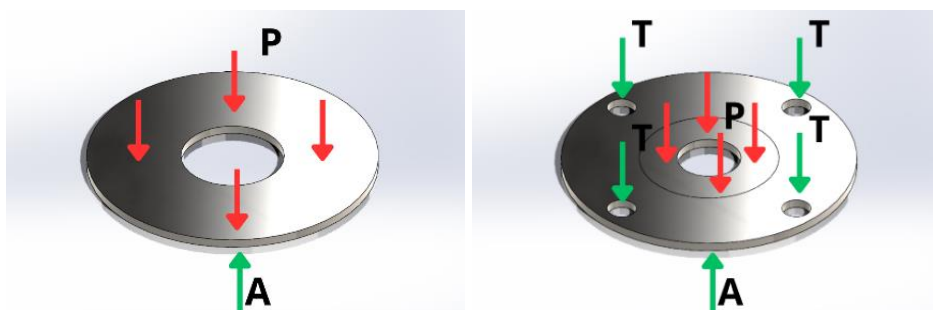


Tabla 7.*Molde Pieza Punzón - Análisis CAE (Resultados)*

Análisis CAE				
Pieza :	Punzón			
Material :	Acero 304			
Carga :	1.000 psi			
Aplicación :	2 in	1 in	3/4 in	1/2 in
Esfuerzo Máximo	9,742 MPA	15,74 MPA	8,982 MPA	6,810 MPA
Desplazamiento Máximo	0,002442 mm	0,002419 mm	0,001988 mm	0,0001558 mm
Factor de seguridad Mínimo	21	13	23	30

Como se muestra en la Tabla 7, la pieza cumple adecuadamente las exigencias y esfuerzos generados en cada uno de los 4 tamaños de grano.

- **Anillo centro y base.** Estas dos piezas particularmente solo están sometidas a esfuerzos significativos en un solo tamaño de grano, el anillo centro, solo está sometida a carga significativa en la fabricación de granos de 3/4 in, y la base solo está sometida a carga significativa en la fabricación de granos de 2 in, en las Figura 23, se ilustran los D.C.L. del anillo centro y la base respectivamente.

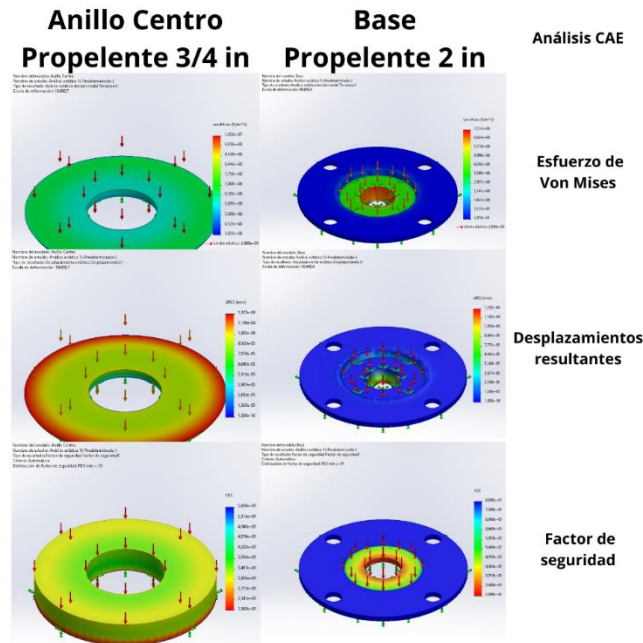
Figura 23.*Molde Piezas Anillo Centro y Base D.C.L.*

Nota: Izq. Anillo Centro Der. Base

En la Figura 24 se muestran los resultados después de someter estas piezas a un análisis CAE.

Figura 24.

Molde Piezas Anillo centro y Base - Análisis CAE



Adicionalmente, en las Tabla 8 y Tabla 9, se resumen los datos de estas dos piezas, indicando así que las dos piezas están perfectamente diseñadas para el equipo.

Tabla 8.

Molde Piezas Anillo centro - Análisis CAE (Resultados)

Análisis CAE	
Pieza :	Anillo Centro
Material :	Acero 304
Carga :	1.000 psi
Aplicación :	3/4 in
Esfuerzo Máximo	10,50 MPA
Desplazamiento Máximo	0,0001329 mm
Factor de seguridad Mínimo	20

Tabla 9.

Molde Piezas Base - Análisis CAE (Resultados)

Análisis CAE	
Pieza :	Base
Material :	Acero 304
Carga :	1.000 psi
Aplicación :	2 in
Esfuerzo Máximo	7,737 MPA
Desplazamiento Máximo	0,0001292 mm
Factor de seguridad Mínimo	29

5.3 Sistema de potencia

Teniendo en cuenta el diseño y funcionamiento del sistema de prensado que se tiene establecido, se requiere implementar un nuevo mecanismo de accionamiento del gato hidráulico, debido a las funciones que se establecen, por lo tanto, se busca llevar a cabo una idea de mecanismo rotativo, el cual nos brinde una eficiencia y un óptimo trabajo a la hora de la realización de la tarea estipulada.

Primero que todo se debe tener en cuenta las dimensiones de la maquina en funcionamiento junto con las fuerzas y presión necesarias para la realización del prensado del propelente. Dicha presión necesaria es de 6.89 Mpa, por lo tanto, al realizar la ecuación 1, con las dimensiones del pistón de mayor diámetro obtenemos la fuerza que vendría siendo 15200N, lo cual vendrían siendo 1549.4Kg que serán aplicados en el propelente sólido a la hora del prensado.

Ecuación 1: presión máxima de trabajo

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P(A) = F$$

$$6.89\text{Mpas} \left(\frac{\pi}{4} (53\text{mm})^2 \right) = F$$

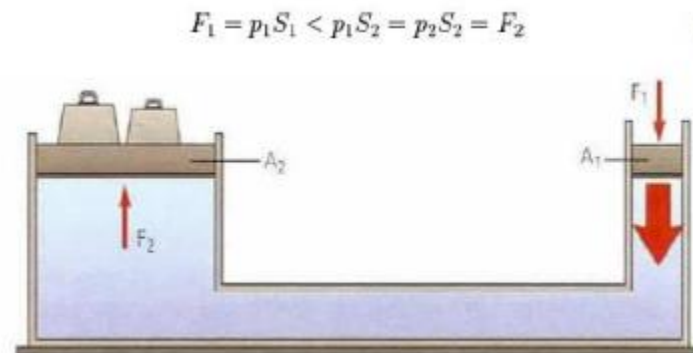
$$F = 15200\text{N}$$

Teniendo en cuenta que se requieren 15200N como fuerza mínima para el prensado del propelente sólido, se consideran los siguientes parámetros para el diseño y fabricación por decisiones propias, aplicando un factor de seguridad en los elementos y asegurando el prensado del propelente. Dicho esto, los gatos hidráulicos funcionan con el principio de Pascal, Figura 25,

así que se determina la fuerza necesaria a aplicar en el pistón de menor diámetro con una carga de 2000 kg como fuerza máxima sobre el pistón de mayor diámetro que vendrían siendo 19620N.

Figura 25.

Principio de pascal



Nota. Tomado de (Afkir, 2018)

Partiendo del pistón con diámetro mayor de 53mm obtenemos la presión necesaria que se requiere para el levante de 2000kg, según el principio de pascal;

Diámetro pistón mayor: 53mm

Diámetro pistón menor: 12mm

$$P_1 = \frac{F}{A}$$

$$P_1 = \frac{2000KG(9.81 \frac{m}{s^2})}{\frac{\pi}{4} (53mm)^2}$$

$$P_1 = 8,89MPA$$

Considerando que el principio de pascal define que la presión interna es igual en todos los puntos se define que $P_1 = P_2$. Realizando los cálculos necesarios se obtiene la fuerza que se

requiere aplicar en el pistón de menor diámetro para poder realizar el levante de 2 toneladas en el pistón de mayor diámetro.

$$P_1 = P_2$$

$$P_2(A_2) = F_2$$

$$8.89MPa\left(\frac{\pi}{4}(12mm)^2\right) = F_2$$

$$F_2 = 1005.43N$$

En vista que, obtenemos la fuerza necesaria a aplicar en el pistón de menor diámetro, como paso a seguir, se define el diseño del mecanismo junto con sus dimensiones. Continuando con el proceso de diseño, como idea principal se tiene en cuenta lo mencionado por (Afkir, 2018) en la tesis *Estudio y diseño de un gato hidráulico con accionamiento rotatorio*, donde se describen dos mecanismos para accionar el sistema de levante del gato hidráulico, uno de estos mecanismos es la *leva-seguidor* y el segundo es el *Cigüeñal-Biela*, de los cuales se realizan estudios a fondo y se elige como mejor opción el mecanismo *Cigüeñal-Biela*, dado que satisface las variables del mecanismo *leva-seguidor* que no permiten una efectividad debido a su baja carrera, tardando así la operación de compresión y succión del pistón de menor diámetro. En conclusión, se elige el mecanismo *Cigüeñal-Biela*, puesto que reduce los tiempos de compresión y succión del pistón de menor diámetro, mediante el ajuste de las dimensiones de la biela y el cigüeñal.

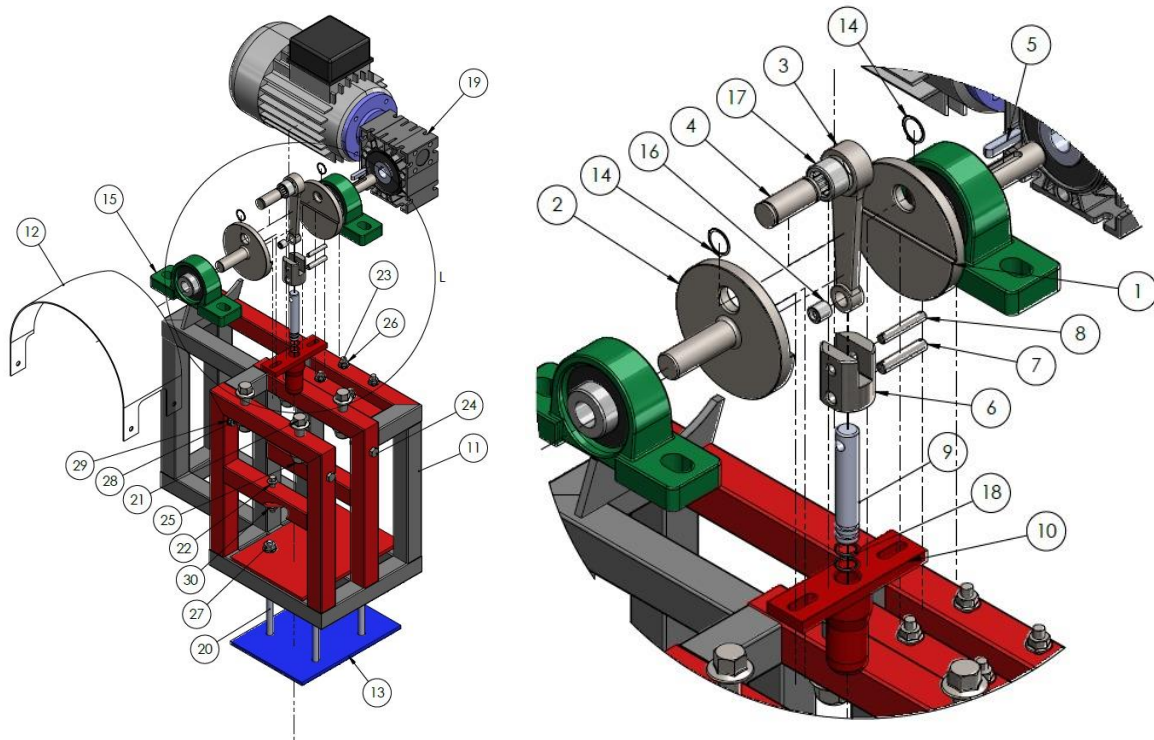
A continuación, se procede con la realización del diseño y dimensiones del mecanismo *Cigüeñal-Biela*.

5.3.1 Mecanismo Cigüeñal-Biela

En la Figura 26, se ilustra parte del sistema de potencia y sus componentes.

Figura 26.

Modelo 3D Mecanismo Cigüeñal-Biela



Nota. Se muestra el sistema de potencia que lo compone el mecanismo cigüeñal-biela y los demás subcomponentes como lo es el bastidor y motorreductor.

En la Tabla 10 se muestra el listado de componentes del sistema.

Tabla 10.

Componentes del sistema de potencia

ITEM	NOMBRE DE PIEZA	CANT.
1	CIGÜEÑAL P1	1
2	CIGÜEÑAL P2	1
3	BIELA	1
4	MUÑON BIELA	1
5	CHAVETA	1

6	ACOPLE BIELA-PISTON	1
7	PASADOR ACOPLE BIELA-PISTON	1
8	PASADOR PEQUEÑO- BIELA	1
9	EMBOLO	1
10	CAMISA EMBOLO	1
11	ESTRUCTURA SOPORTE	1
12	GUARDA-CIGUEÑAL	1
13	LAMINA ANCLAJE	1
14	ANILLO SH-55	2
15	CHUMACERA	2
16	SKF_HK 0509	1
17	SKF_HK 1412	1
18	O-RING 2-012	2
19	MOTORREDUCTOR CON SUBESTRUCTURA	1
20	TORNILLO ANCLAJE	4
21	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M12 x 1.75 x 55 --30N	4
22	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M6 x 1.0 x 45 --18N	2
23	B18.6.7M - M6 x 1.0 x 40 Indented HFMS --40N	4
24	HBOLT 0.2500-20x1.375x0.75-N	3
25	AM-M12-N	4
26	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M6 x 1 --N	6
27	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M8 x 1.25 --N	8
28	HHJNUT 0.2500-20-D-N	3
29	Preferred Narrow FW 0.25	3
30	B18.22M - Plain washer, 6 mm, regular	2

En este sistema se puede tener en cuenta la carrera del pistón de menor diámetro que se encuentra definida sin modificar los elementos y dimensiones de la máquina que se tiene. Primero que todo se definirán las dimensiones a utilizar y seguidamente se ilustrarán por medio de un programa de diseño SolidWorks la idea establecida.

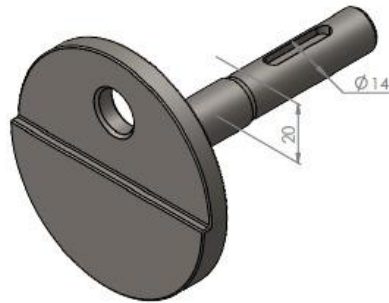
Las dimensiones del mecanismo que se pueden determinar son:

- Carrera del pistón de menor diámetro, en este caso la carrera es de 40mm, la cual es la medida estandarizada que se tiene actualmente, por lo tanto, se define la medida a la que se encontrara el muñón del cigüeñal, siendo esta medida de 20mm.

- Longitud de la biela, que en este caso se define de 4 veces la longitud que se encuentra el muñón desde el centro del eje del cigüeñal o la mitad de la carrera del pistón de menor diámetro. Esto con el fin de obtener dimensiones proporcionales.

Figura 27.

Cigüeñal parte derecha

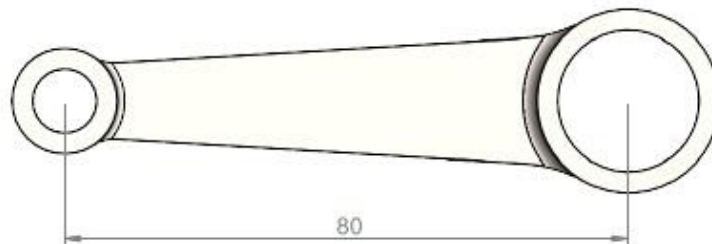


Nota. Se muestra un esquema del cigüeñal con las dimensiones básicas iniciales, esquema tomado del programa SolidWorks.

Por otro lado, en la Figura 27 se muestran las dimensiones básicas de la biela ya que se desconocen las demás variables. A continuación, en la Figura 28 se modela la biela mostrando su longitud y sus puntos de anclaje en los demás elementos.

Figura 28.

Esquema Biela

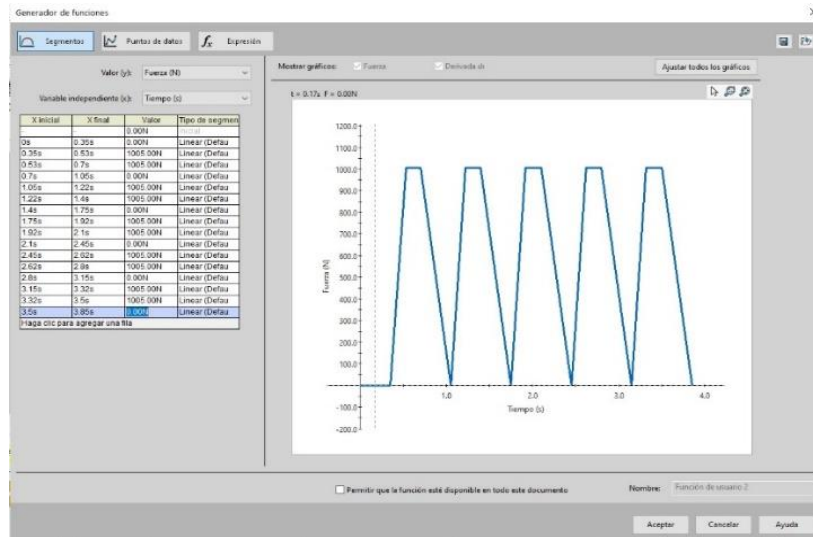


Continuando con el estudio y diseño del mecanismo se definirá el torque necesario que deberá transmitir el cigüeñal a la biela para proporcionar la fuerza y presión necesaria en el cilindro de menor diámetro. Se utilizan dos métodos para obtener un resultado aproximado, un método es utilizando el programa de diseño SolidWorks y como segundo método es la realización de la sumatoria de las fuerzas y momentos manualmente.

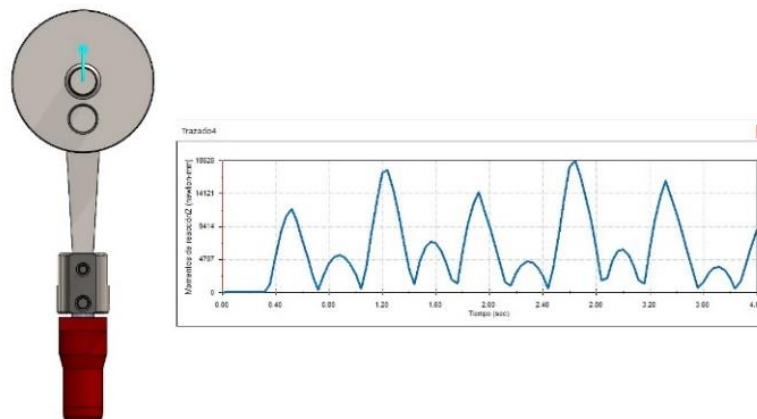
En el método del programa de diseño no se tienen en cuenta fuerzas de rozamiento y el peso de los elementos mecánicos. Se procede primeramente con la simulación donde consta de un estudio de movimiento, por lo tanto, se tiene en cuenta solo la fuerza cuando se realiza la compresión del propelente mas no la de retirada del pistón, es decir, se realiza una programación de la fuerza, donde se hace constante cuando el cilindro de menor diámetro se encuentra en el punto muerto superior y llega al punto muerto inferior, seguidamente disminuye considerablemente cuando finaliza en el punto muerto inferior y comienza a desplazarse nuevamente hacia arriba buscando el punto muerto superior. Esto se realiza debido a que el mayor trabajo se ejerce cuando se comprime el propelente sólido y se genera presión dentro del sistema del gato hidráulico, por lo tanto, la fuerza de succión del pistón de menor diámetro es menor que la de compresión.

En el siguiente grafico podemos observar la programación de la fuerza a partir de la compresión del propelente sólido sin tener en cuenta la fuerza del desplazamiento o succión del pistón de menor diámetro ya que, como se mencionó anteriormente es menor que la fuerza de compresión.

Se define como punto muerto inferior el punto final de la carrera del pistón de menor diámetro y como punto muerto superior el punto inicial de carrera del pistón.

Figura 29.*Fuerza máxima en cigüeñal*

En el siguiente gráfico Figura 30, se observa el torque que se requiere en el cigüeñal para cumplir con el objetivo del prensado del propelente sólido, que en este caso se está diseñando por decisiones propias para el levantamiento de 2 toneladas en el pistón de mayor diámetro, el cual satisface la fuerza y presión necesaria para el prensado del propelente. Por consiguiente, se requieren 18.82 Nm de torque en el cigüeñal para ejercer la fuerza necesaria de 1005N sobre el pistón de menor diámetro según simulación presentada por el programa de diseño SolidWorks.

Figura 30.*Momento máximo Cigüeñal*

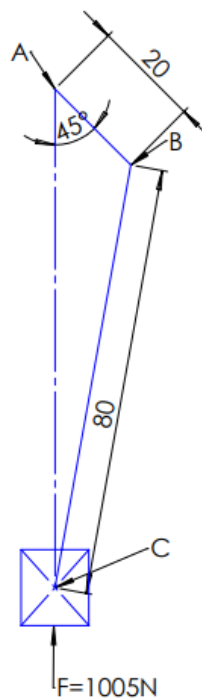
En el segundo método a utilizar se tiene en cuenta un ángulo de posicionamiento de 45° entre el eje del pistón de menor diámetro y el radio del cigüeñal donde ejercerá la fuerza a la biela, el cual es el muñón.

Como se mencionó anteriormente, el ángulo con el cual se realizará el estudio para hallar el momento máximo a utilizar es de 45° ya que, cumpliendo con la ecuación de torque, este es efectivo cuando la fuerza es totalmente perpendicular al radio de giro.

Se muestra en la Figura 31, un bosquejo del diagrama de cuerpo libre con las dimensiones y ángulo a utilizar del cigüeñal y la biela, junto con la fuerza máxima a utilizar de 1005N.

Figura 31.

Mecanismo Cigüeñal-Biela D.C.L

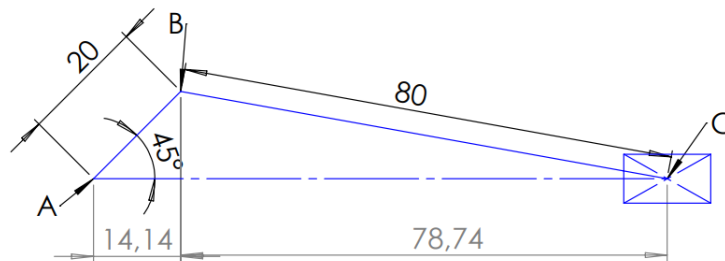


Nota. Se muestra diagrama de cuerpo libre del mecanismo Cigüeñal-Biela, junto con la fuerza máxima aplicada sobre el pistón de menor diámetro.

Las dimensiones que se utilizarán para los cálculos son mostradas a continuación en la

Figura 32.

Dimensiones Mecanismo Cigüeñal-Biela



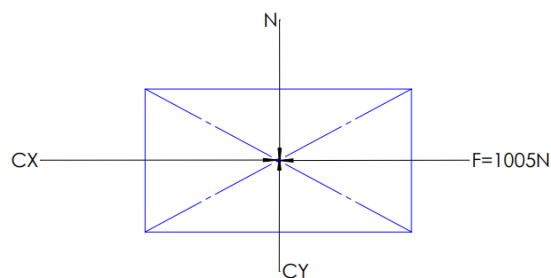
Nota. Distancias en mm y Fuerzas en N.

A continuación, se muestran los diagramas de cuerpo libre de cada elemento junto con sus reacciones, se realizará cada calculo para conocer las fuerzas de reacción en cada uno de ellos.

5.3.1.1 Pistón de menor diámetro. Se muestra en la Figura 33 el diagrama de cuerpo libre del pistón de menor diámetro con sus reacciones y fuerza máxima aplicada.

Figura 33.

Pistón Menor Diámetro D.C.L



Se procede a realizar las sumatorias de fuerzas en dirección X y en dirección Y, por lo tanto, se escoge como referencia positiva en dirección hacia la derecha y hacia arriba, así mismo, obtenemos:

En dirección X del plano:

$$\sum F_X = 0$$

Ecuación 2: Sumatoria de fuerzas en X

$$\sum F_X = C_X - F$$

$$C_X = F = 1005N$$

En la dirección Y del plano:

$$\sum F_Y = 0$$

Ecuación 3: Sumatoria de fuerzas en Y

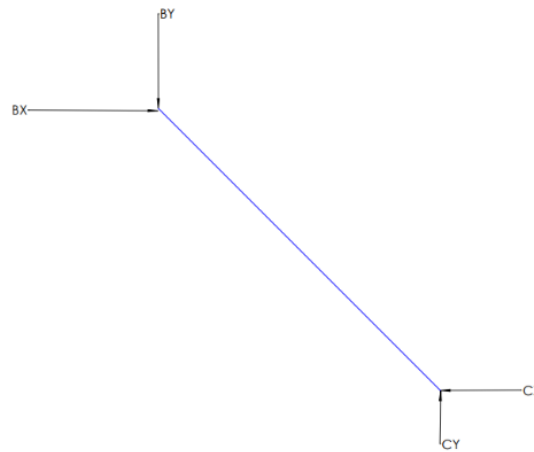
$$\sum F_Y = C_Y - N$$

$$C_Y = N$$

5.3.1.2 Biela. Se muestra el diagrama de cuerpo libre de la biela junto con sus reacciones en la Figura 34, las dimensiones utilizadas son mostradas en el grafico anterior Figura 32, se utiliza el mismo sistema de referencia dicho anteriormente, positivo hacia la derecha y hacia arriba.

Figura 34.

Biela D.C.L



En la dirección X obtenemos:

$$\sum F_X = 0$$

$$\sum F_X = B_X - C_X$$

$$B_X = C_X = 1005N$$

En la dirección Y obtenemos:

$$\sum F_Y = 0$$

$$\sum F_Y = C_Y - B_Y$$

$$C_Y = B_Y$$

Para obtener las variables C_Y y B_Y , se realiza momento en un punto de la biela, en este caso se realiza en el punto B y el momento es positivo a favor de las manecillas del reloj.

$$\sum M_B = 0$$

Ecuación 4: Sumatoria de Momentos

$$C_x(14.14mm) - C_Y(78.74mm) = 0$$

Reemplazando las variables con los valores obtenidos anteriormente tenemos:

$$C_Y = \frac{1005(14.14)}{78.74}$$

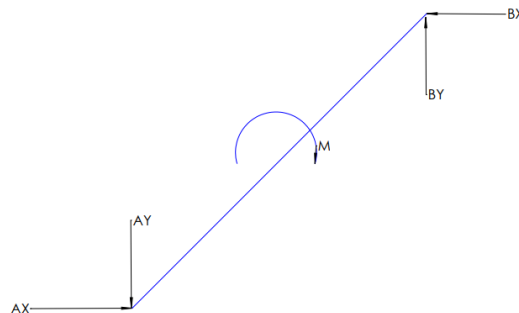
$$C_Y = 180.47N$$

Por consiguiente, tenemos que las reacciones resultantes C_Y y B_Y es igual a 180.47N.

5.3.1.3 Cigüeñal. En este elemento se debe tener en cuenta el momento externo necesario para realizar la presión sobre el pistón de menor diámetro, que en este caso viene siendo el momento que se busca para la selección de los demás componentes. Se muestra en la Figura 35 el Diagrama de cuerpo libre del cigüeñal junto con sus reacciones y el momento externo necesario para la selección del motorreductor.

Figura 35.

Cigüeñal D.C.L



Se realiza todo el proceso antes mencionado en los demás elementos y con el mismo sistema de referencia, positivo hacia la derecha y hacia arriba.

En la dirección X obtenemos:

$$\sum F_X = 0$$

$$\sum F_X = A_X - B_X$$

$$A_X = B_X = 1005N$$

En la dirección Y obtenemos:

$$\sum F_Y = 0$$

$$\sum F_Y = B_Y - A_Y$$

$$B_Y = A_Y = 180.47N$$

Sumatoria de momento en el punto A, dejando como momento positivo a favor de las manecillas del reloj.

$$\sum M_A = 0$$

$$M - B_Y(14.14mm) - B_X(14.14mm) = 0$$

Reemplazando las variables con los valores obtenidos y despejando el momento M:

$$M = 180.47(14.14mm) + 1005(14.14mm) = 0$$

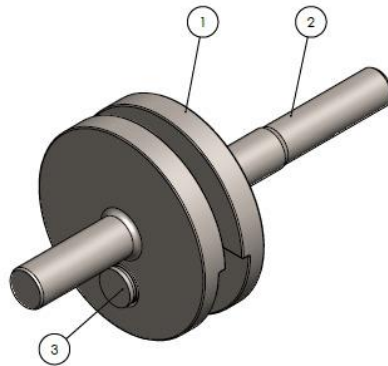
$$M = 16762.54Nmm$$

$$M = 16.76Nm$$

El momento que se debe aplicar a la biela es de 16.76Nm aproximadamente, como se pudo verificar antes con el estudio de movimiento realizado en SolidWorks, el torque necesario se puede decir que, al ser similar, se escoge el mayor que es 18.82Nm, por lo tanto, se procede a la selección de los demás componentes y a su respectivo diseño teniendo en cuenta estos resultados.

5.3.2 *Diseño del mecanismo de Accionamiento*

5.3.2.1 Cigüeñal. Es el elemento principal en este mecanismo, ya que su función es la transmisión del momento generado por un motor eléctrico, por lo tanto, es el encargado de transformar el movimiento circular en movimiento lineal a través de otros elementos mecánicos. Sus componentes se muestran en la Figura 36 en el modelo de diseño en SolidWorks.

Figura 36.*Partes del Cigüeñal*

Número	Elemento
1	Contrapesas
2	Eje del cigüeñal
3	Muñón

El cigüeñal es el elemento empleado en el accionamiento de un pistón de un Gato Hidráulico tipo botella, para el cual cumple con la misma función que para motores de combustión interna, con la diferencia que no realizará tareas a altas revoluciones ni a temperaturas elevadas (Guanuchi & Moposita, 2017). En este caso, el cigüeñal trabajara con cargas menores a las que realiza en un motor a combustión interna y como se encuentra expuesto, las temperaturas que maneja son muy bajas a comparación de los motores.

La función que realizará en este mecanismo es la transmisión de un torque externo proporcionado por un motor eléctrico que se encontrará conectado a un extremo de este, el cual impulsará una biela que se encontrará conectada en el muñón del cigüeñal y transmitirá una fuerza al pistón de menor diámetro, cumpliendo así con el objetivo que es el levante del pistón de mayor diámetro de un gato hidráulico para cumplir con la tarea a realizar que es el prensado del propelente sólido.

En este caso se realizará un diseño de cigüeñal en dos partes debido a las dimensiones a utilizar y facilitar el montaje de la biela y así mismo reducir costos y tiempo a la hora del ensamble.

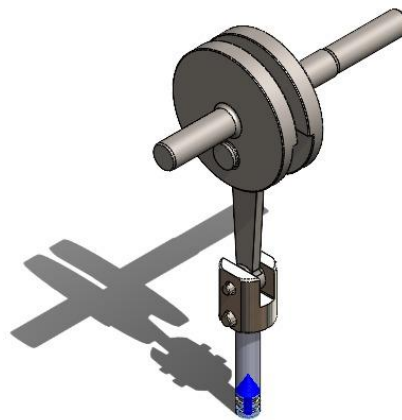
- **Diseño de dimensiones críticas.** En este caso el cigüeñal solo tendrá un punto donde se ejercerá el mayor esfuerzo que vendrá siendo el muñón cuando el pistón de menor diámetro se encuentre en el punto muerto inferior. Por lo tanto, esta carga que tendrá que soportar el muñón se define a partir de los cálculos de momentos y gráficos a realizar.

Con esta carga aplicada se realizará un esquema del cigüeñal donde se tendrán en cuenta apoyos a los extremos del eje que vendrán siendo las chumaceras que soportarán una carga reactiva y mantendrán alineado el cigüeñal para su buen funcionamiento.

Se procede a ejecutar el análisis cuando el cilindro de menor diámetro se encuentre en el punto muerto inferior como se mencionó anteriormente, esto debido a que es donde se producirá la fuerza máxima sobre el muñón del cigüeñal. Se muestra en la Figura 37 el esquema de mecanismo cigüeñal, biela y pistón de menor diámetro con fuerza máxima aplicada sobre el pistón de menor diámetro, la cual se transmite hasta el muñón, esquema tomado con la ayuda del programa de diseño SolidWorks.

Figura 37.

Mecanismo Cigüeñal, biela y pistón



Seguidamente, se tiene en cuenta el torque generado por el movimiento del cigüeñal, que en este caso será generado por una fuente externa.

○ Torque externo generado por el motor eléctrico - T_p : torque del motor

Los datos que se mostrarán a continuación se sustituirán para la realización de los cálculos respectivos y justificar los diámetros del cigüeñal.

Se obtienen datos del motor eléctrico como la potencia y velocidad angular. Se realiza la selección de un motor eléctrico acoplado a un motorreductor, el cual es de velocidades muy bajas y de torque alto. En este caso el motor eléctrico es de ¼ de caballo trifásico, esto debido a la selección de un motor eléctrico con voltaje de 220, ya que los motores de 12V, cumplen con el torque requerido, pero al ser tan pequeños no soportan las altas entregas de potencia y sufren daños internos causando así fallas en la operación, por otro lado, las dimensiones que se tienen no son proporcionales a la máquina que se le realiza el proyecto, por lo tanto, se selecciona el motorreductor de un torque mayor al requerido y con dimensiones proporcionales al diseño que se maneja.

A continuación, se muestran los valores de potencia del motor eléctrico y sus rpm.

$$0.25HP = 186.425W$$

$$W = 42Rpm \times \frac{2\pi}{1Rev} \times \frac{1mn}{60s}$$

$$W = 4.39 \frac{Rad}{s}$$

Sustituimos los resultados en la ecuación para determinar el par del motor eléctrico.

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

Ecuación 5: Potencia del motor eléctrico

$$T_p = \frac{186.425W}{4.39 \frac{Rad}{s}}$$

$$T_p = 42.46Nm$$

Como podemos observar el torque del motorreductor es de $42.46Nm$, por lo tanto, el cigüeñal debe tener las dimensiones y material adecuado para soportar el torque y no presentar fallas a la hora de la realización de la tarea estipulada.

○Determinación de la fuerza critica del cigüeñal.

El punto crítico del cigüeñal viene siendo cuando el cilindro de menor diámetro se encuentre en su punto muerto inferior, por lo tanto, se deben de tener en cuenta la fuerza máxima que se puede obtener a partir de los cálculos presentados anteriormente.

$$P_{MAX} \frac{F_{MAX}}{A_P}$$

$$F_{MAX} = P_{MAX} \times A_P$$

$$F_{MAX} = 8.89MPA \left(\frac{\pi}{4} (12mm)^2 \right)$$

$$F_{MAX} = 1005.43N$$

F_{MAX} viene siendo la fuerza máxima en el pistón de menor diámetro para el levante de las 2 toneladas en el pistón de mayor diámetro del gato hidráulico, lo cual esta fuerza se transmite al punto crítico del cigüeñal que viene siendo el muñón. Como se muestra en la Figura 37.

- **Análisis de torsión.** Teniendo en cuenta que ya tenemos establecida la fuerza máxima en el punto crítico y el torque generado por el motor eléctrico, procedemos a obtener el factor de seguridad a partir del análisis de torsión.

$$T_P = 42.465Nm$$

Para realizar el análisis de torsión procederemos a realizar la teoría del esfuerzo cortante máximo que se representa en la siguiente ecuación.

$$\tau_{MAX} = \frac{16 \times T_p}{\pi \times D^3}$$

Ecuación 6: Esfuerzo cortante máximo

Donde:

T_p= Par del motor eléctrico

D= Diámetro del eje del cigüeñal

En la aplicación de este criterio se tiene en cuenta que en algún momento el pistón se atascará y provocará un esfuerzo cortante máximo, el cual es producto del torque producido en el cigüeñal.

Para el diámetro del eje del cigüeñal tomaremos las medidas del motorreductor que se encuentra conectado a un extremo de este. En este caso el diámetro es de 14mm el cual ya se encuentra estandarizado.

Sustituyendo los valores de cada variable presentadas anteriormente obtenemos:

$$\tau_{MAX} = \frac{16 \times T_p}{\pi \times D^3}$$

$$\tau_{MAX} = \frac{16 \times 42.465Nm}{\pi(0.014m)^3}$$

$$\tau_{MAX} = 78816497.47Pascales$$

$$\tau_{MAX} = 78.8MPa$$

Teniendo en cuenta este resultado se procede a calcular el factor de seguridad, el cual viene dado por:

$$n = \frac{\text{Limite de fluencia}}{\text{Esfuerzo admisible}}$$

Ecuación 7: Factor de seguridad

El esfuerzo admisible (Guanuchi & Moposita, 2017), viene dado por el τ_{MAX} y el límite de fluencia viene dado por las propiedades del tipo de material, como se aplica un par torsor puro en caso de fallo, el límite de fluencia viene dado por un τ_y el cual viene siendo:

$$\tau_y = 0.577 \times S_y$$

Ecuación 8: Criterio de la energía de distorsión para torsor puro

Por consiguiente, el factor de seguridad a torsión es:

$$n = \frac{\tau_y}{\tau_{MAX}}$$

El tipo de acero que se utilizará en el cigüeñal es el acero 4140 en caliente y maquinado por tipo de proceso y acabado, sus propiedades se presentan a continuación en la Figura 38 tomada del catálogo de (Ferrocortes SAS, 2024). El límite de fluencia de este material es de 427MPa o 62000 psi.

Figura 38.

Propiedades Acero 4140

Composición química (% en peso)

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
0.38	0.15	0.75	-	-	0.80	0.15
0.43	0.35	1.00	0.035	0.040	1.10	0.25

Densidad: 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

Propiedades mecánicas mínimas estimadas SAE J1397

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad 1212 EF =100%
	MPa	PSI	MPa	PSI				
Caliente y maquinado	614	89000	427	62000	26	57	187	70
Estirado en frío	703	102000	620	90000	18	50	223	
Templado y revenido*	1172	170000	1096	159000	16	50	341	-

Nota. Adaptado de (Ferrocortes SAS, 2024)

Continuando con lo mencionado anteriormente, se observa que el límite de fluencia del acero 4140 este dado por un $S_Y = 62.000Psi$, o $427 Mpa$, así que reemplazando en la ecuación anterior se obtiene:

$$\tau_Y = 0.577 \times 427Mpa$$

$$\tau_Y = 246.379Mpa$$

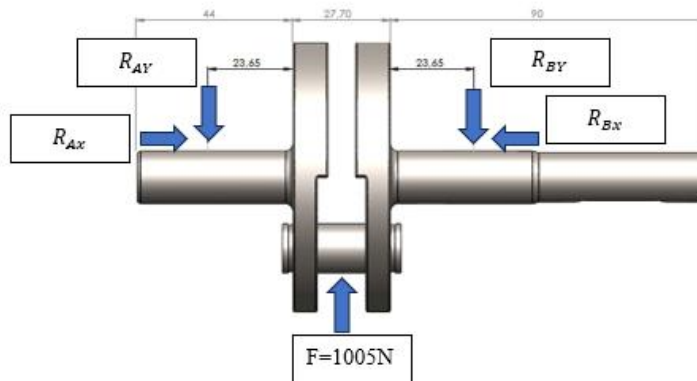
$$n = \frac{246.379Mpa}{78.8Mpa}$$

$$n = 3.12$$

Por consiguiente, se obtiene como resultado un factor de seguridad de 3.12, por lo cual nos indica que el eje del cigüeñal soportara aquel esfuerzo cortante en caso tal de un atascamiento en el pistón de menor diámetro.

- ***Análisis por flexión del cigüeñal.*** La fuerza máxima que se considera viene dada cuando el pistón se encuentra en el punto muerto inferior y es cuando se genera la presión máxima de trabajo, por lo tanto, esta fuerza caerá sobre el punto crítico del cigüeñal que viene siendo el muñón.

Se realiza un análisis estático para calcular las reacciones en los soportes del eje que vienen siendo las chumaceras, por lo tanto, se realiza un diagrama de cuerpo libre (Figura 39). Se muestra el cigüeñal con sus dimensiones y reacciones en los puntos de apoyo (chumaceras) y la fuerza máxima en el muñón, esquema tomado con la ayuda del programa de diseño SolidWorks.

Figura 39.*Cigüeñal D.C.L Fuerzas*

Las reacciones en los apoyos con dirección en X se anulan debido a que no hay fuerzas en el plano, mientras que las reacciones en Y de los apoyos son simétricas, así que $R_{AY} = R_{BY}$. Por lo tanto, tomando como eje de referencia positiva la dirección de la fuerza hacia abajo y como negativa las fuerzas hacia arriba obtenemos:

$$R_{AY} + R_{BY} - F = 0$$

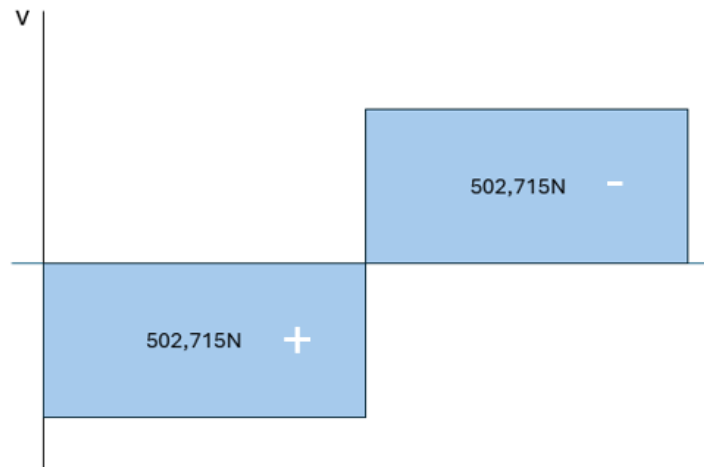
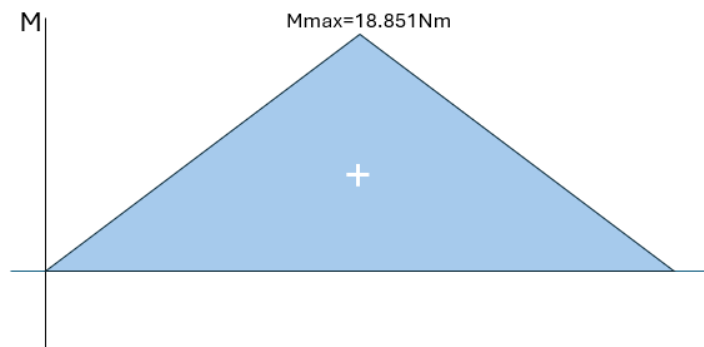
$$R_{AY} = R_{BY}$$

$$R_{AY} = \frac{F}{2}$$

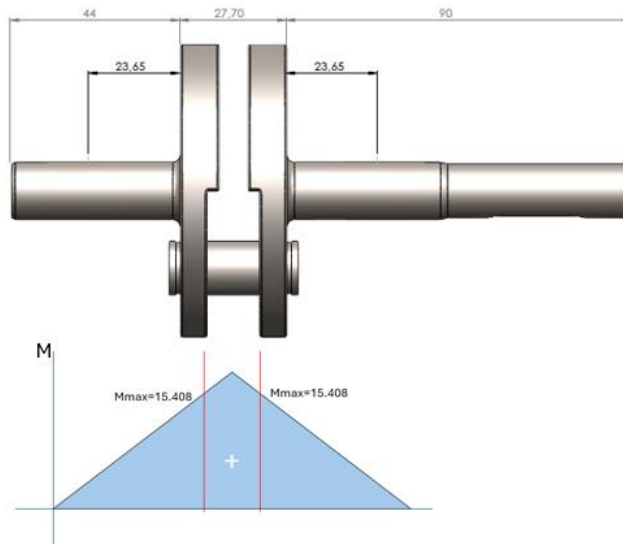
$$R_{AY} = \frac{1005.43}{2}$$

$$R_{AY} = 502.715 \text{ N}$$

Con los resultados anteriores se procede a realizar los diagramas del vector cortante (Figura 40) y de momento flector.

Figura 40.*Diagrama Vector cortante***Figura 41.***Diagrama Momento Flector Máximo*

El momento por flexión máximo se da en el punto de aplicación de la fuerza, es decir, en el muñón del cigüeñal, sin embargo, los puntos críticos a la fatiga se producen en la entalladura o cambios de sección del muñón, por lo tanto, se realizará un estudio de estos entalles, teniendo en cuenta los gráficos de momento flector en esos puntos de contacto (Guanuchi & Moposita, 2017). Se muestra en la Figura 42 el momento flector máximo sobre los puntos de entalladura del muñón.

Figura 42.*Momento flector máximo muñón*

Por otro lado, ya teniendo los puntos críticos a la fatiga y el momento flector máximo en la entalladura, se procede a calcular el esfuerzo máximo a la flexión, el cual se representa en la siguiente ecuación.

$$\sigma_{max} = \frac{32 \times M_{max}}{\pi \times \phi^3}$$

Ecuación 9: Esfuerzo máximo a flexión en ejes

Se procede a analizar el muñón del cigüeñal con el momento máximo dado en los puntos de contacto, el cual tiene un diámetro de 14mm.

$$\sigma_{max} = \frac{32 \times 15.408}{\pi \times (0.014m)^3}$$

$$\sigma_{max} = 5.7 \times 10^7 pas$$

$$\sigma_{max} = 57.19Mpa$$

Teniendo el esfuerzo máximo a la fatiga, se procede al cálculo de la resistencia a la fatiga, el cual viene dado por la siguiente ecuación. Esto con el fin de comprobar si el cigüeñal cumple con la resistencia a la fatiga. Factores que modifican la resistencia a la fatiga (Budynas, 2012)

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

Ecuación 10: Factores que modifican la resistencia a la fatiga

Donde las siguientes variables vienen dadas por:

Ka= factor de modificación por la condición superficial

Kb= factor de modificación por el tamaño

Kc= factor de modificación por la carga

Kd= factor de modificación por la temperatura

Ke= factor de confiabilidad

Kf= factor de modificación por efectos varios

S'_e= límite a la resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Se= límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de la máquina en la geometría y condición de uso.

- Factor de modificación por la condición superficial (Budynas, 2012):

$$k_a = aS_{ut}^b$$

$$S_{ut} = 89.000PSI$$

$$S_{ut} = 614Mpa$$

Maquinado a:

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

Reemplazando obtenemos:

$$k_a = 4.51 * 614^{-0.265}$$

$$k_a = 0.9$$

- Factor de modificación por el tamaño (Budynas, 2012):

$$k_b = \left\{ \begin{array}{ll} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

$$1.51d^{-0.157} \qquad 51 < d \leq 254 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se tiene en cuenta que el diámetro del muñón es de 14mm, reemplazando se obtiene:

$$k_b = 1.51d^{-0.157}$$

$$k_b = 1.51 * 14^{-0.157}$$

$$k_b = 0.99$$

- Factor de modificación por la carga (Budynas, 2012):

$$k_c = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ flexion} \\ 0.85 \text{ axial} \\ 0.59 \text{ torsion} \end{array} \right\}$$

Kc es igual a 1 debido que es flexión lo que se está analizando en este caso.

- Factor de modificación por la temperatura (Budynas, 2012):

$$k_d = 1$$

- Factor de confiabilidad (Budynas, 2012):

$$k_e = 1 - 0.08z_a$$

Ke igual a 1, confiabilidad al 50%

- Factor de modificación por efectos varios (Budynas, 2012):

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

Se determina el valor de $k_t = 1$ debido a que la zona que está sometida la carga no presenta concentrador de esfuerzos, por consiguiente, $k_f = 1$.

Se procede a calcular S'_e el cuál es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria (Budynas, 2012):

$$S'_e = \begin{pmatrix} 0.5 Sut & Sut \leq 200Kpsi \\ 100Kpsi & Sut > 200 Kpsi \\ 70Mpas & Sut > 1400 Mpas \end{pmatrix}$$

El acero 4140 tiene un Sut de 89000 Psi figura 21, equivalente a 614MPa, reemplazando en la ecuación anterior obtenemos:

$$S'_e = 0.5 Sut$$

$$S'_e = 0.5 (614)$$

$$S'_e = 307Mpa$$

Reemplazando en la ecuación 10 para obtener S_e , reemplazamos las variables con los valores obtenidos y da como resultado:

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

$$S_e = 0.9 * 0.99 * 1 * 1 * 1 * 1 * 307$$

$$S_e = 273.537Mpas$$

El diseño propuesto se desarrolla para ciclos de vida infinita, por lo tanto, se realiza el cálculo de factor de seguridad con el $S_e = 273.537Mpas$.

Se realiza bajo el criterio de la ecuación de Soderberg Mohr, en este caso solo se tienen en cuenta los esfuerzos por flexión, reemplazando y resolviendo se obtiene:

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\sigma_m}{S_{yt}} + \frac{k_f * \sigma_a}{S_e} \right)^2 + 4 * \left(\frac{\tau_m}{S_{ys}} + \frac{k_{fs} * \tau_a}{S_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 11: Criterio de Soderberg Mohr

Por lo tanto, tendremos:

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\sigma_m}{S_{yt}} + \frac{k_f * \sigma_a}{S_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Reemplazando obtenemos un factor de seguridad por flexión de 4.78, lo que asegura un buen funcionamiento del cigüeñal y no presentará fallas por flexión en el punto más crítico, por lo tanto, satisface los demás puntos donde la fuerza que soportará será menor.

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{0}{S_{yt}} + \frac{1 * 57.19}{273.537} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

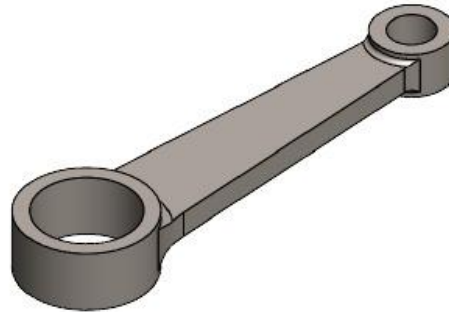
$$N = \frac{1}{0.209}$$

$$N = 4.78$$

5.3.2.2 Biela. Las características de este elemento mecánico es su alta resistencia a la fatiga, existen diversos diseños de bielas, en este caso se fabricó en una sola pieza para reducir costos y con el fin de que su fabricación no se hiciera compleja debido a las dimensiones a utilizar, este diseño fue pensado para su fácil ensamble y mantenimiento. Se modela la biela con ayuda del programa de diseño SolidWorks (Figura 43).

Figura 43.

Modelo 3D Biela



- **Función.** La biela es un elemento mecánico que tiene como función transmitir el movimiento circular de un cigüeñal en movimiento lineal y viceversa.

En este caso es el encargado de transmitir la fuerza generada por el cigüeñal hacia el pistón de menor diámetro, por lo tanto, sus propiedades y dimensiones vienen dadas a partir de las fuerzas a transmitir y ciclos a realizar.

- **Diseño de dimensiones críticas.** Para el diseño de las dimensiones se realiza un análisis estático y un análisis de fatiga, a los cuales va a estar expuesta la biela tanto en reposo como en movimiento. Para garantizar un buen desempeño de la biela durante la tarea a realizar, se calculan los factores de seguridad en cada uno de los casos dichos previamente, estáticos y en fatiga (Guanuchi & Moposita, 2017).

El material para utilizar en este caso para la biela es el acero 4140, dicho material utilizado en la fabricación del cigüeñal, esto se hace con el fin de mantener calidad en el diseño y de evitar elevados costos debido a la pérdida del material al realizar el mecanizado de la biela.

Como paso principal se determinará la fuerza que se transmitirá al pistón de menor diámetro, en este caso en los cálculos anteriores se define que dicha fuerza se calcula dependiendo

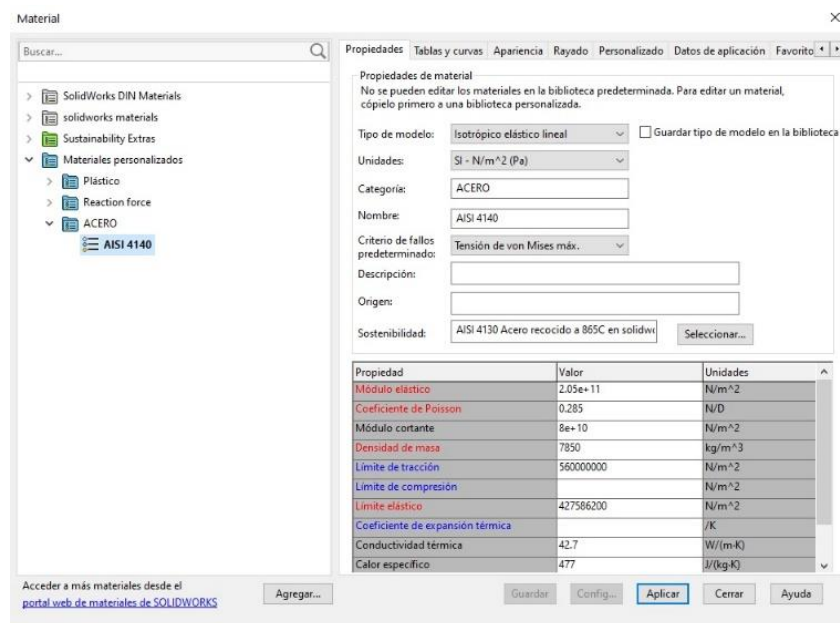
de la presión máxima de trabajo a generar, que en este caso es de 8,89Mpa, por lo tanto, la fuerza en este punto viene dada por 1005,43 N, que dicha fuerza es la que caerá sobre la biela y sobre los rodamientos de agujas que soportan la biela.

- **Diseño estático.** Se realiza por medio del programa de diseño SolidWorks un análisis estático donde se programa el tipo de material que está compuesto el elemento mecánico que en este caso viene siendo el acero 4140 con límites de fluencias de 427MPa o de 62000 psi. Seguidamente se programa como fuerza máxima 1005N a compresión sobre la biela, que se encuentra soportada en cada extremo interno de la misma y se procede a realizar el análisis.

Seguidamente en la figura 45, se muestran las propiedades del acero 4140 programadas en nuestra simulación a realizar en SolidWorks.

Figura 44.

Propiedades acero 4140 en SolidWorks

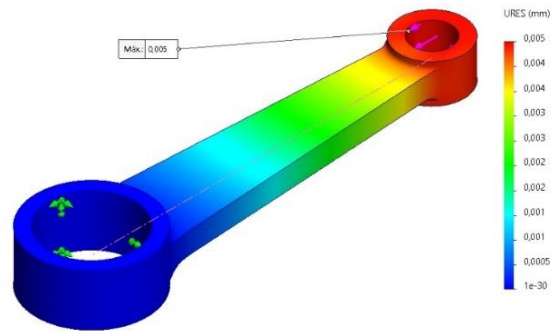


Como pueden observar, la simulación de análisis estático generada con la ayuda del programa de diseño de SolidWorks (Figura 45), nos muestra que los puntos donde hay más

concentración de esfuerzos es el extremo donde estará conectado el acople del pistón de menor diámetro, por lo tanto, es claro, ya que esta sección es la más delgada de la biela y los desplazamientos en esos puntos son de 0,005mm.

Figura 45.

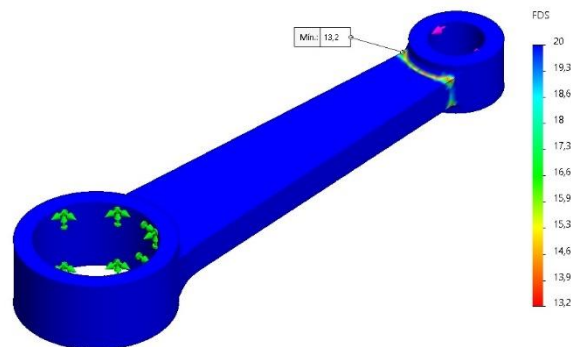
Simulación estática Biela



- **Factor de seguridad estático.** En este caso, observando anteriormente las secciones más críticas (Figura 46), nos queda en claro que el elemento no fallara debido al alto factor de seguridad que se tiene, en este caso es de 20, por lo tanto, se puede definir que este elemento resistirá cualquier tensión o compresión superior a la fuerza descrita anteriormente de 1005N.

Figura 46.

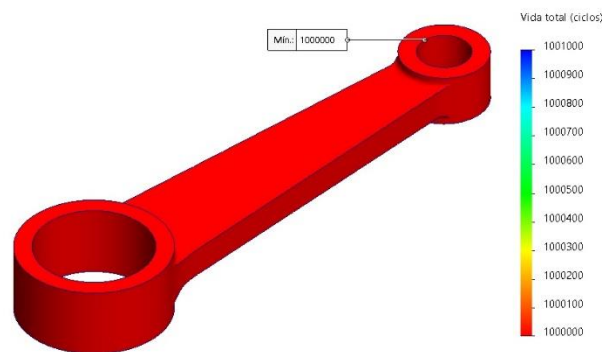
Factor de seguridad estático Biela



- **Diseño a la fatiga.** Teniendo en cuenta el análisis estático presentado anteriormente se realiza el análisis de fatiga por medio de una simulación realizada por el programa de diseño SolidWorks, dándonos como resultado los siguientes valores de la Figura 47. Como se puede observar en la figura, la biela se encuentra diseñada para soportar un millón de ciclos, por lo tanto, se concluye que no fallará por fatiga con una fuerza aplicada de 1005N.

Figura 47.

Ciclo de vida simulación estática Biela



5.3.3 Apoyos y Rodamientos

5.3.3.1 Chumaceras. Teniendo en cuenta el análisis estático, sabemos que cada soporte o chumacera debe soportar una fuerza radial, la cual es máxima cuando se está ejerciendo la fuerza máxima de trabajo que ocurre cuando el pistón de menor diámetro se encuentra en el punto muerto inferior.

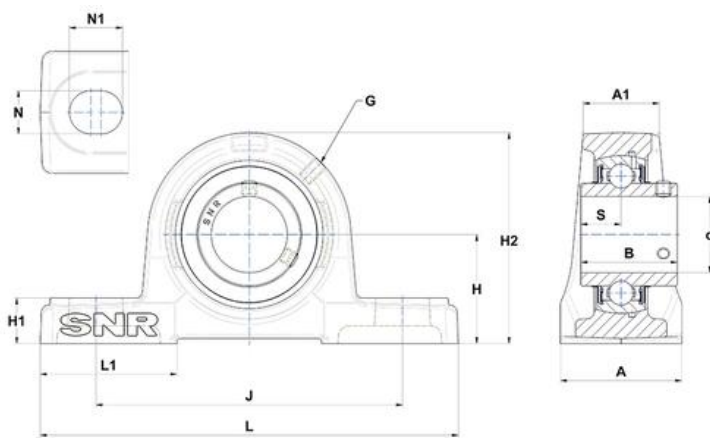
Obteniendo esta fuerza de 1005.43N y las reacciones al estar ubicadas simétricamente son la mitad del valor de la fuerza de 1005.43 que es 502.71N, por ende, como se mencionó anteriormente y con el diámetro del eje del cigüeñal de 15mm y demás datos obtenidos como lo son las 42rpm a utilizar, procederemos a la búsqueda en un catálogo para la selección de la chumacera que corresponda a las dimensiones y demás parámetros.

En este caso para las chumaceras del eje del cigüeñal nos dirigimos al manual NTN-SNR y se seleccionan las chumaceras de tipo bolas UCP202, ya que como se pudo observar a lo largo del proyecto, el cigüeñal soportara solo cargas radiales sobre las chumaceras.

A continuación, en la Figura 48, se muestran las dimensiones y gráficos de las chumaceras tipo bolas UCP202 SNR.

Figura 48.

Esquema Chumacera SNR



C - Capacidad de carga dinámica	12,8 kN
C0 - Capacidad de carga estática	6,65 kN
Temperatura min de funcionamiento	-20 °C
Temperatura max de funcionamiento	100 °C

Marca	SNR
A - Ancho del alojamiento	38 mm
A1 - Anchura en la parte superior del alojamiento	22 mm
B - Ancho anillo interior	31 mm
d - Diámetro eje	15 mm
G - Engrasador	M6x1
H - Distancia base del alojamiento al centro del rodamiento	33,3 mm
H1 - Altura del respaldo del alojamiento	15 mm
H2 - Altura del alojamiento	65 mm
J - Distancia entre los agujeros de fijación	95 mm
L - Largo del alojamiento	127 mm
L1 - Largo del respaldo del alojamiento	42 mm
N - Dimension agujero de fijación	13 mm
N1 - Largo del agujero de montaje	19 mm
S - Distancia cara al centro del rodamiento	12,7 mm

Nota. Chumacera UCP202 SNR, tomado del catálogo (NTN SNR, 2024).

Para este caso se representa las capacidades de carga de las chumaceras, como se puede observar su capacidad dinámica es de 12800N, la fuerza máxima que debe soportar la chumacera es de 502.5N, por lo tanto, se puede asegurar que soportara con seguridad.

5.3.3.2 Rodamientos biela. En la selección de los rodamientos tipo agujas de la biela, nos dirigimos al manual de SKF rodamientos tipo agujas, se realiza la búsqueda con los diámetros

internos de la biela y diámetros externos de los demás componentes como el muñón y el pasador del acople del pistón a la biela. Se realiza selección del más adecuado para lo que se requiere, en este caso se muestran las especificaciones de los tipos de rodamientos tipo agujas que se utilizaron en el ensamble de este proyecto.

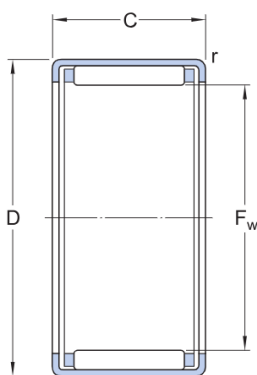
Para la selección del rodamiento a utilizar en la unión entre la biela y el muñón, se tiene en cuenta el diámetro del muñón que es de 14mm y el diámetro interno de la biela que es de 20mm y el ancho de esta, también se tiene en cuenta los 42 rpm del motorreductor y la fuerza máxima a soportar la biela que es de 1005N.

Con los parámetros presentados, se realiza la selección del rodamiento HK1412, se ingresa a la búsqueda en el catálogo (SKF, 2024) con el diámetro del eje y con su ancho. A continuación, en la Figura 49, se muestran las especificaciones.

Figura 49.

Selección de rodamiento HK1412 SKF de la biela

Designación	Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Velocidades nominales	
				dinámica	estática	Velocidad de referencia	Velocidad límite
	F_w [mm]	\uparrow D [mm]	C [mm]	C [kN]	C_0 [kN]	[r/min]	[r/min]
☆ HK1412	14	20	12	6.82	8.65	15 000	17 000



Dimensiones

F_w	14 mm	Diámetro debajo de los rodillos
D	20 mm	Diámetro exterior
C	12 mm	Width
r	min. 0.8 mm	Dimensión del chaflán del casquillo (aro exterior)

Nota. Adaptado de (SKF, 2024)

En la Figura 50 se puede observar la capacidad de carga dinámica del rodamiento, para la tarea a realizar con el prensado del propelente sólido, se tiene como fuerza máxima a soportar 1005N, por lo tanto, se puede ver que la capacidad del HK1412 es de 6820N, esto quiere decir que soportara las cargas en mención sin ningún problema.

Figura 50.

Capacidades de carga de rodamiento HK1412 de la biela

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	6.82 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	8.65 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.98 kN
Velocidad de referencia		15 000 r/min
Velocidad límite		17 000 r/min

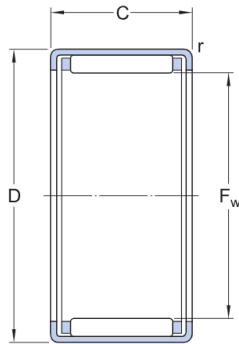
Nota. Adaptado de (SKF, 2024).

Para la selección del rodamiento entre el otro extremo de la biela y el acople del pistón de menor diámetro se ingresa con el diámetro del pasador y con el ancho de la biela, por lo tanto, se selecciona el rodamiento tipo aguja HK0509 de (SKF, 2024). En la Figura 51 y Figura 52 se muestran las especificaciones del rodamiento.

Figura 51.

Selección de rodamiento HK0509 SKF de la biela

Designación	Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Velocidades nominales	
				dinámica	estática	Velocidad de referencia	Velocidad límite
	F_w [mm]	D [mm]	C [mm]	C [kN]	C_0 [kN]	[r/min]	[r/min]
☆ HK 0509	5	9	9	2.38	2.08	22 000	24 000



Dimensiones

F_w	5 mm	Diámetro debajo de los rodillos
D	9 mm	Diámetro exterior
C	9 mm	Width
r	min. 0.4 mm	Dimensión del chaflán del casquillo (aro exterior)

Nota. Adaptado de (SKF, 2024)

Figura 52.

Capacidades de carga de rodamiento HK0509 SKF de la biela

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	2.38 kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	2.08 kN
Carga límite de fatiga	P_u	0.22 kN
Velocidad de referencia		22 000 r/min
Velocidad límite		24 000 r/min

Nota. Adaptado de (SKF, 2024)

5.3.4 Motorreductor

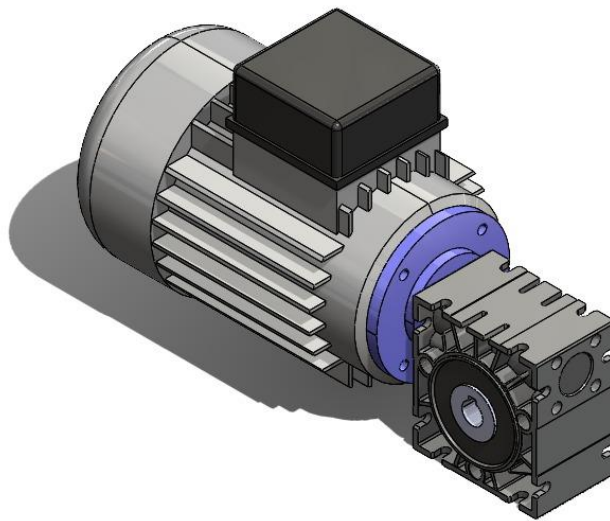
Para la selección de la fuente externa que generara el torque necesario para cumplir con el objetivo inicialmente presentado, se tiene en cuenta un motor eléctrico debido a la facilidad de

conexión y fácil manejo en peso y dimensiones. Debido al tipo de motor a elegir dependen los demás elementos como lo es el cigüeñal y la biela, su tamaño va de acuerdo con el diámetro de salida del eje. La elección de motores con dimensiones pequeñas no es tan viable debido a la potencia que se exige, esto causaría fallos internos y por lo tanto una falla para nuestra operación, además los diámetros de salidas de motores con dimensiones pequeñas obligan a diseñar mecanismos proporcionales, aumentando así la posibilidad de falla del mecanismo, disminuyendo la confiabilidad.

Realizando un estudio más a fondo, observamos que el torque que ofrecen los motores eléctricos es bajo y debido a esto se requiere un motor con dimensiones muy grandes y necesariamente no es lo que se busca, por lo tanto, se plantea la idea de obtener un motor eléctrico con menos rpm y más torque. Por consiguiente, se recomienda el motorreductor, debido a las dimensiones y demás valores que ya se han obtenido a lo largo del estudio.

Figura 53.

Motorreductor MI30-632-4 Modelo 3D



Nota. Se muestra el esquema del Motorreductor MI30-632-4 sin fin corona de la marca TECHTOP.

Teniendo en cuenta el torque, se procede a la selección del motorreductor, que en este caso es seleccionado el MI30-632-4 Sin fin corona marca TECHTOP de la empresa (Reductores Y Potencia SAS, 2024), debido a su alto torque y sus rpm adecuadas para la tarea a realizar, también se tienen en cuenta sus costos y sus dimensiones. Una de las variables que se busca cumplir es el torque, así que, analizando las especificaciones del motorreductor MI30-632-4 (Tabla 11 y Figura 54) es el que cumple con las expectativas, otra de las variables es la confiabilidad del equipo y el montaje sobre la máquina que se le realiza este proyecto, por lo tanto, el motorreductor en mención cumple con las dimensiones adecuadas que se adaptan fácilmente a nuestra máquina, ofreciendo seguridad con la tarea a realizar y permitiendo así su programación con el fin de mejorar la operación.

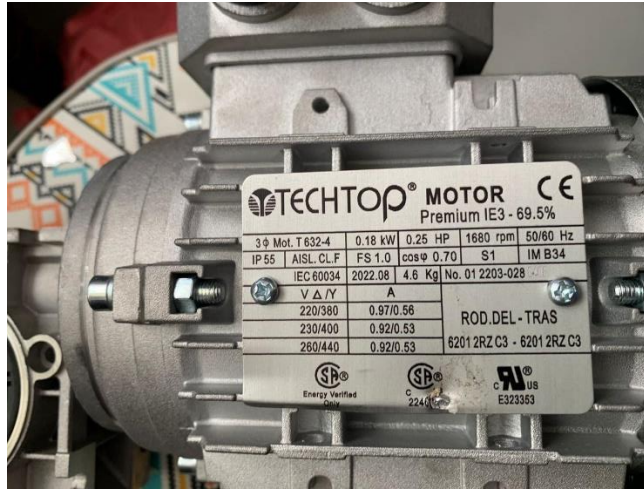
Tabla 11.

Características del motorreductor MI30-632-4 TECHTOP

Motorreductor Sin Fin Corona	
Potencia Del Motor	0.25 hp
Velocidad De Salida	42 rpm
Velocidad Nominal Del Motor	1580 rpm
Frecuencia	50/60 Hz
Par De Salida Máx.	30 nm
Corriente	Trifásico

Nota: Adaptado (Reductores Y Potencia SAS, 2024).

Por consiguiente, se realiza la selección de un motorreductor de 3 fases con una tensión a 220/380V. debido a que es de uso académico y se encontrara dentro de instalaciones de la universidad que permiten la conexión sin ninguna interferencia. A continuación, en la Figura 54, se muestran las especificaciones del motor eléctrico que se utilizó en este proyecto.

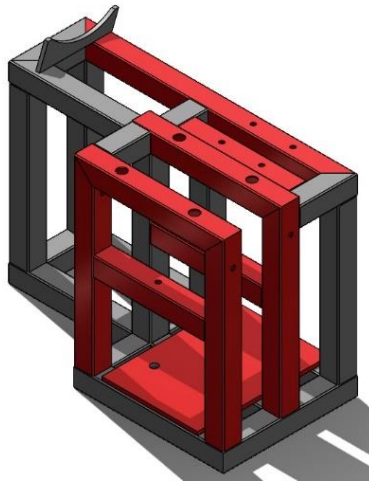
Figura 54.*Especificaciones del motorreductor MI30-632-4 TECHTOP*

Nota: Imagen tomada de la placa de especificaciones del motor eléctrico TECHTOP.

5.3.5 Bastidor

Para el ensamble del sistema de potencia y permitir un sistema de desarme fácil del mecanismo de accionamiento del gato hidráulico, se requiere de un soporte para el motorreductor, por lo tanto, se tiene en cuenta una estructura a base de tubulares de baja resistencia, las dimensiones sobre este bastidor están dadas por el motorreductor y demás componentes del mecanismo de accionamiento, esta estructura se realiza con el fin de mantener fijo y alineado el motorreductor con el cigüeñal, para evitar fallas en la compresión.

En la Figura 55 se muestra un esquema de la estructura utilizado en el soporte y alineación del motorreductor y demás componentes del mecanismo, fabricada con tubulares de sección cuadrada de 1"X1" unidas entre sí por medio del proceso de soldadura.

Figura 55.*Modelo 3D Bastidor*

La estructura debe ser capaz de soportar el peso del motorreductor y además mantener dimensiones proporcionales a la máquina que se adaptará, por lo tanto, se dimensiona teniendo en cuenta la posición que llevará en la máquina. Su posición es la parte superior del bastidor de la máquina del proyecto, permitiendo así la facilidad de alineación y ajuste con el soporte de esta.

Por otro lado, al tener un espacio con dimensiones muy pequeñas en el soporte del gato hidráulico, se realizó una adaptación por medio de conexiones hidráulicas y una manguera, permitiendo así la elección de otro lugar donde tenga mayores dimensiones y pueda cumplir con la función de accionar el gato sin restricciones de espacio.

Para accionar el gato anteriormente se requería de un sistema de palanca, junto con un pistón que cumple con la acción de generar presión a través de una recámara con un sistema de cheque en la parte interna, permitiendo así el paso de fluido hacia adentro, mas no de regreso. Mencionado lo anterior, se rediseño este sistema teniendo en cuenta el sistema de accionamiento en la parte superior del bastidor de la máquina, el cual es accionado por un mecanismo llamado cigüeñal-biela, reemplazando el sistema de palanca utilizado anteriormente. Por lo tanto, se diseña

una recámara con las mismas dimensiones de la anterior junto con su pistón, esto con el fin de enviar presión a través de la manguera.

En la Figura 26, se muestra el montaje del sistema sobre el bastidor utilizado para soportar y alinear el motorreductor con el mecanismo, junto con la recámara diseñada para la transmisión de la presión desde la parte superior, que se llevara a cabo a través de la manguera.

5.4 Sistema hidráulico

El sistema hidráulico del equipo se ha modificado, con el fin de automatizar el proceso, la configuración inicial estaba conformada únicamente por un gato hidráulico de 20 Toneladas, como se observa en la Figura 56.

Figura 56.

Configuración inicial del sistema hidráulico



El sistema actual está diseñado para permitir accionar el gato hidráulico, automáticamente y desde una posición más cómoda, por lo tanto, el sistema de bombeo y sus partes, que se muestran en la Figura 57, se modificaron por un sistema compuesto por acoples hidráulicos, manguera hidráulica, un pistón y camisa modificados para accionar desde el bastidor del sistema de potencia.

Figura 57.*Sistema de bombeo inicial*

Para el prototipado de funcionamiento se realizó una réplica, como se ilustra en la, que permitiera avanzar en el cálculo y diseño sin necesidad de inhabilitar el equipo Figura 58.

Figura 58.*Réplica del sistema de bombeo*

Teniendo en cuenta que la camisa del sistema de bombeo y el alojamiento de esta en el gato hidráulico están contruidos con una rosca M20x1.5, se reemplazó esta unión con un acople comercial, como se ilustra en la Figura 59, que facilitara la conexión de los demás accesorios.

Figura 59.

Acople inicial del sistema de bombeo



Partiendo de este acople, se realizaron las demás conexiones, usando acoples comercialmente comunes como se ilustra en la Figura 60.

Figura 60.

Primer tramo de conexiones



Como se observa en la imagen anterior, el primer tramo de conexiones está compuesto por el conjunto de acoples, en conjunto con un acople rápido, que permite un acoplamiento y desacoplamiento más sencillo, ágil y práctico, teniendo en cuenta que, a solicitud del semillero de investigación, se solicitó un sistema fácilmente desmontable.

Como se menciona anteriormente, en el apartado del sistema de potencia, debido a las dimensiones del gato hidráulico y a la fuerza necesaria para comprimir los propelentes, se maneja una presión de 8,89 MPa en el sistema hidráulico, para la elección de la manguera hidráulica, se convierte a psi, obteniendo que la presión es de 1290 psi, se selecciona una manguera hidráulica que cumple con la norma SAE 100 R2, permitiendo así trabajar el equipo de manera segura a estas presiones.

Para el segundo tramo de conexiones, que se muestra en la Figura 61, teniendo en cuenta la réplica fabricada, se diseñó el nuevo sistema de bombeo, y se conecta mediante acoples al primer tramo de conexiones.

Figura 61.

Segundo tramo de conexiones



Estando así conformado el sistema hidráulico de la siguiente manera, descrito desde el gato hidráulico hasta el nuevo sistema de bombeo, siguiendo el sentido hidráulico:

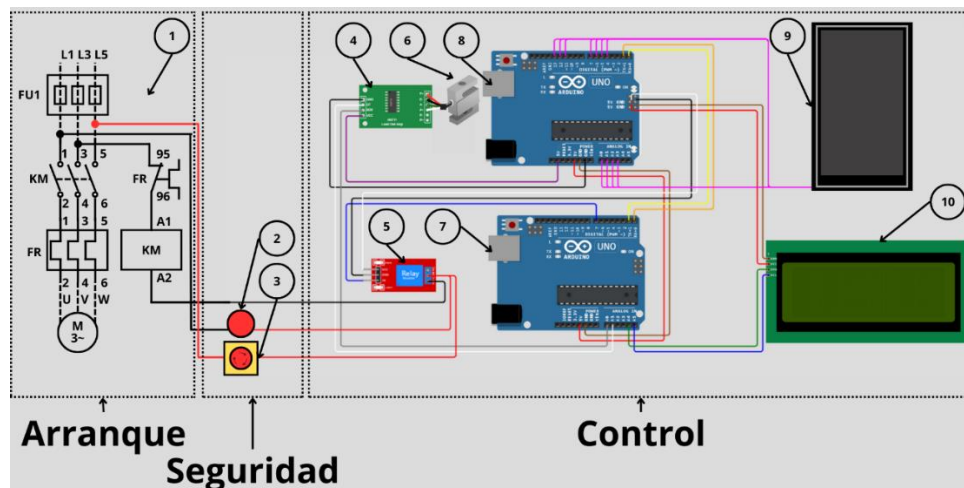
- Gato hidráulico Hembra M20x1.5
- Acople Macho M20x1.5: Macho 7/8 JIC
- Acople Hembra 7/8 JIC: Macho 1/2 NPT
- Acople Rápido 1/2 Hembra: Hembra
- Acople Macho 1/2 NPT: Macho 1/2 NPT
- Manguera hidráulica SAE 100 Hembra R12 1/2 BSP 90°: Hembra R2 1/2 BSP Recta
- Acople Macho 1/2 NPT: Hembra 7/8 JIC
- Acople Macho 7/8 JIC: Hembra 1/2 NPT
- Nuevo sistema de bombeo Macho 1/2 NPT

5.5 Sistema eléctrico y de control

El sistema eléctrico y de control tiene la finalidad de accionar el sistema de potencia y controlar su uso, permitiendo así tener un trabajo preciso por parte del equipo, y presentar una interfaz sencilla y practica para el operario, el sistema se divide en tres segmentos como se observa en la Figura 62.

Figura 62.

Sistema eléctrico y de control



Los tres segmentos que conforman el sistema eléctrico y de control y sus componentes, están divididos según la funcionalidad, estando divididos como se indicó en la Figura 62, el

segmento de arranque como su nombre lo indica, es el encargado del arranque del motor, conectando el motor a la alimentación 220V, el segmento de seguridad, se encarga de brindar los elementos de seguridad para el operario, permitiendo una operación segura, y por último, el segmento de control tiene como objetivo dar el control del sistema al operario, permitiendo que este pueda controlar las diferentes funciones posibles en el sistema, en total, los 3 segmentos están conformados por 10 componentes conectados entre sí, estos son:

- Arranque:

1. Arrancador directo CHINT NQ3

- Seguridad:

2. Indicador led 220V

3. Botón, paro de emergencia

- Control:

4. Módulo amplificador HX711

5. Módulo relé

6. Celda de carga TRUMAX SC 3.000 Kg tipo S

7. Arduino UNO

8. Arduino UNO genérico

9. Pantalla táctil 2.8inch TFT Touch Shield v2.0

10. Pantalla LCD i2c 20x4

Debido al motor seleccionado en el apartado de sistema de potencia, para conectar este motor a la alimentación 220V de la universidad, se selecciona el arrancador directo CHINT NQ3, mostrado en la Figura 63.

Figura 63.

Arrancador directo CHINT NQ3



Este arrancador cuenta con dos interruptores que se encargan del accionamiento interno permitiendo así el arranque o paro del motor, estos interruptores se deshabilitan debido a que el arrancador para este equipo, está siendo activado por un relé.

Para la conexión del arrancador al sistema de alimentación del laboratorio donde está ubicado el equipo, se usa una clavija Leviton 2511, como se ilustra en la Figura 64.

Figura 64.

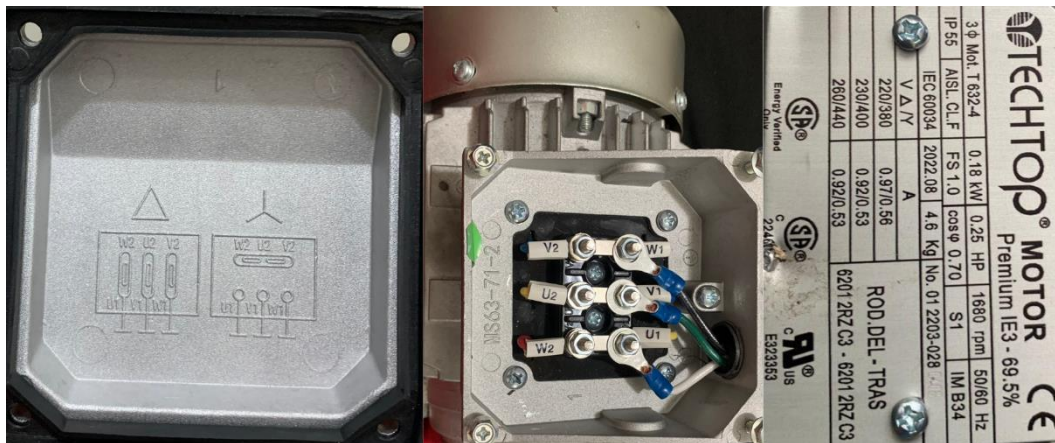
Conexión 220V



Del otro extremo, para la conexión del arrancador al motor, como se ilustra en la Figura 65 se usa conexión en delta siguiendo la recomendación del fabricante.

Figura 65.

Conexión de motor en delta



Como se indicó anteriormente, en el segmento de seguridad se encuentran dos componentes, un indicador led que tiene como objetivo indicar cuando el motor esta energizado, siendo una señal visible para el operario, y también se cuenta con un botón de paro de emergencia que permite al operario cortar el flujo eléctrico del equipo ante cualquier eventualidad que lo requiera.

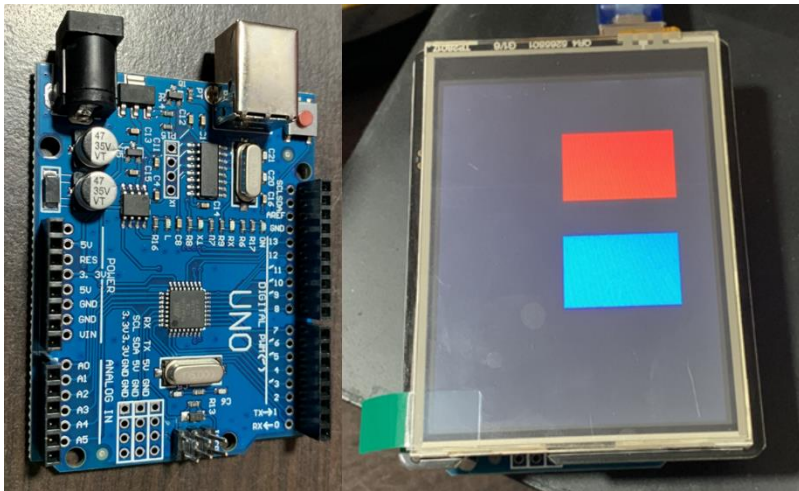
El segmento de control a su vez se encuentra dividido en dos partes, una se encarga de la interfaz de usuario y permite que el operario se encargue de usar las diferentes funciones del equipo, la otra parte se encarga de la parte lógica del control, y transformar las selecciones del usuario en órdenes para el equipo.

La parte encargada de la interfaz de usuario se encuentra compuesta por los componentes 8 y 9, mostrados en la Figura 66, adicionalmente el Arduino encargado de esta parte se encarga de

estar conectado a la alimentación 110V del laboratorio y de suministrar los puertos 5V y GND a todos los componentes del segmento de control.

Figura 66.

Componentes de la interfaz de usuario



La parte encargada de la lógica se conecta a la encargada de la interfaz de usuario mediante comunicación serial entre Arduino haciendo uso de los puertos RX y TX, esta parte se encarga de recibir información desde la celda de carga y desde la parte de interfaz de usuario, se encarga de aplicarle la lógica del equipo a esta información y enviar la información final a la pantalla LCD y al relé, esto con el fin de controlar la fuerza aplicada en el equipo y encenderlo o apagarlo según sea el caso.

El sistema eléctrico y de control se encuentra ubicando sobre el bastidor de potencia, como se ilustra en la Figura 67, estando en un área accesible y cómoda.

Figura 67.

Ubicación del sistema eléctrico y de control



El sistema cuenta con dos opciones para controlar el equipo, la primera es usarla con una prensa normal automatizada, donde el operario ingresa la carga que desea aplicar y controla el arranque o paro del equipo, y la otra opción es la de fabricación de propelentes, donde el operario puede escoger la presión que desea usar, el tamaño de propelente que va a fabricar y de igual manera el arranque o paro del equipo.

6 Resultados

Después de realizar el procedimiento para fabricar los granos de propelente sólido, se observa en la Figura 68 como se obtiene el resultado en primera instancia.

Figura 68.

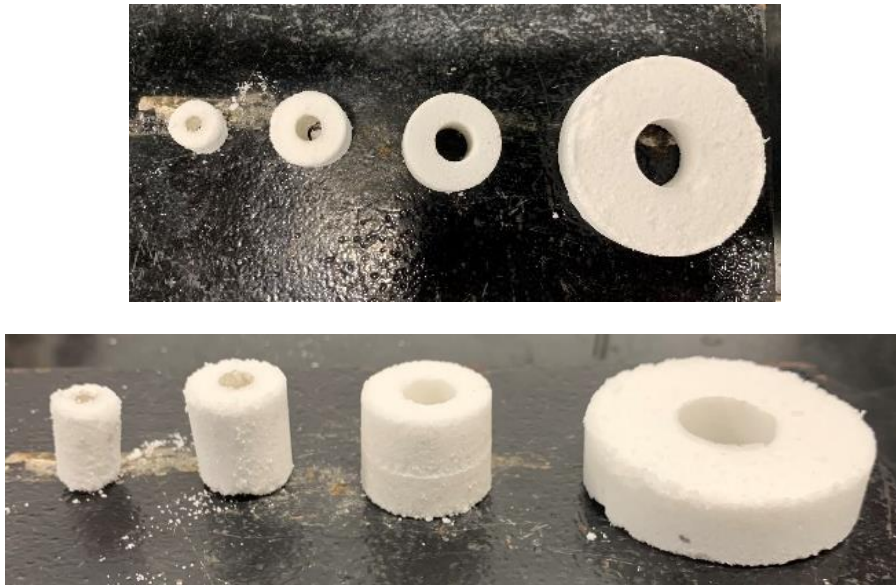
Extracción del grano fabricado



El equipo está diseñado para fabricar granos de 4 tamaños, $\frac{1}{2}$ in, $\frac{3}{4}$ in, 1 in y 2 in, la Figura 69 ilustra estos 4 tamaños de granos fabricados.

Figura 69.

Resultado final Granos de propelente



Adicionalmente en la Figura 70, se ilustra como el equipo tiene la capacidad de producir granos a diferentes presiones de fabricación.

Figura 70.

Grano de 2in a 1000 psi y a 500 psi



Nota: El grano de la izquierda está fabricado usando una presión de 1000 psi y el grano ubicado a la derecha una presión de 500 psi

7 Análisis de viabilidad

Para el análisis de viabilidad mediante el factor económico, al no encontrar alternativas en el mercado ni proyectos enfocados exactamente en el mismo campo de acción se decide analizar en dos partes, siendo la primera analizando la viabilidad de la automatización de la prensa hidráulica, y siendo la segunda analizando la configuración de moldes diseñada vs una configuración diferente usada para fabricar probetas circulares.

7.1 Costos

A continuación, en la Tabla 12 se indican todos los costos derivados del equipo y su fabricación, teniendo en cuenta los costos asumidos por la UIS y los costos asumidos por los autores del proyecto.

Tabla 12.

Costos totales del proyecto

Nº	Descripción	Fuente de Financiamiento	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Cantidad
1. Recursos Humanos						
1.1	Director de Proyecto	UIS	Hora	63	\$ 50.000,00	\$ 3.150.000,00
1.2	Asesorías Especializadas	Estudiante	Hora	32	\$ 50.000,00	\$ 2.300.000,00
1.3	Estudiante 1	Estudiante	Hora	630	\$ 10.000,00	\$ 6.300.000,00
1.4	Estudiante 2	Estudiante	Hora	630	\$ 10.000,00	\$ 6.300.000,00
Subtotal						\$ 18.050.000,00
2. Equipos						
2.1	Computador Portátil	Estudiante	Unidad	2	\$ 4.000.000,00	\$ 8.000.000,00
2.2	Equipo de Medición	Estudiante	Unidad	1	\$ 190.000,00	\$ 190.000,00
Subtotal						\$ 8.190.000,00
3. Software						
3.1	Microsoft Office (Licencia Anual)	UIS	Unidad	1	\$ 510.000,00	\$ 510.000,00
3.2	Solidworks Student (Licencia Anual)	UIS	Unidad	1	\$ 386.000,00	\$ 386.000,00
3.1	eDrawings (Licencia Permanente)	Estudiante	Unidad	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Subtotal						\$ 906.000,00
4. Materiales						
4.1	Papelería	Estudiante	Unidad	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
4.2	Manuales, artículos y libros	UIS	Unidad	3	\$ 500.000,00	\$ 1.500.000,00
Subtotal						\$ 1.600.000,00
5. Otros						
5.1	Electricidad	Estudiante	\$/KWh	622,44	\$ 552,94	\$ 344.171,97
5.2	Internet	Estudiante	Mes	12	\$ 104.000,00	\$ 1.248.000,00
5.3	Transporte	Estudiante	Mes	12	\$ 100.000,00	\$ 1.200.000,00
Subtotal						\$ 2.792.171,97

6. Diseño y Construcción							
6.1 Moldes							
6.1.1	Piezas en Acero Inoxidable 304	Estudiante	Conjunto	1	\$	905.000,00	\$ 905.000,00
6.1.2	Piezas en A36	Estudiante	Conjunto	1	\$	270.000,00	\$ 270.000,00
6.2 Sistema Hidráulico							
6.2.1	Acoples y accesorios para manguera	Estudiante	Conjunto	1	\$	192.000,00	\$ 192.000,00
6.2.2	Manguera grafada	Estudiante	Unidad	1	\$	200.000,00	\$ 200.000,00
6.2.3	Aceite hidráulico	Estudiante	Unidad	1	\$	10.000,00	\$ 10.000,00
6.3 Electricidad y Control							
6.3.1	Celda de carga SC 3000 KG tipo S	Estudiante	Unidad	1	\$	379.760,00	\$ 379.760,00
6.3.2	Arrancador directo CHINT	Estudiante	Unidad	1	\$	213.100,00	\$ 213.100,00
6.3.3	Clavija 220V LEVITON 2511/L21-20	Estudiante	Unidad	1	\$	140.000,00	\$ 140.000,00
6.3.4	Elementos de soldadura para arduino	Estudiante	Conjunto	1	\$	28.500,00	\$ 28.500,00
6.3.5	Modulo HX711	Estudiante	Unidad	1	\$	20.000,00	\$ 20.000,00
6.3.6	Paro de emergencia	Estudiante	Unidad	1	\$	53.000,00	\$ 53.000,00
6.3.7	Luz LED roja piloto	Estudiante	Unidad	1	\$	10.000,00	\$ 10.000,00
6.3.8	Arduino UNO R3	Estudiante	Unidad	2	\$	85.000,00	\$ 170.000,00
6.3.9	Pantalla Táctil TFT Touch Shield v2.0	Estudiante	Unidad	1	\$	97.900,00	\$ 97.900,00
6.3.10	Rele electromecánico arduino	Estudiante	Unidad	1	\$	9.000,00	\$ 9.000,00
6.3.11	Pantalla LCD 4x20 con I2C	Estudiante	Unidad	1	\$	45.000,00	\$ 45.000,00
6.3.12	Bases arduinos	Estudiante	Conjunto	1	\$	10.000,00	\$ 10.000,00
6.3.13	Terminales de conexión	Estudiante	Conjunto	1	\$	30.000,00	\$ 30.000,00
6.3.14	Cables de conexión	Estudiante	Conjunto	1	\$	46.500,00	\$ 46.500,00
6.4 Sistema de Potencia							
6.4.1	Motor reductor	Estudiante	Unidad	1	\$	1.190.000,00	\$ 1.190.000,00
6.4.2	Chumaceras	Estudiante	Unidad	2	\$	24.000,00	\$ 48.000,00
6.4.3	Cigüeñal, Muñon y Biela	Estudiante	Conjunto	1	\$	530.000,00	\$ 530.000,00
6.4.4	Rodamientos	Estudiante	Unidad	2	\$	26.000,00	\$ 52.000,00
6.4.5	Bastidor	Estudiante	Conjunto	1	\$	380.000,00	\$ 380.000,00
6.4.6	Pasadores	Estudiante	Unidad	2	\$	20.000,00	\$ 40.000,00
6.4.7	Acople biela	Estudiante	Unidad	1	\$	60.000,00	\$ 60.000,00
6.4.8	Camisa para piston	Estudiante	Unidad	1	\$	60.000,00	\$ 60.000,00
6.4.9	Pistón	Estudiante	Unidad	1	\$	30.000,00	\$ 30.000,00
6.4.10	Cuña	Estudiante	Unidad	1	\$	10.000,00	\$ 10.000,00
6.4.11	Pin Chaveta	Estudiante	Unidad	1	\$	1.500,00	\$ 1.500,00
6.5 Tomillería y Elementos de Sujeción							
6.5.1	Tomillería	Estudiante	Unidad	1	\$	175.200,00	\$ 175.200,00
6.5.2	Esparrago de sujeción para celda de carga	Estudiante	Unidad	2	\$	18.500,00	\$ 37.000,00
6.5.3	Amarres plásticos	Estudiante	Unidad	1	\$	30.000,00	\$ 30.000,00
6.6 Prensa Hidráulica							
6.6.1	Prensa hidráulica y accesorios	UIS	Unidad	1	\$	1.300.000,00	\$ 1.300.000,00
						Subtotal	\$ 6.773.460,00
Elaborado por:			Costo asumidos por la UIS			\$	6.846.000,00
Diego Fernando Castro Torres			Costo asumidos por los estudiantes			\$	31.465.631,97
Deyber Ivan Manrique Escobar			Costo Total del Proyecto			\$	38.311.631,97

7.2 Análisis de viabilidad (Automatización de la prensa hidráulica)

En la Tabla 13 se exponen los costos correspondientes únicamente a la automatización de la prensa hidráulica, esta tabla deriva de la Tabla 12 donde están enumerados cada uno de los costos.

Tabla 13.*Costos automatización*

N°	Descripción	Costos
6.2	Sistema Hidráulico	\$ 402.000,00
6.3	Electricidad y Control	\$ 1.252.760,00
6.4	Sistema de Potencia	\$ 2.401.500,00
6.5	Tornillería y Elementos de Sujeción	\$ 242.200,00
Total		\$ 4.298.460,00

Estos costos se compararán con los costos de un proyecto (Alvitres Vigo & Ramos Chacon, 2022) llevado a cabo en la universidad Cesar Vallejo, ubicada en Trujillo, Perú, donde la prensa inicial es similar a la que se empleó para este proyecto, se comparan ambos proyectos, para mostrar la viabilidad de nuestra configuración de automatización frente a la configuración empleada en el proyecto mencionado.

En las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se muestran los costos empleados para la automatización de una prensa hidráulica de 20 Ton, la cual descrita anteriormente se está usando para comparar la viabilidad económica.

Tabla 14.*Costo de la estructura de la prensa hidráulica comparación*

ESTRUCTURA			
Descripción	Cant.	Costo Unitario (s/.)	Sub Total (s/.)
Perfil H ASTM A36 - W200X59 – 200X205mm (1.1 m)	1	1,150.61	1,150.61
Perfil H ASMT A36 – W150X14 – 150X100mm (1.4 m)	2	570.20	1140.40
Perfil C ASMT A36 – C75X6 – 76.2X35.8mm (1.1 m)	2	76.55	153.11
Plancha ASTM A36 – 181.6X1100X4mm	2	115.44	230.89
Plancha ASMT A36 – 139X1490X4mm	4	55.27	221.11
Plancha ASMT A36 – 100X1100X4mm	2	29.35	58.71
TOTAL			2,954.84

Nota: Tomado de (Alvitres Vigo & Ramos Chacon, 2022)

Tabla 15.*Costo de sistema hidráulico y de control comparación*

SISTEMA HIDRAULICO			
Descripción	Cant.	Costo Unitario (s/.)	Sub Total (s/.)
Cilindro de Doble Efecto	1	1,540.24	1,540.24
Manómetro	1	25.00	25.00
Motor Eléctrico	1	735.00	735.00
Mangueras	4	19.01	76.04
Bomba de engranaje	1	845.5	845.4
TOTAL			3,221.68

*Nota: Tomado de (Alvitres Vigo & Ramos Chacon, 2022)***Tabla 16.***Costo de mano de obra y gastos externos comparación*

MANO DE OBRA			
Descripción	Cant.	Costo Unitario (s/.)	Sub Total (s/.)
Soldador	2	960.00	1,920.00
Ensamblador	2	480.00	960.00
Pintor	1	160.00	160.00
TOTAL			3,000.00

Nota: Tomado de (Alvitres Vigo & Ramos Chacon, 2022)

En la Tabla 17 se resumen los costos de las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 17.*Resumen costos proyecto automatización de prensa hidráulica 20 Ton*

N°	Descripción	Costos
1.	Estructura	\$ 2.954,84
2.	Sistema Hidráulico	\$ 3.221,68
3.	Mano de Obra	\$ 3.000,00
Total PEN		\$ 9.176,52
Total COP		\$ 9.743.628,94

Nota: Adaptado de (Alvitres Vigo & Ramos Chacon, 2022)

Al analizar ambos proyectos, se evidencia como la automatización de nuestro proyecto es menor al 50% de los costos del otro proyecto presentado, a pesar de ser de diferentes capacidades,

teniendo en cuenta que en nuestro caso para llegar a esa capacidad tendríamos que redimensionar el sistema de potencia e hidráulico, aun así, los costos seguirán siendo inferiores.

7.3 Análisis de viabilidad (Moldes)

En la Tabla 12 se expusieron los costos correspondientes a la fabricación de los 4 conjuntos de moldes, para fines de comparación, en la Tabla 18 se exponen los costos correspondientes a un solo conjunto de moldes.

Tabla 18.

Costos por cada conjunto de moldes

N°	Descripción	Costos
6.1	Moldes	
6.1.1	Piezas en Acero Inoxidable 304	\$ 226.250,00
6.1.2	Piezas en A36	\$ 67.500,00
	Total	\$ 293.750,00

Estos costos se compararán con los costos de un proyecto (Castro Rumipamba, 2017) llevado a cabo en la Universidad Técnica De Ambato, ubicada en Ambato, Ecuador, donde el resultado final es similar al de este proyecto, se compara ambos proyectos, para mostrar la viabilidad de nuestra configuración de moldes frente a la configuración empleada en el proyecto mencionado, debido a que este consta de una configuración diferente para fabricar probetas metálicas circulares.

En las Tabla 19 se muestran los costos empleados para la construcción de un molde para compactación de pulvimetalurgia para elaboración de probetas cilíndricas, la cual descrita anteriormente se está usando para comparar la viabilidad económica.

Tabla 19.

Costo de fabricación molde para compactación de pulvimetalurgia comparación

Costo total MOLDE CIRCULAR	
Costo de materiales	120 \$
Mecanizado CNC	110 \$
Mecanizado convencional (rectificado y mano de obra)	75 \$
Tratamiento térmico	50 \$
Punzones	40 \$
Total:	395 \$

Nota: Tomado de (Castro Rumipamba, 2017)

Al comparar costos, el proyecto con el que se están comparando costos gasto \$1'544.580,35 COP mientras que, a su vez, nuestro proyecto tuvo un costo de \$293.750 COP, se debe tener en cuenta que los moldes tienen algunas piezas diferentes y soportan presiones distintas, pero, aun así, con el redimensionamiento de nuestros conjuntos de moldes, los costos seguirán siendo significativamente menores.

8 Manual de usuario y recomendaciones

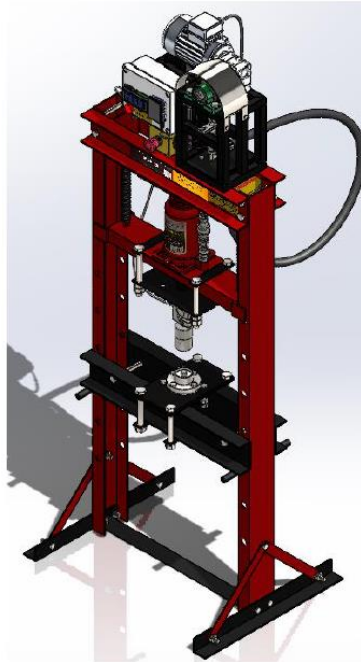
El manual de usuario está compuesto por 13 páginas donde se explica y se instruye al operario como utilizar el equipo de manera adecuada y segura, el manual se puede revisar en el Apéndice B, en la Figura 71 se muestra la portada del equipo.

Figura 71.

Portada manual de usuario

MANUAL DE USUARIO V1.0: EQUIPO PARA LA FABRICACIÓN DE PROPELENTE 1

Manual de Usuario V1.0
Equipo para la fabricación de propelentes



Autores:

Diego Fernando Castro Torres

Deyber Iván Manrique Escobar

9 Conclusiones

- El equipo construido cumple con los requerimientos exigidos por el semillero de investigación SCUA tales: Capacidad de producción en serie, moldes acoplables e intercambiables, producción de grano en tamaños de ½ in, ¾ in, 1 in y 2 in, estandarización de presión en la fabricación de granos y seguridad para el operario.
- La consistencia y forma resultado de la fabricación de granos fue la deseada para el equipo.

- Los materiales y componentes empleados son de fácil acceso y mantenimiento.
- Con la puesta en marcha del equipo se logra fabricar un grano en menos de 5 minutos, sujeto a la velocidad del operario.
- El equipo cuenta con manual instructivo de usos y cuidados, permitiendo así el entendimiento del proceso del equipo de forma rápida, y evitando errores de fabricación.
- El equipo es viable económicamente, teniendo en cuenta que, al compararlo con otras alternativas similares, los costos de fabricación fueron significativamente menores.

Referencias bibliográficas

- Afkir, H. (2018). *Estudio y diseño de un gato hidráulico con accionamiento rotatorio*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona Tech. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123327/TFG_Hamid_Afkir.pdf
- Alvitres Vigo, S., & Ramos Chacon, H. (2022). *Diseño de una prensa hidráulica semi-automática de 20 Toneladas para el desmontaje y montaje de rodamientos para el taller automotriz ASIS S.A.C.* Trujillo: Universidad Cesar Vallejo. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/94365/Alvitres_VSP-Ramos_CHA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Brito, J. C. (2011). *Diseño y evaluación conceptual de un motor cohete de combustible sólido*.
- Budynas, R. (2012). *Diseño en Ingeniería de Shigley*. España: McGraw Hill. doi:9786071507716
- California Academy of Science. (s.f). *Anatomía de un cohete*. Obtenido de https://www.calacademy.org/sites/default/files/assets/docs/calacademy-sah-rockets-anatomy_of_a_rocket-spanish-210415.pdf
- Castro Rumipamba, H. (2017). *Diseño y construcción de un molde para compactación de pulvimetalurgia para la elaboración de las probetas cilíndricas*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25256/1/Tesis%20I.%20M.%20372%20-%20Castro%20Rumipamba%20Henry%20Mauricio.pdf>

Ferrocortes SAS. (2024). *Catálogo Aceros Baja y media aleación AISI / SAE 4140*. Medellín.

Obtenido de <https://ferrocortes.com.co/wp-content/uploads/2022/04/FT-02-001-AISI-SAE-4140.pdf>

Garzón, D. (2002). *Análisis y diseño de la cámara de combustión de un pequeño motor cohete*.

Guanuchi, B., & Moposita, S. (2017). *Diseño y construcción de cigüeñal, bielas y tapas de rodamientos en fundición nodular de una bomba Triplex émbolo*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Nakka, R. (2014). Teoría sobre motores cohete de propelente sólido.

NASA. (2011). *What Is a Rocket?* Obtenido de <https://www.nasa.gov/learning-resources/for-kids-and-students/what-is-a-rocket-grades-k-4/>

NASA. (2021). El cohete Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS) de la NASA. Obtenido de <https://www.nasa.gov/sls/multimedia/gallery/conoce-el-cohete.html>

NTN SNR. (2024). *Ficha Técnica Brida UCP202 - SNR*. Obtenido de <https://eshop.ntn-snr.com/es/product/UCP202-SNR/UCP202>

Planetario de Aragon. (2019). *Guía de Lanzamientos de Cohete*. Obtenido de <https://www.planetariodearagon.com/wp-content/uploads/2019/03/Guia-lanzamientos-de-cohetes.pdf>

Reductores Y Potencia SAS. (2024). *Motorreductores TECHTOP*. Bogotá.

SKF. (2024). *HK 0509 Casquillo de agujas con extremos abiertos*. Obtenido de <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/roller-bearings/needle-roller-bearings/drawn-cup-needle-roller-bearings/productid-HK%200509>

SKF. (2024). *HK 1412 Casquillo de agujas con extremos abiertos*. Obtenido de <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/roller-bearings/needle-roller-bearings/drawn-cup-needle-roller-bearings/productid-HK%201412>

Sutton, G., & Biblarz, O. (2010). *Rocket Propulsion Elements*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Wanderson, C. (2021). *Análise de bates propelentes KNSU produzidos utilizando compactação a frio e sinterização*.