



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, CAMPUS MEXICALI

P. E. INGENIERO AEROESPACIAL

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MOTORES DE PROPELENTE SÓLIDO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO AEROESPACIAL

PRESENTA:

JESÚS RAMÍREZ VALDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALEJANDRO SEBASTIÁN ORTIZ PÉREZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. EMMANUEL SANTIAGO DURAZO ROMERO

MEXICALI, B.C

JUNIO, 2024

Diseño y evaluación de motores de propelente sólido

por

Jesús Ramírez Valdez

Reporte presentado para obtener el grado de

Ingeniero Aeroespacial

en

FACULTAD DE INGENIERÍA, CAMPUS MEXICALI

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Mexicali, B.C. Junio, 2024

DEDICATORIA

A todos aquellos miembros de mi familia que desde pequeño creyeron en mí.

A mis hermanos que pese a las diferencias sé que están ahí.

Profe Carmen, profe Joel, teacher Alejandra, Lehrer Rocha, profe Yee, profe Luis Antonio, profe Bolaños, profe Zarate, profe Pérez Mota y profe Durazo por los cimientos que forjaron en mí como profesionista y como persona.

A mis amigos Emo, Gil, Kuchen, Bobs, Juanra, Ayala, Daniel y Memo por las risas y confianza que hemos reunido a lo largo de los años.

A Scar, Carmen, Jehieli, Brenda, Karen, Greta, Aletza, Beatriz, Marian y Silva; amigas irremplazables que han aparecido en mi vida para ayudarme cuando hizo falta.

Al Dr. Ortiz que me brindó confianza desde aquel 5º semestre para el Servicio Social y que compartió conmigo la oportunidad de llevar a cabo más proyectos que le darían chispa a mi carrera universitaria.

Santi, gran amigo, gracias también por el apoyo brindado en este proyecto.

A mi compañero de trabajo y amigo Alfaro que sin su proactividad y entusiasmo este proyecto no habría visto la luz.

Ariadna y Adriana, que se han convertido en buenas amigas, gracias por haberse interesado en este proyecto y decidir continuar con él, a su vez por habernos ayudado. Tengo confianza del trabajo que desempeñarán y me siento tranquilo de que todo quedó en buenas manos.

Y sobre toda cosa en este mundo, a mis padres que a lo largo de mi vida me han brindado su apoyo y amor; y que en respuesta considero que cualquier agradecimiento es poco, pero aquí está el fruto aún verde de 24 años de esa confianza que siempre he recibido.

Prólogo

En la presente obra se muestra parte del producto de la investigación desarrollada particularmente durante el año 2023 para el proyecto apoyado por la 23a. convocatoria interna con código 3091 titulado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO PARA USO EN MECANISMOS DE PROPULSIÓN"

Mexicali, B.C., junio 2024

Dr. Alejandro Sebastián Ortiz Pérez.

Reconocimientos

Especial reconocimiento a los profesores del programa educativo que fungieron como asesores en el desarrollo de este proyecto.

Gracias también a la Universidad Autónoma de Baja California por brindar a los jóvenes un lugar donde convertirse en profesionistas.

Abreviaturas

<i>O/F</i>	Razón de Oxidante y Combustible
<i>KNO₃</i>	Nitrato de potasio
<i>C₆H₁₄O₆</i>	Sorbitol
<i>Epoxi</i>	Referente a resina epóxica
<i>Fe₂O₃</i>	Óxido de hierro
<i>KNSB</i>	Propelente de KNO ₃ y C ₆ H ₁₄ O ₆
<i>EPOXI</i>	Propelente de KNO ₃ , Epoxi y Fe ₂ O ₃
<i>CFD</i>	Dinámica de Fluidos Computacional (por sus siglas en inglés)
<i>tg</i>	Garganta
<i>D_{x̄}</i>	Diámetro promedio
<i>σ</i>	Desviación estandar
<i>C_v</i>	Coficiente de variación
<i>FFT</i>	Fabricación por Fotopolimerización en Tanque
<i>HTPB</i>	Polibutadieno con radicales de hidroxilo terminales

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Justificación	2
1.4. Hipótesis	2
1.5. Objetivo general	2
1.6. Objetivos específicos	2
2. Estado del arte	5
3. Marco teórico	7
3.1. Propelentes	7
3.1.1. Clasificación de los propelentes	7
3.2. Componentes del motor de propelente sólido	9
3.2.1. Carcasa	9
3.2.2. Aislamiento térmico	10
3.2.3. Tobera	10
3.3. Grano	10
3.3.1. Definiciones generales del grano	10
3.3.2. Configuración del grano según su instalación	12
3.3.3. Geometría del núcleo	12
3.3.4. Tasa de combustión	12
3.4. Tamaño de partícula	14

3.4.1.	Relación del tamaño de partícula con el desempeño del propelente	14
3.4.2.	Determinación del tamaño de partícula	15
3.5.	Combustión del propelente KNSB	16
4.	Metodología	19
4.1.	Grano de propelente	19
4.1.1.	Selección de reactivos	19
4.1.2.	Proceso de elaboración de granos	20
4.2.	Toberas	21
4.2.1.	Diseño de toberas	21
4.2.2.	Manufactura de toberas	21
4.3.	Carcasa	21
4.4.	Definición del proceso de experimentación	22
4.4.1.	Zona de pruebas	22
4.4.2.	Banco de pruebas	23
4.4.3.	Instrumentación	24
5.	Desarrollo del proceso	25
5.1.	Selección de reactivos	25
5.1.1.	Oxidante - Nitrato de potasio	25
5.1.2.	Combustibles - Sacarosa, sorbitol y epoxi	26
5.2.	Proceso de elaboración de granos - Generalidades	26
5.2.1.	Recepción de reactivos.	26
5.2.2.	Revisión de reactivos	26
5.2.3.	Almacenamiento	28
5.2.4.	Molido de reactivos y granulometría óptica	28
5.2.5.	Selección del propelente	28
5.3.	Propelente KNSB	29
5.3.1.	Propelente KNSB - Pesado, secado y mezclado	29
5.3.2.	Propelente KNSB - Síntesis a alta temperatura	30
5.3.3.	Propelente KNSB - Fundición en molde	32
5.3.4.	Propelente KNSB - Manufactura de núcleos	32
5.4.	Propelente EPOXI	33

5.4.1.	Propelente EPOXI - Pesado y secado	34
5.4.2.	Propelente EPOXI - Mezclado	35
5.4.3.	Propelente EPOXI - Moldeo y curado	36
5.5.	Remoción de moldes y maquinado correctivo	36
6.	Motor y experimentación	39
6.1.	Toberas	39
6.1.1.	Tobera fabricada por fotopolimerización en tanque	39
6.1.2.	Tobera maquinada	40
6.2.	Carcasa	41
6.3.	Ensamblaje del motor - Tobera FFT	41
6.4.	Ensamblaje del motor - Tobera maquinada	41
6.5.	Experimentación	42
6.5.1.	Zona de pruebas	43
6.5.2.	Banco de pruebas	44
6.5.3.	Instrumentación	45
7.	Resultados	49
	Granulometría	49
	Desempeño de las toberas FFT y propelente KNSB	50
Empuje - Toberas FFT		51
Erosión - toberas FFT		52
	Desempeño de las toberas maquinadas y propelente KNSB	52
	Desempeño de las toberas FFT y propelente EPOXI	53
	Comparación de desempeño de motores de propelente KNSB	53
	Reglamento del laboratorio	54
8.	Conclusiones	59
A.	Apéndice	61
	Referencias	67

Índice de figuras

3-1. Granos según su relación de Tiempo - Presión. Obtenido de <i>Rocket Propulsion Elements</i> , Sutton & Biblarz. [21]	11
3-2. Distintas configuraciones geométricas y su comportamiento. Obtenido de <i>Mechanics and Thermodynamics of Propulsion</i> . Hill & Peterson. [9]	13
3-3. Efecto del tamaño de partícula en un propelente a base de perclorato de amonio. Obtenido de Reporte SP-72262, <i>Motor Propellant Development</i> . NASA [21]	15
4-1. Metodología de investigación.	20
4-2. Diagrama de diseño de toberas supersónicas	22
4-3. Diagrama de fases de manufactura de toberas.	23
5-1. Proceso de elaboración de granos.	27
5-2. Distribución del área de trabajo para el pesado de ingredientes.	30
5-3. Etapas de la síntesis a alta temperatura.	31
5-4. Colocación del molde para fundición.	32
5-5. Molde lleno de propelente KNSB.	33
5-6. Diseño para impresión del accesorio para núcleos.	34
5-7. Colocación de la fixtura para núcleos.	35
5-8. Etapas de mezcla de ingredientes para propelente EPOXI.	36
5-9. Molde lleno de propelente EPOXI	37
5-10. Grano de propelente KNSB.	37
6-1. Parámetros de impresión utilizados.	40
6-2. Toberas impresas.	40

6-3. Referencia de motor con tobera impresa ensamblado (sin mecha).	42
6-4. Referencia de motor con tobera maquinada ensamblado (sin mecha).	43
6-5. Proceso de experimentación.	44
6-6. Zona de pruebas utilizada para experimentación.	45
6-7. Banco de pruebas.	46
6-8. Diagrama eléctrico para la obtención de datos.	47
7-1. Muestra de molido en 5 ciclos (magnificación de 50x)	49
7-2. Muestra de grano molido en 5 ciclos (magnificación de 6x)	50
7-3. Evidencia del motor KNSB con tobera de resina operativo.	51
7-4. Curva de empuje del 20 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.	52
7-5. Curva de empuje del 21 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.	53
7-6. Curva de empuje (1) del 22 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.	54
7-7. Curva de empuje (2) del 22 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.	55
7-8. Comparación: toberas antes de la prueba (izquierda) y después de la prueba (derecha).	55
7-9. Curva de empuje de motor KNSB con tobera de acero.	56
7-10. Evidencia del motor KNSB operativo.	56
7-11. Evidencia del motor KNSB operativo.	57

Índice de tablas

3-1. Resumen de propelentes homogéneos.	8
3-2. Clasificación de tamaños de partículas	14
3-3. Componentes de la ecuación de combustión del propelente KNSB.	17
5-1. Proporción de ingredientes para propelente EPOXI	34
7-1. Diámetros promedio de partícula de KNO_3 molido.	50
7-2. Resumen de empujes máximos en las pruebas.	51

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La exploración del espacio dejó de convertirse en un sueño y pasó a ser una necesidad de la humanidad. Independientemente del objetivo, poner en órbita satélites para observar galaxias, colonizar planetas, pisar otros cuerpos celestes, etc; hay una constante y es la necesidad de un vehículo de transporte capaz de salir de la atmósfera terrestre, "los cohetes".

Los cohetes son vehículos con propósito de investigación científica o aplicación militar. Se mueven gracias a la reacción de gases de combustión (fenómeno visible en el fuego y la estela de humo durante el lanzamiento) producidas por el motor del cohete.

Los motores de cohetes pueden funcionar de distintas formas. Algunas aprovechan de las reacciones químicas producidas gracias a un propelente. Otros utilizan de vapores altamente presurizados.

Los propelentes, también conocidos como explosivos deflagrantes, son materiales capaces de entrar en combustión en sí mismos cuando se les aplica la energía suficiente. Esta combustión es controlada y los gases de escape no superan la velocidad del sonido en condiciones normales.

Los propelentes pueden presentarse en distintas formas: sólidos, líquidos, gaseosos, en gel; y dentro de cada una de esas presentaciones existen más subclases.

1.2. Planteamiento del problema

No se dispone de un protocolo in situ el diseño y experimentación de motores de propelente sólido en donde se especifique las tareas y equipo necesarios para la fabricación de sus elementos (carcasa, tobera, propelente, entre

otros), de igual forma no existe un protocolo ni estructura para probar el desempeño de los motores que permita realizar las mediciones pertinentes para llevar a cabo la evaluación.

1.3. Justificación

Se requiere de un sistema que evalúe el desempeño de los motores de propelente sólido con base a su empuje y tiempo de operación para poder medir los cambios producidos a consecuencia de las modificaciones realizadas en el proceso de elaboración de granos y también a consecuencia de las mejoras aplicadas a la fabricación de las partes del motor. El contar con un proceso de evaluación de los motores de propelente sólido sirve como mecanismo didáctico que complementa la asignatura de "Propulsión de cohetes" del programa educativo de Ingeniería Aeroespacial al permitir la visualización y práctica de los conceptos desarrollados en clase.

1.4. Hipótesis

Es posible obtener un empuje máximo constante utilizando motores de propelente sólido KNSB con toberas fabricadas por fotopolimerización en tanque para una presión operativa interna de 1 MPa a pesar de la erosión presente, arrojando datos factibles para muestreo.

1.5. Objetivo general

El propósito de este trabajo es desarrollar un protocolo y sistema capaz de evaluar el desempeño de los motores de propelente sólido para que los resultados obtenidos sirvan como base del área de investigación para propulsión de cohetes dentro de la Universidad Autónoma de Baja California.

1.6. Objetivos específicos

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general planteado para esta investigación se seguirán los siguientes objetivos específicos.

- Seleccionar los reactivos para la producción de propelentes con base a su accesibilidad, seguridad y desempeño estimado.
- Diseñar un proceso que permita elaborar granos de propelente de manera eficiente y regulada.
- Seleccionar para cada parte del motor el adecuado material para operación. Ejemplo: tobera
- Desarrollar la instrumentación necesaria para la evaluación del desempeño de los motores.

Capítulo 2

Estado del arte

Los orígenes de sistemas de propulsión remontan al siglo XIII con la invención de la pólvora en China, utilizada para propósitos militares al servir como propelente de pequeños cohetes que tenían como meta el incendiar la zona de impacto. [11]

En la actualidad, los propósitos de utilizar cohetes son para la aplicación armamentística con el uso de los misiles, la colocación de satélites en órbita para los sistemas de geolocalización y telecomunicaciones, así como la investigación científica para estudios en condiciones de gravedad cero u observación espacial.

Dentro de la investigación científica tenemos a la sección de cohetes experimental en donde se usan cohetes de menor escala (un cohete puede pesar alrededor de 750 toneladas mientras que un cohete experimental suele no superar los 20 kilogramos), los cuales son utilizados para analizar telemetría o aprovechar la carga útil para experimentos de otras áreas de la ciencia además de lo aeroespacial.

Propulsión UNAM AAFI, de la UNAM; Club de Investigación Universitario de Desarrollo en Sistemas Espaciales (CIUDSE) de la UABC; UDEG Space, de la UdeG; son algunos de los ejemplos de universidades donde se está desarrollando la cohetes experimental. [7][22]

En el marco de los propelentes, el uso de propelentes con base de HTPB y NH_4ClO_4 son los más utilizados tanto como para cohetes espacial y para cohetes experimental. Una alternativa dentro de la cohetes experimental a los propelentes antes mencionados es la utilización de azúcar, sorbitol y KNO_3 . [14]

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Propelentes

Los propelentes son materiales que pueden entrar en combustión en sí mismos al contener estos una mezcla de combustible y oxidante. Su función principal es proporcionar la fuerza de empuje necesaria para generar movimiento de un vehículo aéreo. Otro nombre para los propelentes es el de “explosivo deflagrante”, el cual sería definido como un material explosivo que se quema de manera controlada a velocidades por debajo a la del sonido produciendo o generando un alto volumen de gases de escape. [17]

Los propelentes son utilizados para generar la fuerza de empuje dentro de un motor de cohete y que en coacción con una tobera se logra concentrar la salida de los gases de escape y acelerarlos.

3.1.1. Clasificación de los propelentes

Los propelentes pueden ser clasificados de acuerdo a su estructura física (líquidos, sólidos, híbridos o en gel) o por su naturaleza (homogéneos o heterogéneos).

Propelentes líquidos

Los **propelentes líquidos** están clasificados a su vez mono- y bi- propelentes.

Un **monopropelente** es una sustancia capaz de entrar en combustión sin la presencia de oxígeno externo. Se caracterizan por un bajo impulso específico y una baja energía por lo que se utiliza en aplicaciones de poco empuje. [17]

Un **bipropelente** consta de combustible y oxidante líquidos separados en tanques diferentes e inyectados en una cámara de combustión. Son ampliamente utilizados debido a sus niveles de eficiencia y capacidad de ser controlados. [17]

Propelentes sólidos

Los propelentes sólidos se encuentran divididos según el tipo de mezcla del cual están conformados.

Propelentes homogéneos

En un propelente homogéneo las partículas de tanto oxidante como combustible se encuentran enlazadas químicamente. Hay tres tipos de ellos y se listan a continuación. (Véase también la Tabla 3-1)

- **Propelente de base simple.** Son propelentes que contienen nitrocelulosa (NC) en 90% como ingrediente principal con concentraciones de nitrógeno del 12.5-13.25%.
- **Propelente de base doble.** Son propelentes que están compuestos principalmente de nitrocelulosa y nitroglicerina (NG), la cual se añade a los propelentes de base simple para hacerlos más energéticos.
- **Propelente de base triple.** Son propelentes donde se añade nitroguanidina (picrite-NQ) a uno de base doble para disminuir su temperatura de llama y reducir la luz en la boca del cañón (considerando una aplicación balística).

Tabla 3-1: Resumen de propelentes homogéneos.

Tipo	Ingredientes	Nomenclatura
Base simple	Nitrocelulosa	NC
Base doble	Nitrocelulosa más nitroglicerina	NC + NG
Base triple	Nitrocelulosa más nitroglicerina más nitroguanidina	NC + NG + picrite-NQ

Propelentes heterogéneos

En un propelente heterogéneo los componentes están mezclados o unidos físicamente.

- **Propelentes compuestos.** Estos propelentes son una mezcla de un combustible o aglutinante y un oxidante, donde el combustible actúa como matriz que sostiene al oxidante. Aumentar la cantidad de oxidante dentro del propelente produce un aumento en el impulso específico de éste pero compromete la integridad estructural del mismo.

El oxidante mayormente utilizado en la actualidad es el perclorato de amonio (AP), otros ejemplos serían el nitrato de amonio (AN), la dinitramida de amonio (ADN) y el nitroformiato de hidrazinio (HNF). Entre los combustibles destacan el aceite de castor (CO), el polipropilenglico (PPG), polibutadieno con radicales de carboxilo terminales (CTPB) y el polibutadieno con radicales de hidroxilo terminales (HTPB). [17]

- **Propelentes de base doble modificada.** En estos propelentes se incorporan el oxidante cristalino y el combustible metálico a una matriz de propelente DB.

Propelentes híbridos

Estos propelentes contienen componentes sólidos y líquidos dentro del mismo sistema. La configuración más común presenta un combustible sólido hueco y un tanque con oxidante líquido, el cual es inyectado a la cavidad del combustible sólido para iniciar la combustión.

3.2. Componentes del motor de propelente sólido

Un motor de cohete tiene la función de proporcionar el empuje necesario para mover al vehículo en que está instalado y está diseñado para asegurar que la combustión de un propelente sea bajo determinada presión y que los gases generados sea expandidos en la tobera.

3.2.1. Carcasa

La carcasa está hecha de metal, usualmente aceros de alta resistencia, o de materiales compuestos. Debe ser capaz de soportar la presión interna (1-25 MPa) resultante del motor encendido con un factor de seguridad aproximado al orden de 1.4. Sus dimensiones dependen principalmente del grano que se ubicará dentro. [6]

3.2.2. Aislamiento térmico

Debido a las altas temperaturas alcanzadas dentro del motor es necesaria una capa de aislamiento que proteja las paredes de la carcasa. El aislamiento debe ser escogido teniendo en cuenta el ambiente dentro de la carcasa en un motor operativo (la aerodinámica de los gases internos, la temperatura alcanzada, entre otros); las dimensiones de espesores deben ser determinados según la temperatura en distintas secciones y los esfuerzos mecánicos a los que se verán sometidos carcasa, aislamiento y grano. [6]

3.2.3. Tobera

La tobera es un elemento que cuenta con una sección convergente que dirige los gases producto de la combustión del propelente hacia la garganta, la cual es un punto operativo de la tobera que da fin a la sección convergente y da inicio a la sección divergente encargada de aumentar la velocidad de los gases de escape, dando así la reacción que permite el empuje del motor. [3]

3.3. Grano

El **grano** es otro componente del motor y es el agente encargado de generar la combustión interna; donde un grano está definido como una masa sólida de reactivos los cuales dan lugar a un proceso de combustión, o bien, los granos están hechos de propelente sólido. Los ingredientes y la configuración del grano determinan el desempeño de éste.

3.3.1. Definiciones generales del grano

En los puntos subsecuentes se darán las definiciones generales en relación a los granos de propelente sólido.

- **Combustible.** Sustancia que ante una reacción de combustión se oxida y libera energía. Es de carácter orgánico. [15]
- **Oxidante.** Sustancia que también es llamada comburente, actúa oxidando al combustible cuando las condiciones de presión y temperatura produzcan combustión. Para los propelentes sólidos se utilizan oxidantes inorgánicos de partículas cristalinas. [15]

- **Aglutinante.** Componente que sirve como matriz estructural para las partículas granulares del propelente. [21]
- **Agente curador.** Sustancia encargada de endurecer los prepolímeros. Puede considerarse un aditivo debido a que sólo se necesita cuando el aglutinante sea uno que requiera solidificación. [21]
- **Aditivos.** Término utilizado para cualquier sustancia no mencionado anteriormente cuya función sea modificar un parámetro de rendimiento del propelente o modificar el proceso de manufactura. [21]
- **Grano cilíndrico.** Hace referencia a un grano que tiene la misma sección transversal a lo largo de todo su eje principal. [21]
- **Núcleo.** Es la cavidad central del grano la cual permite el flujo dentro de él. Puede tener distintas geometrías que modifican el área de quemado, modificando también el comportamiento del empuje del motor. [21]
- **Quemado neutro.** Comportamiento durante operación en el que el empuje, presión interna y área de quemado se mantienen aproximadamente constantes a través del tiempo. Véase la Figura 3-1. [15]
- **Quemado progresivo.** Comportamiento durante operación en el que el empuje, presión interna y área de quemado aumentan a través del tiempo. Véase la Figura 3-1. [15]
- **Quemado regresivo.** Comportamiento durante operación en el que el empuje, presión interna y área de quemado disminuyen a través del tiempo. Véase la Figura 3-1. [15]

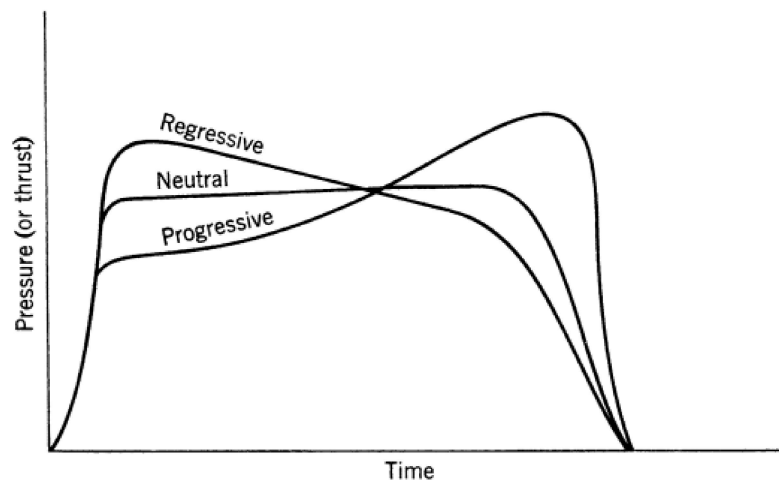


Figura 3-1: Granos según su relación de Tiempo - Presión. Obtenido de *Rocket Propulsion Elements*, Sutton & Biblarz. [21]

- **Plata.** Propelente restante no quemado posterior a la operación del motor. [15]

3.3.2. Configuración del grano según su instalación

Los granos pueden ser clasificados según la manera en que son instalados dentro del motor. Esto también determina el tipo de proceso de manufactura que será requerido para fabricar el grano.

- **Unido a la carcasa.** Los granos que son unidos directamente a la carcasa del motor utilizan como molde de fundición la carcasa misma, a la cual sería necesario aplicarle el aislante antes de realizar el proceso de fundición. Esta forma de colocar el grano dentro del propelente es utilizada para granos medianos o grandes (diámetros externos entre 100 mm y 500 mm o pesos entre 10 y 300 kg). El núcleo de estos granos puede hacerse durante la misma fundición haciendo uso de un molde macho o posterior al curado del grano mediante maquinado. [6]
- **Grano libre.** Estos granos son preparados fuera del motor en que serán utilizados y son almacenados dentro de un cartucho el cual es colocado en el motor hasta su momento de operación. El cartucho funciona también como molde al momento de la manufactura. El núcleo de estos granos suele hacerse con un molde pero puede maquinado de ser necesario. [6]

3.3.3. Geometría del núcleo

El núcleo de un grano de propelente está definido como la cavidad hueca al centro del mismo, posee una sección transversal constante o variable y se extiende en su eje longitudinal.

Esta sección transversal es una figura geométrica que determina el comportamiento de la curva de empuje a lo largo del tiempo. Véase la Figura 3-2.

3.3.4. Tasa de combustión

La **Ley de Piobert** establece que la combustión toma lugar en capas paralelas del grano de propelente en todo punto desde la superficie en que comenzó la ignición. [20]

Eso y considerando una presión constante, la ecuación para determinar la tasa de combustión lineal queda definida como la siguiente:

$$B_{rL} = \frac{L}{t_c} (mm/s) \quad (3-1)$$

donde,

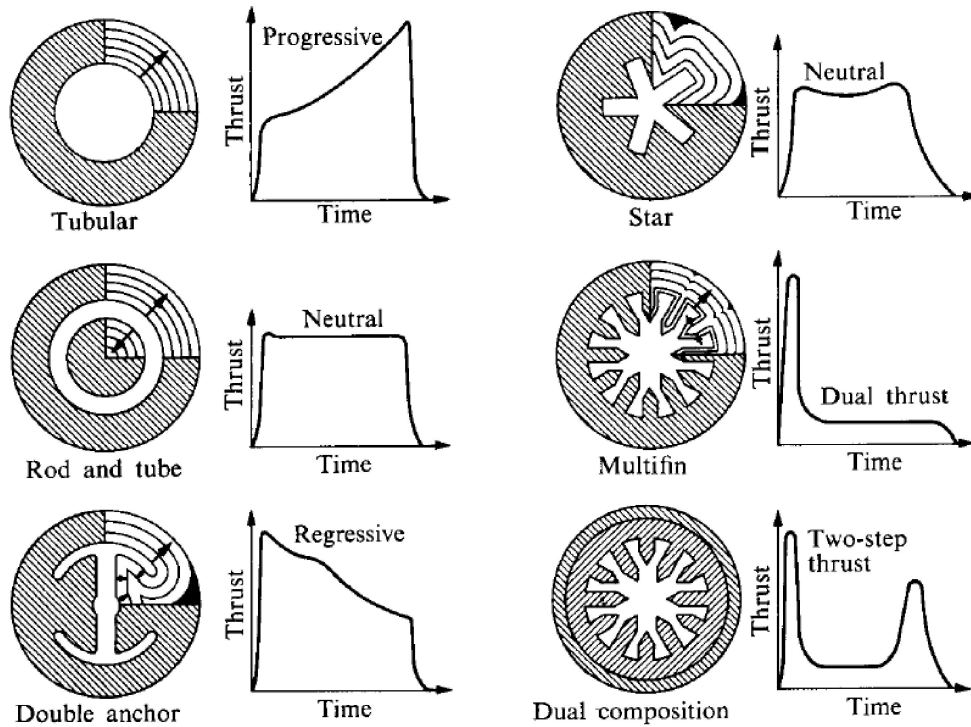


Figura 3-2: Distintas configuraciones geométricas y su comportamiento. Obtenido de *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*. Hill & Peterson. [9]

B_{rL} = tasa de combustión lineal a presión constante (comúnmente presión atmosférica).

L = distancia del grano bajo medición.

t_c = tiempo en que la distancia L termina su combustión.

La tasa de combustión variará su comportamiento según esté variando la presión dentro de la cámara de combustión y también dependerá de la temperatura inicial del propelente. Esto formará daré como resultado la forma exponencial de la tasa de combustión dada por la ecuación de la conocida **Ley de Vieille**: [17]

$$B_r = aP_c^n \quad (3-2)$$

donde,

B_r = tasa de combustión exponencial.

P_c = presión interna de la cámara de combustión.

- a = coeficiente dependiente de la temperatura inicial del propelente. Se encuentra en rangos de 0.05 - 0.002.
- n = exponente de presión, depende de la formulación del propelente.

Las tasas de combustión de los propelentes se determinan de manera experimental haciendo uso de una *Bomba de Crawford* a diferentes presiones haciendo uso de un gas inerte para presurización y mediante la ecuación (2-2) es posible determinar el exponente de presión y el coeficiente a . [17]

El exponente de presión es un punto importante a la hora de caracterizar un propelente debido a que si presenta valores cercanos a cero permite hacer las siguientes consideraciones:

- Las imperfecciones superficiales, vacíos y/o grietas no producirán muchas variaciones de presión interna de cámara.
- La presión interna alcanzará el equilibrio más pronto.

3.4. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula del oxidante juega un papel importante en el desempeño y la integridad estructural del propelente. Su clasificación se hace considerando partículas de forma esférica y está listada en la Tabla 3-2. [21]

Tabla 3-2: Clasificación de tamaños de partículas

Descripción	Diámetro de partícula (μm)
Grueso	400 - 600
Mediano	15 - 200
Fino	5 - 15
Ultrafino	0 - 5

3.4.1. Relación del tamaño de partícula con el desempeño del propelente

El reporte SP-72262 de la NASA demuestra el incremento en la tasa de combustión en consecuencia de aumentar el porcentaje de partículas finas en el oxidante.

Como se muestra la Figura 3-3, aumentar el porcentaje de oxidante fino produce un aumento en el desempeño del propelente. Pero, si se desea conservar una buena integridad estructural del propelente no se puede llevar el

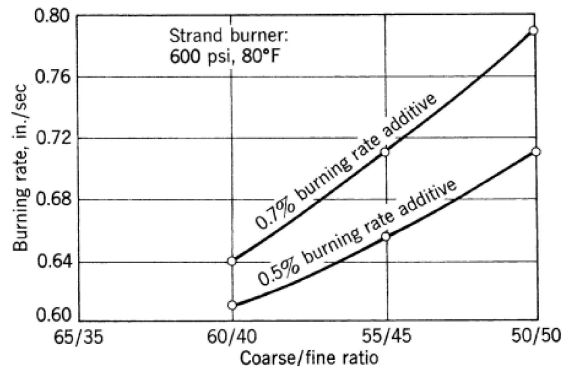


Figura 3-3: Efecto del tamaño de partícula en un propelente a base de perclorato de amonio. Obtenido de Reporte SP-72262, *Motor Propellant Development*. NASA [21]

porcentaje de partículas gruesas a cero, por lo que resulta necesario hacer un análisis del propelente que se vaya a utilizar para determinar en qué punto la razón de partículas gruesas con finas deja de comprometer a la integridad estructural para maximizar el desempeño energético.

3.4.2. *Determinación del tamaño de partícula*

Conocer el tamaño de partícula del oxidante permite evaluar el desempeño del propelente en relación a su razón de tamaños de partícula con los que fue elaborado. Además, las propiedades mecánicas también varían según esta misma razón.

Análisis por tamizado

El tamizado permite separar las partículas de un material según su tamaño. Al pasar el material por cierto número de tamices se va separando, dejando las partículas más gruesas en los niveles superiores de la serie de tamices. Una vez que el proceso terminó se pesan las fracciones de masa restantes en cada tamiz, lo que permite caracterizar el material en porcentajes de tamaños de partícula.

El principio del funcionamiento de una tamizadora es sujetar una serie de tamices que se hacen vibrar para que las partículas puedan ser orientadas para pasar por los agujeros del tamiz.

El proceso de tamizado tiene unas limitaciones, las cuales se lista a continuación:

- No toma en cuenta la forma de la partícula, por lo que para partículas no esféricas puede presentarse la situación de que sus dos dimensiones menores puedan pasar por un tamiz mientras que su tercera dimensión no debería pasar.
- Carece de resolución, es decir, no se pueda determinar el tamaño exacto de cada partícula, sólo un rango de posibles dimensiones.
- Requiere tiempos largos de análisis para asegurar que las partículas finas logren ser filtradas adecuadamente.
- Es posible que los agujeros del tamiz se tapen, entorpeciendo futuros análisis.
- Requiere de otros análisis para poder obtener precisión acerca de forma de las partículas.

Granulometría óptica

La granulometría óptica se refiere al análisis de imágenes tomadas del grano. Se puede realizar de manera manual midiendo partícula por partícula con una escala o mediante el uso de un tamiz virtual, es decir, un programa que en unión con una escala y un código de determinación de fronteras de partícula permita medir cada una de ellas.

3.5. Combustión del propelente KNSB

La ecuación combustión para el propelente KNSB se desarrolla a continuación mientras que en la Tabla 3-3 se muestra la lista de componentes con su nombre, simbología y estado de la materia en que se presentan.

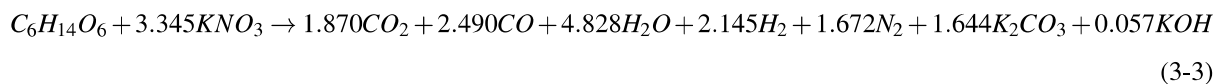


Tabla 3-3: Componentes de la ecuación de combustión del propelente KNSB.

Simbología	Estado	Componente
$C_6H_{14}O_6$	Sólido	Sorbitol
KNO_3	Sólido	Nitrato de potasio
CO_2	Gas	Dióxido de carbono
CO	Gas	Monóxido de carbono
H_2O	Gas	Vapor
H_2	Gas	Hidrógeno
N_2	Gas	Nitrógeno
K_2CO_3	Líquido	Carbonato de potasio
KOH	Gas	Hidróxido de potasio

Capítulo 4

Metodología

Para alcanzar los objetivos generales y específicos se desarrolló la siguiente metodología

La metodología de trabajo de esta investigación concentra las metodologías requeridas para el desarrollo la definición de grano y procesos para su fabricación; así mismo, el diseño de las toberas y cómo serán manufacturadas; a su vez, la selección de los materiales con los cuales estará fabricado el motor. Se contempla también lo necesario para realizar la experimentación y evaluación de los motores. Esto queda definido en el diagrama de flujo presente en la Figura 4-1.

4.1. Grano de propelente

La metodología relacionada con el grano de propelente permite definir los ingredientes con los que se estará experimentando para desarrollar el protocolo de trabajo.

4.1.1. Selección de reactivos

Cada reactivo debe seleccionarse con base a los siguientes criterios:

- **Disponibilidad o accesibilidad.** Qué tan simple resulta el conseguir el reactivo, si puede ser comprado directamente o si es necesario realizar una reacción química para obtenerlo.
- **Seguridad.** Qué riesgos conlleva el manipular el reactivo o qué riesgos tendría el producto terminado.
- **Desempeño.** Comparativa frente a otros de su misma clase.

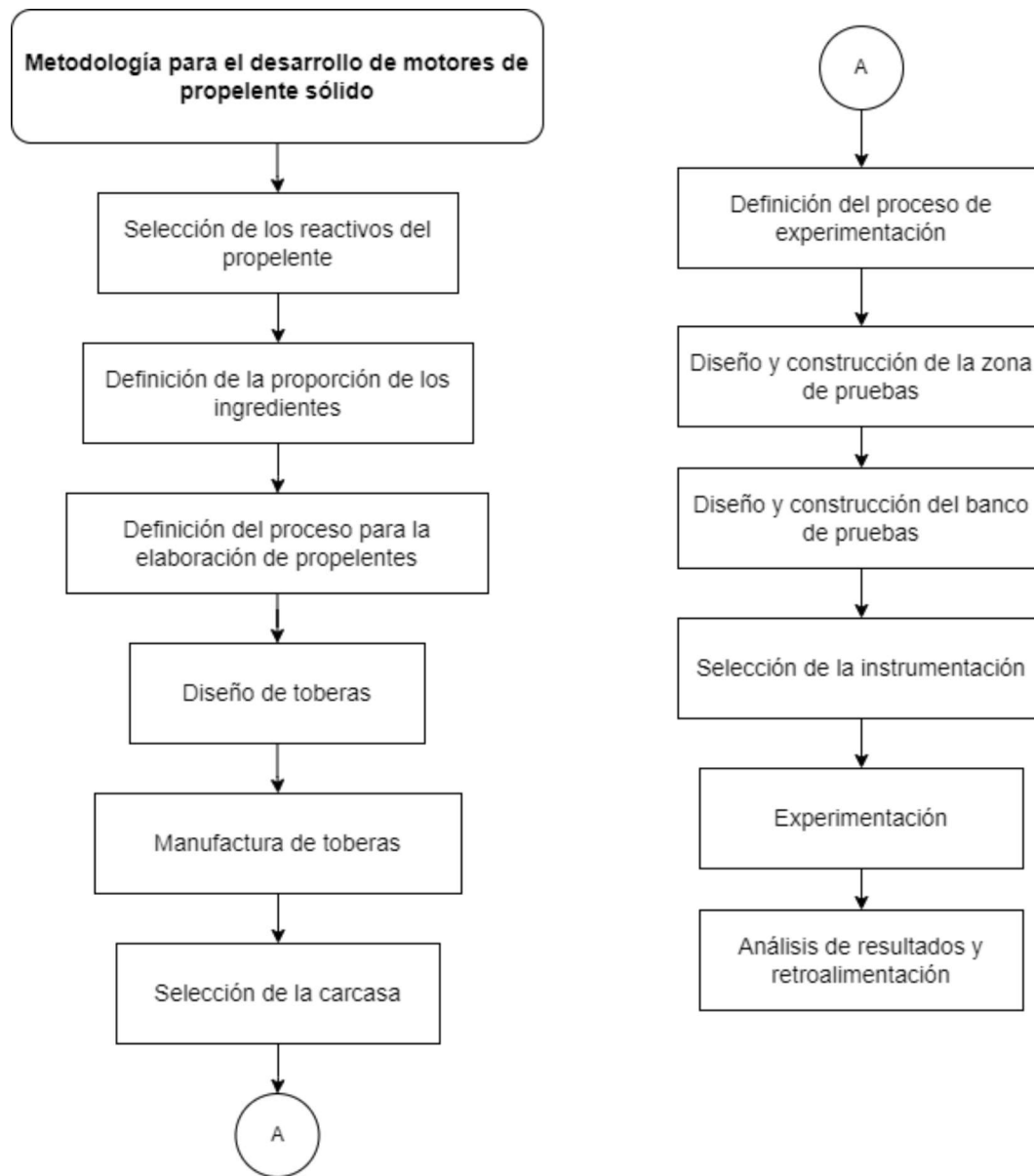


Figura 4-1: Metodología de investigación.

4.1.2. *Proceso de elaboración de granos*

Como primer paso, se realizó una investigación de los procesos de diferentes autores y entusiastas de la coherencia experimental. Identificando diferencias y similitudes que permitan la construcción de un proceso inicial.

Para definir el proceso de elaboración de granos se usó un proceso iterativo, donde se buscó refinar el producto investigativo.

4.2. Toberas

Una vez definido el propelente que se utilizará se llevará a cabo el diseño y manufactura de las toberas buscando optimizar el máximo desempeño para el propelente seleccionado.

4.2.1. Diseño de toberas

El diseño de toberas será con los datos obtenidos del proyecto de investigación "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO PARA USO EN MECANISMOS DE PROPULSIÓN" con código 3091 del cual deriva este trabajo de tesis, el diseño de la tobera no se describirá en el presente trabajo más no obstante otro trabajo de tesis se deriva exclusivamente para el diseño de la tobera en el cual se puede obtener datos en el reporte final del proyecto "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO PARA USO EN MECANISMOS DE PROPULSIÓN". En la Figura 4-2 se presenta el diagrama que resume el desarrollo de las toberas.

4.2.2. Manufactura de toberas

A pesar del recomendado uso de toberas de metal con insertos de grafito se optó por una alternativa de desarrollo en fases. Esto permitió descartar diseños de toberas en la fase de fabricación por fotopolimerización en tanque antes de hacerse un maquinado en acero, permitiendo ahorrar en tiempos y potenciales costos extra.

4.3. Carcasa

Los criterios de selección para la carcasa fueron los siguientes:

- **Material - Metal.** Utilizar un metal evita la necesidad de procesos de manufactura para materiales compuestos.

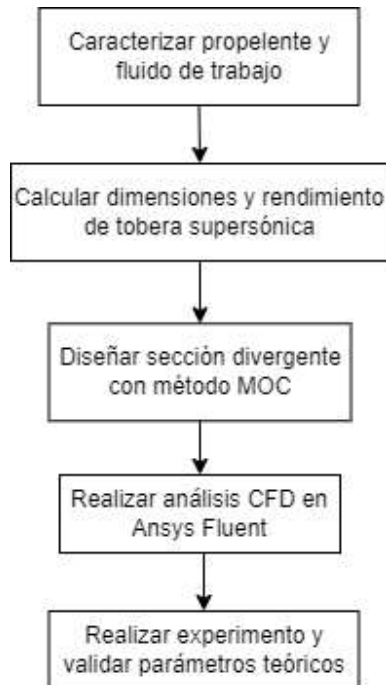


Figura 4-2: Diagrama de diseño de toberas supersónicas

- **Estandarización.** Las medidas de cada motor deben ser iguales entre sí.
- **Factor de seguridad.** El factor de seguridad mínimo ante los efectos de presión interna debe ser de 1.4.

4.4. Definición del proceso de experimentación

La experimentación permite la obtención de resultados los cuales sirven para evaluar el desempeño de los motores así que es fácil asumir que se requiere de un sistema que mida esto. Pero también es necesario considerar los aspectos de seguridad que minimicen o anulen los posibles riesgos durante la experimentación.

4.4.1. Zona de pruebas

La zona de pruebas es un espacio designado como el único lugar donde se pueden realizar las pruebas de operación del motor. Para su diseño se consideran los siguientes aspectos:

- Poseer espacio suficiente para la instalación del banco de pruebas.

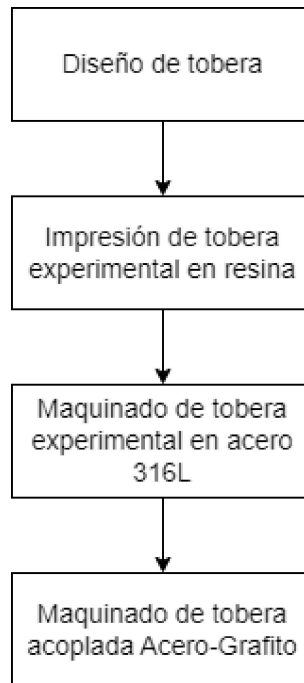


Figura 4-3: Diagrama de fases de manufactura de toberas.

- Permitir el fácil acceso y no limitar la movilidad dentro de ella.
- Contar con un suelo nivelado.
- Ser capaz de contener los posibles proyectiles en caso de un mal funcionamiento del motor.

4.4.2. Banco de pruebas

El banco de pruebas es la estructura que tiene contacto directo con el motor, asegurando su posición y conteniendo la instrumentación necesaria para la experimentación y toma de mediciones de las pruebas. Se diseñó tomando en consideración los siguientes aspectos:

- El banco de pruebas no debe superar las dimensiones de la zona de pruebas.
- El banco de pruebas debe ser capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sujeto por consecuencia del motor operativo.
- Debe permitir hasta un máximo de dos grados de libertad: traslación y rotación en el eje Z.

4.4.3. Instrumentación

La necesidad de medir el desempeño de los motores basándose en el comportamiento y magnitud del empuje generado a lo largo del tiempo requiere un dispositivo sensible a los cambios en el empuje, por lo que la instrumentación diseñada se limitó a la detección de fuerza.

Capítulo 5

Desarrollo del proceso

5.1. Selección de reactivos

El criterio principal para la selección de reactivos es su disponibilidad dentro de la región. El nitrato de amonio se limita sólo a reactivos sobre pedido a distribuidoras de químicos, lo cual le define como accesible ya que, efectivamente, puede adquirirse, pero el hecho de ser sobrepedido a laboratoristas lo hace caro y por tanto poco accesible en cuestión de precio. En cuanto al perclorato de amonio, la venta de éste se encuentra prohibida en la región y su síntesis presenta un riesgo extra y, por lo tanto, considerando el criterio de seguridad se debe descartar el uso de perclorato de amonio en esta investigación

5.1.1. *Oxidante - Nitrato de potasio*

El nitrato de potasio dentro de la región puede encontrarse de manera accesible y con calidad de laboratorio, teniendo un 99% de pureza, o en calidad fertilizante con un 98% de pureza. En cuestión de seguridad ambos tienen los mismos cuidados en su manejo. En el caso del rendimiento, se consultó el experimento realizado por Nakka R. referente a la medición de la tasa de combustión lineal de propelentes KNSU variando el grado químico del nitrato de potasio. El resumen del experimento es el siguiente: Presión atmosférica constante. Haciendo uso de filamentos de propelente preparados por síntesis de alta temperatura y dándoles forma de manera manual. Dimensiones de 10 mm x 5 mm x 70 mm y sección transversal con forma de óvalo. 4-5 filamentos por tipo de propelente. Se midió la tasa de combustión lineal en cada filamento. Su reporte de resultados fue que el nitrato de potasio de grado laboratorio tuvo una tasa de combustión promedio de 3.8 mm/s y el de grado fertilizante tuvo una de 3.9 mm/s. [16]

Tomando esos resultados a consideración y que la disponibilidad del nitrato de potasio de grado fertilizante es mayor a la del grado laboratorio, éste fue seleccionado como el nitrato de potasio que se utilizaría para experimentación.

5.1.2. Combustibles - Sacarosa, sorbitol y epoxi

Los combustibles sacarosa, sorbitol y epoxi son los únicos que cumplen con los criterios de disponibilidad y que su manipulación no presenta un riesgo mayor. Además, se cuenta con bibliografía suficiente para realizar cotejos de resultados en relación a procesos y rendimiento de los motores. La sacarosa se descartó debido a que el fenómeno de caramelización de éste dificultaba la manufactura de los propelentes.

5.2. Proceso de elaboración de granos - Generalidades

La parte de *generalidades* se refiere a procesos que son iguales independientemente del tipo de propelente que se esté fabricando (sea KNSB o Epoxi). La Figura 5-1 muestra el diagrama para la elaboración de los granos usados en esta investigación.

5.2.1. Recepción de reactivos.

La recepción de reactivos se hizo en el departamento de compras de la universidad. Una vez recogidos los reactivos, se ubicaron en un contenedor de transporte designado y estos fueron directamente llevados al laboratorio para su almacenamiento.

5.2.2. Revisión de reactivos

Una vez que los reactivos llegaron al laboratorio se verificó que los envases o recipientes en los cuales están almacenados hayan llegado cerrados herméticamente y que el peso de estos corresponda con la cantidad de material que deberían contar. Esto no se hizo al momento de la recepción debido a que la ubicación donde se recibieron no era el adecuado para realizar la revisión.

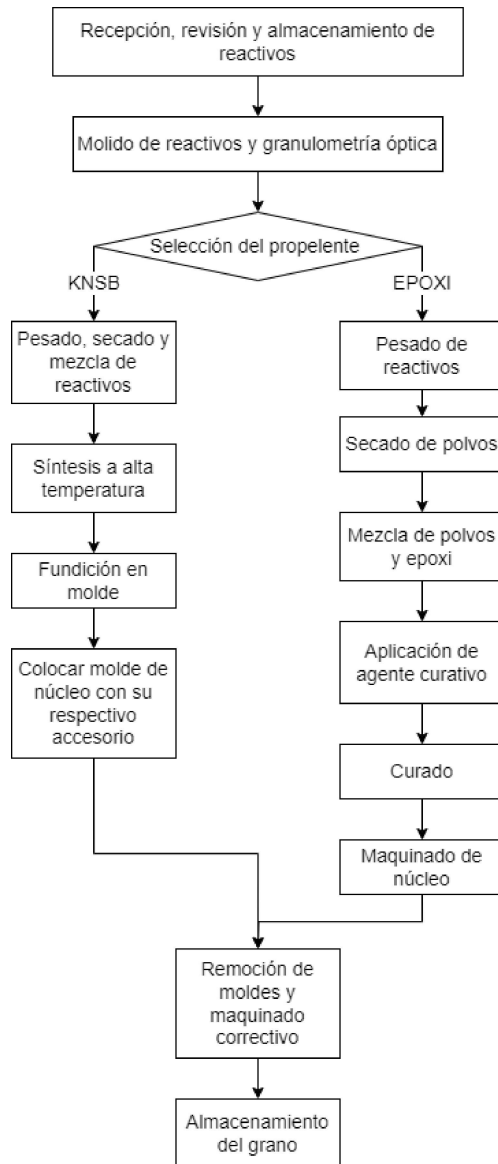


Figura 5-1: Proceso de elaboración de granos.

Una vez se corroboró el punto anterior, se continuó con un proceso de caracterización de los reactivos para poder clasificar estos no sólo por su naturaleza (por ejemplo: combustible, propelente o aditivo) si no también por las dimensiones de sus partículas. En el caso de que uno de estos presente dimensiones por encima de las consideradas aptas para experimentación será necesario un proceso de molido previo a la mezcla de reactivos. Según bibliografía el tamaño de la partícula de polvo de un reactivo debe ser menor a $15 \mu m$ para que no haya

pérdidas de energía durante el proceso de combustión en la combustión misma del polvo y que toda esta energía sea aprovechada para generar empuje.

Para realizar el proceso de caracterización se utilizó un microscopio con objetivos de hasta 50x de magnificación con la capacidad de tomar fotografías digitales para así poder realizar la medición de las partículas con ayuda de un software de procesamiento de imágenes (ImageJ) y por medio de un muestreo junto con condiciones de desviación estándar y coeficiente de variación determinar si la media de las dimensiones es representativa para la muestra seleccionada. En este punto se midió únicamente el nitrato de potasio virgen para corroborar la necesidad de un proceso de molido.

5.2.3. Almacenamiento

El almacenamiento de reactivos queda especificado en el reglamento del laboratorio presente en el Apéndice A y en el apartado V del propio reglamento.

5.2.4. Molido de reactivos y granulometría óptica

Se utilizó un dispositivo de moliendo de granos para moler el nitrato de potasio virgen. Se realizaron molidas de 20 segundos por ciclo. Se analizaron muestras a diferente número de ciclos para determinar la cantidad adecuada para el proceso. El límite de molidas fue de 5 ciclos puesto que al sexto ciclo las partículas de polvo comenzaban a pegarse en las paredes del dispositivo provocando un mal funcionamiento del proceso y generando un calentamiento en el dispositivo.

La medición del tamaño de partícula resulta complicada por medio de granulometría óptica en las muestras molidas bajo 5 ciclos. Pero en un análisis bajo magnificación de 4x y 10x de todas las muestras es notable disminución en la razón de partículas gruesas y finas.

5.2.5. Selección del propelente

La elaboración de propelentes KNSB se decidió con la finalidad de diseñar motores experimental de baja potencia con un valor teórico aprovechable. Mientras que los propelentes EPOXI tiene un valor demostrativo a la hora de asemejar a los procesos de elaboración de propelentes de alta potencia.

La Figura 5-1 muestra la secuencia del proceso para cada tipo de propelente pero en las secciones continuación se detalla cada uno de ellos.

5.3. Propelente KNSB

Se definió también la longitud de grano en 10 cm y un diámetro externo de 3.4 cm. Considerando que la densidad teórica del propelente es de 1.8373 g/cm^3 y despreciando el diámetro interno definido por el núcleo el volumen del grano es de 90.792 cm^3 por lo que el peso estimado es de 166.81 g y que por motivos de pérdida de material debido a los restos en las paredes durante el proceso de fundición se diseñaron los procesos para un preparado de 200 g de propelente.

La información del diseño de la tobera se toma del proyecto de investigación "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO PARA USO EN MECANISMOS DE PROPULSIÓN" con código 309

5.3.1. *Propelente KNSB - Pesado, secado y mezclado*

Previo a comenzar con la elaboración del propelente es necesario preparar el equipo que se utilizará durante el pesado, secado y mezclado; debe ser colocado de manera que todo instrumento sea accesible y su ubicación no interrumpa con la movilidad del laboratorista. La distribución del área de trabajo que se utilizó para el proceso de pesado es el siguiente:

El proceso de pesado consta en lo siguiente:

1. Colocar la balanza en una superficie estable y nivelada.
2. Colocar en ceros la balanza.
3. Colocar el recipiente en el cual se depositará el reactivo y volver a establecer en ceros la balanza.
4. Seleccionar el reactivo a pesar.
5. Tomar del recipiente del reactivo una cantidad arbitraria de éste, colocarla en el recipiente de medición y esperar a que se actualice el valor en la balanza.
6. Repetir hasta alcanzar la cantidad requerida del reactivo.

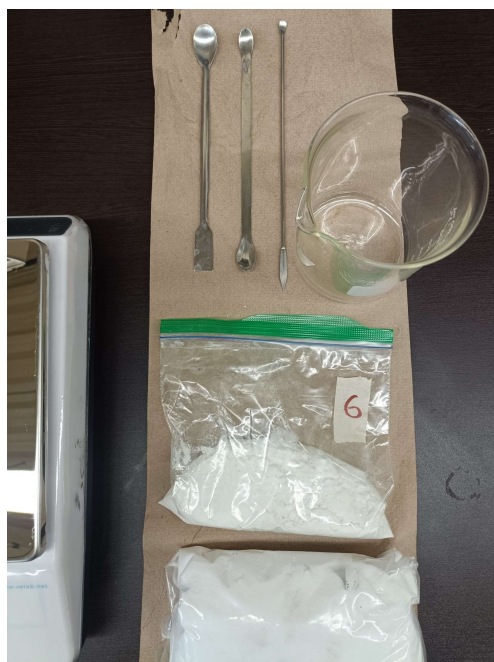


Figura 5-2: Distribución del área de trabajo para el pesado de ingredientes.

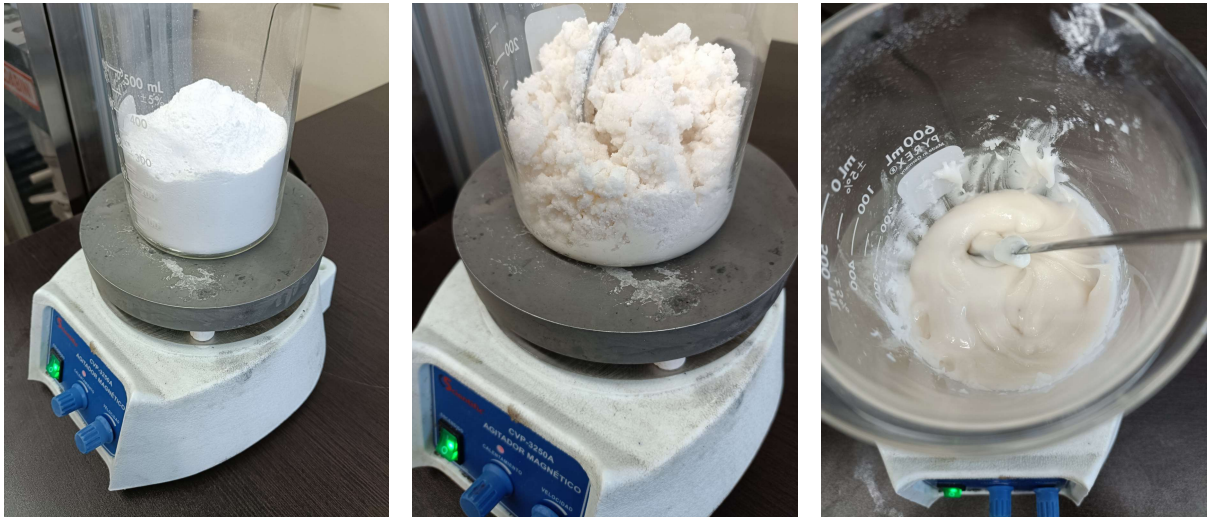
Es importante mencionar que jamás se debe hacer contacto con la balanza ni el recipiente de medición durante este proceso, de ser así es necesario comenzar de nuevo con el pesado. Lo mismo si se supera la medida requerida de reactivo.

Para eliminar la presencia de partículas de vapor de agua que puedan afectar el proceso de preparación y que esto a su vez afecte al empuje final proporcionado por el propelente es necesaria deshumidificar los reactivos haciendo uso de un deshumidificador.

Para mezclar los polvos se hace uso de un recipiente hermético colocado en un mezclador rotativo donde se deja un tiempo de 5 minutos.

5.3.2. Propelente KNSB - Síntesis a alta temperatura

Para el proceso de síntesis a alta temperatura se utilizó un calentador eléctrico o cama caliente regulable y se destacó la prohibición del uso de cualquier sistema que utilice llama para calentar. El proceso definió de la siguiente manera:



(a) Mezcla en la cama caliente.

(b) Inicio de la síntesis.

(c) Fin de la síntesis.

Figura 5-3: Etapas de la síntesis a alta temperatura.

1. Precalear la cama caliente junto al recipiente de cocción (vaso de precipitado para evitar la contaminación por el desprendimiento de partículas de las paredes del recipiente) a la temperatura requerida (186°C para sacarosa y 96°C para sorbitol).
2. Depositar la mezcla de polvos en el recipiente de cocción y mezclar de manera constante.
3. Mezclar hasta que se alcance el punto de fusión y retirar inmediatamente cuando toda la mezcla haya alcanzado la misma consistencia.

Durante el proceso de síntesis alta temperatura se destacan tres fases: la subfigura 5-3(a) muestra cómo se ve la mezcla recién colocada en la cama caliente, mientras se encuentre en este estado la atención requerida es baja y sólo se necesita estar batiendo la mezcla que se encuentra en la parte inferior del recipiente hasta que se comience a ver como la subfigura 5-3(b) donde se observa ya la presencia abundante de grumos, en esta etapa se requiere atención y batido constante a la mezcla hasta que esa alcance una consistencia completamente líquida como en la subfigura 5-3(c) donde el proceso de síntesis estará terminado y se requiere pasar inmediatamente al proceso de fundición.

5.3.3. *Propelente KNSB - Fundición en molde*

Los moldes para el tamaño del grano son tubos de hierro negro con las dimensiones del motor. El diámetro interno de los moldes se recubrió con dos capas de cartón delgado (dimensiones de 12 cm por 15 cm) con un gramaje de 206 g/m^2 o 0.21 mm de grosor sujeta por tiras de cinta adhesiva de tipo *masking* y se colocó una hoja de nitrilo en la mesa de trabajo para evitar que el propelente se adhiera a la mesa, como se muestra en la Figura 5-4.



Figura 5-4: Colocación del molde para fundición.

Se procede a fundir la mezcla dentro del molde en intervalos de 3 cm de recorrido y se hace presión sobre ellos con una herramienta de cara plana recubierta con vaselina, esto con la finalidad de evitar la formación de huecos dentro del grano. En la Figura 5-5 se muestra un molde lleno de propelente.

5.3.4. *Propelente KNSB - Manufactura de núcleos*

Para la elaboración de núcleos (cavidad geométrica interna del grano que define el comportamiento de la curva de empuje) del propelente KNSB se diseñó un accesorio impreso con PLA que se sujeta al molde principal y



Figura 5-5: Molde lleno de propelente KNSB.

tiene en su centro una cavidad que permite el paso del accesorio (varilla pulida de aluminio o hierro) con la forma que se le desea dar al núcleo. La Figura 5-6 muestra el diseño del accesorio para la manufactura de núcleos para propelentes KNSB.

El accesorio impreso se coloca alrededor del molde principal y después se inserta el accesorio de forma al cual previamente se le colocó capa de vaselina aplicada manualmente. Véase la Figura 5-7.

5.4. Propelente EPOXI

Al igual que para los propelentes de KNSB, para los propelentes EPOXI se definió la longitud de grano en 10 cm y un diámetro externo de 3.4 cm. Considerando que la densidad teórica del propelente es de 1.8302 g/cm^3 y despreciando el diámetro interno definido por el núcleo el volumen del grano es de 90.792 cm^3 por lo que el peso estimado es de 166.16 g y que por motivos de pérdida de material debido a los restos en las paredes durante el proceso de fundición se diseñaron los procesos para un preparado de 200 g de propelente.

La proporción utilizada para la elaboración de los propelentes epoxi se muestra en la Tabla 5-1.

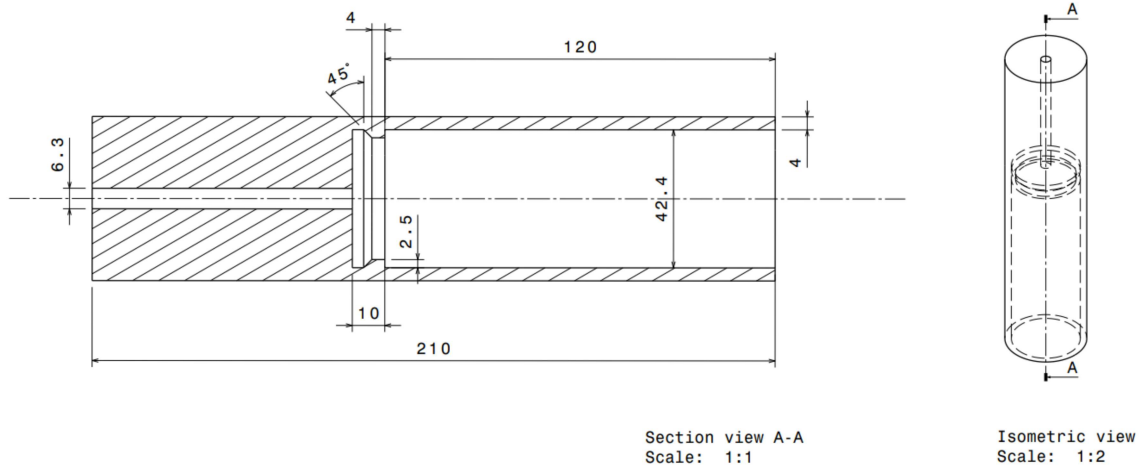


Figura 5-6: Diseño para impresión del accesorio para núcleos.

Tabla 5-1: Proporción de ingredientes para propelente EPOXI

Ingrediente	Porcentaje sobre el total (%)	Peso para proceso (g)
Nitrato de potasio	69	138
Epoxi	3.835	7.67
Agente curativo	19.175	38.35
Fe ₂ O ₃	8	16

La epoxi y el catalizador utilizados se prepararon a una razón 5:1, 5 partes de epoxi y 1 de catalizador; así que se definieron 38.35 g de epoxi y 7.67 g de agente curativo, se terminó utilizado 40 g de epoxi y 8.5 de catalizador debido a los residuos en las paredes de los recipientes en que se medían. [19]

5.4.1. *Propelente EPOXI - Pesado y secado*

El proceso de pesado para los propelentes EPOXI fue el mismo indicado en la sección 5.3.1 del presente documento.

El secado de ingredientes sólo se realiza para aquellos de naturaleza sólida (polvos).



Figura 5-7: Colocación de la fixtura para núcleos.

5.4.2. *Propelente EPOXI - Mezclado*

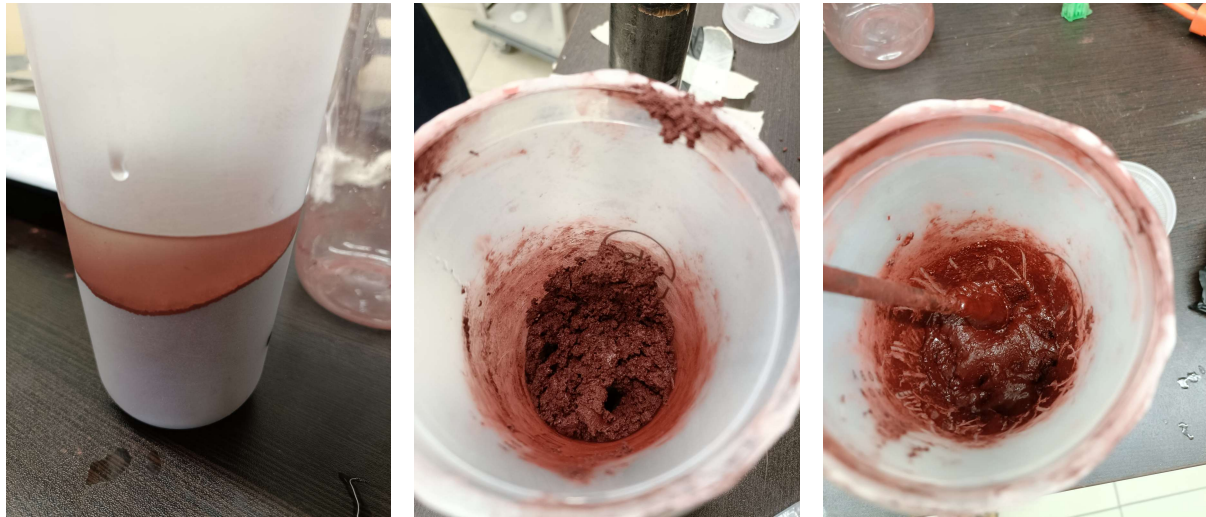
Por los efectos del agente curativo en la resina epoxi fue necesario dividir el mezclado de ingredientes en tres fases:

1. Mezclado de polvos según lo indicado en la sección 4.3.1.
2. Mezclado de la resina epoxi junto con la mezcla de polvos.
3. Adición del agente curativo a la mezcla de epoxi - polvos.

Fases que se muestran en la Figura 5-8.

Se usó un recipiente desechable para mezclar los ingredientes debido a que los residuos de propelente impiden la reutilización de dicho recipiente. La mezcla se realiza de manera manual.

El tiempo de mezclado una vez añadido el agente curativo fue de ocho minutos debido a que los diez minutos la mezcla comenzará a endurecer. Pasado este tiempo es necesario pasar al proceso de moldeo.



(a) Epoxi añadido a la mezcla de polvos (b) Producto de la mezcla epoxi - polvos (c) Producto de la adición del catalizador

Figura 5-8: Etapas de mezcla de ingredientes para propelente EPOXI.

5.4.3. *Propelente EPOXI - Moldeo y curado*

La mezcla de propelente se coloca en un molde de las dimensiones del grano hechos tubos de hierro negro. El diámetro interno de los moldes se recubrió con una capa de cartón delgado con un gramaje de 206 (g/m^2) o 0.21 mm de grosor sujeta por tiras de cinta adhesiva de tipo *masking* y se colocó una hoja de nitrilo en la mesa de trabajo para evitar que el propelente se adhiriera a la mesa.

Una vez que se colocó el propelente dentro del molde se dejó curar 24 horas. La Figura 5-9 muestra el producto del llenado del molde.

5.5. Remoción de moldes y maquinado correctivo

Para remover el grano del molde se hizo presión en una de las caras de éste.

El maquinado correctivo se utilizó para llevar al grano a las dimensiones exactas requeridas y se realizó mediante el corte por sierra en ambos tipos de propelente.

La Figura 5-10 muestra un grano de propelente KNSB terminado.

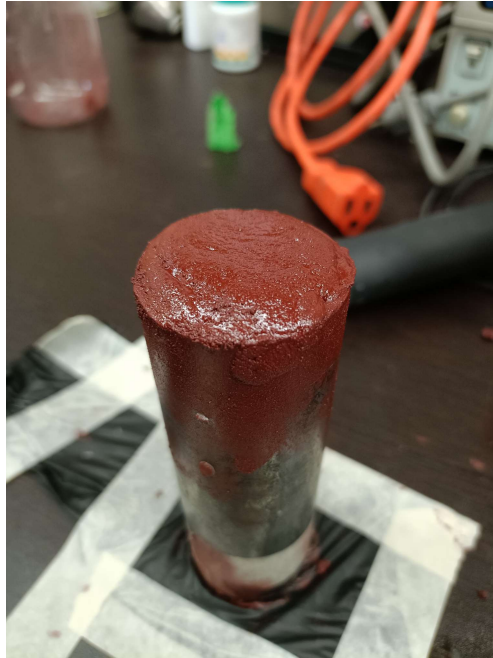


Figura 5-9: Molde lleno de propelente EPOXI



Figura 5-10: Grano de propelente KNSB.

Capítulo 6

Motor y experimentación

6.1. Toberas

Los prototipos de tobera fueron diseñados para una presión interna de operación de 1MPa.

6.1.1. *Tobera fabricada por fotopolimerización en tanque*

La primer iteración para la fabricación de toberas consistió en la manufactura de prototipos funcionales. Como segundo propósito, las toberas hechas por este método tienen costo de 30 pesos mexicanos por tobera frente a los 7000 pesos mexicanos que puede llegar a costar maquinar una tobera en acero. Esta diferencia en precio da la posibilidad de realizar prototipado rápido con finalidades únicamente académico-demostrativas para clases universitarias dentro de la rama de la propulsión.

Se eligió el proceso de impresión por fotopolimerización debido a que éste presenta mejores acabados superficiales frente a su contraparte de impresión por filamento fundido extruido.

La impresora que se utilizó fue la Elegoo Mars 2 Pro. Se usó resina para impresión 3D de la marca ANYCUBIC "básica color verde transparente. El software de impresión utilizado fue Chitubox Basic con los parámetros indicados en la Figura 6-1. Las toberas impresas se muestran en la Figura 6-2.

Posterior al proceso de impresión se usó alcohol etílico para limpiar las piezas y se realizó un curado con luz UV por 2 minutos.

Layer Height:	<input type="text" value="0.050"/>	mm	Bottom Lift Distance:	<input type="text" value="5.000"/>	+	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Bottom Layer Count:	<input type="text" value="6"/>		Lifting Distance:	<input type="text" value="8.000"/>	+	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Exposure Time:	<input type="text" value="4.500"/>	s	Bottom Retract Distance:	<input type="text" value="5.000"/>	+	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Bottom Exposure Time:	<input type="text" value="50.000"/>	s	Retract Distance:	<input type="text" value="8.000"/>	+	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Waiting Mode During Printing:	<input type="text" value="Restin..."/>		Bottom Lift Speed:	<input type="text" value="100.000"/>	&	<input type="text" value="0.000"/>	mm/min
Rest Time Before Lift:	<input type="text" value="0.000"/>	s	Lifting Speed:	<input type="text" value="250.000"/>	&	<input type="text" value="0.000"/>	mm/min
Rest Time After Lift:	<input type="text" value="0.000"/>	s	Bottom Retract Speed:	<input type="text" value="210.000"/>	&	<input type="text" value="0.000"/>	mm/min
Rest Time After Retract:	<input type="text" value="0.500"/>	s	Retract Speed:	<input type="text" value="120.000"/>	&	<input type="text" value="0.000"/>	mm/min

Figura 6-1: Parámetros de impresión utilizados.

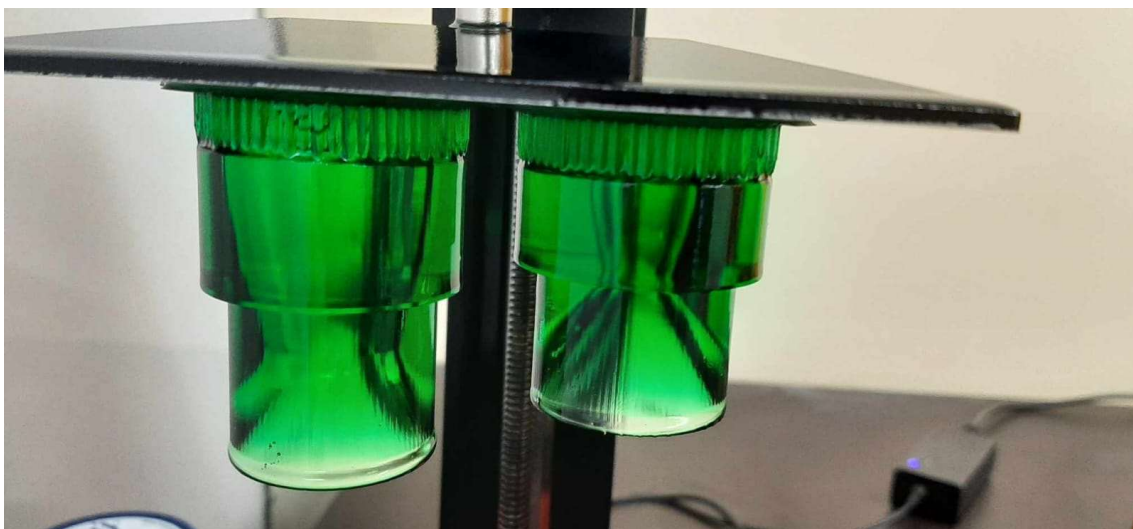


Figura 6-2: Toberas impresas.

6.1.2. *Tobera maquinada*

La segunda iteración de la tobera se elaboró con acero 316L por proceso de maquinado en torno CNC.

Esta tobera tiene el objetivo de reducir los efectos erosivos durante la operación del motor y así reducir el coeficiente de variación presentado en la experimentación con toberas fabricadas por fotopolimerización en tanque.

6.2. Carcasa

Para la carcasa de los motores se seleccionaron nipples de 1¼” de diámetro y ¼ ft de largo de hierro negro como material.

La punta con rosca se mantiene para que se coloque una tapa que sirva como tope del propelente y cumpla el propósito de que la carcasa esté cerrada de uno de sus extremos.

La otra punta de la carcasa debe permitir la inserción de la tobera impresa y en el paso de la tobera maquinada debe contar una rosca que permita colocar el conector Tobera-Carcasa.

6.3. Ensamblaje del motor - Tobera FFT

Se requiere de los siguientes componentes:

1. Grano de propelente.
2. Carcasa del motor.
3. Tapadera de la carcasa. (Tapa roscada según las medidas del nipple original.)
4. Tobera impresa.
5. Adhesivo epóxico.
6. Mecha de ignición.

El primer paso fue adherir la tobera a la carcasa, para esto se aplicó pegamento epóxico en la zona de contacto entre las dos piezas y se dejó curar por 24 horas. Después, se colocó la mecha dentro del núcleo del grano. El grano se colocó dentro de la carcasa deslizándolo hacia dentro con cuidado que la mecha saliese por el extremo de la tobera. Por último, se cerró la carcasa con la tapadera. En la Figura 6-3 se muestra un motor de tobera de resina ensamblado.

6.4. Ensamblaje del motor - Tobera maquinada

Se requiere de los siguientes componentes:

1. Grano de propelente.
2. Carcasa del motor.
3. Tapadera de la carcasa. (Tapa roscada según las medidas del nipple original.)



Figura 6-3: Referencia de motor con tobera impresa ensamblado (sin mecha).

4. Tobera maquinada.
5. Conector de rosca interna.
6. Mecha de ignición.

Para unir la tobera a la carcasa se hace uso de un conector y sólo basta con enroscar las tres piezas juntas. Después, se colocó la mecha dentro del núcleo del grano. El grano se colocó dentro de la carcasa deslizándolo hacia dentro cuidado que la mecha saliese por el extremo de la tobera. Por último, se cerró la carcasa con la tapadera. En la Figura 6-4 se muestra un motor de tobera de acero ensamblado.

6.5. Experimentación

En el apartado IX del reglamento del laboratorio de propelentes, el cual está presente en el Apéndice A este documento, quedan señalados los lineamientos necesarios para el proceso de experimentación.



Figura 6-4: Referencia de motor con tobera maquinada ensamblado (sin mecha).

6.5.1. Zona de pruebas

La zona de pruebas es una base cuadrada de 1.5 m de lado y una altura de 2.5 m, con una estructura principal tipo jaula que permita la contención de posibles proyectiles a causa de un fallo en el banco de pruebas.

La base tiene dimensiones de 1.5 x 1.5 x 0.15 metros. Es del tipo firme de concreto, se colocó una malla electro-soldada como núcleo de la estructura para prevenir la ocurrencia de fracturas críticas. La proporción para el concreto fue de 1, 3, 3, 1.5 (cemento, arena común, grava y agua). Se solicitó un espacio a las autoridades pertinentes de preferencia en una zona periférica.

La zona de pruebas terminada se muestra en la Figura 6-6.

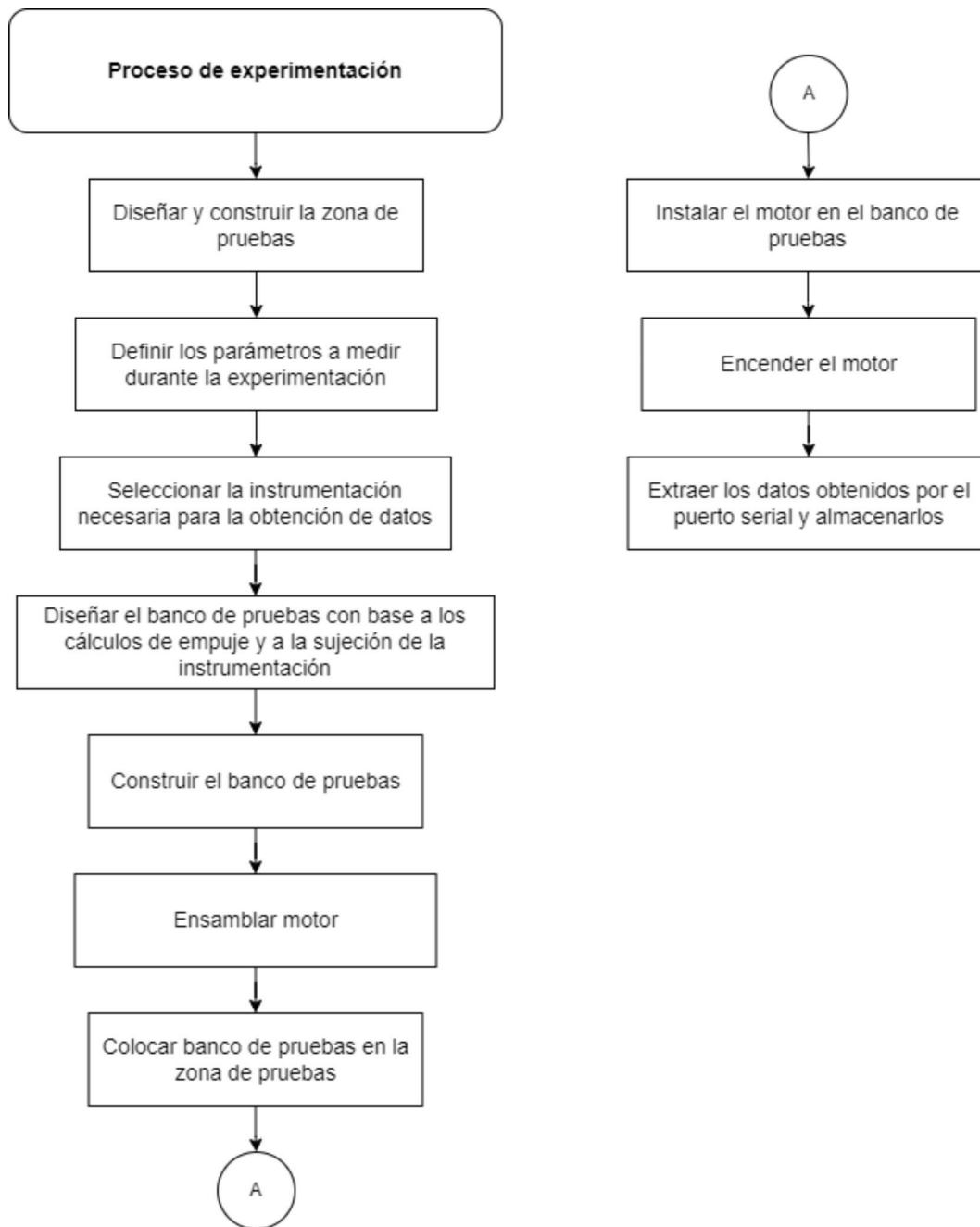


Figura 6-5: Proceso de experimentación.

6.5.2. Banco de pruebas

Para el banco de pruebas se usó un armazón hecho de perfiles 2020 de aluminio extruido. El diseño se realizó en un software CAD/CAM y se tuvo en consideración los motores con presión interna operativa de 1MPa.



Figura 6-6: Zona de pruebas utilizada para experimentación.

El diseño de la sujeción del motor restringe la traslación y rotación a lo largo de los ejes X e Y, permitiendo únicamente dos grados de libertad. En la Figura 6-7 se muestra el diseño de banco de pruebas (a) y el producto ensamblado (b).

6.5.3. Instrumentación

Para la obtención de datos de empuje se usó una galga extensiométrica montada en un banco de pruebas. La galga extensiométrica tiene un rango de medición de 0 a 200 kg. Se utiliza el hardware Arduino y su interfaz de desarrollo para la programación. Para el registro de los datos se utiliza el software PuTTY, software que permite leer y extraer los datos del puerto serial para su almacenamiento y procesamiento. En la Figura 6-8 se muestra la configuración electrónica utilizada.



(a) Diseño renderizado del banco de pruebas.



(b) Banco de pruebas manufacturado.

Figura 6-7: Banco de pruebas.

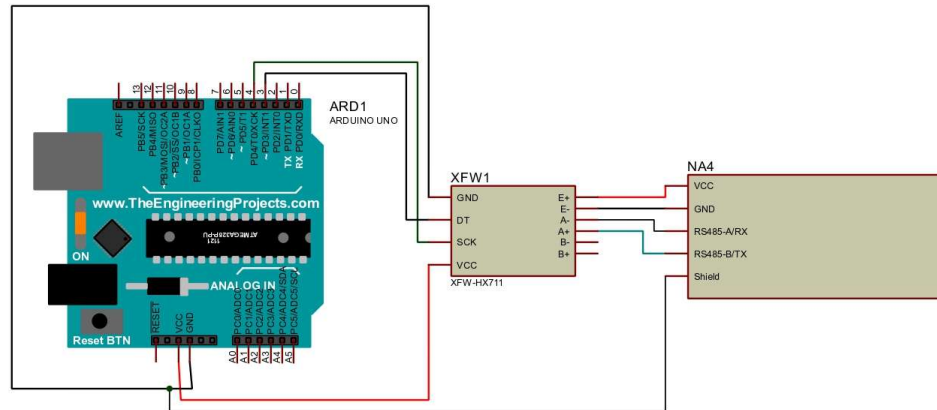


Figura 6-8: Diagrama eléctrico para la obtención de datos.

Capítulo 7

Resultados

Granulometría

En la Figura 7-1 se muestra la evidencia de que se pueden alcanzar tamaños de partícula de diámetros promedio de categoría ultrafina. También se hace evidente la necesidad de un proceso de tamizado para poder separar los distintos tamaños de partícula. En la Figura 7-2 se presenta la misma muestra de la Figura 7-1, sólo que en una menor magnificación para poder apreciar la distribución de tamaños de partícula.

La Tabla 7-1 resume tamaños de partícula obtenidos en un total de 300 mediciones de partículas.

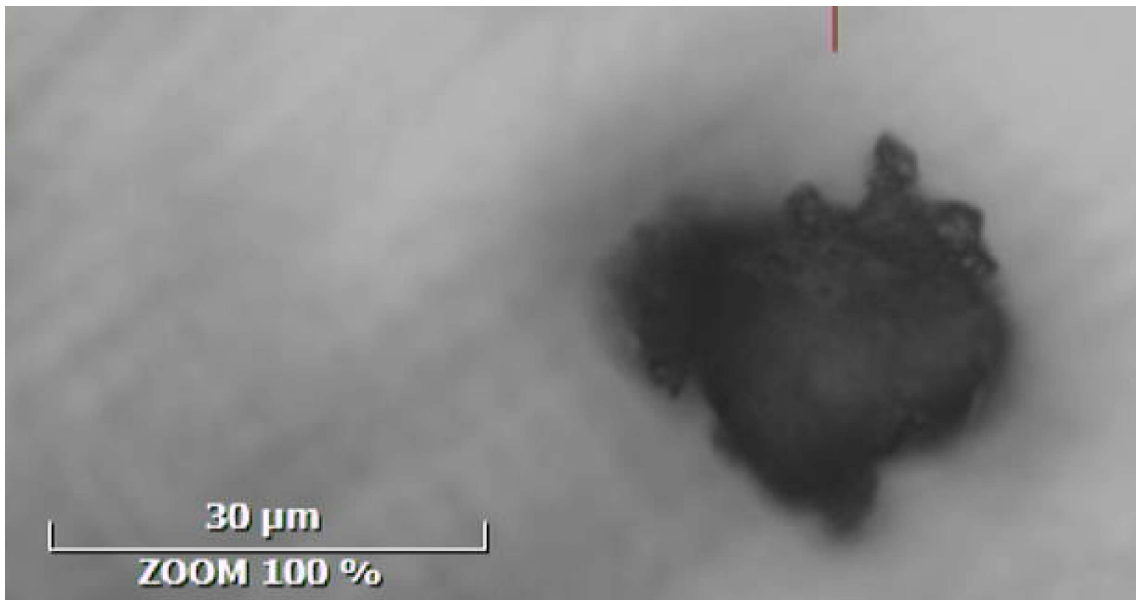


Figura 7-1: Muestra de molido en 5 ciclos (magnificación de 50x)

Tabla 7-1: Diámetros promedio de partícula de KNO_3 molido.

Muestra	$D_{\bar{x}}$ (μm)
1(medianos)	29.44
2(medianos)	18.321
3(medianos)	34.165
4(finós)	2.435
5(finós)	3.622
6(finós)	2.821

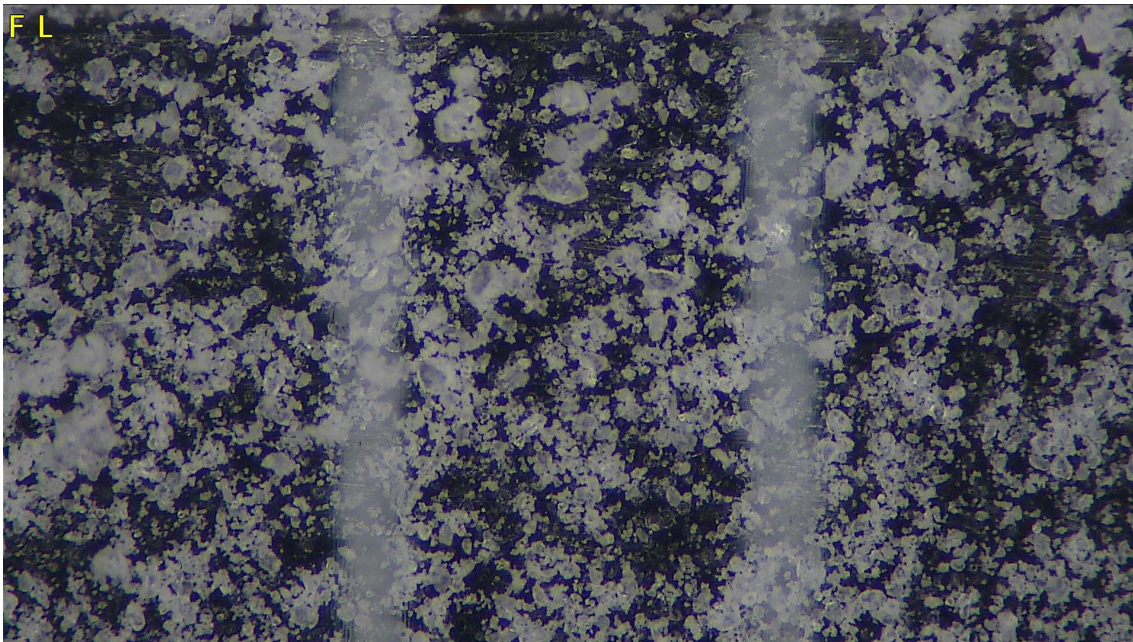


Figura 7-2: Muestra de grano molido en 5 ciclos (magnificación de 6x)

Desempeño de las toberas FFT y propelente KNSB

A continuación se muestran los resultados de desempeño de las pruebas realizadas con motores de propelente KNSB y tobera FFT.

Empuje - Toberas FFT

Las curvas de empuje de las pruebas realizadas con las toberas impresas se muestran en las Figuras 7-4 a 7-7. Mientras que las cuatro pruebas se realizaron con la misma configuración de propelente y grano, las Figuras 7-4 y 7-5 muestran un curva de empuje con comportamiento fue neutro pese a haberse esperado un desarrollo progresivo propio del núcleo circular con el que fue manufacturado el grano. En cuanto a las curvas de las Figuras 7-6 y 7-7 sí se presentó el comportamiento progresivo del empuje a lo largo del tiempo.

Referente al empuje máximo que se presentó en cada una de las pruebas, estos están anotados en la Tabla 7-2. Observamos un empuje máximo promedio de 144.995 N con una desviación estándar de 19.09 N y un coeficiente de variación del 13.16%, por lo que el empuje máximo promedio sí es considerado representativo de la muestra

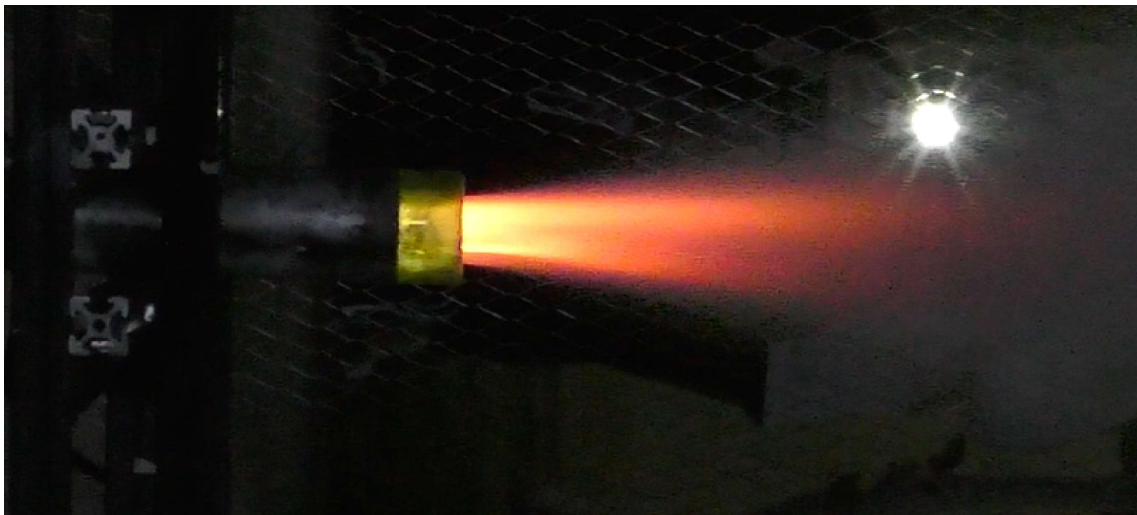


Figura 7-3: Evidencia del motor KNSB con tobera de resina operativo.

Tabla 7-2: Resumen de empujes máximos en las pruebas.

Prueba	Empuje máximo (N)
20-02-24 (1)	152.94
21-02-24 (1)	128.45
22-02-24 (1)	168.26
22-02-24 (2)	130.33

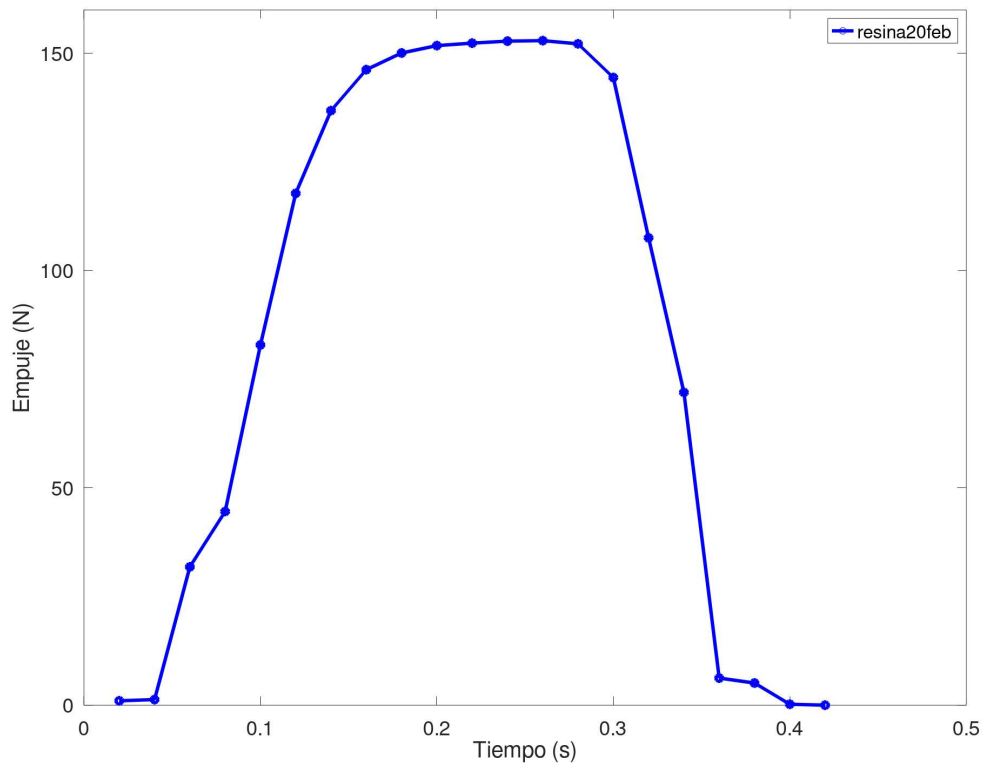


Figura 7-4: Curva de empuje del 20 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.

Erosión - toberas FFT

En la Figura 7-8 se muestra la comparación entre una tobera antes de ser utilizada y otra después de operación. Los efectos erosivos por los gases de escape presentaron un desgaste promedio de 4.54 mm en el diámetro de la garganta.

Desempeño de las toberas maquinadas y propelente KNSB

La tobera sólo se probó una vez debido a la falta de suavidad de la curva de empuje, lo que indicaba la necesidad de mayor sensibilidad para la adquisición de datos.

Tras la operación, no se encontraron muestras de erosión en la tobera de acero.

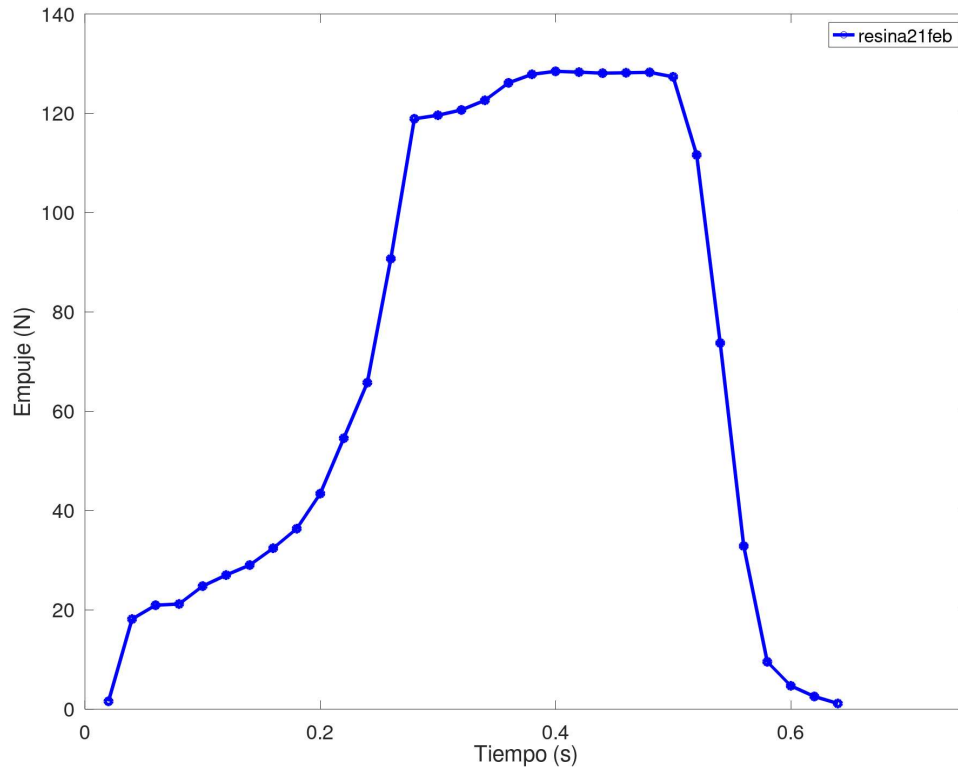


Figura 7-5: Curva de empuje del 21 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.

Desempeño de las toberas FFT y propelente EPOXI

La prueba realizada con un motor de propelente Epoxi y tobera FFT presentó un empuje máximo de 4.2 N y tiempo de operación de 3.88 s. Este poco rendimiento en cuestión de empuje fue motivo para descartar la experimentación posterior con este propelente. En la Figura 7-9 se muestra el desempeño de este motor.

Comparación de desempeño de motores de propelente KNSB

En la Figura 7-10 se realiza la comparación de los desempeños de los motores de propelente KNSB para toberas FFT y tobera maquinada.

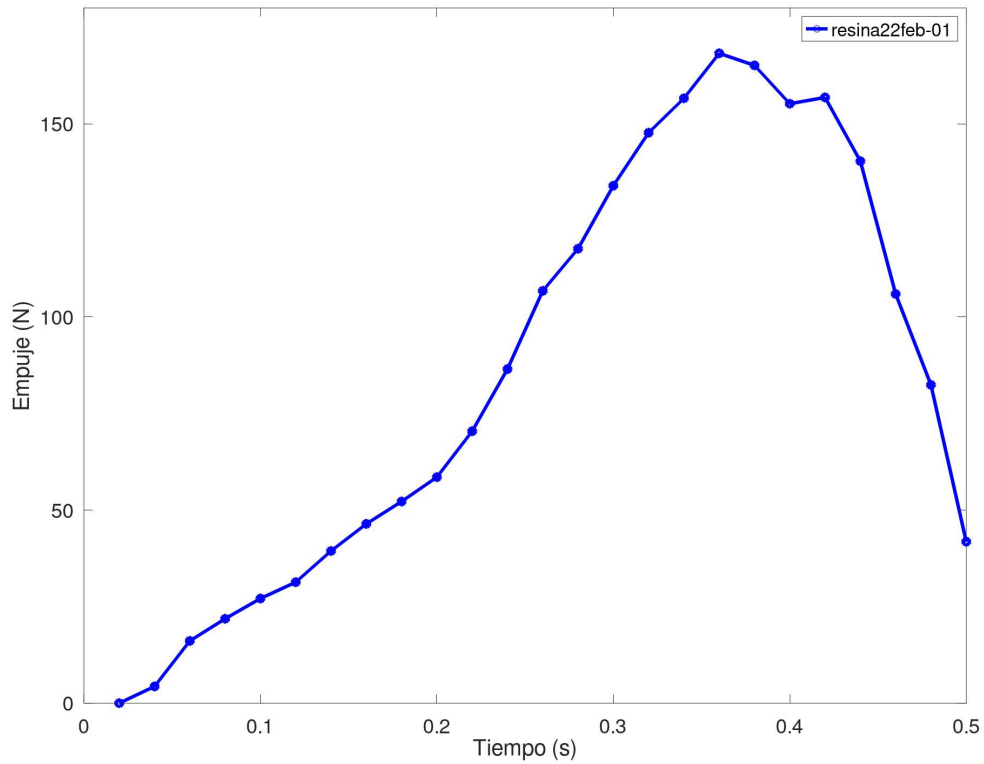


Figura 7-6: Curva de empuje (1) del 22 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.

Reglamento del laboratorio

Con la finalidad de salvaguardar la salud y seguridad de las personas que participaron en el proyecto sin olvidar tampoco a las personas que se encontraron cerca de donde se realizaron las actividades descritas por la investigación se desarrolló un reglamento interno en conjunta colaboración de los integrantes del proyecto y los profesores asesores.

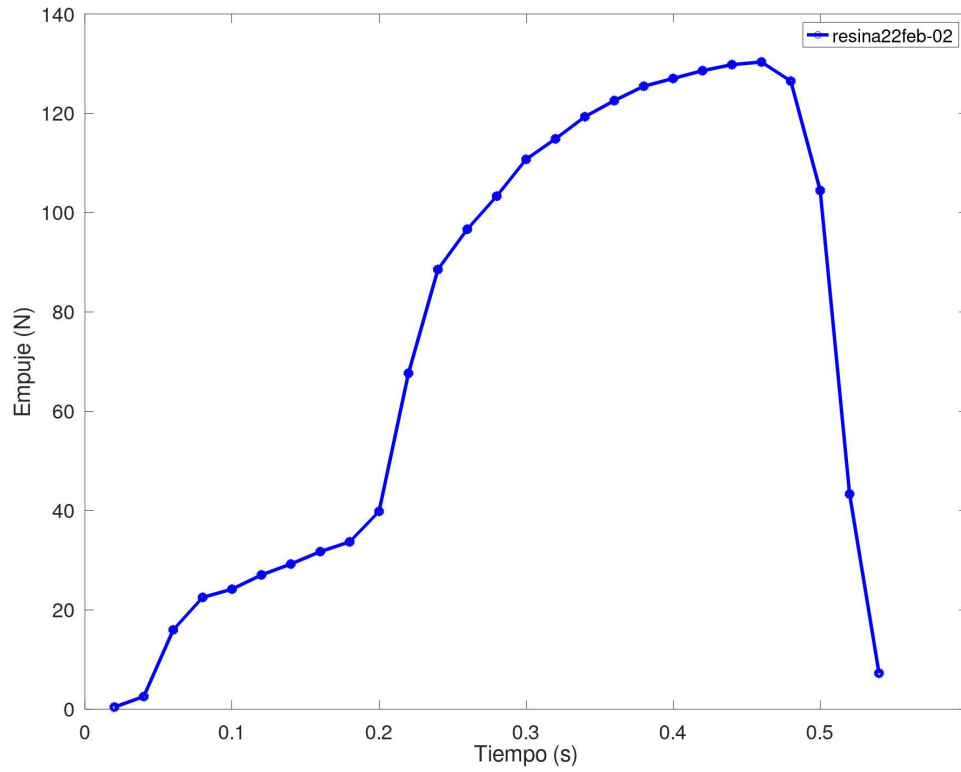


Figura 7-7: Curva de empuje (2) del 22 de febrero. Motor KNSB con tobera impresa.

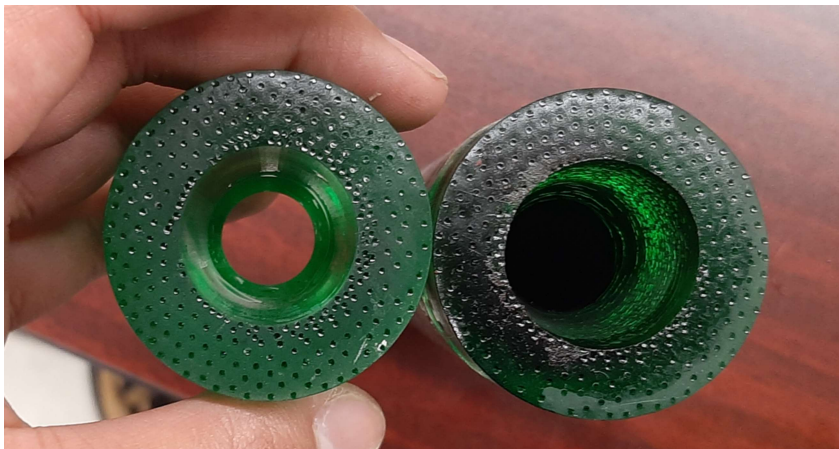


Figura 7-8: Comparación: toberas antes de la prueba (izquierda) y después de la prueba (derecha).

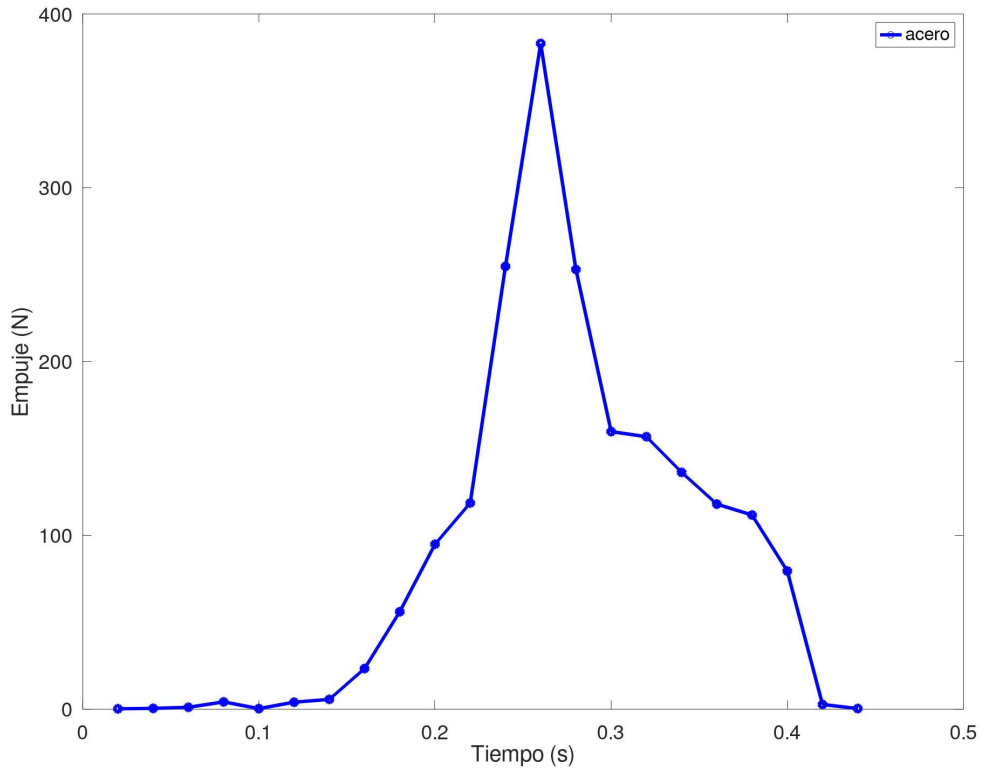


Figura 7-9: Curva de empuje de motor KNSB con tobera de acero.

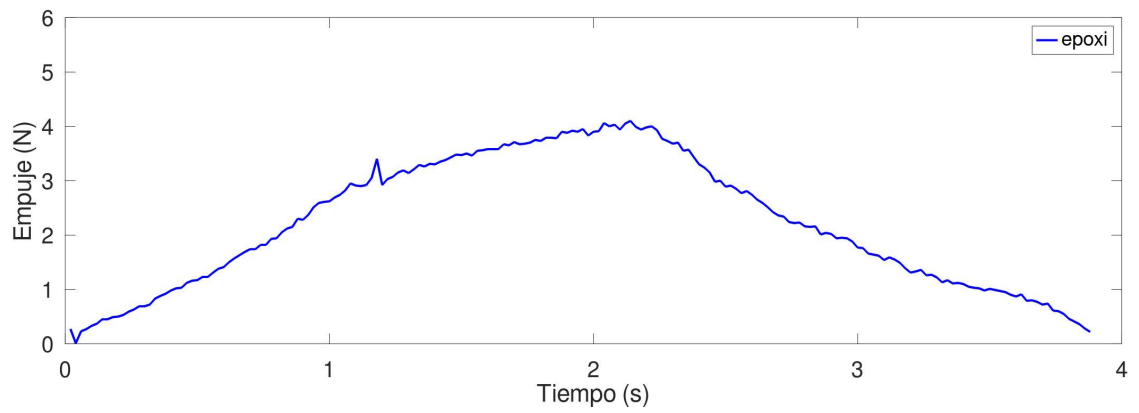


Figura 7-10: Evidencia del motor KNSB operativo.

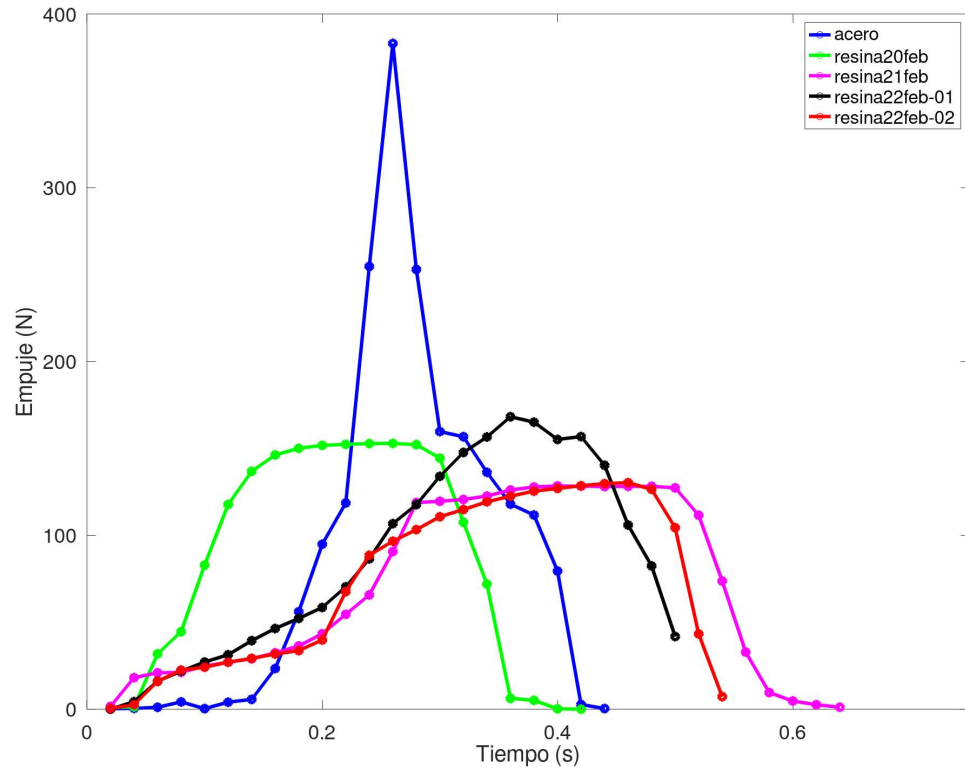


Figura 7-11: Evidencia del motor KNSB operativo.

Capítulo 8

Conclusiones

Las toberas fabricadas por fotopolimerización en tanque utilizando motores KNSB a una presión operativa de 1 MPa presentan un empuje máximo constante de 144.995 N con un coeficiente de variación del 13.16% en relación a la desviación estándar de 19.08, por lo que este empuje máximo es representativo de la muestra.

En cuanto a los ingredientes utilizados para la elaboración de los propelentes, el nitrato de potasio de grado fertilizante mostró ser una alternativa accesible en la región, sumado a que su manipulación antes de entrar al proceso de refinado es segura debido que su tamaño de partícula es grueso y su desempeño ha sido evidenciado en trabajos de investigación como el de Richard Nakka. En cuanto al sorbitol, su fácil manipulación y accesibilidad lo hacen la mejor alternativa frente a la sacarosa, cuyo efecto de cristalización durante la síntesis a alta temperatura tiende a provocar imperfecciones durante el casteo de los granos.

Un punto importante es que los procesos de manufactura empleados dentro de esta investigación deben ser normalizados con ayuda de equipo específico para su elaboración, cabe destacar que la experiencia del operador en la manufactura de un grano de propelente resulta indispensable, haciéndolo un proceso altamente susceptible al error humano.

Pese a que el empuje máximo promedio sea representativo de la muestra, resulta imposible identificar a las toberas impresas como la alternativa en vanguardia para el desarrollo de motores con granos de propelente sólido de categoría experimental debido a la inconsistencia del comportamiento presentado en las curvas de empuje mostradas en los resultados de este trabajo. Esto se debe a la erosión presentada en las toberas, lo cual reduce su eficiencia al no poder mantener la presión operativa requerida. Sin embargo, el bajo costo del material de aporte y la facilidad del proceso de manufactura empleado aportan valor a las toberas impresas dentro del rubro académico ya que brindan accesibilidad de experimentación para múltiples tipos de diseño producto de las clases afines al desarrollo de motores de propulsión de cohetes, no obstante no descartamos que otro tipo de material pueda tener mejor comportamiento, pero esto es un alcance fuera de este trabajo.

En cuanto a las toberas de acero, se requiere de una instrumentación más precisa para poder apreciar los cambios en el empuje a lo largo del tiempo. Esta mejora en los sistemas de medición también permitiría medir la diferencia de desempeño entre distintas razones de tamaño de partícula en el oxidante. Aún con esto mencionado, el crecimiento en el empuje máximo es notable (383.03 N registrados) y por lo tanto se espera un mejor desempeño.

El motor con grano de propelente EPOXI mostró un empuje máximo de los 4 N y una erosión de tobera equivalente a tres veces el diámetro original. Además, tomando en consideración que el proceso de manufactura de estos granos de propelente resulta más complejo que los de KNSB, se optó por descartar el estudio de estos propelentes hasta que se manufacture la tobera de acero. La razón de manufactura una tobera de mayor calidad para un propelente que en papel y práctica demuestra ser ineficiente es que sus tiempos de operación largos en comparación con los de KNSB facilitan la observación de fenómenos de flujo compresible, lo que les aporta un valor académico dentro de la dinámica de fluidos.

Apéndice A

Apéndice

Reglamento del laboratorio de propelentes sólidos

Elaborado por: Alfaro Perez Alejandro y Ramírez Valdez Jesús.

Aprobado por: Dr. Ortiz Pérez Alejandro Sebastián.

Objetivo

El presente documento tiene como objetivo establecer nuevos lineamientos y normas de seguridad, que permitan la creación y correcto uso de un nuevo espacio en las instalaciones del LABORATORIO DE INGENIERÍA AEROSPACIAL; espacio que tendrá como meta la adquisición, almacenamiento, diseño, síntesis y manejo de propelentes sólidos.

Alcance

Se establecen claramente las reglas, derechos y obligaciones de los profesores, alumnos y personal de laboratorio que harán uso del Laboratorio de Combustibles y Motores-Cohete.

Sustento

Este reglamento tendrá sustento en diferentes normas proporcionadas por la Norma Oficial Mexicana (NOM), con el fin de asegurar que el reglamento tiene un sustento oficial y facilitar la creación, entendimiento y cumplimiento de este. Específicamente las normas:

- NOM-002-STPS-2010
- NOM-005-STPS-1998
- NOM-114-STPS-1994
- NOM-018-STPS-2015

I. Del ingreso al laboratorio

1. El acceso al laboratorio será restringido, y sólo podrá acceder personal autorizado por el asesor encargado del proyecto.
2. Personal docente y alumnos deben portar bata de trabajo ignífuga y antiestática al momento de entrar al laboratorio.
3. Personal docente y alumnos que ingresen al laboratorio deben contar con seguro facultativo vigente o algún otro seguro médico.

II. De las medidas de seguridad del laboratorio

1. El laboratorio debe contar obligatoriamente con equipo contra incendio portátil de agente extintor químico húmedo, para extinguir incendios de clase A, B, C.
2. Queda totalmente prohibida la utilización de llama (fuego) o cualquier agente inflamable dentro del espacio de laboratorio (cigarros, encendedores, cerillos, etc.).
3. Contar con salida de emergencia sin ningún tipo de obstrucción.
4. Se debe contar con un extractor de humo, para evitar la creación de una atmósfera inflamable en el laboratorio.
5. El laboratorio debe de contar con equipo contra incendio fijo, ya sea sistema de rociadores automáticos o sistema de aspersores (para incendio clase A, B, C).
6. El laboratorio debe contar con espacio seguro para el almacenamiento de los reactivos a utilizar.

7. El laboratorio debe contar con un área de trabajo segura donde se puedan manipular los reactivos a utilizar.
8. Según la NOM-005-STPS-1998, paredes, pisos, techos, instalaciones y cimientos donde se manejen las sustancias peligrosas deben ser de materiales resistentes al fuego.

III. De las medidas de seguridad del personal

1. Cualquier persona que entre y permanezca en el área de laboratorio deberá portar obligatoriamente bata de laboratorio ignífuga y antiestática.
2. Se debe portar mascarilla con filtro de vapores, guantes de látex o nitrilo; y lentes de seguridad con empaque cuando se realice el manejo de reactivos.
3. Toda persona debe portar ropa adecuada para el ingreso al laboratorio, evitando tener cualquier parte del cuerpo al descubierto (en la medida de lo posible).
4. Obligatorio el uso de cofia y cabello recogido en el espacio de laboratorio.
5. Según la NOM-005-STPS-1998, está prohibido el uso de herramientas, ropa, zapatos y objetos que puedan generar chispas, flama abierta o temperaturas elevadas.

IV. Reactivos (Generalidades)

1. **Definición:** los reactivos son las sustancias que se manejan en el laboratorio y que se utilizan para la síntesis del combustible.
2. El oxidante permitido dentro del espacio de laboratorio es nitrato de potasio de grado laboratorio o fertilizante.
3. Los combustibles permitidos son: sorbitol, sacarosa y resina epóxica.
4. Los aditivos permitidos son: carbón, azufre, óxido de hierro y catalizador para resina epóxica.
5. El manejo de cualquier otra sustancia no autorizada queda totalmente PROHIBIDO.

V. Almacenamiento de reactivos

1. Se deben identificar los recipientes que contengan sustancias químicas peligrosas conforme a lo establecido en la NOM-114-STPS-1994, NOM-018-STPS-2015 o Directiva 1272/2008/EC.

2. Según la Directiva 1272/2008/EC el nitrato de potasio grueso (diámetro de partícula igual o superior a 200 μm) debe ser almacenado con el pictograma “materia explosiva” (categoría 1, división 1.3), con la palabra de advertencia: **ATENCIÓN**.
3. El nitrato de potasio fino (diámetro de partícula entre los 5 y 15 μm) y ultrafino (diámetro de partícula entre los 0 y 5 μm) debe ser es considerado como “materia explosiva” de categoría 1, división 1.1, por lo que su almacenamiento queda estrictamente **PROHIBIDO**.
4. Los recipientes que contengan sustancias químicas peligrosas (nitrato de potasio), deben permanecer cerrados mientras no estén en uso.
5. Se debe evitar que los recipientes de almacenamiento presenten fugas de los reactivos utilizados.
6. Se debe contar con una zona específica para el almacenamiento de las sustancias peligrosas (nitrato de potasio).
7. El nitrato de potasio (oxidante) debe mantenerse alejado del fuego y altas temperaturas.
8. El nitrato de potasio debe ser almacenado en un lugar seco y fresco.

VI. Manejo de reactivos

1. **OBLIGATORIO** el uso de equipo de protección cuando se manejen los reactivos (especificado en apartado III).
2. Mientras se realice la manipulación de reactivos, el acceso de personas no autorizadas queda totalmente **PROHIBIDO**.
3. La manipulación de reactivos y la síntesis del propelente sólo puede ser realizada con previa autorización.
4. Cada sustancia debe tener su vaso de precipitado específico para su manipulación.
5. El secado de los reactivos (oxidante y combustible) **NUNCA** debe realizarse al mismo tiempo ni en el mismo recipiente.
6. El molido de los reactivos (oxidante y combustible) **NUNCA** debe realizarse al mismo tiempo ni en el mismo recipiente.
7. El mezclado de los reactivos (oxidante y combustible) debe realizarse en un recipiente hermético.
8. La mezcla de reactivos sólo está permitida para la síntesis de propelente, cualquier otro fin queda totalmente **PROHIBIDO**.
9. Se debe utilizar **EXCLUSIVAMENTE** cama caliente para la síntesis de propelente. El uso de sistemas de calentamiento por llama queda estrictamente **PROHIBIDO**.
10. La mesa de trabajo debe ser de metal.

11. Queda totalmente **PROHIBIDO** sintetizar un grano propelente de masa mayor a 300 g.

VII. Limpieza del laboratorio

1. El área de trabajo debe ser limpiada después de cada actividad relacionada con el manejo de reactivos.
2. Los vasos de precipitado utilizados deben ser limpiados con agua y jabón para neutralizar el oxidante.
3. El sartén utilizado debe ser lavado utilizando agua y jabón para neutralizar el oxidante.
4. La mesa de trabajo debe ser limpiada con agua y jabón.
5. Cualquier residuo (ya sea oxidante, carburante o mezcla de combustible), debe ser primeramente neutralizado en agua.
6. **PROHIBIDO** desechar los residuos sin antes ser neutralizados.
7. Utilizar guantes de látex o nitrilo para realizar la limpieza de todo el equipo que estuvo en contacto con los reactivos y mezclas.

VIII. Almacenamiento de propelentes

1. El grano propelente sintetizado debe ser almacenado en un recipiente especial, y no debe ser mezclado con ningún otro tipo de sustancia.
2. Basado en NOM-018-STPS-2015, el recipiente debe contar con el pictograma LLAMA (Sólidos inflamables categoría 2), con la palabra: **ATENCIÓN**.
3. Basado en NOM-018-STPS-2015, el recipiente debe contar con el pictograma BOMBA EXPLOTANDO (División 1.4, Peligro de incendio o de proyección), con la palabra: **ATENCIÓN**.
4. Solo se puede **ALMACENAR MÁXIMO DE 1 KG DE PROPELENTE** (masa combinada), y la masa de los granos propelentes no podrá superar los 300 gramos por unidad (establecido en el apartado VI, punto 11).
5. El máximo tiempo que se puede almacenar un grano propelente es **1 SEMANA**, pasado este tiempo el grano propelente tendrá que ser disuelto en agua.
6. Queda **PROHIBIDO** el manejo del propelente fuera de su recipiente de almacenamiento.
7. El propelente no se puede retirar de la bodega o lugar de almacenamiento, a menos que se autorice.

IX. De la experimentación

1. Toda experimentación y ensamblaje de motores sin autorización y sin presencia de personal académico queda totalmente **PROHIBIDA**.
2. Para toda autorización de experimentación y ensamblaje de motores se debe presentar por escrito la prueba a realizarse y la simulación de la prueba en cuestión.
3. **OBLIGATORIO** el uso de equipo de protección cuando se manipulen los propelentes y/o motores durante el proceso de experimentación (especificado en apartado III).
4. El mecanismo de ignición de los motores debe constar de una unión de los siguientes:
 - a. Mecha rápida de longitud equivalente al largo del motor.
 - b. Mecha lenta cuya longitud permita el paso de un minuto (1 min) de tiempo una vez encendida.
 - c. Encendedor electrónico a distancia unido a la sección de mecha lenta cuya alimentación de corriente debe ser instalada hasta el momento de la prueba.

Ante la ausencia de uno de los elementos anteriores toda prueba debe ser **CANCELADA**.

5. Queda totalmente **PROHIBIDO** el almacenamiento de motores ensamblados.
 6. Toda experimentación debe realizarse en la zona designada.
 7. La zona de pruebas debe contar con lo siguiente:
 - a. Firme de concreto nivelado.
 - b. Marco de acero.
 - c. Paredes y techo de láminas de acero perforadas.
 - d. Banco de prueba con sujeción para el motor que limite los momentos rotacionales.
 8. La instalación de instrumentación para monitoreo y captura de datos debe ser realizada previo a la instalación del motor en el banco de pruebas.
 9. La instalación del motor en el banco de pruebas debe realizarse sin la posesión de artículos que puedan producir chispa o llama.
 10. Una vez finalizada la instalación del motor en el banco de pruebas, la zona de pruebas debe permanecer cerrada hasta que se finalice con la prueba en cuestión.
 11. El mecanismo de ignición sólo debe ser activado si se cumplen con los 1 al 10 del apartado IX.
-

Referencias

1. Advisory Group for Aerospace Research & Development. (1988) Design Methods in Solid Rocket Propulsion. Specialized Printing Services Limited.
2. Bouziane, M., Bertoldi, A. E. M., Milova, P., Hendrick, P., & Lefebvre, M. (2018). Development and testing of a lab-scale test-bench for hybrid rocket motors. 15th International Conference on Space Operations, 2018. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2722>
3. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*, 7ma. ed. México: MCGRAW-HILL.
4. Chaturvedi, S., & Dave, P. N. (2019). Solid propellants: AP/HTPB composite propellants. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 12, Issue 8). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.033>
5. Chemical Propulsion Information Agency, Hazards of Chemical Rockets and Propellants. (1972) Vol. II, Solid Rocket Propellant Processing, Handling, Storage and Transportation. NTIS AD-870258.
6. Davenas, A. (Ed.). (2012). Solid rocket propulsion technology. Newnes.
7. Gaceta UdeG. (s.f.) UdeG Space gana en encuentro de cohertería. <https://www.gaceta.udg.mx/udeg-space-gana-primer-lugar-encuentro-de-coheteria/>
8. Gligorijevic, N., Zivkovic, S., Rodic, V., Antonovic, S., Milojkovic, A., Pavkovic, B., & Novakovic, Z. (2016). Reliability of solid rocket propellant grain under simultaneous action of multiple types of loads. *Scientific Technical Review*, 66(4). <https://doi.org/10.5937/str1604008g>
9. Hill, P. & Peterson, C. (1992) *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*. Addison Wesley.
10. Jain, U., Shukla, H., Kapoor, S., Pandey, A., & Nirwal, H. (2020). Design and analysis of 2-axis rocket motor stand for thrust vectoring. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3920>
11. Kelly, J. (2004) *Gunpowder: alchemy, bombards, and pyrotechnics : the history of the explosive that changed the world*. New York: Basic Books
12. Kubota, N. (1984) "Survey of Rocket Propellants and Their Combustion Characteristics," American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
13. Kuo, K. & Martin, S. (1984) *Fundamentals of Solid-Propellant Combustion*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc
14. Lysien, K., Stolarczyk, A., & Jarosz, T. (2021). Solid propellant formulations: A review of recent progress and utilized components. In *Materials* (Vol. 14, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/ma14216657>
15. Mishra D. P. (2017). *Fundamentals of Rocket Propulsion*, 1ra. ed. Florida, Estados Unidos: CRC Press by Taylor & Francis Group, LLC.
16. Nakka, R. (2024, 1 de marzo) *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site*. Disponible en: <https://www.nakka-rocketry.net/>
17. Prakash, J.(2010). *High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Wiley.
18. Pranda, P., Prandová, K., & Hlavacek, V. (2000). Particle size and reactivity of aluminum powders. *Combustion Science and Technology*, 156(1–6). <https://doi.org/10.1080/00102200008947297>
19. Ruis, F. (2019) Study, implementation and test of a solid propellant rocket motor. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.
20. Russell, M. S. (2009). *The chemistry of fireworks*. Royal Society of Chemistry.
21. Sutton, G. P. (2001). *Rocket Propulsion Elements: an introduction to the engineering of rockets*. In *Rocket propulsion elements*.

22. Thomas, J. C., Stahl, J. M., Morrow, G. R., & Petersen, E. L. (2016). Design and characterization of a lab-scale hybrid rocket test stand. 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2016.
23. UNOTV.COM (2023) UNAM construye cohetes con tecnología 100
24. Yang, V., Brill, T. & Ren, W. (2000) Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.