

RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO
2. TÍTULO: Estudio de viabilidad del polímero Acrilonitrilo Butadieno Estireno como combustible para motores-cohete híbridos en Colombia.
3. AUTOR (ES): Henry Mauricio Lozada Ardila
4. LUGAR: Bogotá, D.C
5. FECHA: 11 de abril de 2019
6. PALABRAS CLAVES: Combustión Híbrida, Motor Cohete, Motor Híbrido, Acrilonitrilo Butadieno Estireno, Cera De Parafina, Polibutadieno Hidroxiterminado, Manufactura Por Deposición Fundida, Impulso Especifico
7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: Esta investigación busca estudiar la viabilidad de uso del ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), como combustible sólido alternativo en motores cohete híbridos a nivel nacional; realizando un proceso de caracterización experimental del combustible, aplicando un análisis teórico y comparandolo en diferentes criterios con otros tipos de combustible, como lo son la parafina y el HTPB.
8. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Línea de Investigación de la USB: Energía y propulsión
9. METODOLOGÍA: Este proyecto se desarrolló con una metodología de carácter empírico analítico, con un enfoque en la comparación de combustibles, en diferentes criterios.
10. CONCLUSIONES: El ABS es un combustible viable para el desarrollo de cohetería experimental en Colombia, pues puede ser manufacturado de manera sencilla por medio de tecnología FDM, los costos de obtención de insumos no son elevados. Adicionalmente es de fácil consecución en el mercado, sus datos experimentales pueden ser corroborados teóricamente por software de distribución abierta como es el caso de CEARUN-NASA, y puede ser reutilizado y reciclado al tener características termoplásticas.

**Estudio de viabilidad del polímero Acrilonitrilo Butadieno Estireno  
como combustible para motores-cohete híbridos en Colombia.**

Henry Mauricio Lozada Ardila

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá  
Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Bogotá D.C.  
2018

**Estudio de viabilidad del polímero Acrilonitrilo Butadieno Estireno<sup>ii</sup>  
como combustible para motores-cohete híbridos en Colombia.**

Henry Mauricio Lozada Ardila

**DIRECTOR:**  
M.Sc José Alejandro Urrego Peña

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá  
Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Bogotá D.C.  
2018

## **Dedicatoria**

Dedico esta investigación a aquellos estudiantes que a pesar de las adversidades han continuado con sus estudios, y aquellas personas que siempre han mantenido el deseo de aprender más y asombrarse más con el fin de ayudar a los demás.

## **Agradecimientos**

iv

Primero agradezco a Dios, por todas las pruebas y bendiciones que puso en el desarrollo de esta investigación, así como en el trascurso de mis estudios de pregrado. También agradezco la ayuda de mi familia, en especial la de mi madre, pues sin su apoyo no hubiera llegado a este punto. Agradezco enormemente la tutoría, guía y ayuda del ingeniero José Alejandro Urrego para el desarrollo del proyecto, recalcando su vasto conocimiento en el tema y su constante disposición para fomentar y guiar la investigación, adicionalmente agradezco la ayuda del ingeniero Guillermo Ceballos para el desarrollo experimental, al ingeniero Christopher Snyder por su ayuda en el desarrollo teórico, a la ingeniera Myriam Stella Ardila y al ingeniero Duquerio Antonio Bonilla por su ayuda en desarrollo del documento.

# Contenido

v

1. Introducción .....	1
2. Planteamiento de problema.....	3
2.1 Antecedentes .....	3
2.2 Descripción y formulación del problema.....	9
2.3 Objetivos .....	11
2.4 Alcances y Limitaciones .....	12
3. Marco teórico y conceptual.....	13
3.1 Propulsión híbrida.....	13
3.2 Elementos de la combustión .....	16
3.3 ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) .....	16
3.4 Cera de Parafina .....	18
3.5 Polibutadieno Hidroxiterminado (HTPB).....	19
3.6 Óxido Nitroso.....	20
3.7 Relación O/F .....	20
3.8 Empuje .....	21
3.9 Coeficiente de empuje.....	22
3.10 impulso total.....	23
3.11 impulso específico .....	24
3.12 Tecnología de deposición fundida .....	24
4. Metodología .....	27
5. Desarrollo de ingeniería.....	29
5.1 Obtención de datos teóricos .....	29
5.2 Pruebas experimentales.....	38
5.2.1 Fabricación del grano combustible .....	38
5.2.2 Pruebas experimentales en el banco motor .....	43
5.3 Comparación de combustibles .....	52
5.3.1 Manufactura del grano del combustible.....	53
5.3.1.1 Manufactura de un grano de combustible de Cera de Parafina .....	53
5.3.1.2 Manufactura de un grano de combustible de HTPB .....	55
5.3.1.3 Manufactura de un grano de combustible de ABS .....	56
5.3.2 Criterios de reciclabilidad y reusabilidad .....	58
5.3.2.1 Reciclabilidad y reusabilidad de la Cera de Parafina.....	58
5.3.2.2 Reciclabilidad y reusabilidad del HTPB.....	59
5.3.2.3 Reciclabilidad y reusabilidad del ABS .....	59
5.3.3 Revisión económica general .....	61
5.3.3.1 Revisión económica de la Cera de parafina .....	61
5.3.3.2 Revisión económica del HTPB .....	62
5.3.3.3 Revisión económica del ABS .....	63
5.3.4 Propiedades Físicas del grano de combustible.....	64
5.3.4.1 Propiedades físicas de un grano de Cera de Parafina .....	65
5.3.4.2 Propiedades físicas de un grano de HTPB .....	65
5.3.4.3 Propiedades físicas de un grano de ABS .....	66
5.3.5 Prestaciones como combustible .....	67
5.3.5.1 Prestaciones de la Cera de Parafina como combustible.....	67
5.3.5.2 Prestaciones del HTPB como combustible .....	68

5.3.5.3 Prestaciones del ABS como combustible .....	70	vi
6. Análisis de resultados .....		73
6.1 Obtención de datos en banco. ....	73	
6.2 Comparación de datos teóricos y experimentales .....	77	
6.3 Tablas de viabilidad del combustible.....	78	
7. Conclusiones .....		87
8. Recomendaciones .....		89
9. Bibliografía .....		90
10. Anexos .....		95

Tabla 1. Lanzamientos realizados en Colombia al 2011, fuente: (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011) ..... 10

Tabla 2. Comparación cualitativa entre diferentes tipos de combustibles para motores-cohete, fuente: (Bath, 2012) ..... 10

Tabla 3. Entalpía de formación por medio del método de adición de grupos. Fuente: Autor ..... 33

Tabla 4. Parámetros de entrada del programa CEARUN, fuente: Autor ..... 34

Tabla 5. Datos de salida CEA fuente: Autor ..... 35

Tabla 6. Resultados entalpía del programa CEA. fuente: Autor ..... 37

Tabla 7. Tabla de confiabilidad CEA. Fuente: Autor ..... 37

Tabla 8. Parámetros de entrada en el programa cura, fuente: Autor ..... 40

Tabla 9. Parámetros constantes del experimento ..... 48

Tabla 10. Comparación de los combustibles en función de la manufactura, fuente: Autor. .... 57

Tabla 11. Comparación de los combustibles en función de su reutilización, fuente: Autor ..... 60

Tabla 12. Comparación de los combustibles en función de sus costos, fuente: Autor ..... 64

Tabla 13. Comparación de Propiedades físicas, fuente: Autor. .... 67

Tabla 14. Comparación de combustibles en función del impulso específico. fuente: Autor ..... 71

Tabla 15. Resumen de los parámetros comparativos. fuente: Autor ..... 72

Tabla 16. Cálculo de error porcentual de los datos teóricos y experimentales, fuente: Autor. .... 78

Tabla 17 Cálculo de error porcentual de la relación O/F. fuente: Autor ..... 78

Tabla 18. Criterio de evaluación. fuente: Autor ..... 79

Tabla 19. Tabla de decisión de Cera de parafina, fuente: Autor ..... 80

Tabla 20. Tabla de decisión del HTPB, fuente: Autor ..... 81

Tabla 21. Tabla del ABS, fuente: Autor. .... 82

Tabla 22. Evaluación del valor porcentual de cada criterio, fuente: Autor. .... 83

Tabla 23. Evaluación de la viabilidad de los combustibles, fuente: Autor ..... 84

Tabla 24. Porcentaje de viabilidad de los combustibles, fuente: Autor ..... 84

Figura 1. Cohete GIRD-9 fuente : (Space Propulsion Group, 2018).....	3
Figura 2. Comparación ABS vs HTPB fuente : (Whitmore et al., 2013) .....	5
Figura 3. Regresión del combustible sólido, por medio del programa fuente: (Bath, 2012).....	6
Figura 4. Cohete Tequendama II a punto de despegar fuente: (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011) .....	8
Figura 5. Banco del proyecto PUA fuente: Autor.....	9
Figura 6. Esquema básico de motor cohete de propulsión híbrida fuente: Autor.....	14
Figura 7. Banco de pruebas un motor cohete de propulsión híbrida construido en 1999. Fuente: (Sutton, George P., 2001) .....	15
Figura 8. Compuestos de la molécula de ABS fuente: (Whitmore, Peterson, & Eilers, 2011) ...	16
Figura 9. Impresora 3d fuente: Autor .....	26
Figura 10. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto, fuente: Autor .....	28
Figura 11. Sólido del grano de combustible construido por medio del programa computacional Catia, fuente: Autor.....	38
Figura 12. Sólido del grano de combustible dividido en programa CURA, Fuente: Autor .....	41
Figura 13. Proceso de manufactura del grano ABS por medio de deposición fundida, fuente: Autor .....	41
Figura 14. Grano de ABS por medio de deposición fundida en su totalidad, Fuente: Autor .....	42
Figura 15. Grano de combustible cubierto de papel cerámico. Fuente: autor .....	43
Figura 16. Representación digital del Motor híbrido Phoenix. fuente:(Moreno, 2018) .....	43
Figura 17. Banco UCAND 1-Motor híbrido Phoenix con detalle de la ubicacion de celda de carga. fuente:Autor .....	44
Figura 18. Tanque de oxidante y sus respectivas válvulas de regulación manual. fuente: Autor	45
Figura 19. Válvula solenoide. fuente:(Moreno, 2018).....	46
Figura 20. Cámara de combustión. fuente: (Moreno, 2018).....	46
Figura 21. Precámara de combustión. fuente: Autor .....	47
Figura 22. Boquilla spiral jet nozzle. fuente; <a href="https://www.bete.com/products/tf">https://www.bete.com/products/tf</a> .....	47
Figura 23. Tobera del banco de pruebas. Fuente: (Moreno, 2018).....	48
Figura 24. Banco de pruebas con detalle en los soportes de un anillo de seguridad. Fuente: Autor .....	49
Figura 25. Pruebas experimentales con el grano de ABS, fuente: Autor .....	51
Figura 26. Análisis del grano de ABS postcombustión con detalle en la zona de pegado, fuente: Autor .....	52
Figura 27. Imagen microscópica de un grano de parafina. Fuente: (Piscitelli et al., 2015).....	55
Figura 28. Imagen microscópica de un grano de HTPB. Fuente: (Thomas et al., 2015).....	56
Figura 29. Tasa de regresión lineal de la parafina y el HTPB en función del flujo de oxidante, fuente: (M. Karabeyoglu et al., 2001).....	68
Figura 30. Comparación de los resultados de la tasa de regresión lineal del HTPB, fuente: M. J. Chiaverini, Serint, K., & Lu, Y. C, Kuol, K. K., 2017 .....	69
Figura 31. Comparación de ABS con HTPB fuente: (Whitmore et al., 2013) .....	70
Figura 32. Impulso de varios propelentes combinados con diferentes oxidantes, en función de su relación O/F. fuente: (Okninski, 2018).....	71
Figura 33. Datos de temperatura obtenidos del banco motor, fuente: Autor.....	73
Figura 34. Datos de presión obtenidos del banco motor, fuente: Autor .....	74

Figura 35. Datos de empuje obtenidos del banco motor, fuente: Autor .....	75ix
Figura 36. Datos representativos del empuje generado de los cuatro granos de ABS, fuente: Autor .....	76
Figura 37. Porcentaje de viabilidad de los combustibles estudiados, fuente: Autor.....	85
Figura 38. Interfaz inicial del programa cearun fuente: Autor .....	95
Figura 39. Interfaz Rocket propeties del programa cearun fuente: Autor .....	96
Figura 40. Interfaz de reactivos del programa cearun fuente: Autor .....	97
Figura 41. Biblioteca del programa cearun fuente: Autor .....	97
Figura 42. Interfaz OUTPUT del programa cearun fuente: Autor.....	98

## 1. Introducción

Este proyecto busca analizar la viabilidad de la utilización del polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), como combustible alternativo para motores cohetes de combustión híbrida en el territorio colombiano, como un aporte para incentivar la investigación en sistemas propulsivos tipo cohete y generar tecnología y desarrollo industrial de alto nivel a la industria colombiana.

Para su desarrollo se realizaron pruebas experimentales, en un banco de pruebas estático, construido por el PUA (Proyecto Uniandino Aeroespacial); en dichas pruebas se usó Óxido Nitroso ( $\text{NO}_2$ ) como oxidante y ABS como combustible.

Se fabricaron cuatro granos (tacos sólidos) de combustible con material polimérico ABS obtenido a nivel nacional, los cuales son elaborados por medio de tecnología de manufactura aditiva. Se efectuó el encendido de cada grano de combustible en el banco de pruebas UCAND 1-Motor Phoenix del PUA construido por (Moreno, 2018), con el fin de comparar los datos obtenidos experimentalmente con los cálculos teóricos realizados y analizar su comportamiento.

Una vez conocidas las prestaciones que ofrece el ABS para la combustión híbrida, se compararon con las de otros combustibles tradicionales para este tipo de motores, encontrados en la literatura técnica internacional, como lo son la parafina o el HTPB (Polibutadieno Hidroxiterminado por sus siglas en inglés). Finalmente, se realizó un

estudio general de viabilidad, teniendo en cuenta el tiempo de fabricación de los granos, la facilidad de consecución de los insumos y el costo de una cadena de producción a baja escala, entre otros parámetros.

## 2. Planteamiento de problema

En este capítulo se expone la descripción y formulación del problema, los antecedentes, objetivos del proyecto, alcances y limitaciones.

### 2.1 Antecedentes

La propulsión de cohetes ha tenido una gran evolución desde sus primeros prototipos construidos en 1933 por el ruso Mikhail Tikhonravov y el grupo Korolev. En este caso, el motor que fue utilizado para darle empuje al cohete GIRD-9 (Figura 1), usaba como oxidante oxígeno líquido (LOX) y gasolina gelificada; por varios años la tecnología para motores cohetes se limitaba a combustión por medio de agentes líquidos y muy rara vez sólidos(Space Propulsion Group, 2018).



*Figura 1. Cohete GIRD-9 fuente : (Space Propulsion Group, 2018)*

Posteriormente en 1951, la compañía General Electric (G.E.) empezó a investigar acerca de motores de combustión híbrida. Luego, gracias a la carrera espacial de los años 60's entre los Estados Unidos y la URSS, se lograron significativos avances en cuanto a la propulsión cohete, los que dejaron grandes bases para los conocimientos que se tienen hoy en día.

Pero fue hasta la década de los 90's, cuando el recién fundado Programa de Desarrollo de Propulsión Híbrida (HPDP-por sus siglas en inglés), realizó el lanzamiento del primer cohete sonda impulsado por un motor híbrido usando oxígeno líquido y HTPB (Poli-butadieno Hidróxiterminado) (Space Propulsion Group, 2018).

Actualmente, el HTPB es el combustible más usado para los motores cohetes híbridos y se han comparado las prestaciones que ofrece este combustible con otros combustibles, como la parafina y el ABS. Un ejemplo de estas comparaciones es el estudio realizado por (Whitmore, Peterson, & Eilers, 2013) en la Universidad de Utah, en donde compara las prestaciones del ABS con el HTPB y concluye que el ABS tiene unos resultados aceptables pero menores al HTPB. Esto se puede evidenciar en la Figura 2, en donde se muestran las comparaciones de los datos de empuje obtenidos de un banco motor con ambos combustibles.

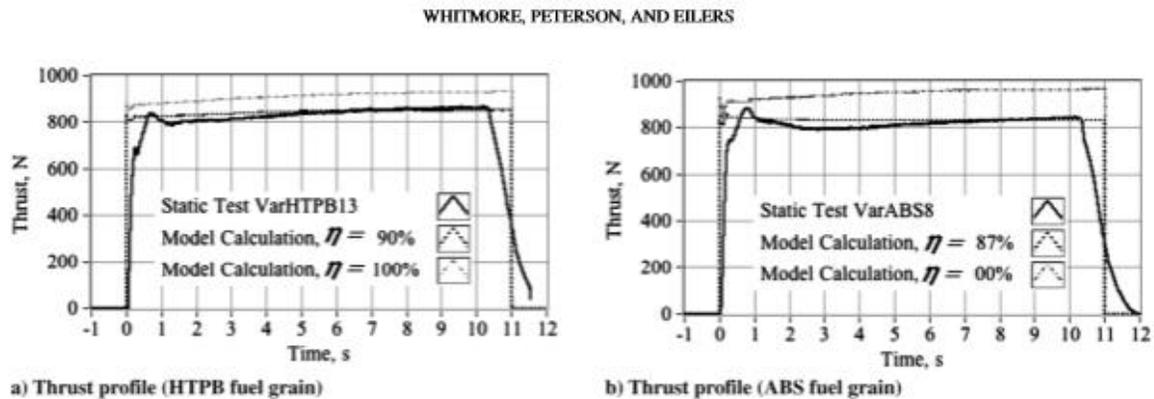
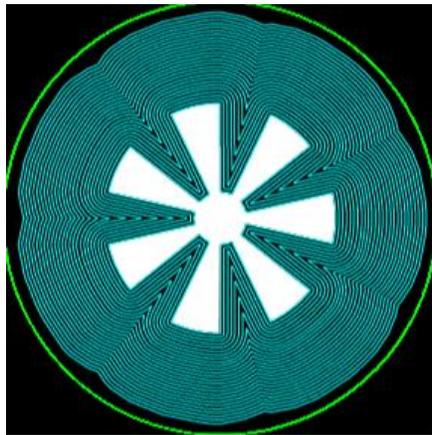


Figura 2. Comparación ABS vs HTPB fuente : (Whitmore et al., 2013)

Igualmente, en el Instituto Americano de Astronáutica y Aeronáutica (AIAA -por sus siglas en Inglés), también realizó un estudio de la parafina como combustible para motores cohetes, en el cual emplean los modelos matemáticos, utilizados para los cálculos termodinámicos de un motor híbrido, con el fin de determinar las prestaciones que teóricamente puede ofrecer la parafina como combustible alternativo para los motores ya mencionados (M. Karabeyoglu, Cantwell, & Altman, 2001).

Otro antecedente a considerar es la publicación de (Bath, 2012), basada en su investigación sobre tecnologías de Modelado por Deposición Fundida (FDM por sus siglas en Inglés), para la fabricación de los granos de combustibles, en la cual también muestra el desarrollo de un programa que predice el comportamiento de la tasa de regresión en combustibles sólidos (Figura 3). Esto le permitió concluir que el método de FDM es útil y eficaz para la fabricación de los granos y que el programa desarrollado permite obtener resultados correctos en el área de análisis. El desarrollo de este programa

es capaz de modelar y predecir la regresión de una sección transversal de granos de combustible con geometrías internas complejas (áreas no cilíndricas y/o con un desarrollo helicoidal a través del grano); su estudio le permitió obtener resultados muy precisos aplicando un error de redondeo, pues aunque no predice exactamente su comportamiento, tiene resultados bastante aproximados, a pesar de que su ejecución es relativamente lenta; omitiendo el error de redondeo, los resultados son un poco más imprecisos, pero se obtienen de manera más rápida.



*Figura 3. Regresión del combustible sólido, por medio del programa fuente: (Bath, 2012)*

En cuanto a los cálculos teóricos, existe el estudio de (Van Krevelen & Chermin, 1951), cuyo método suma la entalpía local de cada compuesto multiplicado por su valor porcentual. De esta manera, conociendo el valor porcentual de cada polímero que constituye el ABS y los valores de sus entalpías se puede calcular la entalpía de formación total del ABS. Los datos de la entalpía de los polímeros que forman el ABS ya han sido calculados y publicados por varios autores, la del Acrilonitrilo por (Baxendale & Madakas, 1956) y la del Butadieno y Estireno por (Prosen & Rossini, 1945).

Por otra parte, es necesario conocer los avances tecnológicos en el tema de la cohetaría experimental que ha hecho Colombia.

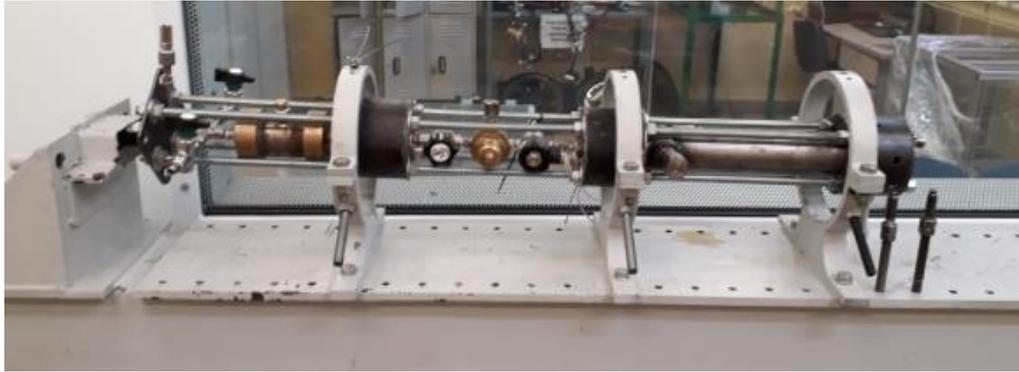
Al respecto, se encuentra el estudio de la Universidad Nacional (Murcia Piñeros, 2012) en donde se afirma que Colombia tiene más de 50 años de atraso respecto a países como Estados Unidos y Rusia, que dieron comienzo a la carrera espacial. También agrega que es de vital importancia que el país se proyecte al desarrollo de esta tecnología en un lapso inferior a los 20 años, ya que otros países tienen proyectado regresar a la Luna e incluso llevar seres humanos a Marte.

Aunque el desarrollo en nuestro país no es tan extenso en comparación al resto del mundo, si se han hecho varios aportes a la cohetaría a través del tiempo, como el cohete TEQUENDAMA I que alcanzó una altura de 380 metros y el TEQUENDAMA II (Figura 4), que se lanzó con un primate a bordo con el fin de estudiar los efectos que pudieran sufrir los humanos en este tipo de vuelos. Ambos diseñados y construidos por Isaías Moreno Moncada (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011).



*Figura 4. Cohete Tequendama II a punto de despegar fuente: (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011)*

Igualmente en Colombia existe el banco de pruebas UCAND 1-Motor híbrido Phoenix, diseñado y construido en la Universidad de los Andes (Moreno, 2018). En el estudio que se hizo para su construcción se concluye que el banco puede ser usado para pruebas, teniendo en cuenta parámetros como la temperatura y humedad del aire y así mismo recomienda evaluar la facilidad de adquirir los combustibles en el mercado. Las pruebas necesarias para el presente estudio se realizaron en este banco al cual se tuvo acceso (Figura 5).



*Figura 5. Banco del proyecto PUA fuente: Autor*

Por otra parte, con respecto a la determinación del oxidante (Jiménez. & Díaz., 2016) concluye que en motores cohetes el Óxido Nitroso posee bajas tasas de regresión, haciéndolo ideal para el experimento en el banco PUA, ya que provee un proceso de combustión de larga duración. Adicionalmente, este material es de fácil adquisición en el mercado, pues es usado principalmente como anestésico, tiene una baja volatilidad y no requiere consideraciones de manejo criogénico (Tri-Gas, 2003).

## **2.2 Descripción y formulación del problema.**

Colombia presenta un atraso de más de cincuenta años en el tema de cohetaría, en comparación con las potencias en este tema como Estados Unidos y Rusia (Murcia Piñeros, 2012). Aunque se han hecho varios avances en la cohetaría a nivel nacional, no se tiene un amplio material de referencia en cuanto al desarrollo de combustibles. Según datos de la Asociación Astronáutica de Colombia, los escasos lanzamientos que se han realizado en Colombia hasta el 2011, en su gran mayoría fueron por medio de propulsión sólida o propulsión hidráulica. Ver Tabla 1 (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011).

Tabla 1. Lanzamientos realizados en Colombia al 2011, fuente: (Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, 2011)

<b>Resumen 2011</b>	<b>Hidráulicos</b>	<b>Combustible Sólido</b>	<b>Combustible Líquido</b>	<b>Combustible Híbrido</b>	<b>Total</b>
<i>N° Personas involucradas</i>	189	94	4	4	291
<i>N° Lanzamientos</i>	2591	110	0	0	2701
<i>N° Capacitados en el tema</i>	2380	190	5	0	2575

Estas tecnologías cada vez se están haciendo más obsoletas en comparación con la combustión híbrida tal como se muestra en la Tabla 2, publicada por (Bath, 2012).

Tabla 2. Comparación cualitativa entre diferentes tipos de combustibles para motores-cohete, fuente: (Bath, 2012)

<b>Factor</b>	<b>Combustible Sólido</b>	<b>Combustible Líquido</b>	<b>Combustible Híbrido</b>
<i>Capacidad de reencendido y control de aceleración</i>	No	Si	Si
<i>Presencia de Gases de combustión no tóxicos</i>	No	Posiblemente	Si
<i>Facilidad de transporte, almacenamiento y manejo</i>	No	Si	Si
<i>Costo De Mantenimiento y de Lanzamiento</i>	Moderado	Moderadamente alto	Bajo
<i>Costo de manufactura</i>	Moderado	Moderadamente alto	Bajo
<i>Impulso específico</i>	Bueno	Excelente	Bueno
<i>Fracción molar del propelente</i>	Bueno	Excelente	Favorable
<i>Propelentes seguros y no explosivos</i>	No	Puede Ser Minimizado	Si

Por lo anterior, se hace relevante el estudio de mayor profundidad en temas que permitan el desarrollo de la combustión híbrida en Colombia. De ahí el interés por estudiar la viabilidad del uso del ABS, con el fin de determinar si se puede llegar a usar este

elemento en futuros cohetes construidos en el país. Investigaciones sobre este tema pueden dar bases sólidas para futuros desarrollos en el campo aeronáutico y aeroespacial.

Todo lo expuesto lleva a la pregunta de investigación: ¿Es viable el uso del Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), como combustible sólido alternativo para motores cohetes híbridos a nivel nacional?

### **2.3 Objetivos**

#### **Objetivo general.**

Estudiar la viabilidad de uso del ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), como combustible sólido alternativo en motores cohete híbridos a nivel nacional.

#### **Objetivos específicos.**

1. Efectuar un proceso de caracterización experimental del ABS como combustible híbrido para cohetes.
2. Realizar el análisis teórico termoquímico del ABS como combustible para motores cohete híbridos.
3. Comparar los datos obtenidos en el análisis teórico del ABS con la caracterización experimental para el ABS y otros combustibles.

## **2.4 Alcances y Limitaciones**

### **Alcances**

- Para los procesos de manufactura de los combustibles se exploraron metodologías de manufactura aditiva controlada por computador o por procesos de manufactura de polimerización en masa, fabricando cuatro granos de combustibles para motores híbridos.
- Se comparará el combustible ABS con los resultados teóricos de otros autores.
- Se realizará un estudio preliminar de la viabilidad del polímero ABS como alternativa potencial de combustible en motores cohetes híbridos en Colombia.
- Se generará un documento académico publicable, con los resultados de la investigación.

### **Limitaciones**

- Los parámetros del experimento estarán limitados a las condiciones de seguridad enmarcadas dentro del reglamento de uso del laboratorio de motores de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.
- El estudio de viabilidad se realizó solo para el territorio colombiano y se efectuó con base en materias primas, procesos de manufactura y recursos técnicos existentes a nivel nacional.
- Solo se obtendrán datos experimentales del combustible ABS, más no se comparará de manera experimental con otro tipo de combustibles.

### **3. Marco teórico y conceptual.**

Dentro de las bases teóricas que sirvieron de marco a esta investigación y con el fin de facilitar su comprensión, es necesario tener en cuenta ciertos conceptos que se usaron para su desarrollo, referentes a los insumos utilizados, procesos químicos como a los cálculos y análisis que se llevaron a cabo para su desarrollo. Dentro de estos se encuentran:

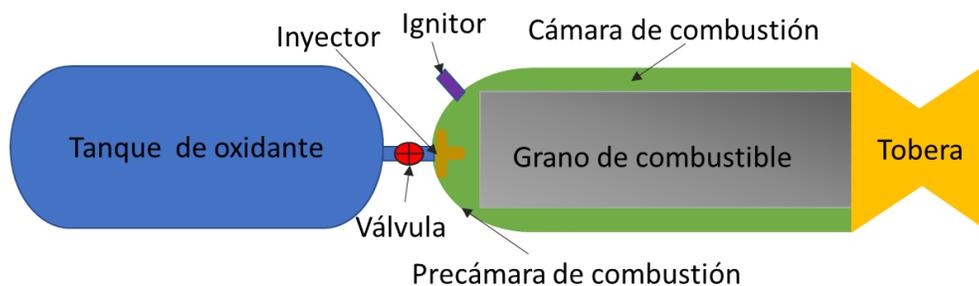
#### **3.1 Propulsión híbrida**

El sistema de propulsión híbrida está compuesto por un grano de combustible sólido y un oxidante en estado líquido o gaseoso que fluye a través del grano.

En este tipo de motores, el oxidante se inyecta en una cámara de precombustión o vaporización aguas arriba del grano de combustible. El grano de combustible sólido contiene mínimo un puerto de combustión axial que genera vapor de combustible para reaccionar con el oxidante inyectado. Se emplea una cámara de mezcla para asegurar que todo el combustible y el oxidante se quemen antes de salir por la tobera. (Sutton, George P., 2001)

Según (Martin J. Chiaverini, 2010) los propulsores híbridos, como el que se muestra en la Figura 6, son más seguros, más controlables y menos sensibles a las imperfecciones mecánicas que los motores cohetes tradicionales de propulsión sólida. Los cohetes híbridos, tienen mayor versatilidad en cuanto al uso de combustible y son mecánicamente más simples. Sin embargo, presentan algunas desventajas como:

- Las partículas de combustible no quemado que salen en los gases de combustión.
- La variación de la relación de la mezcla oxidante-combustible (O/F) durante el funcionamiento.
- Su propensión a presentar inestabilidad en la presión.
- Las eficiencias de combustión ligeramente inferiores en comparación con cohetes de propulsión líquida.
- La complicada balística interna del motor.
- Baja tasa de regresión del combustible sólido, ya que, en última instancia, limita el empuje del motor.



*Figura 6. Esquema básico de motor cohete de propulsión híbrida fuente: Autor*

Las aplicaciones de la propulsión híbrida incluyen propulsión primaria, y de etapas superiores para vehículos de lanzamiento espacial, así como para sistemas de maniobra de satélites. Los primeros desarrollos de la propulsión híbrida estaban dirigidos a misiles tácticos de bajo costo, en los últimos años, los esfuerzos se han concentrado en prototipos de propulsores para aplicaciones de lanzamiento espacial.

Como se mencionó anteriormente los oxidantes suelen estar en estado líquido o gaseoso, entre los más comunes para este tipo de motores se encuentran; el difluoruro de oxígeno,

el oxígeno líquido (LOX), peróxido de hidrógeno del 90% al 95% de pureza, el óxido nítrico  $N_2O$ , oxidantes de alta capacidad energética como flúor/oxígeno líquido (FLOX) y compuestos de cloro y flúor como  $ClF_3$  y  $ClF_4$ .

Los combustibles usados para estos motores son hidruros de metales ligeros, como berilio, litio y aluminio, mezclados con un aglutinante polimérico adecuado, el más usado hasta el momento es el HTPB (Polibutadieno Hidroxiterminado).

Existen algunos bancos de pruebas, para este tipo de propulsión, uno de los más antiguos es el construido en 1999, por un consorcio de empresas aeroespaciales, el cual tenía como objetivo funcionar por 80 segundos usando HTPB como combustibles y LOX como oxidante, generando un empuje máximo de 250,000 Lb. (Figura 7)



*Figura 7. Banco de pruebas un motor cohete de propulsión híbrida construido en 1999. Fuente: (Sutton, George P., 2001)*

### 3.2 Elementos de la combustión

Como se mencionó anteriormente, los cohetes de propulsión híbrida funcionan con un grano sólido que opera como carburante y un flujo con elevadas cantidades de oxígeno que pasa a través de él, que opera como oxidante.

Con el fin de cumplir el propósito de la investigación se compararon los datos de tres tipos diferentes de carburantes (combustibles) el ABS, la cera de parafina comercial y el HTPB; se realizó la comparación siempre con el mismo tipo oxidante constante en esta investigación: óxido nitroso gaseoso al 99.5% de pureza.

### 3.3 ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Existen diversos materiales utilizados en la fabricación de granos de combustible para cohete, los más usados son la parafina (composición aproximada  $C_{73}H_{124}$ ) y el HTPB (Polibutadieno Hidróxiterminado). Para esta investigación se usó el Polímero Termoplástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) de tipo comercial para las pruebas experimentales, cuya composición química global aproximada es  $C_{3,85}H_{4,85}N_{0,43}$ . Este compuesto se compone por tres polímeros bases, el Estireno, el Acrilonitrilo, y el Butadieno, como se puede ver en la Figura 8.

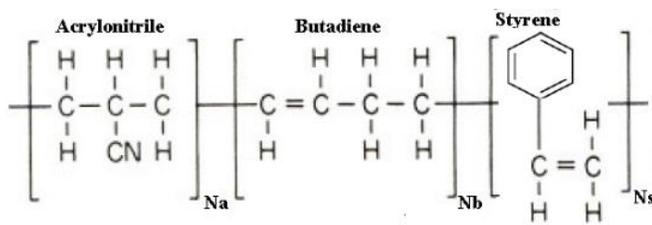


Figura 8. Compuestos de la molécula de ABS fuente: (Whitmore, Peterson, & Eilers, 2011)

El ABS es un termoplástico obtenido de la derivación del petróleo. Su proceso de elaboración comienza con la destilación del crudo de petróleo, que separa el crudo pesado en grupos de componentes más ligeros, llamados fracciones. Cada fracción es una mezcla de cadenas de hidrocarburos. Una de estas fracciones, la Nafta, es el compuesto crucial para la producción de plásticos, más específicamente de termoplásticos como el ABS. Los usos más comunes de este termoplástico son la fabricación de equipos deportivos, juguetes y varias partes de automóviles. Normalmente se utilizan dos procesos principales para producir plásticos: la Polimerización y la Policondensación. En este caso se hace énfasis en la polimerización, pues es el método comúnmente utilizado para la obtención del ABS.

En un reactor de polimerización, monómeros como el etileno y el propileno están unidos entre sí para formar largas cadenas poliméricas. Cada polímero tiene sus propias propiedades, estructura y tamaño, dependiendo de los distintos tipos de monómeros básicos utilizados. La función del reactor es fusionar los monómeros y los hidrocarburos para generar una nueva molécula (PlasticsEurope; Association of plastics Manufacturers, 2018).

El ABS como combustible para motores no ha sido explorado en profundidad. No obstante, se han realizado estudios en donde se usa el ABS para dicho fin, como el de (M. A. Karabeyoglu, Altman, & Cantwell, 2002), en el que concluye que los termoplásticos al ser quemados aumentan la tasa de regresión lineal, pues las gotas de combustible líquido que se desprenden de la combustión debido a las altas temperaturas presentes, se mezclan con el flujo de oxidante, generando una combustión más óptima.

Para el desarrollo de la presente investigación, se utilizó filamento comercial de ABS de 1,75 mm, adquirido en la empresa *Shenzhen Esun Industrial Co.* debido a su alto nivel de calidad en la tolerancia geométrica del filamento y homogeneidad en su composición. Según (Shenzhen Esun Industrial Co, 2018) los filamentos de ABS poseen alta rigidez, tenacidad 10 veces mayor a la del PLA y no presenta ruptura por esfuerzos de flexión; los porcentajes de composición son aproximadamente 50% de butadieno, 43% de acrilonitrilo y 7% de estireno. Las propiedades térmicas y físicas más específicas se expondrán más adelante en este documento.

### **3.4 Cera de Parafina**

La parafina es muy usada como combustible para motores cohete, por sus prestaciones como carburante y su facilidad de obtención; idealmente su fórmula química es  $C_{74}H_{124}$ . Según (Morán et al., 1989) la propulsión híbrida realizada con ceras de parafina presenta capacidades más atractivas en comparación con el combustible HTPB, en cuanto a la aceleración, el reencendido del motor y también porque permite alcanzar tasas de regresión más altas en comparación con el combustible HTPB. En cuanto a su manufactura, se tiene que la cera de Parafina también es un derivado del petróleo crudo, pero en un grado menor de refinación que el ABS, se puede obtener parafina líquida y sólida.

Sus usos principales son la fabricación de velas, caucho, pastas, cremas, lápiz de labios, pinturas y barnices, como recubrimiento de pastillas y en la protección de superficies; también se usa como aditivo en la manufactura de telas dándoles suavidad, flexibilidad y

elasticidad y de igual manera se encuentra presente en aplicaciones electrónicas (CEPSA, 2018)

### **3.5 Polibutadieno Hidroxiterminado (HTPB)**

Actualmente es el combustible más usado para cohetes sólidos e híbridos, en la mayoría de los casos combinado con óxido nitroso como agente oxidante (Whitmore et al., 2013).

La formulación de un polímero común de HTPB tiene 50 unidades repetidas de 1,4 Butadieno con una terminación del tipo hidroxilo (OH) en cada extremo de la molécula (William, Martin, & Schweitzer, 1969).

Al ser el combustible más usado para este tipo de propulsión se han realizado innumerables estudios. Según (Cai et al., 2016) la tasa de regresión de la combustión en combustibles basados en HTPB disminuye en función del diámetro hidráulico (es decir la relación entre cuatro veces el área sobre el perímetro) y la geometría interna del puerto de combustión (sección del grano de combustible donde se inicia la combustión).

Se han realizado estudios en donde se combinan con otros compuestos con el fin de mejorar sus propiedades de flamabilidad, como el estudio de (Rhee, Lee, & Lee, 2008) en donde combinan el HTPB con IPDI (Diisocianato de Isoforona) y el estudio de (Thomas, Petersen, Desain, & Brady, 2015) donde mezcla micro y nano partículas de aluminio y boro al combustible.

Dentro de sus características más notables, se encuentra que es un material hidrófobo, es decir repele el agua, tiene una baja temperatura de transición vítrea, es flexible a bajas temperaturas, posee baja permeabilidad a la humedad, es resistente a ácidos y bases

acuosas, además de ser un aislante eléctrico. Su uso principal radica en ser aglutinante, adhesivo, sellador o el elemento principal de combustible para motores de combustión sólida e híbrida, así como también se usa para fabricar revestimientos o membranas impermeables. (Cray Valley USA, 2010)

### **3.6 Óxido Nitroso**

Este elemento es usado en la mayoría de los casos como anestésico, su condición incolora es ideal para observar los productos de la combustión, además por su naturaleza no inflamable y tener una baja volatilidad, es ideal para llevar a cabo una combustión controlada y segura. Además, según (Sun, Tian, Li, Yu, & Cai, 2016) produce una baja tasa de regresión en la combustión, La función de este elemento es actuar como oxidante de la combustión. Se almacena en forma líquida en tanques presurizados, para luego ser inyectado a la cámara de combustión donde se encuentra el grano de combustible con el ignitor.

Para el óxido nitroso se escogió como proveedor GASLAB SAS en presentación de cilindro de 7 Kilos con una pureza de 99,5% por su facilidad de obtención; las propiedades térmicas y físicas se expondrán más adelante en el desarrollo de ingeniería.

### **3.7 Relación O/F**

La relación O/F es un parámetro adimensional que relaciona la cantidad de oxidante y la cantidad de combustible que están presentes en una combustión. La ecuación (1) que describe este fenómeno está descrita a continuación.

$$O/F = \frac{\dot{m}_{ox}}{\dot{m}_f} \quad (1)$$

Donde:

- $\dot{m}_{ox}$  hace referencia al flujo másico de oxidante en este caso  $N_2O$
- $\dot{m}_f$  hace referencia al flujo másico de combustible.

También se puede asumir como una relación de masas, siempre y cuando se analice en un mismo instante de tiempo.

Para determinar la relación O/F en un proceso estequiométrico, se tiene en cuenta la siguiente ecuación (2):

$$O/F = \frac{M_{ox} * N_{ox}}{M_f * N_f} \quad (2)$$

Donde:

- $M_{ox}$  es la masa molar del oxidante
- $M_f$  es es la masa molar del combustible
- $N_{ox}$  es el número de moles presentes de oxidante
- $N_f$  es el número de moles del combustible

### 3.8 Empuje

En cohetaría se define como la fuerza que actúa sobre un vehículo, producida por un sistema de propulsión a chorro, es decir la eyección de materia a alta velocidad. Este principio se describe en la siguiente ecuación (3); para este caso se debe asumir que tanto

el flujo másico de los reactivos, como la velocidad de salida son constantes respecto al tiempo.

$$F = \frac{dm}{dt} * v = \dot{m} * v \quad (3)$$

En donde:

- F hace referencia a la fuerza de empuje que se va a generar
- $\frac{dm}{dt}$  o  $\dot{m}$  es el flujo másico de salida
- $v$  es la velocidad de salida de los gases de combustión.

Debido a la complejidad para determinar el flujo másico y la velocidad de salida de gases, no es viable usar el empuje en función del momento, se usará el empuje en función de la presión, como se observa en la ecuación (4)

$$F = C_f * A_t * P_1 \quad (4)$$

En donde:

- $A_t$  es el Área de la sección transversal a la salida de la tobera
- $P_1$  es la Presión en la cámara de combustión
- $C_f$  es el Coeficiente de empuje

### 3.9 Coeficiente de empuje

Este coeficiente adimensional se calcula con base en la ecuación (5), que se indica a continuación:

$$C_f = \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} * \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] + \left(\frac{P_2 - P_3}{P_1} * \frac{A_g}{A_t}\right)} \quad (5)$$

En donde:

- $k$  es la relación  $C_p/C_v$  del material de combustión es decir el ABS
- $P_1$  es la Presión de la cámara
- $P_2$  es la Presión a la salida de gases
- $P_3$  es la Presión Atmosférica
- $A_g$  es el Área de la garganta
- $A_t$  es el Área de la sección transversal a la salida de la Tobera

### 3.10 impulso total

En cohetaría este concepto se define como el empuje generado, multiplicado por el tiempo de combustión; este parámetro es proporcional a la energía total suministrada por el combustible en un sistema de propulsión. El impulso total se describe de mejor manera en la ecuación (6)

$$I_t = \int_0^t F * dt \quad (6)$$

Donde:

- $I_t$  es el impulso total
- $F$  es la fuerza de empuje obtenido por el motor
- $t$  es el tiempo que dura la combustión.

Para un empuje constante la ecuación queda reducida, como se ve en la ecuación (7)

$$I_t = F * t \quad (7)$$

### 3.11 impulso específico

Se considera como el impulso producido por unidad de masa de combustible en un segundo de combustión. Este parámetro es ampliamente usado para la comparación entre diferentes sistemas de propulsión de cohetes, su modelo matemático está descrito en la ecuación 8.

$$I_{esp} = \frac{I_t}{m_t * g} \quad (8)$$

En donde:

- $I_{esp}$  es el impulso específico
- $I_t$  es el impulso total al igual que en la ecuación 6
- $m_t$  es la masa efectiva del propelente (masa de combustible usado más masa del oxidante usado)
- $g$  es la gravedad

Para el presente estudio, se toma en cuenta el impulso específico, pues con él se realizará una comparación entre la teoría y los análisis experimentales.

### 3.12 Tecnología de deposición fundida

Para la fabricación del grano de combustible se usó la tecnología de deposición fundida, más conocida como Fused Deposition Modeling (por sus siglas en inglés FDM), desarrollada por Scott Crump a finales de 1980 (3Dnatives, 2018).

Esta tecnología se basa en tres elementos principales: una placa/cama de impresión sobre la que se imprime la pieza; un carrete de filamento que aporta el material de impresión y una cabeza de extrusión también llamada punta caliente (Figura 9). En resumen, el filamento es succionado y fundido por el extrusor del dispositivo de impresión, que deposita el material de forma precisa capa por capa sobre la cama de impresión.

El proceso de manufactura inicia con el diseño del objeto, utilizando un programa de diseño asistido por computador, este caso CATIA (Dassault Systemes, 2018).

El archivo resultante debe ser exportado en formato STL, posteriormente se divide en varias capas utilizando un programa denominado *slicer*. Para este caso se utilizó el programa Ultimaker Cura 3.5.1 (Cura, 2018) en el que es posible seleccionar los distintos parámetros de la impresión, los cuales serán expuestos más adelante.

El proceso de manufactura aditiva comienza cuando el extrusor de la máquina alcanza una temperatura alrededor de los 200°C, necesaria para la fusión del material. Entre los materiales de impresión tridimensional más populares en la deposición por fusión se encuentran el PLA (Ácido Poliláctico) y el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) que es el material utilizado en esta investigación. La presentación común de estos materiales normalmente se presenta en carrete de 1 kg de filamento de material de 1,75 mm o de 2,85 mm de diámetro; este material, como se mencionó anteriormente, fluye hacia la plataforma proveniente de la boquilla extrusora, la cual a su vez se mueve sobre los tres ejes “x”, “y” y “z” simultáneamente. La plataforma asciende una medida predeterminada con cada nueva capa aplicada, hasta que se imprima la totalidad del objeto.

Para este caso se utilizaron soportes de impresión (material adicional que se imprime alrededor de la base del modelo) para mejorar la calidad de los modelos. Su función es apoyar las partes sobresalientes del modelo 3D, ya que hay ciertos modelos los cuales, sin apoyo, se dificulta su impresión. Estos soportes pueden estar hechos del mismo material que el objeto impreso o en un material soluble en agua o en otras sustancias específicas (ejemplo: Limoneno).



*Figura 9. Impresora 3d fuente: Autor*

#### **4. Metodología**

Este proyecto se desarrolló con una metodología de carácter empírico analítico. Como primera instancia, se realizó un estudio del estado del arte, en donde se abordaron temas como procesos de manufactura para la fabricación de granos de combustible y la trayectoria colombiana en el desarrollo de motores cohetes o aplicaciones de índole propulsiva aeroespacial.

A partir de la información adquirida, se procedió a manufacturar cuatro granos de combustible ABS por método de manufactura aditiva tridimensional-FDM.

Posteriormente se hicieron los cálculos basados en las características geométricas del motor existente. Luego con los cuatro granos manufacturados se efectuaron pruebas en el banco estático de motor cohete.

Se tuvo en cuenta que, en caso de presentarse un error porcentual superior al 5% entre los valores experimentales y teóricos, era necesario reformular los criterios de experimentación o los cálculos según se consideraran pertinentes.

Adicionalmente, en el caso de efectuar dos iteraciones (repetir el proceso experimental anteriormente descrito) y no obtener un porcentaje de error menor al mencionado, se procedería a indagar y registrar su causa.

Considerando los gastos tanto de la manufactura como de los insumos y las prestaciones que se encontraron del ABS, se realizó un estudio de viabilidad comparando el ABS con otros combustibles usados en la combustión híbrida, cuyos resultados se registraron en

una tabla de decisión de viabilidad del material. Finalmente, toda la información pertinente recolectada se plasma en un artículo de carácter académico.

Esta metodología se puede apreciar de manera esquemática en la Figura 10.

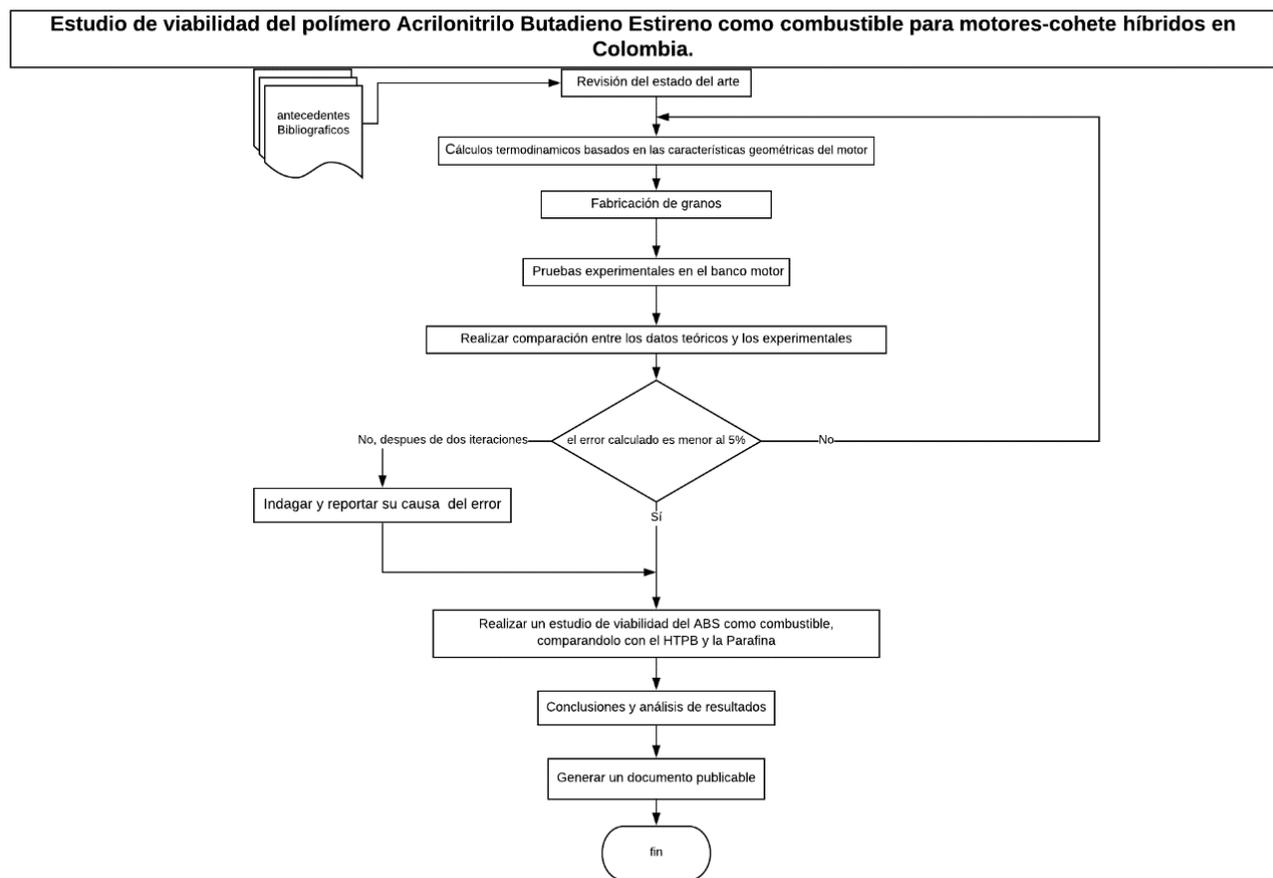


Figura 10. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto, fuente: Autor

## 5. Desarrollo de ingeniería

Con el fin de determinar la viabilidad del ABS como combustible para cohetes de propulsión híbrida, se inició efectuando un simple experimento de aplicación para verificar la funcionalidad del ABS como combustible, para después comparar los datos obtenidos experimentalmente con los resultados teóricos. Para efectuar dicha comparación, en esta investigación se usó el parámetro de impulso específico, pues el parámetro más citado para la comparación de prestaciones en motores cohetes de toda clase, además es un parámetro muy usado en los estudios del HTPB y de la parafina, lo que facilita realizar una comparación entre los resultados.

### 5.1 Obtención de datos teóricos

La ecuación de empuje de cohete utilizada está en función de diferentes parámetros que se puedan calcular de manera fácil y precisa. Existen diferentes formas de expresar el empuje de motor cohete, pero para simplicidad de los cálculos se usó la ecuación (9)

$$F = C_f * A_t * P_1 \quad (9)$$

En la ecuación anterior

- $F$  hace referencia a la fuerza de empuje generada por el motor.
- $A_t$  es el área transversal a la salida de la tobera.
- $P_1$  es la presión que se encuentra en la cámara de combustión

Estos dos últimos valores fueron mantenidos constantes a lo largo de todo el experimento. Según (Moreno, 2018) la presión de la cámara de combustión es de 2 MPa,

y el área transversal a la salida de la tobera es de 122, 48 mm<sup>2</sup> es decir 1,22 E 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>. El coeficiente de empuje  $C_f$  es un parámetro adimensional que está en función de diferentes valores de presiones, áreas y también de la relación de calores específicos como lo muestra la ecuación (10)

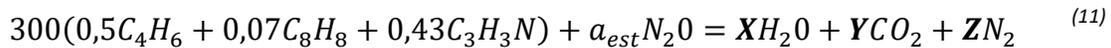
$$C_f = \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} * \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + \left(\frac{P_2 - P_3}{P_1} * \frac{A_g}{A_t}\right) \quad (10)$$

Donde

- $C_f$  hace referencia al coeficiente de empuje.
- $k$  es coeficiente de calores específicos, es decir el calor específico a presión constante sobre el calor específico a volumen constante  $\left(\frac{c_v}{c_p}\right)$ .
- $P_1$  al igual que en la ecuación (9) hace referencia a la presión en la cámara de combustión.
- $P_2$  es la presión a la salida de los gases.
- $P_3$  es la presión atmosférica.
- $A_t$  de igual manera que la ecuación (9) es el área de la sección transversal
- $A_g$  es el área transversal de la garganta de la cámara de combustión.

El valor de  $k$  se obtiene por medio de simulación numérica en el programa CEARUN desarrollado por (Nasa, 2018) cuyo procedimiento necesario para obtener este dato está expuesto en el Anexo 1.

Algunos de los parámetros de entrada, como la relación oxidante-combustible (O/F), fue necesario calcularlos. Para ello se efectuó el balance químico asumiendo una mezcla estequiométrica donde los productos son los convencionales, agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno diatómico (N<sub>2</sub>) y se estableció el porcentaje presente de cada molécula que compone el ABS stock (de consecución y uso general), que es 50% para el butadieno (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>), 43% para el acrilonitrilo (C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>N) y 7% para el estireno (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>), tal como se establece en la ecuación (11), también se asumió un grado de polimerización un grado de polimerización de 300.



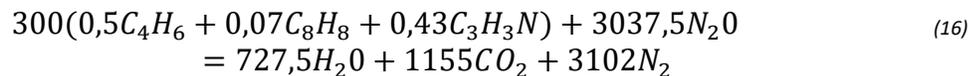
$$C: 300 * ((0,5 * 4) + (0,07 * 8) + (0,43 * 3)) = Y \rightarrow Y = 1155 \quad (12)$$

$$H: 300 * ((0,5 * 6) + (0,07 * 8) + (0,43 * 3)) = 2X \rightarrow X = 727,5 \quad (13)$$

$$O: (a_{est} * 1) = 2Y + X \rightarrow a_{est} = 3037,5 \quad (14)$$

$$N: (a_{est} * 2) + (0,43 * 1 * 300) = 2Z \rightarrow Z = 3102 \quad (15)$$

Conociendo los resultados de las ecuaciones (12) a la (15) se reemplaza en ecuación (11) y se obtiene la ecuación (16).



Para determinar la relación O/F (Ecuación 2) se debe tener en cuenta la masa molar del oxidante, la del combustible, el grado de polimerización de la molécula del ABS y el

número de moles para una balance estequiométrico, en la ecuación (16) se puede afirmar que se necesitan 3037,5 moles de oxidante por cada mol de combustible para obtener dicho balance, la masa del óxido nitroso ( $M_{NO_2}$ ) es igual a 44.013 gr/mol, y debido a que el ABS es una molécula polimérica, su peso molecular se determina con una sumatoria de los pesos moleculares de cada molécula por su valor porcentual (Smallman & Nwang, 2011), como se ve en la ecuación (17)

$$M_{ABS} = \sum_0^n M_n * (n\%) = (M_A * 0,43) + (M_B * 0,50) + (M_E * 0,07) \quad (17)$$

Conociendo que el valor de la masa molar del Acrilonitrilo ( $M_A$ ) es de 53,06 gr/mol, la del Butadieno ( $M_B$ ) es de 54,09 gr/mol, la del Estireno ( $M_E$ ) es de 104,14 gr/mol, y grado de polimerización de molécula es de 300 se puede calcular la relación O/F como se ve en la ecuación (18)

$$\frac{O}{F} = \frac{44,013 \frac{gr}{mol} * 3037,5 mol}{300 \left( \left( 53,06 \frac{gr}{mol} * 0,43 \right) + \left( 54,09 \frac{gr}{mol} * 0,50 \right) + \left( 104,14 \frac{gr}{mol} * 0,07 \right) \right) * 1 mol} = 7,803 \frac{gr N_2O}{gr ABS} \quad (18)$$

Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la entalpía de formación del ABS, la cual fue calculada en función de la masa, por medio del método de adición de grupos propuesto por (Van Krevelen & Chermin, 1951), este consiste en calcular la entalpía de un polímero, teniendo en cuenta el valor porcentual de cada monómero que forma el compuesto, las entalpías de formación establecidas para el Acrilonitrilo, es de 98,31 kJ/g-mol (Baxendale & Madakas, 1956), para el Butadieno es de 32,00 kJ/g-mol (Prosen

et al., 1951) y finalmente para el Estireno el valor de la entalpía es de 63,31 kJ/g-mol (Prosen & Rossini, 1945), con esta información y conociendo que el ABS está compuesto por un 43% de estireno, 50% de butadieno y 7% de estireno, se multiplica el valor de entalpía de cada monómero por la cantidad porcentual presente en la molécula compuesta del ABS, la sumatoria de estos resultados es la entalpía de formación. En la Tabla 3 se puede apreciar el resultado de la entalpía de formación del ABS obtenida a partir de la adición de sus grupos constituyentes la cual arroja un valor de 62,705 kJ/g-mol.

*Tabla 3. Entalpía de formación por medio del método de adición de grupos. Fuente: Autor*

<b>Moléculas presentes en el ABS</b>	<b>Acrilonitrilo</b>	<b>Butadieno</b>	<b>Estireno</b>	<b>Total</b>
<b>Porcentaje presente en la molécula de ABS</b>	43%	50%	7,0%	100%
<b>Entalpía de formación [kJ/g-mol]</b>	98,31	32,00	63,31	193,62
<b>Contribución de entalpía a la molécula del ABS [kJ/g-mol]</b>	42,2733	16,00	4,4317	<b>62,705</b>

Según la guía de CEARUN (Gordon & McBride, 1996), con parámetros de entrada como los mostrados en la Tabla 4, se puede determinar la constante adimensional  $k$ ,

Cabe recalcar que el valor de temperatura estimada de combustión ya se había asumido para ese banco en otras investigaciones (Moreno, 2018). Adicionalmente, el valor de la temperatura inicial del grano de ABS y del oxidante se asumió como temperatura ambiente. El proceso de simulación se describe de manera detallada en el Anexo 1.

Tabla 4. Parámetros de entrada del programa CEARUN, fuente: Autor

Parámetros de entrada	Valor
Relación O/F	7,8035
Tipo de oxidante	Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)
temperatura inicial del oxidante	298,15 K
Presión en la cámara	290 Psi (2 Mpa)
Entalpía del Acrilonitrilo	98,31 kJ/g-mol
Entalpía del Butadieno	32,00 kJ/g-mol
Entalpía del Estireno	63,31 kJ/g-mol
temperatura inicial del butadieno	298,15 K
temperatura inicial del estireno	298,15 K
Formula química del Acrilonitrilo	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N
Formula química del Butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>
Formula química del Estireno	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
Porcentaje molar del Acrilonitrilo	43%
Porcentaje molar del Butadieno	50%
Porcentaje molar del Estireno	7%
Temperatura estimada de la combustión	3800 K

Una vez realizada la simulación, el programa arroja los resultados mostrados en la Tabla 5, en este caso generó un valor de 1,1386 como valor de  $k$  en la salida de la tobera. Este programa arroja otros datos como velocidad del sonido, número de mach, calor específico, temperatura de los productos entre otros, sin embargo, para esta investigación solo se tuvo en cuenta el valor de la constante adiabática de gases  $k$ .

Tabla 5. Datos de salida CEA fuente: Autor

	Cámara	Garganta	Salida
$P_{inf}/P$	1	1,7343	2
Presión [atm]	19,733	11,378	9,8666
Temperatura [K]	3328,14	3148,45	3104,09
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	2,00E-03	1,23E-03	1,09E-03
Entalpía [Cal/g]	423,59	296,38	264,83
Energía interna [cal/g]	184,54	73,109	45,415
Entropía [cal/g*K]	2,3025	2,3025	2,3025
Cp [cal/g*K]	1,0354	1,0253	1,0203
K	1,1438	1,1396	1,1386
Velocidad del sonido[m/s]	1069,6	1031,8	1022,4
Número de mach	0	1	1,127

Teniendo el valor de  $k$  y asumiendo una pérdida de presión no mayor a 5 Psi, es decir aproximadamente 33500 Psi, por un rendimiento de combustión ideal cercano al 99%, y teniendo en cuenta que el *coeficiente de empuje óptimo*  $c_f$  descrito por (Sutton, George P., 2001), se presenta cuando la presión de salida de gases es igual a la presión atmosférica ( $P_2 = P_3$ ), se calculó este coeficiente como se observa en la ecuación 19.

$$c_f = \sqrt{\frac{2 * 1,1386^2}{1,1386 - 1} * \left(\frac{2}{1,1386 + 1}\right)^{\frac{1,1386+1}{1,1386-1}} \left[1 - \left(\frac{1966500 Pa}{2000000 Pa}\right)^{\frac{1,1386-1}{1,1386}}\right]} + \left(\frac{0 * 2}{2000000 Pa}\right) = 0,1172 \quad (19)$$

Con el valor del *coeficiente de empuje óptimo*  $c_f$  y reemplazando en la ecuación (9) junto con los otros valores ya mencionados, se obtuvo el empuje generado tal como se muestra a continuación:

$$F = 0,1172 * (1,22 * 10^{-4})m^2 * 2000000 Pa = 28,727 N \quad (20)$$

Con el valor de la fuerza de empuje y conociendo que la prueba de combustión duró siete segundos, se pudo determinar el impulso total teórico como se muestra en la siguiente ecuación.

$$I_t = F * t = 28,727 \text{ N} * 7 \text{ s} = 201,092 \text{ Ns} \quad (21)$$

Para calcular el impulso específico teórico, fue necesario determinar el valor de  $m_t$ , es decir la masa de propelente gastada (combustible más oxidante), para ello se pesó el grano de combustible antes y después de la primera prueba con el fin de tener una diferencia de masas, obteniendo como resultado 0,398 kg y 0,389 kg respectivamente, si se restan ambos valores se obtiene 0,009 kg de masa de combustible gastada. Con el fin de obtener la masa del oxidante, se utiliza la ecuación (1) la cual enuncia que con la relación O/F y la masa del combustible, es posible determinar la masa de oxidante, obteniendo como resultado 0,07 kg, la suma de estos dos últimos valores arroja como resultado la masa gastada del propelente ( $m_t$ ).

Al conocer el impulso total, la masa gastada de propelente, y el valor de la gravedad, se puede calcular el impulso específico teórico, como se observa en la ecuación 21.

$$I_{esp} = \frac{I_t}{m_t * g} = \frac{201,092 \text{ N} * \text{s}}{(0,07\text{kg} + 0,009\text{kg}) * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 259,55 \text{ s} \quad (22)$$

Con el fin de determinar la exactitud y la confiabilidad del programa, se compararán los cálculos efectuados en la Tabla 3 (entalpía de formación), con los datos arrojados por el programa CEA cuya entalpía del proceso se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados entalpía del programa CEA. fuente: Autor

Variable	Combustible	Oxidante	Mezcla
Entalpía expresada con la constante universal de gases (h/R) [(kg mol) (K)/kg]	0.13651081E+03	0.22298441E+03	0.21315787E+03

Como se puede observar el valor de la entalpía de formación del combustible, está expresada con la constante universal de los gases ideales, si se multiplica por el valor R que se obtiene de tablas (8,31 kJ/K\*kmol), genera como resultado 1080,3 kJ/kg. Con este valor y el de la masa molar, presentado en la Ecuación 17, se puede determinar el valor de la entalpía de formación en las mismas unidades con las que ya se calculó, como se puede evaluar en la Ecuación 23.

$$1080,3 \frac{kJ}{kg} * \frac{1 kg}{1000 g} * \left( \left( 53,06 \frac{gr}{mol} * 0,43 \right) + \left( 54,09 \frac{gr}{mol} * 0,50 \right) + \left( 104,14 \frac{gr}{mol} * 0,07 \right) \right) = 61,739 \frac{kJ}{g mol} \quad (23)$$

La estimación del error porcentual entre la entalpía ofrecida por el programa en la Ecuación 23 y la expresada en la Tabla 3 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7. Tabla de confiabilidad CEA. Fuente: Autor

Entalpía CEA	Entalpía teórica	Error porcentual
61,739 [kJ/g-mol]	62,705 [kJ/g-mol]	1,539 %

Como se puede evidenciar el error es muy cercano al 1%, aclarando que el programa también calcula la entalpía con el método de adición de grupos, pero utilizando la información de su base de datos, de lo cual se puede concluir que la confiabilidad del programa es bastante precisa.

## 5.2 Pruebas experimentales

Para la toma de datos experimentales fue necesario realizar un proceso de manufactura con tecnología FDM y un montaje en el banco de pruebas motor para motor-cohete UCAND I-Motor híbrido (N<sub>2</sub>O-ABS) Phoenix, el cual tiene como funcionalidad primaria la medición de empujes de hasta 250 N (Moreno, 2018), estos procesos son descritos a continuación.

### 5.2.1 Fabricación del grano combustible

Se desarrollaron cuatro granos (tacos) de combustible sólido con un único puerto de combustión cilíndrico, lineal y constante. Posteriormente se procedió a diseñar la geometría del grano de combustible en un programa de diseño asistido por computador, en este caso CATIA (Dassault Systemes, 2018). Los granos de prueba se cubrieron con un papel termo-cerámico de aluminio-silicato para prevenir daño por estrés térmico de la cámara de combustión del motor. En este experimento se utilizó el papel cerámico del proveedor Thermal Ceramics® que tiene un espesor de 3 mm y un límite de temperatura máxima de 1649 °C, obteniendo como resultado el sólido que se observa en la Figura 11.

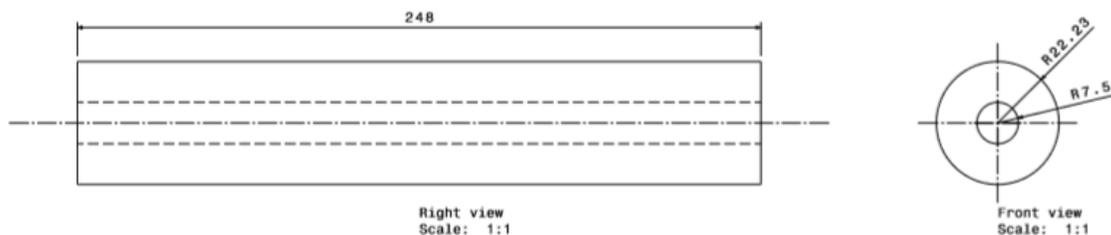


Figura 11. Sólido del grano de combustible construido por medio del programa computacional

Catia, fuente: Autor

Para el proceso de manufactura del grano, se escogió como materia prima un filamento de 1,75 mm de diámetro de ABS color negro proveniente de la marca *Shenzhen Esun Industrial Co.* debido a ser un color opaco, se prevé que evite de alguna manera el calentamiento radiativo y ayude a mejorar el proceso de combustión. Es un material de fácil adquisición en Colombia, así como de alta disponibilidad; sus propiedades mecánicas y de manufactura se exponen en el Anexo 2.

En los granos de combustible se mantuvieron constantes las geometrías internas y externas para todos los experimentos, usando un vaciado cilíndrico para el puerto de combustión (zona por la cual atraviesa el flujo de oxidante) en el centro. También se mantuvo una tolerancia geométrica entre el grano de combustible (con papel cerámico) y la cámara de combustión de + 2 mm, con el fin de permitir un acople-desacople rápido de los granos entre pruebas.

Posteriormente se importa el archivo a un programa compatible con la impresora 3D.

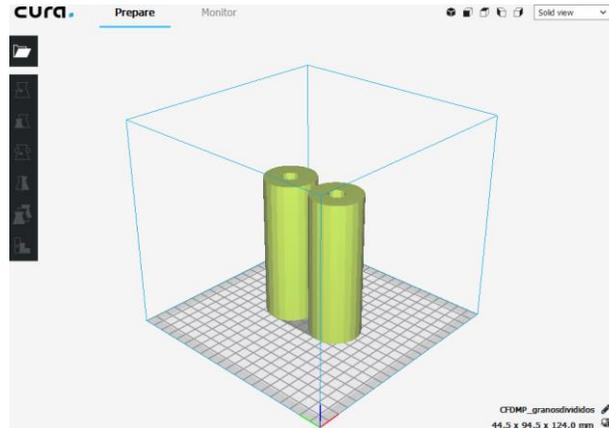
Para este caso en específico se utilizó **CURA 3.4.1** (Ultimaker, 2018), en el cual se establecieron los parámetros de impresión; por recomendación del fabricante se usó una velocidad de desplazamiento de 50 mm/s, una velocidad de alimentación de 100 mm/s, y una velocidad de impresión de 60 mm/s, adicionalmente se aplicó un llenado del 100% ya que se debe maximizar la densidad del grano para no afectar el proceso de combustión; igualmente se usó una resolución de impresión definida como “*low quality*” la cual es relativamente baja debido a que no eran necesarios acabados superficiales de calidad superior en los granos. Sin embargo, debido a esta configuración dada a la

impresora, se obtuvieron geometrías cilíndricas del grano a partir de aproximaciones poligonales. Adicionalmente, con el fin de asegurar que el material estuviera sin imperfecciones internas causadas por irregularidades al momento de fusión del material, la velocidad del ventilador de refrigeración fue de cero, generando una fusión uniforme de todo el material; complementariamente se aplicó una altura de capa de 0,3 mm, que es un valor relativamente alto para este tipo de manufactura pero asegura el menor grado de imperfecciones para la fusión del material, según el fabricante de la impresora utilizada. Estos parámetros se detallan en la Tabla 8.

*Tabla 8. Parámetros de entrada en el programa cura, fuente: Autor*

<b>Parámetro de entrada</b>	<b>Valor</b>
Velocidad de desplazamiento	50 mm/s
Velocidad de alimentación	60 mm/s
Velocidad de impresión	100 mm/s
Porcentaje de llenado	100%
Velocidad de ventilador de refrigeración	0 %
Altura de capa	0,3 mm
Resolución	low quality

La máquina que se usó para este procedimiento es una Maker Select Plus 3D Printer de la marca IIP y tiene una altura de trabajo máxima de 18 cm, por tanto, debido a que las especificaciones del grano necesitan una altura mayor a la altura de trabajo, fue necesario dividir el grano en dos partes iguales y realizar la manufactura con cada una de ellas por separado, cada una con una altura de 12,4 cm, tal como se observa en la Figura 12.



*Figura 12. Sólido del grano de combustible dividido en programa CURA, Fuente: Autor*

Para realizar el proceso de impresión, la máquina toma 10 h y 42 minutos (sin contar con el calentamiento de la placa), agregando una base de sujeción para asegurar su estabilidad a la hora de imprimir. El proceso de impresión (Figura 13), puede generar gases tóxicos, por eso se recomienda realizar las pruebas en ambientes ventilados.



*Figura 13. Proceso de manufactura del grano ABS por medio de deposición fundida, fuente: Autor*

Finalizado el proceso de impresión aditiva se pegan las dos mitades con una resina epóxica de secado rápido marca Topex<sup>®</sup> como se observa en la Figura 14, se escogió este

tipo de resina ya que sus componentes químicos afectan de manera despreciable a la combustión del polímero.



*Figura 14. Grano de ABS por medio de deposición fundida en su totalidad, Fuente: Autor*

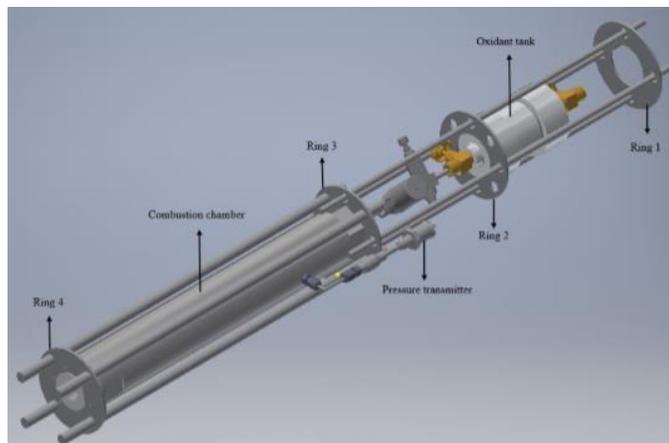
Una vez secos los granos se recubrieron con pegamento PL-285 marca *Pegatex* *Artecola*® y con una capa de papel cerámico cuyas propiedades están expuestas en el Anexo 3. Este papel tiene como función proteger la estructura interna de la cámara de combustión, además de poseer propiedades físicas que le permiten aislar el calor, ayudando a obtener una combustión más eficiente. El resultado final de los granos está expuesto en la Figura 15



*Figura 15. Grano de combustible cubierto de papel cerámico. Fuente: autor*

### 5.2.2 Pruebas experimentales en el banco motor

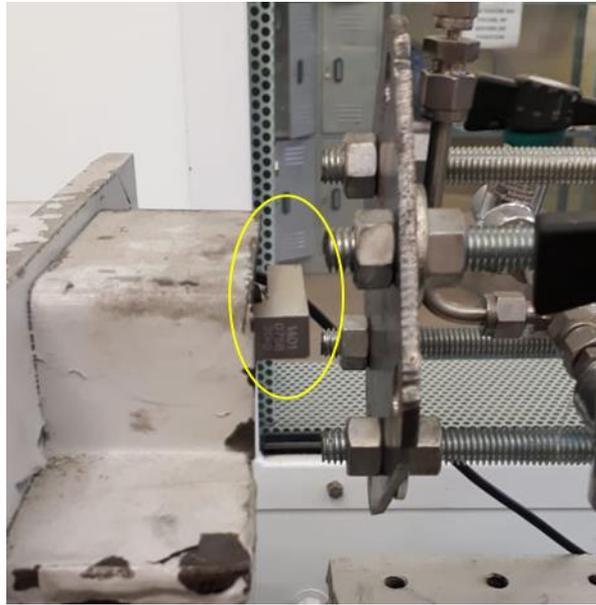
Ensamblados los granos, se procedió a realizar el montaje experimental, en el banco de pruebas UCAND 1-Motor híbrido Phoenix, Figura 16, ubicado temporalmente en el laboratorio de motores de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.



*Figura 16. Representación digital del Motor híbrido Phoenix. fuente:(Moreno, 2018)*

El banco cuenta con una celda de carga tipo **S** (Figura 17) de marca Lexus<sup>®</sup> modelo SA con un límite de operación de 500 N, esta celda fue previamente probada con la máquina

universal de ensayos Tinius Olsen 30 K, con un rango de carga desde cero hasta el 60% de la carga máxima soportada por la celda, con intervalos de 5 N con el fin de determinar su funcionamiento y obtener la curva voltaje-fuerza utilizada para entregar los resultados. Esta celda de carga se encarga de recibir y medir el empuje obtenido en la prueba.



*Figura 17. Banco UCAND 1-Motor híbrido Phoenix con detalle de la ubicación de celda de carga.*

*fuentes: Autor*

Para medir la temperatura el banco cuenta con una termocupla tipo **K** construida por Instrumatic® la cual tiene un rango de operación de -150 a 1100 °C, un bulbo de 3 pulgadas manufacturada por una aleación de cromel y alumel. Así mismo para medir la presión el banco usa un sensor Huba Control serie 528, con un rango de presiones de 0 a 60 bar, instalado a un costado de la cámara de combustión, con el fin de medir la presión durante los procesos reactivos.

El banco-motor también cuenta con un tanque de almacenamiento fabricado en acero al carbono y bronce, capaz de soportar una presión máxima de 704 Psi (Moreno, 2018).

Cuenta con dos válvulas GCE-DRUVA de ½ in conexión OD de regulación manual, para

llenado y purga respectivamente, fabricadas en acero inoxidable 316 con cierre de diafragma tipo *Elgiloy*, usadas para gases inertes, reactivos, inflamables y oxidantes (Figura 18).

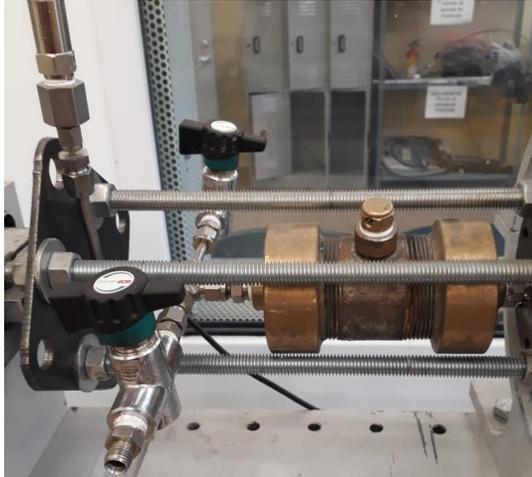


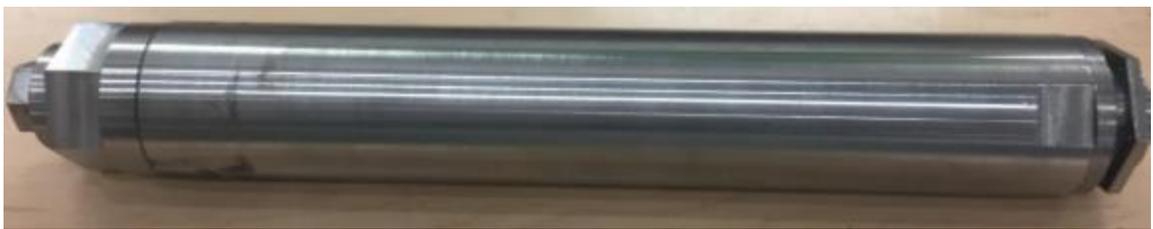
Figura 18. Tanque de oxidante y sus respectivas válvulas de regulación manual. fuente: Autor

El tanque cuenta con un disco de ruptura calibrado a 500 Psi como elemento de seguridad, el cual actúa en caso de presentarse eventos de contrapresión excesiva. Abajo del tanque se encuentra una válvula *GCE-DRUVA*<sup>®</sup> de aguja, fabricada en acero inoxidable 316 de ½ in de diámetro conexión OD, para el control del flujo de oxidante. Inmediatamente después se encuentra un regulador de presión *Victor*<sup>®</sup> de 200 Psi que conecta con una válvula solenoide de marca *Gems Sensors & Controls*<sup>®</sup> de la serie *D-Cryo* de 15 W y 12 VDC cuya presión máxima de apertura es de 375 Psi. Esta válvula permite el flujo de oxidante desde el tanque de almacenamiento a la cámara de combustión y se observa en la Figura 19.



*Figura 19. Válvula solenoide. fuente:(Moreno, 2018)*

Por otra parte, la cámara de combustión del banco (Figura 20), fabricada en acero al carbono AISI 1020, se encarga de almacenar el grano de combustible. Esta cámara de combustión está diseñada para contener una precámara (Figura 21) donde se aloja un ignitor propérgico basado en magnesio, encargado de iniciar la combustión. Este se activa cuando recibe una señal de 12V a 7 Ah, generando un proceso de combustión de alta temperatura que genera la suficiente energía de activación para iniciar el combustible polimérico.



*Figura 20. Cámara de combustión. fuente: (Moreno, 2018)*



Figura 21. Precámara de combustión. fuente: Autor

Al interior de la cámara de combustión, también se aloja el inyector de óxido nitroso (Figura 22) marca *Spraying System*<sup>®</sup> tipo *Spiral Jet Nozzle*<sup>®</sup> de acero inoxidable 316 el cual tiene una tasa de flujo de 1.62 g/min, una capacidad de presión de hasta 290 Psi y un ángulo de pulverización de 45°.



Figura 22. Boquilla spiral jet nozzle. fuente; <https://www.bete.com/products/tf>

Finalmente, la cámara de combustión cuenta con una zona de mezcla y una tobera De laval con una relación de expansión entre la garganta y la salida de 2.95, fabricada en acero al carbono AISI 1020 (Figura 23), la cual optimiza el empuje entregado.



Figura 23. Tobera del banco de pruebas. Fuente: (Moreno, 2018)

Para el montaje del experimento, la única variable fue el grano de combustible, todos los demás parámetros como tiempo de combustión, presión inicial en la cámara, dimensiones y geometría del grano y flujo másico de combustible fueron constantes. Estos valores se expresan mejor en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros constantes del experimento

<b>Parámetros del experimento</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de combustión	7 s
Presión en la cámara de combustión (Max.)	290 Psi
Flujo de oxidante	0,0095 kg/s
Longitud del grano	248 mm
Radio externo del grano	22,23 mm
Radio interno del grano	7,5 mm
Largo de la cámara de combustión	365 mm
Radio externo de la cámara de combustión	63,5 mm
Radio interno de la cámara de combustión	50,80 mm
Material del grano de combustible	ABS

Para el montaje del experimento se sostiene el motor bajo una configuración tipo péndulo balístico, aprovechando el escaso movimiento del motor sobre su eje axial, y por ende el pequeño ángulo que subyace sobre la vertical al momento de efectuarse la prueba. Al momento de su desensamble cuenta con unos soportes en unos anillos de seguridad, los cuales se encargan de sostener el motor en el desensamble, como se ve en la Figura 24.



*Figura 24. Banco de pruebas con detalle en los soportes de un anillo de seguridad. Fuente: Autor*

Las pruebas experimentales fueron controladas por un sistema de adquisición de datos, asistido por un programa basado en LabVIEW 2013. Dicho sistema es alimentado con dos fuentes de voltaje *Protek*<sup>®</sup> *PL3003T* y controlado por tres tarjetas *National Instruments*<sup>®</sup> NI con las siguientes características: *Series 9213* encargada de medir la temperatura de los gases a la salida de la tobera, *Series 9205* la cual recibe la señal de presión y empuje generadas por el motor, y *Series 9263* la cual envía señales de control

para la ignición del ignitor y apertura y cierre de la válvula solenoide que permiten el flujo de oxidante. Las tres tarjetas están enlazadas a un computador *Dell® Vostro 3500* por medio de un banco de tarjetas *NI cDAQ-9172*.

El protocolo de la prueba se programó con una secuencia de conteo regresivo utilizando un protocolo de seguridad, que permite la apertura y cierre de dos relés conectados en serie con el ignitor y a la válvula solenoide de control de flujo respectivamente. Cuando el contador llega a cero, los dos relés se activan simultáneamente por la señal enviada desde el computador, efectuando la ignición, y a la vez permitiendo el paso de óxido nítrico a la cámara de combustión por la apertura de la válvula solenoide. La lectura de datos de los tres sensores comienza tres segundos antes de que la cuenta regresiva llegue a cero, y siete segundos después se corta automáticamente el flujo de oxidante, apagando el relé que controla la válvula solenoide. Finalmente, se efectúa la transferencia de los datos en una hoja de cálculo tipo Excel y se culmina el proceso.

Cada montaje demoró aproximadamente 30 minutos teniendo en cuenta el tiempo en que se disipan los gases de combustión del salón de pruebas, el tiempo de enfriamiento de la cámara para su manipulación y el posterior desensamble de los componentes.

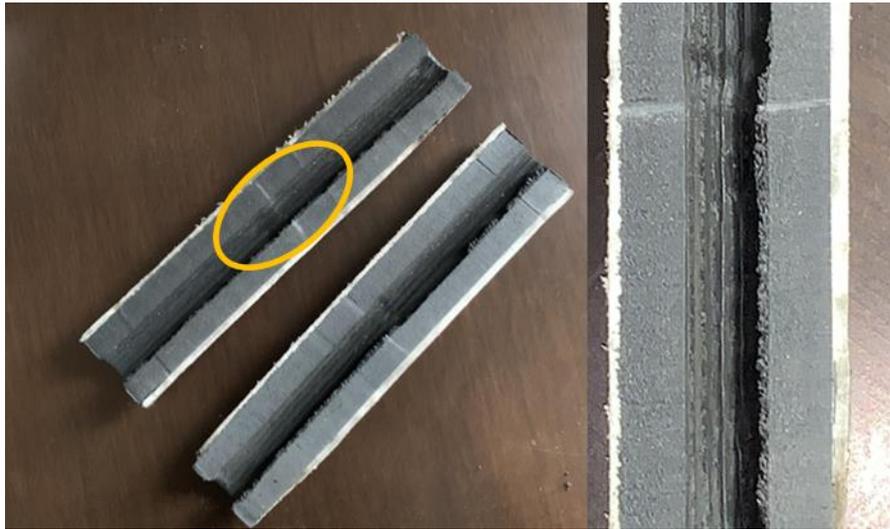
Los experimentos realizados mostraron una pluma estable cuyo comportamiento puede apreciarse en la Figura 25.



*Figura 25. Pruebas experimentales con el grano de ABS, fuente: Autor*

Aunque no son perceptibles en las fotografías, durante los experimentos se pudieron apreciar partículas similares a chispas en los productos de la combustión, posiblemente creadas por el aditivo que se agrega al ABS para obtener el color negro (se presume que puede ser partículas de carbón o negro de humo). Debido a que el ABS no fue concebido como un material útil para procesos de combustión en cohetería, durante su obtención se agregan aditivos inhibidores o retardadores de llama, los cuales tienen la finalidad de mejorar sus propiedades de resistencia al fuego e inhibir el proceso de combustión (Díaz, Alonso, Valenciano, & Arenaza, 2008), dichos aditivos también pueden ser la causa de las chispas presentes en la combustión.

Para observar, al menos cualitativamente, los efectos de la tasa de quemado en el ABS, los granos se cortaron a la mitad pudiéndose apreciar en ellos los canales erosivos que dejó la combustión cuyo comportamiento es continuo y lineal. Se determinó también que la resina utilizada para unir los granos no afectó la combustión, de haberlo hecho, se hubieran presentado irregularidades en los canales y en las inmediaciones de la zona donde se aplicó la resina epóxica, como se observa en la Figura 26.



*Figura 26. Análisis del grano de ABS postcombustión con detalle en la zona de pegado, fuente: Autor*

### **5.3 Comparación de combustibles**

Para determinar la viabilidad del ABS como combustible para motores cohete híbridos, se comparó de manera teórica, apoyado en diferentes fuentes bibliográficas, con otros combustibles tradicionales en motores-cohetes híbridos como lo son el HTPB y la parafina. No se realizaron comparaciones experimentales con otros combustibles por la evidente dificultad de conseguir y manufacturar los granos de combustible con otros materiales. En la presente comparación se evaluaron las siguientes características:

- 1) Manufactura del grano de combustible.
- 2) Criterios de reciclabilidad y reusabilidad.
- 3) Disponibilidad en el mercado nacional y revisión económica general.
- 4) Propiedades físicas del grano de combustible.
- 5) Prestaciones como combustible

### 5.3.1 Manufactura del grano del combustible

La manufactura es un parámetro necesario para demostrar la viabilidad del ABS, pues de su calidad depende la obtención de granos de combustible sin deformaciones apreciables, cavidades internas, homogeneidad del material combustible al interior del grano, tiempo de conformado y curado (si es necesario) entre otras características. Adicionalmente una manufactura rápida y de buena calidad puede optimizar el tiempo de producción, tener impactos positivos en la toma de datos y repetitividad de ensayos, además de disminuir la variabilidad en parámetros propios del funcionamiento del motor, obteniendo así granos de combustibles más eficientes.

#### 5.3.1.1 Manufactura de un grano de combustible de Cera de Parafina

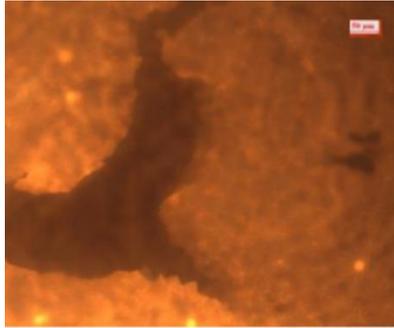
Según (Piscitelli, Saccone, Gianvito, Cosentino, & Mazzola, 2015) existen dos categorías para la manufactura de la parafina, la primera es la que se realiza industrialmente; este proceso requiere de una máquina especial de *spin casting* con una velocidad de rotación variable, el proceso requiere calentar la parafina hasta el punto de fusión, verter la mezcla homogeneizada en la cámara cilíndrica de la máquina y girar el tubo alrededor de su eje longitudinal a una velocidad de giro adecuada con el fin de que la fuerza centrífuga compacte el grano.

La segunda categoría es la manufactura en laboratorio, sobre la cual se han realizado varios estudios que pueden hallarse en la literatura académica; dentro de estos se resalta

el de (Morán et al., 1989), donde se describe el proceso completo de fabricación de granos con este material, el cual consiste en introducir la cera de parafina en moldes cilíndricos, que se calientan por medio de resistencias eléctricas o camisas de calentamiento durante 20 minutos a una temperatura de 110°C, una vez fundida se sella con un pistón a una presión de 10 bar y finalmente se permite su enfriamiento y endurecimiento.

De su estudio se concluye, por una parte, que en dicho proceso se generan inconsistencias en la geometría final de los granos, poros internos y micro cámaras no muy convenientes en términos de una combustión homogénea (generación de micro cámaras de combustión) y de otra, que el método de manufactura con molde de pistón es el que genera el grano más homogéneo, sin embargo, se siguen generando cavidades internas. Según (Pulido Ruiz, 2008) el proceso de manufactura de la parafina aún se realiza de manera artesanal en Colombia (solo algunas empresas han implementado métodos de manufactura industrial); también afirma que el proceso de manufactura de granos combustibles de parafina, teniendo en cuenta el tiempo de enfriamiento y endurecimiento, toma en promedio cinco horas por grano.

La calidad de la manufactura del grano está determinada por la mayor o menor porosidad que presenta el grano, debido a que una alta porosidad es directamente proporcional a una mala manufactura. La investigación de (Piscitelli et al., 2015), como se muestra en la Figura 27, permite observar en una escala de 50 micrómetros, un grano con alta porosidad, lo que indica baja calidad de su manufactura.



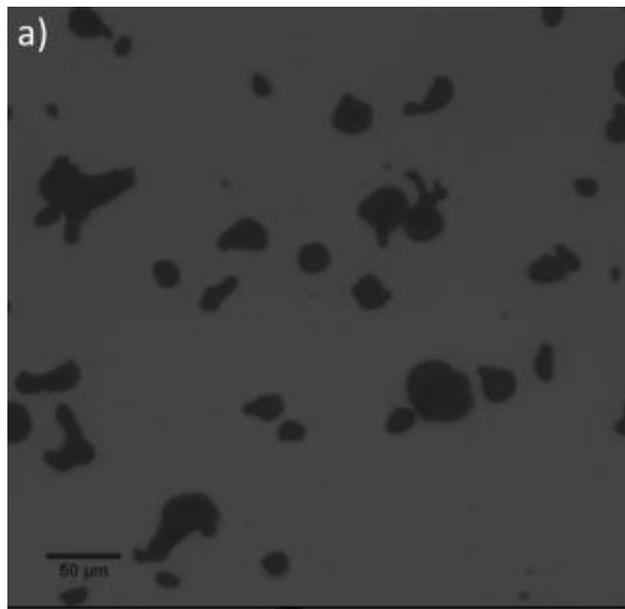
*Figura 27. Imagen microscópica de un grano de parafina. Fuente: (Piscitelli et al., 2015)*

### 5.3.1.2 Manufactura de un grano de combustible de HTPB

Para la fabricación de granos en HTPB actualmente no está disponible el uso de tecnología FDM, pues este proceso solo aplica para materiales termoplásticos; el HTPB al no cumplir con esta característica, tiene que someterse a un proceso de manufactura por curado con un aglutinante según (Aerocon systems, 2018), también se afirma que se debe mezclar 88% de HTPB con 12% del aglutinante. Durante el proceso de manufactura se utiliza vacío para eliminar las burbujas de gas creadas en el grano de combustible durante el proceso de mezcla; esta composición una vez degasificada se vierte en el molde del grano de combustible y se procede al curado durante aproximadamente 15 días para que la dureza del grano sea óptima para su combustión. Si se llegasen a realizar pruebas experimentales antes de que el proceso de curado termine, el resultado puede ser una combustión altamente caótica y turbulenta, además de presentar bajo desempeño termodinámico, esto debido a la presencia de una elevada porosidad interna en el grano, las cuales pueden ser contraproducentes para la estructura interna de la cámara de combustión (Whitmore et al., 2013). Este proceso requiere más tiempo de preparación y elaboración, así como mayores costos que los procesos de manufactura del ABS. Sin

embargo, un reciente estudio propone que el tiempo de curado puede ser reducido drásticamente si la manufactura es asistida con calentamiento por microondas, según lo afirmado por (Teng et al., 2018) .

Como ya se mencionó anteriormente, al igual que la parafina, se puede determinar la calidad de la manufactura del grano, observando la porosidad que pueda presentar a 50 micrómetros, como se ve en la Figura 28, hay presencia de poros. Sin embargo, según lo explica (Thomas et al., 2015) estos poros pueden ser sellados con partículas de aluminio que se agregan al proceso de manufactura, con el fin de mejorar sus prestaciones y de esta manera se obtiene una buena calidad de manufactura.



*Figura 28. Imagen microscópica de un grano de HTPB. Fuente: (Thomas et al., 2015)*

### 5.3.1.3 Manufactura de un grano de combustible de ABS

Este polímero ofrece una amplia gama de procesos de manufactura y conformación, dentro de ellas se presenta la técnica de deposición fundida (FDM). El proceso consiste

en depositar un filamento de polímero fundido de ABS en la mayoría de los casos, a temperaturas de aproximadamente 240°C sobre una plataforma que se mantiene a una temperatura de alrededor de los 100°C, de esta manera se forman capas de filamentos cruzados entre sí, obteniendo diferentes patrones de llenado. Este proceso es relativamente más rápido que el de la conformación de granos de HTPB, pues para la fabricación de un grano se requiere entre 20 y 24 horas. Adicionalmente, dependiendo de los parámetros de entrada que se usen en la máquina, se puede asegurar una impresión tridimensional maciza con baja porosidad.

Otro proceso conocido para la manufactura del ABS es la extrusión de material a través de una lámina o perfil de extrusión. Dicho proceso es de manufactura común y se hace con el fin de obtener la geometría deseada, pero en él, se pueden generar desviaciones de espesores, adelgazamiento de las superficies y solo se obtienen geometrías de sección transversal constante. (Margolis, 2006). Si se hace énfasis en el proceso de manufactura aditiva, el cual se usó para la fabricación del grano, se puede asumir que con los debidos parámetros de manufactura, se puede obtener una geometría maciza con baja porosidad (Ibarra Hernández, Cruel Restrepo, & Díaz, 2018), aunque si se analiza en un orden microscópico, se presentan poros no convenientes para el proceso de combustión.

En la Tabla 10 se compilan los parámetros que se tuvieron en cuenta para la comparación de los combustibles en función de la manufactura.

*Tabla 10. Comparación de los combustibles en función de la manufactura, fuente: Autor.*

<b>Parámetro \ combustible</b>	<b>Parafina</b>	<b>HTPB</b>	<b>ABS</b>
<b>Tiempo de manufactura para fabricación de un grano</b>	5 horas	15 días	1 día
<b>Porosidad a una escala de 50 micrómetros</b>	Si	No	Si

### 5.3.2 Criterios de reciclabilidad y reusabilidad

Debido a que durante el proceso de combustión siempre queda combustible no quemado, se consideró necesario analizar si el material sobrante era susceptible de ser reciclado y destinado para otros usos, o si se puede reutilizar como combustible después de haber sufrido un proceso de combustión.

#### 5.3.2.1 Reciclabilidad y reusabilidad de la Cera de Parafina

Debido a que el proceso de conformación y posterior combustión no cambia la estructura molecular de la parafina, puede ser clasificado como reciclable y reusable, pues se puede fundir de nuevo y darle la forma necesaria, como por ejemplo para fabricación de velas; en caso de querer reciclarse para fines industriales, se puede usar un proceso de hidrotratamiento o hidrogenación (el cual consiste en tratar el hidrógeno con un catalizador) con el fin de reducir compuestos aromáticos, especialmente los compuestos polinucleares y así proveer un olor, sabor y color permitidos para usos domésticos.

(Parkash, 2010).

Adicionalmente, luego de una prueba de combustión, el combustible sobrante se puede reutilizar, para lo cual se debe tener en cuenta que el diámetro de la pieza es mayor, por tanto, el puerto de combustión varía y esto podría tener repercusiones en la tasa de regresión lineal y en el empuje generado en los primeros segundos de combustión, mientras el flujo de oxidante se acopla a la nueva geometría.

### 5.3.2.2 Reciclabilidad y reusabilidad del HTPB

Según lo expuesto por (Whitmore et al., 2013), el HTPB no puede ser reciclado pues este material en presencia del calor no se funde, sino que se ablanda y carboniza debido a sus propiedades como material termoestable, por tanto no puede ser remodelado ni tratado térmicamente sin que se generen cambios drásticos en su estructura. La única manera en la que puede ser descompuesto es por medio de descomposición térmica, la cual según (Sinha, Sridhar, & Santhosh, 2015) no depende de la cantidad de carbono que éste tenga, sino de la velocidad de calentamiento del combustible sólido; adicionalmente (Wang, Liu, Xiao, & Wang, 2015) concluyen que la descomposición térmica del HTPB genera productos de descomposición principalmente en fase gaseosa y en presencia de oxígeno produciendo residuos sólidos a baja escala. Por lo anterior se concluye que este material no es reciclable.

No obstante, si después de realizado el proceso de combustión del HTPB, aún queda grano de combustible dentro de la cámara se puede reusar teniendo en cuenta que el ancho de geometría interna incrementó, lo que generaría que el inicio de la combustión no sea demasiado provechoso.

### 5.3.2.3 Reciclabilidad y reusabilidad del ABS

Este material al ser un termoplástico puede ser reciclado; por medio de fundición y moldeo en caliente se le puede dar una nueva geometría; también se puede reciclar por el método de moldeo por inyección. Según (Devesa, López, Samper, & Parres, 2008) su

reciclaje disminuye sus propiedades mecánicas, pero lo hace de manera despreciable y sigue manteniendo mejores características en comparación con otros polímeros de ingeniería. Sobre el particular, (Fernández Llanderas, 2015) señala que el ABS en estado virgen tiene mayor peso molecular pero menor polidispersidad (medida de dispersión de las moléculas de un polímero) en comparación con sus residuos reciclados, cabe recalcar que un mayor peso molecular, aumenta la relación estequiométrica (O/F).

Según el artículo de (Suárez Zarta, 2016) en Colombia solo el 26% de plástico usado es reciclado, pero gracias a la investigación realizada por (Czyżewski et al., 2018) se puede afirmar que el ABS reciclado puede volver a manufacturarse con procesos FDM, obteniendo características mecánicas muy similares como módulo de Young, resistencia a tensión, y resistencia a compresión .

El ABS puede ser reusado como combustible, al igual que los dos anteriores, con la misma recomendación, de tener en cuenta el cambio de su geometría interna después de la combustión. En la Tabla 11 se muestra la comparación de los combustibles en función de su reutilización y reciclabilidad.

*Tabla 11. Comparación de los combustibles en función de su reutilización, fuente: Autor.*

<b>Parámetro \ combustible</b>	<b>Parafina</b>	<b>HTPB</b>	<b>ABS</b>
<b>Reciclabilidad</b>	Si	No	Si
<b>Reusabilidad</b>	Si	Si	Si

### 5.3.3 Revisión económica general

El estudio de viabilidad está limitado al territorio colombiano, por tanto, fue necesario determinar su disponibilidad en el mercado nacional, así como efectuar una revisión general económica de la obtención de los granos de combustibles en este mercado.

#### 5.3.3.1 Revisión económica de la Cera de parafina

La parafina es de fácil adquisición a nivel nacional debido a que tiene diversos usos, domésticos, industriales, comerciales, entre otros (MERCOSUR, 2018). El estudio realizado por (Mazzetti, Merotto, & Pinarello, 2016), afirma que la parafina es un segmento prometedor para el desarrollo de cohetes de propulsión híbrida; este estudio también prevé una disminución del costo de manufactura de la parafina en un 75% a nivel mundial debido al uso que tiene la parafina para los microsátélites y la posibilidad de ofrecer diferentes alternativas de combustible para vuelos suborbitales; en el mercado nacional el precio del kilo de parafina sólida oscila entre 12.000 COP y 15.000 COP (este rango de precios fue obtenido promediando el valor que ofrecían varios proveedores) en los productores locales, a nivel de gran escala la empresa *Ecopetrol*<sup>®</sup> ofrece parafina liviana en estado líquido, a 3.317.338 COP por tonelada, es decir a 3.317 COP el Kilogramo (Ecopetrol, 2015).

No se tiene un valor monetario exacto del proceso de manufactura ya que en Colombia se realiza de manera artesanal. Sin embargo (Pulido Ruiz, 2008) indica que el costo de una vela de parafina con dimensiones similares a las del grano de combustible planteado en este trabajo, es de 300 COP por el método artesanal y 280 COP por método de automatización, teniendo en cuenta que estos valores solo aplican cuando se produce a

gran escala. Se estima que utilizando el método tradicional de manufactura la unidad de un grano similar al presentado en esta investigación cuesta alrededor de 600 COP, este precio no tiene en cuenta el costo de estudios de verificación y certificación de calidad post producción. Adicionalmente es necesario adquirir un molde para que, en el proceso de endurecimiento del grano, mantenga una geometría deseada, cuyo valor varía entre 5000 y 7500 COP, y un desmoldante de silicona el cual forma una película antiadherente que facilita el desmoldado, este producto cuesta alrededor de 21000 COP. En resumidas cuentas el costo aproximado para la manufactura del grano de combustible en cera de parafina oscila entre 26.300 y 29.100 COP

#### 5.3.3.2 Revisión económica del HTPB

El HTPB aunque es el poliuretano de poliolefina más común (Teng et al., 2018) y como combustible es el más usado en la combustión híbrida, solo es fabricado por países que son potencias mundiales en el campo de cohetaría, por lo tanto, ellos controlan su fabricación, comercialización y los insumos necesarios para fabricarlos. Por ende, actualmente el HTPB no se fabrica ni comercializa bajo ambientes legales en Colombia. Se logró obtener el precio de Estados Unidos, el cual ofrece medio galón de resina líquida de HTPB con el aglutinante necesario para su manufactura por 104.99 USD (Rocket Motor Parts, 2018); para traducir este precio monetario a la moneda Colombiana, se tuvo en cuenta el promedio establecido de la tasa cambiaria en Diciembre de 2018 de 2945,15 COP (Banco de la Republica de Colombia, 2018) obteniendo un precio de 309.211,72 COP sin incluir gastos de nacionalización y transporte. Para la manufactura del HTPB es

necesario el uso de una bomba de vacío resistente a sustancias químicas y de preferencia de catálogo industria, estas bombas oscilan en el mercado entre 900.000 y 1.700.000 COP según características, y al igual que la parafina este requiere un molde y desmoldante para su proceso de curado, los precios también son entre 5.000 y 7.500 COP para el molde y 21.000 COP para el desmoldante. Obteniendo un costo total de manufactura que abarca desde 926.000 hasta 1.728.500 COP

Según el artículo de (Research and Markets, 2018) el HTPB tiene una alta demanda como combustible para cohetes. Sin embargo, el alto precio; estrictas regulaciones gubernamentales para la fabricación, exportación e importación y las dificultades en el manejo de HTPB, obstaculizan su crecimiento en el mercado. Suramérica usa el 6% del HTPB del mundo (Smith, 2018) aunque no se encuentra información relevante de su consumo en el territorio colombiano.

### 5.3.3.3 Revisión económica del ABS

El ABS usado para la manufactura por método FDM es un material de fácil adquisición en Colombia; este termoplástico viene en presentación de rollos desde un kilo de filamento de 1,75 mm de diámetro, tiene un valor económico que oscila entre los 70.000 y 80.000 COP (este rango de precios fue obtenido promediando el valor que ofrecían varios proveedores). A nivel mundial, solo en el 2010, se produjeron más de 1,4 billones de kilogramos de ABS (Feldman, 2018). Su disponibilidad en Colombia es alta debido a

que la tecnología FDM está en auge y este material junto al PLA son los más usados para manufacturar bajo este método (3Dnatives, 2018).

El costo de su manufactura varía dependiendo del modelo, para este caso, el modelo planteado tomó 20 horas y 42 minutos en ser obtenido, y cada minuto de manufactura cuesta entre 90 y 120 COP (este rango de precios fue obtenido promediando el valor que ofrecían varios proveedores), es decir el grano combustible con la geometría diseñada para esta investigación, tiene un costo que varía desde los 111.780 COP hasta los 149.040 COP por cada grano de combustible terminado.

Comparando los resultados de los tres combustibles se obtiene la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación de los combustibles en función de sus costos, fuente: Autor

<b>Parámetro \ Combustible</b>	<b>Parafina</b>	<b>HTPB</b>	<b>ABS</b>
<b>Disponibilidad en el mercado colombiano</b>	Sí	No	Sí
<b>Costo de insumos/kilogramo [COP]</b>	12.000- 15.000	309.211,72	70.000- 80.000
<b>Costo de manufactura [COP]</b>	26.300-29.100	926.000 - 1.728.500	111.780-149.040

Es importante tener en cuenta que el costo de insumos está establecido para un kilogramo de cada material. Sin embargo, para el desarrollo de experimentos de este tipo, se debe tener en cuenta que la cantidad de masa está en función de la geometría de la cámara, por tanto, para este proyecto se requirieron 0,35 kg de combustible.

#### 5.3.4 Propiedades Físicas del grano de combustible

Se establecieron las siguientes propiedades físicas importantes de analizar dentro del estudio de viabilidad: Densidad, Temperatura de autoignición, *flash point*, punto de fusión, conductividad térmica, difusividad térmica, resistencia a la fluencia, calor específico y resistencia a la fractura.

Para esto fue preciso analizar los estudios y literatura existentes sobre cada una de estas propiedades. En la Tabla 13 se compilan estas características para el ABS, la parafina, y el HTPB.

#### 5.3.4.1 Propiedades físicas de un grano de Cera de Parafina

Como se han mencionado a lo largo de este documento, la parafina posee gran variedad de usos domésticos, por ende, abundan investigaciones sobre sus propiedades físicas. El valor de la densidad y de la temperatura de fusión se obtuvo de la investigación de (Akhter & Hassan, 2018), arrojando un valor de  $0,98 \text{ g/cm}^3$  y  $53\text{-}57 \text{ }^\circ\text{C}$  respectivamente, de la investigación de (Abyzov, Kidalov, & Shakhov, 2011) se obtuvieron datos de la conductividad térmica  $0.2 \text{ W /m}^\circ\text{K}$ , el valor de resistencia a la fractura por tensión se obtuvo de (Tang et al., 2017), arrojando un valor de  $1,40 \text{ MPa}$ , y finalmente de la publicación de (Correra, Fasano, Fusi, Primicerio, & Rosso, 2007) se determina que la difusividad térmica es de  $3,20 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ; de diferentes fichas técnicas se determinó que la temperatura de auto ignición es de  $245^\circ\text{C}$ , el *flash point* se encuentra cuando la temperatura es de  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ , y el calor específico varía entre  $2140$  y  $2900 \text{ J.kg/K}$ .

#### 5.3.4.2 Propiedades físicas de un grano de HTPB

El valor de la densidad se obtuvo, al igual que el de la parafina, de la investigación de (Akhter & Hassan, 2018) arrojando un valor de  $0,93 \text{ g/cm}^3$ . Por otra parte (Shan, Hou, & Piao, 2013) afirma que el valor de conductividad térmica del HTPB es de  $0.1572 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , así mismo la difusividad térmica se obtuvo del trabajo de (Erikson et al., 2014) en donde expone un valor de  $2.1 * 10^{-7}$  a  $2.3 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , para este material se asume que la

temperatura de autoignición es muy similar a la temperatura de descomposición, pues al presentarse una ignición del material se generan procesos de descomposición, lo que lleva a la investigación de (Wang et al., 2015) que arrojó un valor de temperatura de descomposición entre 242°C y 421°C, en una atmosfera rica en oxígeno, el calor específico se obtuvo de (R. Thomas, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, 2010), donde se obtuvo un valor que oscila entre los 1000 y los 1300 J/Kg\*K, y finalmente, de fichas técnicas del material se obtuvieron los siguientes datos: resistencia a la fractura de 0,922MPa y temperatura de *flash point* de 205°C. Sus propiedades físicas no le permiten tener punto de fusión, pues al tener altas temperaturas se carboniza.

#### 5.3.4.3 Propiedades físicas de un grano de ABS

Según la ficha técnica del material expuesta en el Anexo 2, la densidad del material es de 1,03 g/cm<sup>3</sup>, la temperatura de fusión es de aproximadamente 100°C, la temperatura de auto ignición es de 466°C, y el flash point se encuentra cuando la temperatura del material es de 404°C, los parámetros restantes se obtuvieron de diferentes fichas técnicas de otros proveedores, debido al uso comercial del ABS, se pueden asumir como correctos los siguientes datos: resistencia a fractura de 33,9 MPa, calor específico de 1468 J/kg\*K, difusividad térmica de 0,12 mm<sup>2</sup>/s, y conductividad térmica de 0,18 W/m\*K. Con el fin de comparar todos los parámetros de los tres combustibles en las mismas unidades, se representarán los valores en la Tabla 13, adicionalmente si los valores se encuentran dentro de un rango se promedian los datos.

Tabla 13. Comparación de Propiedades físicas, fuente: Autor.

<b>Parámetro \ combustible</b>	<b>Parafina</b>	<b>HTPB</b>	<b>ABS</b>
<b>Densidad</b>	890 kg/m <sup>3</sup>	930 kg/m <sup>3</sup>	1030 kg/ m <sup>3</sup>
<b>Temperatura de auto ignición</b>	245 °C	331,5°C	466°C
<b>Flash point</b>	190 °C	205°C	404°C
<b>Punto de fusión</b>	55°C	-	100 °C
<b>Conductividad térmica</b>	0,20 W/m°C	0,157 W/m°C	0,17 W/m°C
<b>Difusividad térmica</b>	3,2 E 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	2.2 E 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	1,2 E 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
<b>Resistencia a la fractura</b>	1,40 MPa	0,922MPa	33,9 MPa
<b>Calor específico</b>	2520 J/kg·K	1150 J/kg·K	1468 J/kg·K

Ya que los parámetros expuestos en la tabla anterior son propiedades intensivas, se puede asumir que su valor es invariable.

### 5.3.5 Prestaciones como combustible

El ultimo parámetro a comparar son las prestaciones mecánicas que ofrece el material como combustible, ya que sin este parámetro no se puede determinar qué tan útil puede ser generar empuje bajo unas condiciones de operación específicas.

#### 5.3.5.1 Prestaciones de la Cera de Parafina como combustible

En cuanto a sus prestaciones como combustibles el estudio de (M. Karabeyoglu et al., 2001) establece que, parámetros como la viscosidad del material, juegan un papel crítico para determinar el empuje que estos motores generan, según este autor, materiales con baja viscosidad generan más empuje. La parafina es un material de alta viscosidad y tiene una alta tasa de regresión, aproximadamente cinco veces mayor a la del HTPB, como se muestra en la Figura 29.

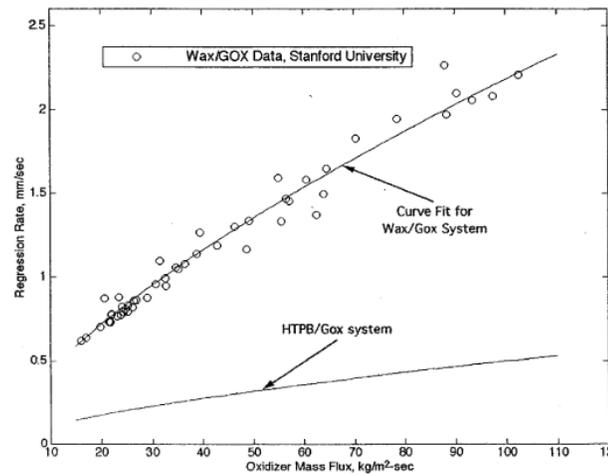


Figura 29. Tasa de regresión lineal de la parafina y el HTPB en función del flujo de oxidante, fuente: (M. Karabeyoglu et al., 2001)

### 5.3.5.2 Prestaciones del HTPB como combustible

El HTPB es un combustible del que se han realizado amplios estudios caracterizando su comportamiento, gracias a (Thomas et al., 2015) se conoce que agregando partículas de aluminio al HTPB se obtiene un aumento de la tasa de regresión; esta mejora se debe a la liberación de energía de la oxidación del metal y a la mejora de los flujos de calor de radiación desde la zona de difusión de la llama hasta la superficie del combustible.

También se conoce la investigación realizada por (Sun et al., 2016) en donde compara las diferentes prestaciones del HTPB con varios tipos de oxidante, entre ellos el GOX (oxígeno gaseoso), el  $N_2O$  (Óxido de Nitrógeno) y el HTP (Peróxido de Hidrógeno grado reactivo), concluyendo que el GOX es el que mejores prestaciones ofrece, ya que tienen una tasa de regresión mayor.

En la investigación realizada por (Chiaverini, Serint, K., & Lu, Y. C, Kuol, K. K., 2017) comparan los resultados de la tasa de regresión lineal del HTPB obtenidos de su experimentación con los resultados de otros autores, como lo son Sutton, Lengelle y Strand (Figura 30)

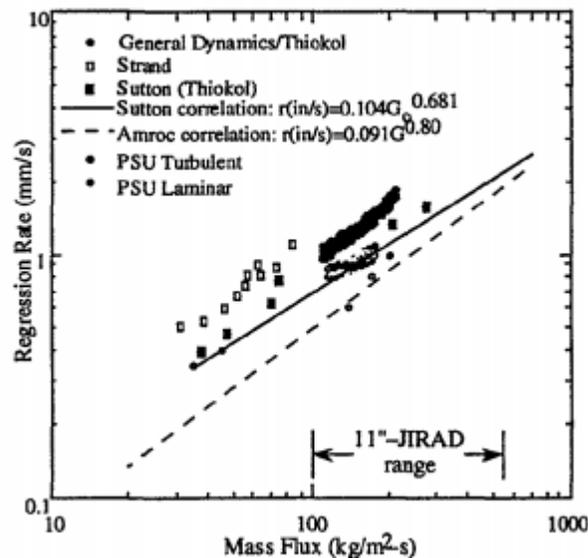


Figura 30. Comparación de los resultados de la tasa de regresión lineal del HTPB, fuente: M. J. Chiaverini, Serint, K., & Lu, Y. C, Kuol, K. K., 2017

Como se apreció en la Figura 30, la experimentación realizada tuvo dos análisis, uno hecho con un flujo turbulento y otro con un flujo laminar, mostrando que el flujo turbulento presentó mayores valores de regresión lineal que los arrojados bajo flujo laminar.

Adicionalmente se tiene la investigación de (Whitmore et al., 2013) en la que compara las prestaciones del ABS y del HTPB como combustible, mostrando que en una prueba de 12 segundos se obtuvo un valor estable de 800N aproximadamente para el HTPB y 700N

para el ABS, evidenciando que el HTPB ofrece un 12,5% de mejora en función del empuje que el ABS, como se puede apreciar en la Figura 31.

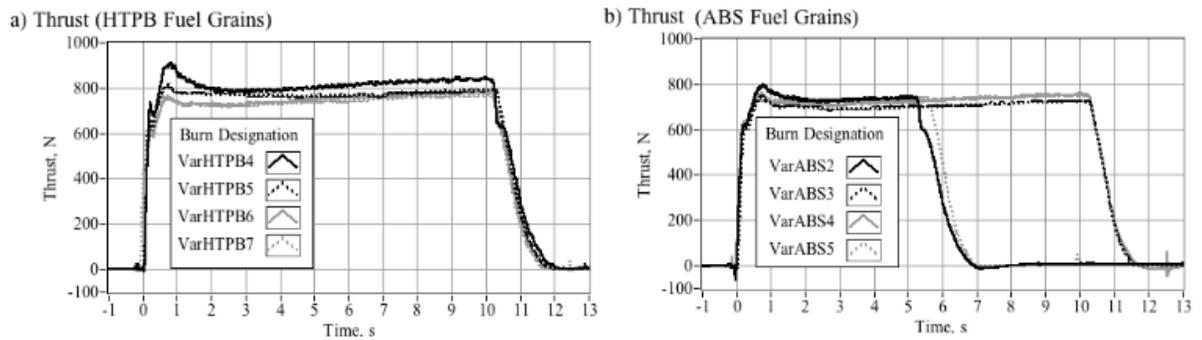


Figura 31. Comparación de ABS con HTPB fuente: (Whitmore et al., 2013)

### 5.3.5.3 Prestaciones del ABS como combustible

Debido a que el ABS no es utilizado ampliamente como material para combustión híbrida en cohetes, hay escasos estudios que especifiquen las prestaciones que este material pueda tener como combustible, no obstante, su proceso de combustión se puede estudiar como si fuera una degradación termoquímica de un polímero según (Wilczura-Wachnik, 2010) los procesos que estén bajo la presencia de productos químicos como el  $N_2O$  y con polímeros como el ABS, presentan una degradación química; la cual debe mantener una alta temperatura con el fin de liberar energía, adicionalmente (Castellanos Vargas, 2014) afirma que los polímeros se comportan como combustible en caso de estar en presencia de una fuente de ignición y de contar con oxígeno necesario, sin embargo, debido a la variedad de productos plásticos que se producen hoy en día, los aditivos que se agregan y la manufactura del material entre otros, pueden variar ampliamente los aspectos que afectan al proceso de combustión, entre ellos el tiempo de combustión, difusión de llama y tipo de llama entre otras.

En resumen, se puede utilizar un parámetro que permite comparar las prestaciones como combustible de un material, este es el impulso específico de combustible, el cual se calculó anteriormente para el ABS a una relación de O/F de 7,8 aproximadamente, con una presión inicial en la cámara de 20 bar (2 MPa) y usando  $N_2O$  como oxidante; obteniendo un resultado de 259,55 s. Gracias a la investigación de (Okninski, 2018), se puede afirmar que con el mismo oxidante, la misma presión inicial y la misma relación O/F, el HTPB tiene un impulso específico de 230 s, y la parafina de 233 s (Figura 32).

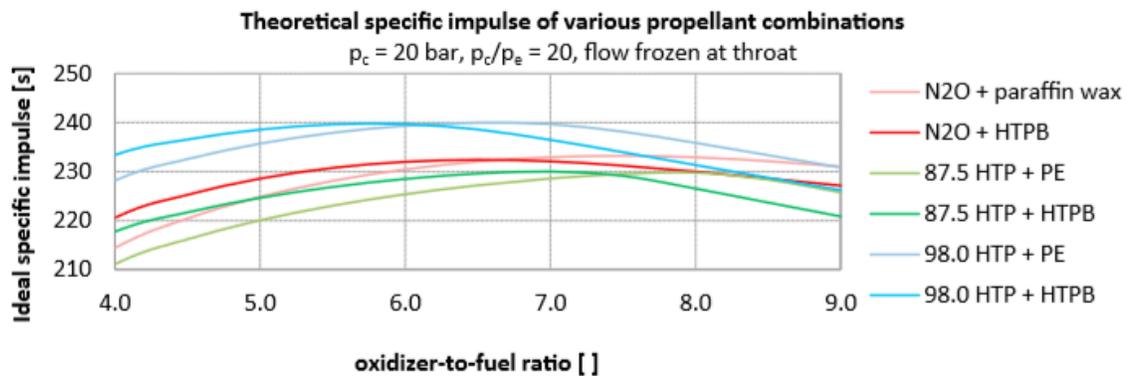


Figura 32. Impulso de varios propelentes combinados con diferentes oxidantes, en función de su relación O/F. fuente: (Okninski, 2018)

Los resultados de los tres combustibles en función de sus prestaciones como cohete se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de combustibles en función del impulso específico. fuente: Autor

Parámetro \ Combustible	Parafina	HTPB	ABS
<b>Impulso específico.</b>	233 s	230 s	259,55 s

### 5.3.6 Resumen de las tablas.

Con el fin de resumir todos los criterios expuestos se realizó una tabla que condensa todos los parámetros comparados de los tres combustibles (Tabla 15).

Tabla 15. Resumen de los parámetros comparativos. fuente: Autor

<b>Categoría</b>	<b>Parámetro \ combustible</b>	<b>Parafina</b>	<b>HTPB</b>	<b>ABS</b>
Manufactura	Tiempo de manufactura para fabricación de un grano	5 horas	15 días	1 día
	Porosidad a una escala de 50 micrómetros	Si	No	No
Factores Ecológicos	Reciclabilidad	Si	No	Si
	Reusabilidad	Si	Si	Si
Factores Económicos	Disponibilidad en el mercado colombiano	Si	No	Si
	Costo de insumos [COP]	12.000- 15.000	309.211,72	70.000- 80.000
	Costo de manufactura [COP]	26.300-29.100	926.000 -1.728.500	111.780-149.040
Características Físicas	Densidad	890 kg/m <sup>3</sup>	930 kg/ m <sup>3</sup>	1030 kg/ m <sup>3</sup>
	Temperatura de auto ignición	245 °C	331,5°C	466°C
	Flash Point	190 °C	205°C	404°C
	Punto de fusión	55°C	-	100 °C
	Conductividad térmica	0,20 W/m°C	0,157 W/m°C	0,17 W/m°C
	Difusividad térmica	3,2 E10-7 m <sup>2</sup> /s	2.2E10-7 m <sup>2</sup> /s	1,2 E10-7 m <sup>2</sup> /s
	Resistencia a la fractura	1,40 MPa	0,922MPa	33,9 MPa
	Calor específico	2520 J/kg·K	1150 J/kg·K	1468 J/kg·K
Prestaciones	Impulso específico.	233 s	230 s	259,55 s

## 6. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación se pueden clasificar en dos ítems: el primero es la validación de datos experimentales obtenidos en banco de pruebas, para luego ser comparados con los datos obtenidos en la teoría, y el segundo es el estudio de viabilidad del uso del ABS en función de su comparación con los combustibles ABS y HTPB, teniendo en cuenta los parámetros expuestos.

### 6.1 Obtención de datos en banco.

Como se mencionó anteriormente las pruebas de validación experimental de cuatro granos de combustible ABS, se realizaron en el banco UCAND 1-Motor híbrido Phoenix, adquiriendo mediciones de temperatura a la salida de la cámara (Figura 33), presión en la cámara (Figura 34), y fuerza de empuje (Figura 35) en un sistema de adquisición de datos centralizado *Texas Instruments*<sup>®</sup> a una tasa de muestreo de aproximadamente 100 mediciones por segundo. (Urrego P, Rojas M, & Muñoz L, 2018)

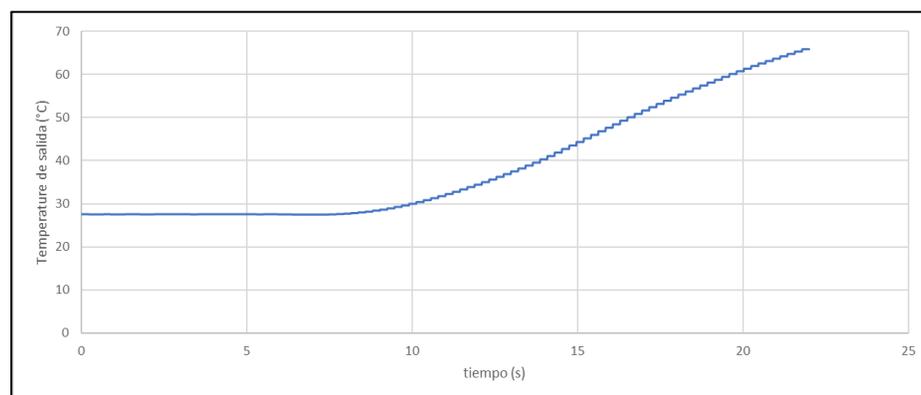
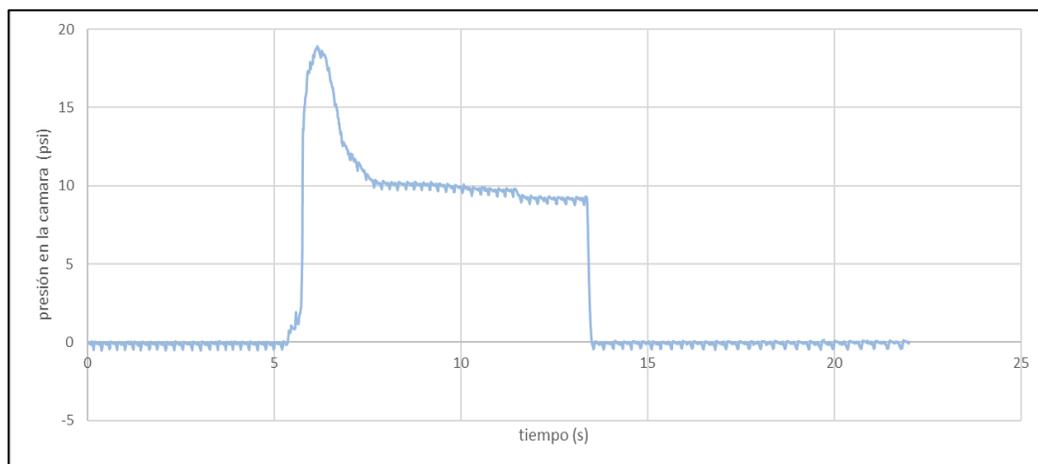


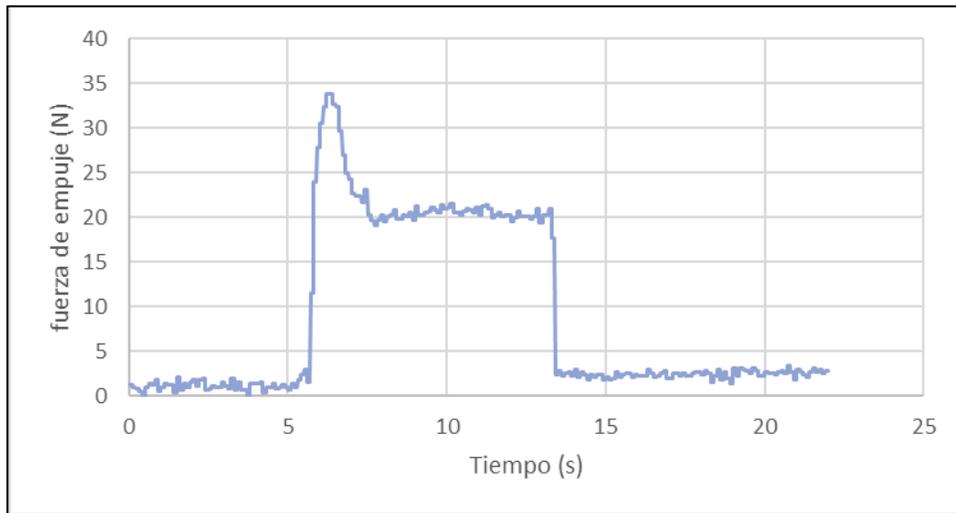
Figura 33. Datos de temperatura obtenidos del banco motor, fuente: Autor

De la Figura 33 se puede apreciar que aproximadamente seis segundos después del inicio de la toma de datos, empieza el proceso de combustión pues el sensor detecta elevación de temperatura exponencial en la garganta de la tobera. Durante la ventana de medición se observa un incremento congruente con la temperatura de gases provenientes del proceso de combustión.



*Figura 34. Datos de presión obtenidos del banco motor, fuente: Autor*

En la Figura 34 se puede apreciar el comportamiento de presión, su pico máximo se presenta al inicio de la combustión, y finaliza con un comportamiento aproximadamente estable, también se puede notar el que proceso de combustión comienza aproximadamente en el segundo 5,5 y que la combustión tiene un tiempo aproximado de 7 segundos. El empuje de este tipo de motores, después del pico de empuje transiente, generalmente evidencia comportamientos de tipo regresivo, hasta finalizar su combustión, lo cual es ciertamente congruente con el comportamiento evidenciado.



*Figura 35. Datos de empuje obtenidos del banco motor, fuente: Autor*

Finalmente, en la Figura 35 se observa que el comportamiento entre el empuje y la presión es muy similar, e incluso presentan su pico transiente máximo en la misma zona, corroborando que se realizó una correcta toma de datos del proceso experimental, ya que los dos sensores responsables de la toma de mediciones son físicamente distintos y adquieren sus datos por canales totalmente independientes.

Para determinar el impulso específico generado, se debe tener en cuenta el empuje, por eso se separan las cuatro graficas obtenidas de empuje (una por cada prueba experimental) y se analizaron solo en el tiempo en donde se presenta la combustión. Con el fin de obtener un dato aproximado del empuje generado se realizó un modelo longitudinal estadístico el cual, efectuando un análisis de varianza, permite obtener una curva promedio ajustada como la que se observa en la Figura 36.

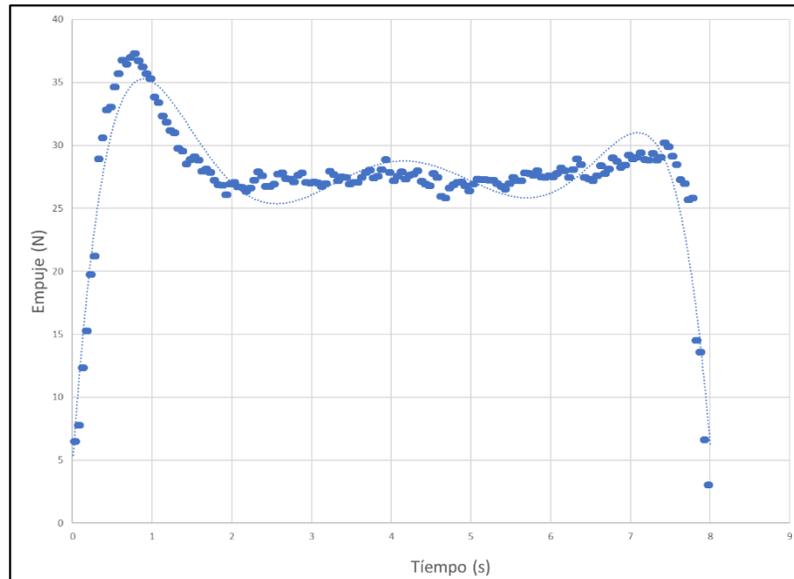


Figura 36. Datos representativos del empuje generado de los cuatro granos de ABS, fuente: Autor

Según (Sun et al., 2016) para un análisis preliminar correcto del resultado de empuje se tienen en cuenta los datos solo cuando se presenta una combustión estable, de esta manera se desprecian las porciones transientes (ignición y apagado de la combustión). En la Figura 36 se puede apreciar que entre los datos del segundo 1,8 al segundo 7,4 se genera una combustión estable, pues se presenta una convergencia de resultados, esto conlleva a despreciar el valor del pico máximo del principio y el proceso de apagado al final; si se promedian los datos que están dentro del rango de la combustión estable se obtiene un resultado de 27,5773 N.

Para determinar el valor del impulso total experimental, como lo explica la ecuación (6), se calculó el área bajo la curva de la gráfica expuesta en la Figura 36, para realizar esto primero se determinó la función que describe el comportamiento del empuje, se asume

que por su forma, se puede obtener un polinomio de grado seis, se tomaron siete puntos de la gráfica y por medio de una matriz se logra determinar que la función que describe el comportamiento es  $F(t) = -0,0396t^6 + 0,9698t^5 - 9,1746t^4 + 41,986t^3 - 94,353t^2 + 91,164t + 4,5104$ . La integración se debe realizar de 0 a 7 segundos, tal y como se muestra a continuación

$$I_t = \int_0^7 (-0,0396t^6 + 0,928t^5 - 9,1746t^4 + 41,986t^3 - 94,356t^2 + 91,164t + 4,5104)dt \quad (24)$$

$$= 197,093Ns$$

El impulso específico se calcula por medio del impulso total, de la gravedad y del gasto de propelente, estos datos son constantes para el desarrollo experimental como el teórico, por lo tanto:

$$I_{esp} = \frac{I_t}{m_t * g} = \frac{197,093Ns}{(0,07kg + 0,009kg) * 9,8 \frac{m}{s^2}} = 253,93 s \quad (259)$$

Adicionalmente se calculó la relación O/F real teniendo en cuenta el flujo de oxidante, el tiempo de combustión (Tabla 9) y la masa de combustible gastada.

$$\frac{O}{F} = \frac{0,0095 \frac{kg}{s} * \frac{1000 gr}{1kg}}{\frac{0,009 kg}{7 s} * \frac{1000 gr}{1kg}} = 7,38 \frac{gr N_2O}{gr ABS} \quad (26)$$

## 6.2 Comparación de datos teóricos y experimentales

Como se puede apreciar en la Tabla 16, los resultados teóricos, obtenidos en la ecuación 22 y los resultados experimentales de la ecuación 25 arrojan valores muy cercanos, con un error porcentual de alrededor del 2%.

Tabla 16. Cálculo de error porcentual de los datos teóricos y experimentales, fuente: Autor.

$I_{esp}$ Dato experimental	$I_{esp}$ Dato teórico	$I_{esp}$ Error porcentual
253,93 s	259,55 s	2,164 %

Según lo expuesto en la metodología de la investigación, al obtener un error porcentual menor al 5%, no es necesario más pruebas teóricas o experimentales.

Aunque la relación O/F no es parámetro común al momento de comparar combustibles, se puede realizar una comparación con este dato, teniendo en cuenta la relación O/F calculada estequiométricamente (Ecuación 18) y la relación O/F calculada experimentalmente (Ecuación 26). Dicha comparación se puede apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17 Cálculo de error porcentual de la relación O/F. fuente: Autor

O/F Datos experimentales	O/F Datos teóricos	Error porcentual
7,38	7,8	5,270 %

El error porcentual es mayor al 5%, debido a que se realizó el cálculo experimental de una relación O/F estequiométrica, y en un caso real de combustión siempre hay combustible dentro del proceso que no se aprovecha (mezcla pobre).

### 6.3 Tablas de viabilidad del combustible.

Ya se han hecho estudios de calidad de combustibles en Colombia, pero se enfocan en la combustión empleada para automóviles, haciendo énfasis en su factores ecológicos (Arango, 2009), al no existir una investigación enfocada en la combustión de motores cohete se debe plantear una metodología para comparar los tres combustibles.

Para dar respuesta a la pregunta que originó esta investigación: ¿Es viable el ABS como combustible alternativo para la propulsión híbrida en Colombia? se elaboró una tabla de decisión para cada combustible en donde se condensa toda la información expuesta anteriormente y se califica su viabilidad de uno a cinco (siendo uno la calificación más baja y cinco la más alta), esto con el fin de comparar los resultados. Los criterios de evaluación se muestran en la Tabla 18.

*Tabla 18. Criterio de evaluación. fuente: Autor*

Calificación de su viabilidad	Criterio de evaluación
5	Entre los tres parámetros de combustible, es el que mejor aporta a su desarrollo viable como combustible alternativo para la propulsión híbrida en Colombia
4	Aunque el parámetro aporta al desarrollo viable como combustible alternativo para la propulsión híbrida en Colombia no ofrece el mejor resultado en comparación a los otros dos.
3	Es viable como combustible alternativo para la propulsión híbrida en Colombia, sin embargo, presenta alguna o varias limitaciones de orden tecnológico o económico.
2	Es viable como combustible alternativo para la propulsión híbrida, pero no en territorio colombiano
1	Este parámetro no lo hace viable en absoluto.

La primera tabla fue la de cera de parafina (Tabla 19) como se puede apreciar se expone cada criterio y se enfoca en justificar la calificación de su viabilidad.

Tabla 19. Tabla de decisión de Cera de parafina, fuente: Autor.

Categoría	Criterio	Cera de parafina	
		Justificación de su calificación	Calificación de su viabilidad
Manufactura	Tiempo de manufactura	El tiempo de manufactura de la parafina es de aproximadamente una hora, es el valor más bajo en comparación a los otros dos combustibles, con lo que se puede afirmar que su tiempo es bastante óptimo, lo que genera que sea viable por este aspecto.	5
	Calidad de la manufactura	Los procesos de manufactura de la parafina pueden generar poros internos dentro del material sólido, generando irregularidades en la combustión, lo que puede llevar a un comportamiento errático en el empuje o el impulso generado. En Colombia es posible obtener un buen grano combustible de parafina, pero siempre se presentarán poros internos que puedan presentar comportamientos erráticos en la combustión	3
Reciclabilidad y Reusabilidad	Reciclabilidad	La cera de parafina tiene diferentes usos domésticos y puede ser reciclada para otros elementos como velas o lubricantes. Lo que la hace viable según esta categoría.	5
	Reusabilidad	Este elemento puede ser reutilizado como combustible teniendo en cuenta, que la combustión incrementó el diámetro hidráulico de la geometría interna por la cual pasa el fluido, si se desea volver a manufacturar otro grano con el material restante es posible.	5
Revisión económica general	Disponibilidad En El Mercado Colombiano	Debido a que la parafina tiene diferentes usos domésticos, y como el mayor productor y distribuidor de parafina en Colombia es también una de las empresas más rentables en Colombia, se puede afirmar que si está disponible en el mercado y es de fácil adquisición.	5
	Costo De Insumos	El costo monetario de los insumos de la cera de la parafina que se usa para la fabricación de granos abarca desde los 12.000 a los 15.000 COP por kilo, siendo los insumos más económicos de los tres combustibles comparados.	5
	Costo De Manufactura	La manufactura de la parafina para la fabricación de un grano con las dimensiones que se usaron en este experimento cuesta alrededor de 26.300 a 29.100 COP, incluyendo moldes y desmoldante, que es un precio óptimo para el desarrollo del combustible en Colombia.	5
Prestaciones mecánicas	Densidad	Al tener el valor más bajo de densidad en comparación, es el que menos masa aporta por unidad de volumen, lo que traduce en menor combustible almacenado, por ende, menor capacidad energética total disponible, lo cual no es viable para la implementación en Colombia.	1
	Temperatura de auto ignición	Una temperatura de auto ignición de 245 °C es la más baja en comparación a los otros dos materiales, gracias a esto se requiere menor energía de activación y por ende un alto aprovechamiento del combustible	5
	Flash point	Una temperatura de flash point baja como la de la parafina (190 °C) genera una combustión rápida, en la cual se aproveche todo el poder calorífico que pueda ofrecer el material.	5
	Punto de fusión	Con un punto de fusión tan bajo, en comparación con el ABS, genera que se presenten tasas de quemado altas, lo que traduce en un mayor aprovechamiento del combustible generando una viabilidad media desde este punto de vista mecánico.	4
	Conductividad térmica	Tiene el valor más alto de conductividad, esto genera altas tasas de transferencia de calor por conducción a través del grano, generando posibles deformaciones estructurales por afectación térmica en la cámara de combustión y en el mismo grano combustible.	1
	Difusividad térmica	La alta difusividad del material conlleva a un bajo almacenamiento de calor en el grano, por ende, conlleva a pérdidas energéticas por transferencia de calor, al ser el material con mayor valor de difusividad, no lo hace viable desde este punto.	1
	Resistencia a la fractura	En comparación con el HTPB tiene mayor resistencia, pero presenta un valor demasiado bajo en comparación con el ABS, lo que lo hace frágil y propenso a fracturas por clivaje, con la limitante de una protección superficial bastante óptima puede ser viable este combustible.	3
	Calor específico	Al tener un elevado calor específico, se requiere una alta cantidad de energía para aumentar su temperatura, lo que traduce en un almacenamiento energético elevado y una entrega de calor lenta, debido a que el motor es una máquina térmica, que requiere una entrega de calor, un alto valor de calor específico disminuye la calificación en esta característica.	1
Prestaciones como combustible	Impulso específico	Genera un impulso específico bajo en comparación al ABS, lo cual genera buena viabilidad en este aspecto.	4

La segunda tabla de decisión (Tabla 20) realizada fue la del HTPB la cual se muestra a continuación.

Tabla 20. Tabla de decisión del HTPB, fuente: Autor.

Categoría	Criterio	HTPB	
		Característica	Calificación de su viabilidad
Manufactura	Tiempo de manufactura	Para el caso de HTPB su tiempo de manufactura es alrededor de 15 días (tiempo de curado), es muy extenso en comparación al ABS y la cera de parafina.	1
	Calidad de la manufactura	El Proceso de manufactura del HTPB es bastante óptimo en el tema de su calidad, una vez se termina por completo el proceso de curado, se obtiene granos de alta calidad, pues al usar una bomba de vacío se replica con alta precisión la geometría del molde de vaciado y se disminuye la presencia de las burbujas que pueden generar poros internos. Al evitar poros internos se puede afirmar que en esta característica es viable para la propulsión híbrida en Colombia.	5
Reciclabilidad y Reusabilidad	Reciclabilidad	El HTPB, una vez efectuado el proceso de combustión, se carboniza y no puede ser reciclado, por lo cual se puede afirmar que no es viable en este punto.	1
	Reusabilidad	Este elemento puede ser reutilizado como combustible teniendo en cuenta que la combustión incrementó el diámetro hidráulico de la geometría interna por la cual pasa el fluido, aunque el material resultante no puede volver a ser manufacturado para la creación de un nuevo grano, es viable teniendo en cuenta dicha limitación. (reignición)	3
Revisión económica general	Disponibilidad En El Mercado Colombiano	El HTPB es un compuesto cuya distribución está fuertemente controlada por países potencias en el tema de la coherencia, por ende, es de difícil acceso en el mercado colombiano.	2
	Costo De Insumos	Sus insumos son más costosos en comparación con los otros dos combustibles, y depende en gran medida de la variación del valor de divisas extranjeras, las tarifas arancelarias, y el costo de nacionalización, por ende, su viabilidad es cuestionable.	2
	Costo De Manufactura	El valor de la manufactura dependería de la bomba de vacío (incluyendo sus sellos y sus bolsas de vacío), de los moldes y el desmoldante, obteniendo un valor que varía desde 926.000 hasta 1.728.500 COP siendo el costo más alto entre los tres materiales, además hay que tener en cuenta que el costo aumentaría drásticamente si se emplea una manufactura asistida por microondas, con un precio tan elevado en comparación se puede decir que no es viable.	1
Prestaciones mecánicas	Densidad	Aunque no es valor de densidad más alto, es bastante cercano al del ABS, generando viabilidad desde este punto	4
	Temperatura de auto ignición	Una temperatura de auto ignición de 331,5°C genera una combustión estable permitiendo el desarrollo del empuje en el motor, no es el mejor valor, pero sigue siendo un resultado óptimo.	4
	Flash point	Es un valor demasiado cercano al de la parafina, lo que puede generar una combustión rápida, para aprovechar de mejor manera el oxidante.	4
	Punto de fusión	Sus propiedades físicas no le permiten tener punto de fusión, pues al tener altas temperaturas se carboniza no se deforma, retardando el consumo de combustibles, obteniendo un aprovechamiento mayor y unas tasas de quemado altas en comparación a los otros combustibles	5
	Conductividad térmica	Al presentar el valor más bajo de conductividad, es el material que menos posibilidades tiene de generar alguna deformación térmica a la cámara.	5
	Difusividad térmica	Presenta un valor promedio entre los otros dos combustibles, lo que conlleva a que no sea demasiado alta para generar pérdidas elevadas, ni tan bajas para tomarlas como despreciables.	4
	Resistencia a la fractura	Es el material más frágil de los tres, lo cual genera complicaciones al momento del transporte y su manipulación	1
	Calor específico	Al tener un bajo calor específico, se requiere menor cantidad de energía para aumentar su temperatura, y puede entregar calor de manera más rápida, debido a que el motor es una máquina térmica, un bajo valor mejora su rendimiento	5
Prestaciones como combustible	Impulso específico	Genera un impulso específico bajo, en las condiciones de análisis, aunque la investigaciones arrojan que el HTPB ofrece empujes mayores al del ABS (Whitmore et al., 2013), la diferencia entre ambos es despreciable en comparación al ABS.	4

Por último, se tiene la tabla de decisión del combustible ABS (Tabla 21)

Tabla 21. Tabla del ABS, fuente: Autor.

Categoría	criterio	ABS	
		Característica	Calificación de su viabilidad
Manufactura	Tiempo de manufactura	El ABS con su tiempo de manufactura de aproximadamente 24 horas por grano, sigue mantenido un rango aceptable de tiempo pues, aunque es más del doble de tiempo que el requerido para la parafina, sigue siendo mucho más rápido que el HTPB, lo que genera viabilidad por este aspecto.	4
	Calidad de la manufactura	Si se toman en cuenta la tecnología FDM para la manufactura del ABS, se puede catalogar como viable por su calidad de manufactura, pues dependiendo los parámetros de entrada que se usen en la máquina, puede asegurar una impresión tridimensional con buena tolerancia dimensional, aunque sigue presentando poros internos nivel microscópico a diferencia del HTPB.	3
Reciclabilidad y Reusabilidad	Reciclabilidad	El ABS al ser un termoplástico se puede reciclar, de diferentes maneras, adicionalmente se puede usar plástico reciclado para la fabricación de granos de combustibles, pues las propiedades del ABS virgen y del reciclado se puede asumir como iguales.	5
	Reusabilidad	Este elemento puede ser reutilizado como combustible teniendo en cuenta que la combustión incrementó el diámetro hidráulico de la geometría interna por la cual pasa el fluido, además puede volver a manufacturarse por diferentes métodos, generando un nuevo grano.	5
Revisión económica general	Disponibilidad En El Mercado Colombiano	El ABS para la manufactura por medio FDM, es bastante común en tiendas especializadas en este tema, se pueden conseguir con diferentes diámetros de filamentos, así como en una gran variedad de colores.	5
	Costo De Insumos	El ABS tiene un precio entre 70.000 y 80.000 COP, es más costoso que el costo de la parafina por paquete individual, pero teniendo en cuenta que con un kilo se pueden obtener aproximadamente dos granos y medios de combustible, como los que se usaron en esta investigación, sigue teniendo un precio viable para su implementación.	4
	Costo De Manufactura	Para la manufactura del ABS se encuentra un precio que oscila entre 111.780 COP y 149.040 COP por un grano de combustible, aunque su valor es más elevado que el de la parafina, sigue siendo mucho más económico que el del HTPB.	4
Prestaciones mecánicas	Densidad	Al tener el valor más alto de densidad es quien más masa de combustible almacena en el mismo volumen, lo cual es muy provechoso para la experimentación	5
	Temperatura de auto ignición	Una temperatura de auto ignición de 466°C es la más alta en comparación a los otros dos combustibles, generando una alta cantidad energética para su activación, lo que puede significar una pérdida energética debido al retraso en la ignición	1
	Flash point	Un valor de temperatura de flash point, tan alto genera que el inicio de la combustión sea lento, lo que puede generar que se desperdicie oxidante mientras se inicia la combustión.	1
	Punto de fusión	Su valor elevado de punto de fusión hace que este combustible no sea viable analizándolo desde este criterio, pues el motor con dicho combustible obtendrá tasas de quemado bajas, lo cual es una de las desventajas más mencionadas en los motores híbridos	1
	Conductividad térmica	Tiene un valor intermedio entre los otros dos combustibles, pero más cercano al HTPB lo que hace que su calificación sea óptima.	4
	Difusividad térmica	Al tener el valor más bajo en comparación con los otros combustibles, es quien más almaceno calor dentro del material, lo que genera que se aproveche de mejor manera su poder calorífico.	5
	Resistencia a la fractura	Es el material más resistente entre los tres combustibles comparados, lo que conlleva a que no se necesiten grandes precauciones al momento de transportarlo o manipularlo	5
	Calor específico	Presenta un valor cercano al del HTPB, con ese valor tan bajo ayuda también al rendimiento del motor.	4
Prestaciones como combustible	Impulso específico	Es el material que ofrece un mayor valor de impulso específico, en comparación adicionalmente si se tiene en cuenta que el ABS es un polímero que fue diseñado para cohertería, por lo tanto, tiene inhibidores que afectan el proceso de la combustión, si se retiran estos inhibidores pueden llegar a incrementar más estos valores.	5

Debido a hay parámetros que contribuyen de mejor manera al desarrollo de un material como combustible, se propone la siguiente distribución porcentual expuesta en la Tabla

22

Tabla 22. Evaluación del valor porcentual de cada criterio, fuente: Autor.

Criterio	valor porcentual	Justificación
Impulso Específico	30%	Se puede observar la característica con mayor valor porcentual es el impulso específico generado, debido a que la finalidad de un combustible es ofrecer prestaciones mecánicas, además de ser el parámetro más usado en la literatura para comparar motores cohetes.
Calidad de la manufactura	15%	La calidad de la manufactura es el segundo criterio con un valor porcentual más alto, con 15%, este parámetro es vital ya que, si el grano tiene una manufactura deficiente, el combustible simplemente no funciona.
Disponibilidad En El Mercado Colombiano	14%	El tercer criterio con mayor valor porcentual es la disponibilidad en mercado, debido a que se limitó el estudio a un territorio en específico, en este caso el colombiano, es de vital importancia determinar si los insumos o el combustible en sí pueden ser adquiridos.
Costo De Insumos	10%	Los costos monetarios abarcan el 10% debido a la relación costo- beneficio ya que, si el valor monetario es muy elevado, genera que el combustible no sea óptimo para su desarrollo en Colombia, donde los presupuestos de inversión para actividades de esta índole son bajos.
Costo De Manufactura	10%	
Tiempo de manufactura	5%	El tiempo de manufactura tiene un valor porcentual del 5%, es un valor bajo en comparación a los otros, ya que hay poca demanda en Colombia de vehículos que funcionen con propulsión híbrida, por ahora no es necesario producir una gran oferta de este tipo de combustibles.
Reciclabilidad	4%	Los factores ecológicos de reciclabilidad y reusabilidad dan una idea aproximada del aprovechamiento del material de combustión, luego del encendido del motor, pero su calificación no afecta a gran escala la viabilidad que se puede dar a un material como combustible, puesto que lo ideal sería producir un grano de combustible que se queme totalmente.
Reusabilidad	4%	
Densidad	1%	Todas las propiedades físicas que tiene el material abarcan un 1% cada una, debido a que estas están implícitas en el empuje y el impulso específico generado, y su impacto no genera una mayor alteración en los procesos de combustión.
Temperatura de auto ignición	1%	
Flash point	1%	
Punto de fusión	1%	
Conductividad térmica	1%	
Difusividad térmica	1%	
resistencia a la fluencia	1%	
calor específico	1%	

Luego se procedió a multiplicar los resultados obtenidos en sus evaluaciones particulares registrados en las tablas de decisión por su valor porcentual. De esta manera se logró generar una calificación general para cada combustible, como se observa en la Tabla 23

Tabla 23. Evaluación de la viabilidad de los combustibles, fuente: Autor

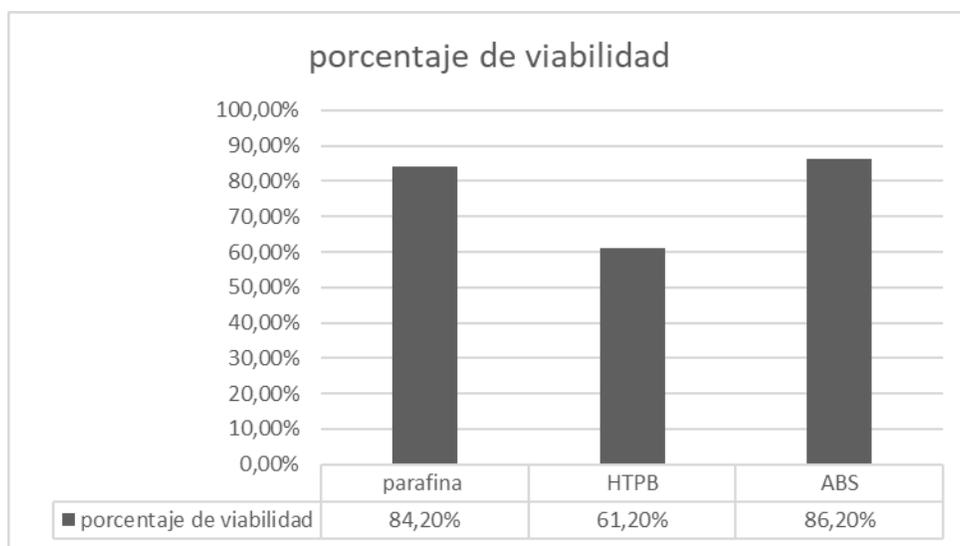
criterio	Valor Porcentual	Calificación			Resultado		
		Parafina	HTPB	ABS	Parafina	HTPB	ABS
Tiempo de manufactura	5%	5	1	4	0,25	0,05	0,2
Calidad de la manufactura	15%	3	5	3	0,45	0,75	0,45
Reciclabilidad	4%	5	1	5	0,2	0,04	0,2
Reusabilidad	4%	5	3	5	0,2	0,12	0,2
Disponibilidad En El Mercado Colombiano	14%	5	2	5	0,7	0,28	0,7
Costo De Insumos	10%	5	2	4	0,5	0,2	0,4
Costo De Manufactura	10%	5	1	4	0,5	0,1	0,4
Densidad	1%	1	4	5	0,01	0,04	0,05
Temperatura de auto ignición	1%	5	4	1	0,05	0,04	0,01
Flash point	1%	5	4	1	0,05	0,04	0,01
Punto de fusión	1%	4	5	1	0,04	0,05	0,01
Conductividad térmica	1%	1	5	4	0,01	0,05	0,04
Difusividad térmica	1%	1	4	5	0,01	0,04	0,05
resistencia a la fluencia	1%	3	1	5	0,03	0,01	0,05
calor específico	1%	1	5	4	0,01	0,05	0,04
Impulso específico	30%	4	4	5	1,2	1,2	1,5
	100%				4,21	3,06	4,31

A partir de la calificación general que se obtuvo y asumiendo que 5 corresponde al 100% se procedió a calcular el porcentaje de viabilidad de cada combustible (Tabla 24)

Tabla 24. Porcentaje de viabilidad de los combustibles, fuente: Autor

Combustible	Calificación (1.0 a 5.0)	Porcentaje de viabilidad
Parafina	4,21	84,20%
HTPB	3,06	61,20%
ABS	4,31	86,20%

Los resultados se pueden apreciar de manera más gráfica en la Figura 37



*Figura 37. Porcentaje de viabilidad de los combustibles estudiados, fuente: Autor*

Como se evidencia de la figura 37, el ABS tiene un porcentaje bastante elevado con los parámetros propuestos, aunque existe una amplia gama de parámetros que se pueden estudiar, para esta investigación se consideraron apropiados los anteriormente mencionados, ya que pueden dar una idea preliminar sobre la viabilidad del combustible ABS en motores-cohete híbridos.

Así mismo, cabe resaltar, que, a la luz de los criterios expuestos, la cera de parafina tiene un porcentaje inferior pero muy cercano al del ABS (con solo un 2% de diferencia), de lo cual se puede afirmar que ambos son combustibles viables para la combustión híbrida en Colombia.

El HTPB sobrepasa el 60% de viabilidad, con lo que puede afirmarse que, con ciertas limitaciones, este combustible también podría usarse en la experimentación de la combustión híbrida en Colombia.



## 7. Conclusiones

Se puede concluir que el ABS es un combustible viable para el desarrollo de coherencia experimental en Colombia, pues puede ser manufacturado de manera sencilla por medio de técnicas de deposición fundida y los costos de obtención de insumos no son elevados. Adicionalmente es de fácil consecución en el mercado, sus datos experimentales pueden ser corroborados teóricamente por el programa de distribución abierta como es el caso de CEARUN-NASA, y puede ser reutilizado y reciclado al tener características termoplásticas. Aunque el HTPB siga presentando prestaciones mecánicas más elevadas en algunos casos, su diferencia con el ABS no evidencia gran relevancia, al menos en estudios preliminares, se sugieren estudios de uso de este material con adición de partículas metálicas tipo aluminio para mejorar características del quemado y transferencia de calor, intentando alcanzar o mejorar los valores del HTPB.

También se concluye que la toma de datos fue adecuada pues la presión y el empuje, que son parámetros medidos de manera totalmente independiente, tienen su pico máximo prácticamente en el mismo punto temporal, que es cuando la temperatura de salida comienza su proceso de crecimiento exponencial.

Adicionalmente la parafina puede considerarse viable como combustible de propulsión híbrida, con la limitación de que se obtendrán bajos valores de empuje en comparación a otros combustibles, y el HTPB se puede considerar viable en términos de funcionamiento, si se logra obtener permiso de importación al país de los insumos, o incluso los granos previamente manufacturados.

Adicionalmente, el montaje experimental, así como el método de manufactura es óptimo, pues no se evidencia un error porcentual elevado, validando la confiabilidad del programa CEARUN y el montaje experimental utilizado durante esta investigación.

## 8. Recomendaciones

Se recomienda para futuras investigaciones realizar el proceso con ABS natural, sin color, ya que los aditivos que se agregan pueden alterar los procesos de combustión. En cuanto a los parámetros de manufactura se recomienda usar la más alta resolución posible, con el fin de no generar geometrías cilíndricas por aproximaciones poligonales, ya que las aristas pueden generar almacenamiento de fluido, aumentando la posibilidad de fenómenos de combustión asociados al *turbulente crevice* variando el empuje en condiciones impredecibles.

También se recomienda hacer el proceso de manufactura en un ambiente ventilado, debido a las que el proceso FDM puede generar gases tóxicos.

Adicionalmente se recomienda realizar un análisis de toxicidad de los gases de escape del motor para los tres combustibles, para ampliar los parámetros de viabilidad de combustibles.

Finalmente se recomienda comparar los datos de empuje con coeficiente de empuje estándar teniendo en cuenta la presión atmosférica del lugar en donde se realizaron las pruebas.

## 9. Bibliografía

- 3Dnatives. (2018). FDM o modelado por deposición fundida. Retrieved November 27, 2018, from <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- Abyzov, A. M., Kidalov, S. V., & Shakhov, F. M. (2011). Thermal conductivity of the diamond-paraffin wax composite. *Physics of the Solid State*, 53(1), 48–52. <https://doi.org/10.1134/S1063783411010033>
- aerocon systems. (2018). Motor Making Supplies. Retrieved from <https://aeroconsystems.com/cart/motor-making-supplies/htpb-rubber/>
- Akhter, M. Z., & Hassan, M. A. (2018). Characterisation of paraffin-based hybrid rocket fuels loaded with nano-additives. *Journal of Experimental Nanoscience*, 13, S31–S44. <https://doi.org/10.1080/17458080.2018.1431848>
- Arango, J. H. (2009). Calidad de los combustibles en Colombia Quality of Fuels in Colombia. *Revista de Ingeniería*, 29, 121–4993. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i29.251>
- Banco de la Republica de Colombia. (2018). Tasa de cambio del peso colombiano (TRM). Retrieved from <http://www.banrep.gov.co/es/tasa-cambio-del-peso-colombiano-trm>
- Bath, A. (2012). Performance Characterization of Complex Fuel Port Geometries for Hybrid Rocket Fuel Grains, 67. Retrieved from <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1381/>
- Baxendale, J. H., & Madakas, G. \V. (1956). Copolymerization of Acrylonitrile and Methyl Methacrylate. *Journal of Polymer Science*, XIX, 171–179.
- Cai, G. B., Zhang, Y. J., Wang, P. F., Hui, T., Zhao, S., & Yu, N. J. (2016). Geometric effects of fuel regression rate in hybrid rocket motors. *Science China Technological Sciences*, 59(5), 807–813. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-6034-1>
- Castellanos Vargas, A. (2014). Estudio de la respuesta térmica de polímeros termoplásticos PVC espumado y PMMA en situaciones de incendio : análisis de propiedades mecánicas y caracterización por combustión.
- CEPSA. (2018). Usos y aplicaciones de la parafina.
- Chiaverini, M. J., Serint, N., K., J. D., & Lu, Y. C, Kuol, K. K., and R. G. A. (2017). THERMAL PYROLYSIS AND COMBUSTION OF HTPB-BASED SOLID FUELS FOR HYBRID ROCKET MOTOR APPLICATIONS, 91, 399–404.
- Correra, S., Fasano, A., Fusi, L., Primicerio, M., & Rosso, F. (2007). Wax diffusivity under given thermal gradient: A mathematical model. *ZAMM Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 87(1), 24–36. <https://doi.org/10.1109/TPPEL.2007.897117>
- Cray Valley USA. (2010). Technical Data Sheet: Poly bd R-45HTLO, 19341. Retrieved from [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0153/9461/files/Silicone\\_350\\_ccs\\_spec\\_sheet\\_101014.pdf?15979270667484395215](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0153/9461/files/Silicone_350_ccs_spec_sheet_101014.pdf?15979270667484395215)
- Cura. (2018). Quick start guide Save print job, 3–5.
- Czyżewski, P., Bieliński, M., Sykutera, D., Jurek, M., Gronowski, M., Ryl, Ł., & Hoppe, H. (2018). Secondary use of ABS co-polymer recyclates for the manufacture of

- structural elements using the FFF technology. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), 1447–1454. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0042>
- Dassault Systemes. (2018). Soluciones de CATIA de CAD en 3D de Dassault Systemes®. Retrieved November 16, 2018, from <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>
- Devesa, F., López, J., Samper, M. D., & Parres, F. (2008). Análisis Del Reciclado Conjunto De Abs Y Hips Obtenidos a Partir De Residuos Eléctricos Y. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 23–24.
- Díaz, E., Alonso, R., Valenciano, R., & Arenaza, I. M. De. (2008). Determinación de retardantes de llama bromados en plásticos de equipos eléctricos y electrónicos, (January 2008), 67–78.
- Ecopetrol. Productos petroquímicos (2015).
- Erikson, W. W., Cooper, M. A., Hobbs, M. L., Kaneshige, M. J., Oliver, M. S., & Snedigar, S. (2014). Determination of thermal diffusivity, conductivity, and energy release from the internal temperature profiles of energetic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 676–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.059>
- Feldman, J. (2018). “Plastics-Materials of the 21st Century,” BASF News Releases. Retrieved from [http://www.basf.de/basf2/html/plastics/englisch/pages/presse/04\\_261.htm](http://www.basf.de/basf2/html/plastics/englisch/pages/presse/04_261.htm)
- Fernández Llanderas, X. (2015). ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS.
- Gordon, S., & McBride, B. J. (1996). Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications II. Users Manual and Program Description.
- Ibarra Hernández, A. F., Cruel Restrepo, C. A., & Díaz, D. R. (2018). Caracterización de las Propiedades Mecánicas de Probetas Fabricadas bajo la Técnica de Modelado por Deposición Fundida.
- Jiménez., A. C. M., & Díaz., M. A. P. (2016). METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN MOTOR-COHETE DE COMBUSTIBLE HÍBRIDO QUE UTILIZA PARAFINA COMO COMBUSTIBLE Y ÓXIDO NITROSO COMO OXIDANTE.
- Karabeyoglu, M. A., Altman, D., & Cantwell, B. J. (2002). Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory. *Journal of Propulsion and Power*, 18(3), 610–620. <https://doi.org/10.2514/2.5975>
- Karabeyoglu, M., Cantwell, B., & Altman, D. (2001). Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels. *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, (c). <https://doi.org/10.2514/6.2001-4503>
- Margolis, J. M. (2006). *Engineering Plastics Handbook*. McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto.
- Mazzetti, A., Merotto, L., & Pinarello, G. (2016). Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective. *Acta Astronautica*, 126, 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.036>
- MERCOSUR. MERCOSUR/GMC/RES. N ° 67/00 REGREGLAMENTO TÉCNICO

- MERCOSUR SOBRE PARAFINAS EN CONTACTO CON ALIMENTOS (2018). Morán, A., Martín, M. L., Montero, M. J., de Urbina, A. V. O., Sevilla, M. A., & Roman, L. S. (1989). Characterization and manufacturing of a paraffin wax as fuel for hybrid rockets. *Journal of Ethnopharmacology*, 27(3), 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2018.07.007>
- Moreno, L. A. A. (2018). UNIVERSIDAD DE LOS ANDES ENGINEERING FACUTLY Mechanical Engineering Department DEGREE PROJECT Design , construction and tests of a rocket propulsion motor with hybrid propellant in a static bank Author : Laura Alejandra Arteaga Moreno Advisor Professor :
- Murcia Piñeros, J. O. (2012). Estudio de la trayectoria de un cohete de tres etapas lanzado desde el territorio colombiano, 120. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/9665/>
- Nasa. (2018). CEARUN. Retrieved November 16, 2018, from <https://cearun.grc.nasa.gov/>
- Okninski, A. (2018). On use of hybrid rocket propulsion for suborbital vehicles. *Acta Astronautica*, 145(November 2017), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.01.027>
- Parkash, S. (2010). *Petroleum Fuels Manufacturing Handbook: Including Specialty Products and Sustainable Manufacturing Techniques*. (I. The McGraw-Hill Companies, Ed.). New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto.
- Pirateque Bolívar, Marco A, Sabogal, A. E. (2011). Más que un sueño, una realidad. Historia preliminar de la cohetería en Colombia. *Asociación Astronáutica Colombiana Astcol*, 1–28. Retrieved from <http://www.astcol.org/archives/461>
- Piscitelli, F., Saccone, G., Gianvito, A., Cosentino, G., & Mazzola, L. (2015). Manufacturing Processes of Paraffin Grains as Fuel for Hybrid Rocket Engines. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 27–29. <https://doi.org/10.2514/6.2015-4039>
- PlasticsEurope; Association of plastics Manufacturers. (2018). How plastics are made :: PlasticsEurope. Retrieved November 14, 2018, from <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics/how-plastics-are-made>
- Prosen, E. J., Maron, F. W., & Rossini, F. D. (1951). Heats of combustion, formation, and isomerization of ten C4 hydrocarbons. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 46(2), 106–112. Retrieved from citeulike-article-id:4209316
- Prosen, E. J., & Rossini, F. D. (1945). Heats of formation and combustion of 1,3-butadiene and styrene. *Journal of Res*, 34, 59–63.
- Pulido Ruiz, L. A. (2008). DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO AUTOMÁTICO DE CALENTAMIENTO Y LLENADO DE PARAFINA A LAS MÁQUINAS DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE VELAS. *Universidad de La Salle*.
- R. Thomas, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, S. T. (2010). Thermophysical Properties of CTBN and HTPB Liquid Rubber Modified Epoxy Blends. *Wiley InterScience*, 43(3), 483–485. <https://doi.org/10.1002/app>
- Research and Markets, B. W. (2018). Global Hydroxyl-Terminated Polybutadiene

- (HTPB) Market, 2022 - Focus on Rocket Fuel, Waterproof Coatings & Membranes, Adhesives, Sealants. *Research and Markets, Business Wire (English)*. Retrieved from <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.uniandes.edu.co:8080/ehost/detail/detail?vid=1&sid=50fafd92-b62d-4c29-9273-c380c5837ff9%40sdc-v-sessmgr03&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=bizwire.c85193704&db=bwh>
- Rhee, I., Lee, C., & Lee, J.-W. (2008). Optimal design for hybrid rocket engine for air launch vehicle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(8), 1576–1585. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0514-6>
- Rocket Motor Parts. (2018). Propellant Chemicals. Retrieved December 18, 2018, from <https://www.rocketmotorparts.com/index.aspx?pageid=1577810&category=1455504&Page=2>
- Shan, F., Hou, L., & Piao, Y. (2013). Combustion performance and scale effect from N<sub>2</sub>O/HTPB hybrid rocket motor simulations. *Acta Astronautica*, 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.12.013>
- Shenzhen Esun Industrial Co. (2018). eSUN 3D Refilament Black | Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. Retrieved November 14, 2018, from <http://www.esun3d.net/products/235.html>
- Sinha, Y. K., Sridhar, B. T. N., & Santhosh, M. (2015). Thermal decomposition study of HTPB solid fuel in the presence of activated charcoal and paraffin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(1), 557–565. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4104-9>
- Smallman, R. ., & Nwang, A. H. . (2011). *Physical Metallurgy and Advanced Materials Engineering (Seventh Edition)*.
- Smith, S. (2018). The HTPB market size is estimated to be USD 131.9 million in 2017 and is projected to reach USD 215.7 million by 2022, at a CAGR of 10.3% between 2017 and 2022. *Reportbuyer*. Retrieved from <https://www.prnewswire.com/news-releases/the-htpb-market-size-is-estimated-to-be-usd-131-9-million-in-2017-and-is-projected-to-reach-usd-215-7-million-by-2022--at-a-cagr-of-10-3-between-2017-and-2022--300664767.html>
- Space Propulsion Group, I. (2018). Hybrid Rockets History. Retrieved June 22, 2018, from [http://www.spg-corp.com/News\\_12.php](http://www.spg-corp.com/News_12.php)
- Suárez Zarta, D. (2016). Solo 26% de las botellas plásticas se recicla. Retrieved December 1, 2018, from <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536>
- Sun, X., Tian, H., Li, Y., Yu, N., & Cai, G. (2016). Regression rate behaviors of HTPB-based propellant combinations for hybrid rocket motor. *Acta Astronautica*, 119, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.11.015>
- Sutton, George P., and O. B. (2001). *Rocket propulsion elements*. New York: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tang, Y., Chen, S., Zhang, W., Shen, R., DeLuca, L. T., & Ye, Y. (2017). Mechanical Modifications of Paraffin-based Fuels and the Effects on Combustion Performance. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(11), 1268–1277.

- <https://doi.org/10.1002/prop.201700136>
- Teng, N. A., Dai, J., Wen, Y., Chen, J., Liu, F. E. I., Zhu, J. I. N., & Na, H. (2018). Microwave-Assisted Synthesis of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Based Polyurethanes with Superior. *Cixi Institute of Biomedical Engineering*, 35(1), 71–83.
- Thomas, J. C., Petersen, E. L., Desain, J. D., & Brady, B. (2015). Hybrid Rocket Enhancement by Micro- and Nano-Scale Additives in HTPB Fuel Grains. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, (October 2016).  
<https://doi.org/10.2514/6.2015-4041>
- Tri-Gas, M. (2003). Safety data sheet. <https://doi.org/10.1021/ie50466a600>
- Ultimaker. (2018). Welcome to Ultimaker Cura 3.0. Retrieved November 16, 2018, from <https://ultimaker.com/en/blog/51439-welcome-to-ultimaker-cura-30>
- Urrego P, J. A., Rojas M, F. A., & Muñoz L, J. R. (2018). Combustion performance comparison of propellant grain for hybrid rocket motors manufactured by casting and fused. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 0–1.
- Van Krevelen, D. W., & Chermis, H. A. G. (1951). Estimation of the free enthalpy (Gibbs free energy) of formation of organic compounds from group contributions. *Chemical Engineering Science*, 1(2), 66–80. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(51\)85002-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(51)85002-4)
- Wang, Y. H., Liu, L. L., Xiao, L. Y., & Wang, Z. X. (2015). Thermal decomposition of HTPB/AP and HTPB/HMX mixtures with low content of oxidizer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(3), 1673–1678.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-014-4324-z>
- Whitmore, S. A., Peterson, Z. W., & Eilers, S. D. (2013). Comparing Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Acrylonitrile Butadiene Styrene as Hybrid Rocket Fuels. *Journal of Propulsion and Power*, 29(3), 582–592.  
<https://doi.org/10.2514/1.B34382>
- Wilczura-Wachnik, H. (2010). Combustion and thermal degradation of polymers, 1–14.  
<https://doi.org/10.1177/0892705708103404>
- William, T., Martin, J. J., & Schweitzer, P. J. (1969). DISTRIBUTED BY: National Technical Information Service U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE 5285, (December). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.2967>

## 10. Anexos

### ANEXO 1

Proceso de simulación en programa de la nasa CEARUN, para esta investigación se utilizó la simulación obtenida por el programa ya mencionado, para obtener el valor de  $k$  coeficiente de relación de calores específicos, como primera instancia en la interfaz inicial, se establece el caso de cohete (Rocket -rkt), y en las opciones de selección de relación oxidante combustible se selecciona *oxid-to-fuel weight ratios- O/F* y se introduce el valor de relación de combustibles como se ve a continuación en la Figura 38

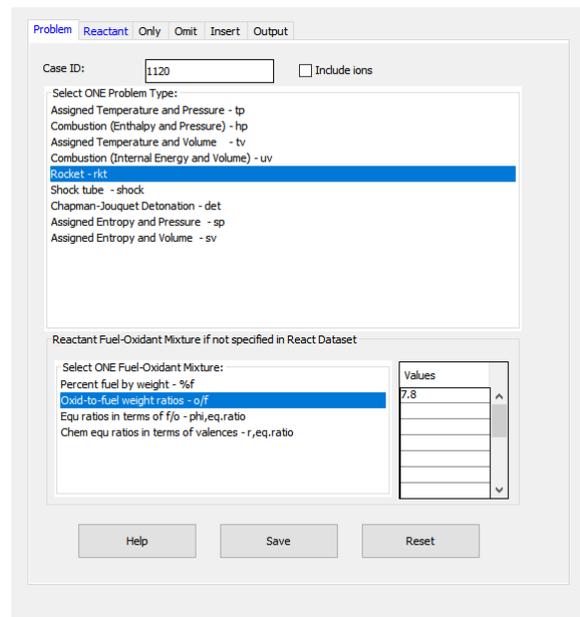


Figura 38. Interfaz inicial del programa ceurun fuente: Autor

Una vez seleccionamos *rocket* aparece una ventana emergente, en donde tenemos que introducir la presión de inicial es decir la presión de la cámara, si queremos un análisis en

un área infinita, y la temperatura estimada de la combustión (3800 K), lo anterior se ve de manera más esquemática en la siguiente Figura 39.

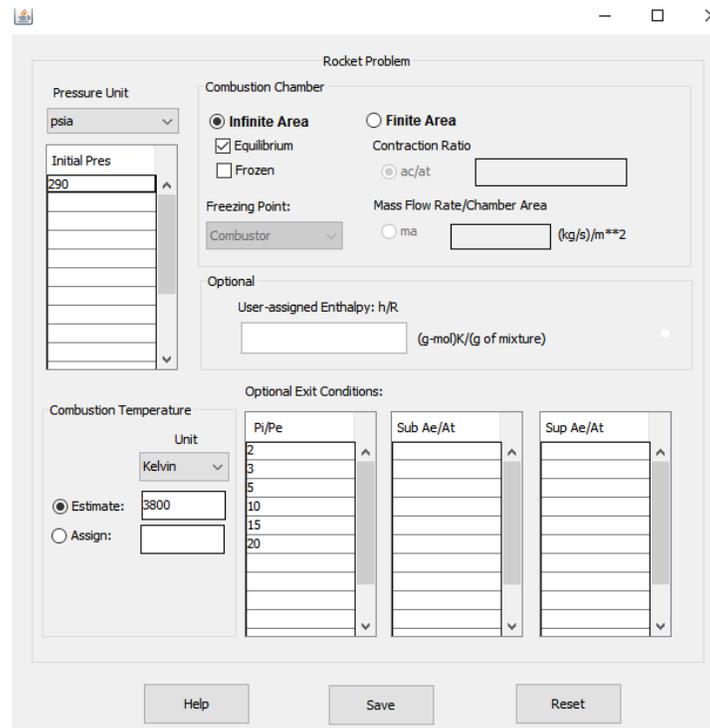


Figura 39. Interfaz Rocket propiedades del programa cearun fuente: Autor

Luego en la segunda interfaz, se establece, la unidad de temperatura (Kelvin para este caso) la unidad de energía interna ( kJ/mol), posteriormente se identifican los reactantes de la combustión, algunos compuestos comunes están incluidos en la biblioteca interna del programa, como el  $N_2O$ , pero al ABS al no ser tan explorado, se tienen que introducir un nombre, el valor porcentual presente en molécula completa, la temperatura a la que se va a analizar ( temperatura ambiente 298,15 K), y la entalpía interna de cada compuesto, adicionalmente se tiene que introducir la formula química, de cada compuesto, la interfaz descrita se expone en la Figura 40.

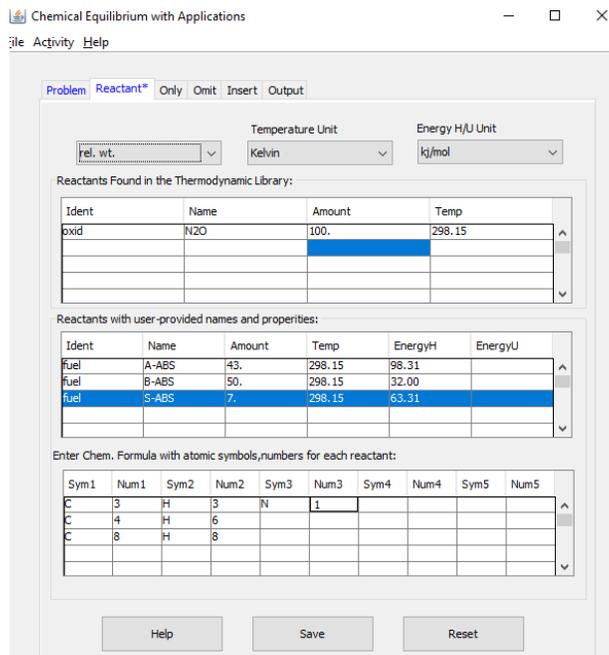


Figura 40. Interfaz de reactivos del programa cearun fuente: Autor

Para buscar compuestos en la librería de CEARUN se debe hacer clic en los espacios de librería, seleccionar o el nombre o los elementos que lo componen, en caso del  $N_2O$ , oxígeno y nitrógeno, y buscarlo en todos los compuestos que arroja la librería, como se ve en la Figura 41.

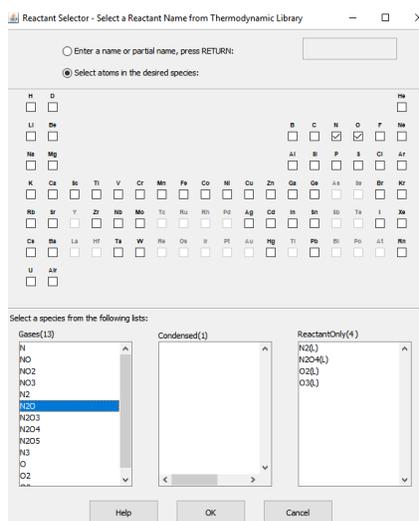


Figura 41. Biblioteca del programa cearun fuente: Autor

Las pestañas de only, omit e insert no se le realizan ningún cambio, pues no es el fin de la investigación determinar los productos que se obtiene en la combustión.

En la última pestaña denominada Output, seleccionamos los valores que queremos que nos arroje el programa (Figura 42).

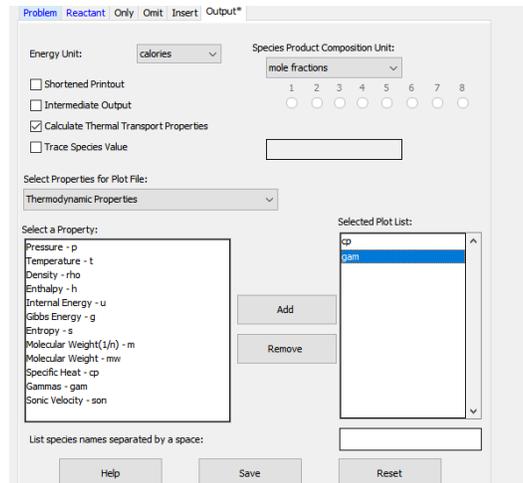


Figura 42. Interfaz OUTPUT del programa cearun fuente: Autor

Cabe recalcar que CEARUN denomina como gamma a la relación de calores específicos. Luego se da clic en el menú de activity y la opción de Execute CEA 2, el programa arroja una ventana con los datos obtenidos

## ANEXO 2

## Ficha técnica del material ABS



Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. Feb. 2014  
 Wuhan University Building A403-I, No.6 Yuexing 2 Road,  
 Nanshan District, Shenzhen, China  
 TEL (086)-0755-28031878  
 FAX (086)-0755-28031882  
 CAS-9003-56-9

## Material Safety Data Sheet -ABS filament

## 1. IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/PREPARATION AND THE

## COMPANY/UNDERTAKING

Substance or Preparation Substance  
 Chemical Name Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer  
 Content > 98 % (Additives ≤ 2 %)  
 Formula (C3H3N, C4H6, C8H8)x  
 CAS No. 9003-56-9  
 Impurities Contributing to Hazard None  
 Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. Feb. 2014  
 Wuhan University Building A403-I, No.6 Yuexing 2 Road,  
 Nanshan District, Shenzhen, China  
 TEL (086)-0755-28031878  
 FAX (086)-0755-28031882

## 2. HAZARDS IDENTIFICATION

Substance or Preparation Substance  
 Chemical Name Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer  
 Content > 98 % (Additives ≤ 2 %)  
 Formula (C3H3N, C4H6, C8H8)x  
 CAS No. 9003-56-9

## 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Material	CAS#	Hazard
ABS	8003-563-9	none known
N, N Ethylene bistearamide	110-30-6	none known
Typical Antioxidant	51063-13-9	none known

Most important Hazards None  
 Adverse Human Health Effects None  
 Environmental Effects None  
 Physical and Chemical Hazards None

## Emergency Overview



**CAUTION!** May cause eye/skin irritation. Burning produces obnoxious and toxic fumes. Avoid contact with skin and eyes. Avoid formation of dust and aerosols  
 Appearance: colorfull filament  
 Physical state: Solid  
 Odor:None

## 4. FIRST AID MEASURES

**Inhalation**  
 In case of gases evolving from melted resin, move subject to fresh air. Treat symptomatically.  
**Skin Contact**  
 In case of pellets or powder, wash with water.  
 In case of melt, wash affected skin area and clothing with plenty of (soap and) water. Seek medical advice.  
**Eye Contact**  
 In case of pellets or powder, flush with plenty of water for at least 15 minutes. Seek medical advice if any dust particles still remain.  
 In case of gases evolving from melted resin of high temperature, flush with plenty of water for at least 15 minutes. Seek medical advice if necessary.  
**Ingestion**  
 Induce vomiting. Rinse mouth with water. Seek medical advice if necessary.

## 5. FIRE FIGHTING MEASURES

**Unusual Explosion Hazard and Fire:** The material will burn if exposed to sufficient heat and an ignition source. Avoid dispersion of dust in the air to reduce dust explosion hazard potential.  
**Extinguished Media:** Water, Carbon dioxide, Dry chemical power, Foam.  
**Special Extinguishing Procedures:** Firefighters must wear self-contained breathing apparatus and fully protective equipment.  
**Flammability:**  
 Flammability Limits in Air  
 Flammable limits in air - lower (%): Not determined  
 Flammable limits in air - upper (%): Not determined  
 Suitable extinguishing media: Foam, Water, Carbon dioxide (CO2), Dry chemical, Alcohol  
 resistant foams are preferred if available. General-purpose synthetic foams (including AFFF) or protein foams may function, but much less effectively.  
**Extinguishing media which must not be used for safety reasons:** No information available  
**Hazardous decomposition products:** Burning produces obnoxious and toxic fumes Aldehydes Carbon monoxide (CO) carbon dioxide (CO2)  
**Special protective equipment for firefighters:** As in any fire, wear



self-contained breathing apparatus pressure-demand, MSHA/NIOSH (approved or equivalent) and full protective gear.

**Under fire conditions:** Cool containers / tanks with spray water. Water mist may be used to cool closed containers.

**Other information:** Fine dust dispersed in air may ignite. Risks of ignition followed by flame propagation or secondary explosions shall be prevented by avoiding accumulation of dust, e.g. on floors and ledges.

#### 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

**Personal precautions:** Use personal protective equipment. See Section 8. Remove all sources of ignition. Avoid dust formation. Avoid contact with skin and eyes. Sweep up to prevent slipping hazard.

**Environmental precautions:** Do not flush into surface water or sanitary sewer system. Do not allow material to contaminate ground water system.

**Methods for cleaning up:** Shovel into suitable container for disposal.

#### 7. HANDLING AND STORAGE

**Safe handling advice:** Avoid contact with skin and eyes. Avoid dust formation. Workers should be protected from the possibility of contact with molten material during fabrication. Low hazard for usual industrial or commercial handling. Use personal protective equipment. See Section 8.

**Storage:**

Store in cool place. Keep at temperatures below 100 °C

No special restrictions on storage with other products

**Precautions:** No special precautions required

#### 8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION

**Engineering measures:** Where reasonably practicable this should be achieved by the use of local exhaust ventilation and good general extraction. Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed.

**Control parameters:** None

**PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT:**

**Eye protection:** Safety glasses with side-shields. Goggles. Skin and body

**protection:** Impervious clothing.

**Respiratory protection:**

Respirator must be worn if exposed to dust. Wear respirator with dust filter.

Respiratory protection is needed if any of the exposure limits in Section 3 are exceeded. Consult an industrial hygiene professional prior to respirator selection and use. Use a positive-pressure air supplied respirator if there is any potential for an uncontrolled release, exposure levels are not known, or any other circumstances where air-purifying respirators may not provide adequate protection. **WARNING:** Air purifying respirators do not protect workers in



oxygen-deficient atmospheres.

**Hand protection:** Preventive skin protection.

**Hygiene measures:** Avoid contact with skin, eyes and clothing.

**Exposure limits:** See Section 3.

#### 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

**Appearance:** colorful filament.

**Physical state:** Solid

**Odor:** None

**Odor threshold:** No data available

**pH:** Not applicable

**Vapor pressure:** Not determined

**Vapor density:** Not determined

**Evaporation rate:** No data available

**Density:** 1.03 g/cc

**Decomposition temperature:** 482F (250C)

**Autoignition temperature:** 488C

**Melting point/range:** Softening above 100C

**Water solubility:** Insoluble

**Solubility in other solvents:** None known

#### 10. STABILITY AND REACTIVITY

**Flammability:** Yes

**Flash Point:** 404 °C

**Auto-ignition Temperature:** 488 °C

**Reactivity with Water:** No

**Stability:** Stable and non-reactive under normal handling and storage condition.

**Dust Explosion:** Possible if powder exists.

**Explosion data for powder (< 145 mesh)**

**Lower explosion limit:** 45 g/m<sup>3</sup>

**Minimum ignition energy:** 3.8 mJ

**Maximum explosion pressure:** 7 x 105 Pa

**Maximum pressure increase rate:** 3.2 x 107 Pa/s

**Thermal Decomposition Gases:** CO, HCN, AN, SM and NO

**Combustion Energy:** 3.53 x 107 J/kg (8424 Kcal/kg)

#### 11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

**Principle Routes of Exposure:** Eye contact. Skin contact. Inhalation. Ingestion.

**Acute toxicity:** There were no target organ effects noted following ingestion or dermal exposure in animal studies.

**Local effects:** May cause eye/skin irritation. Product dust may be irritating to



eyes, skin and respiratory system. Caused mild to moderate conjunctival irritation in eye irritation studies using rabbits. Caused very mild redness in dermal irritation studies using rabbits (slightly irritating). Ingestion may cause gastrointestinal irritation, nausea, vomiting and diarrhoea. Long term toxicity: Did not cause skin allergic reactions in skin sensitization studies using guinea pigs.

**Specific effects:** May cause skin irritation and/or dermatitis. Ingestion may cause gastrointestinal irritation, nausea, vomiting and diarrhoea. Inhalation of dust may cause shortness of breath, tightness of the chest, a sore throat and cough. Burning produces irritant fumes.

**Mutagenic effects:** No data is available on the product itself.

**Reproductive toxicity:** No data is available on the product itself.

**Carcinogenic effects:** No data is available on the product itself.

**Target organ effects:** There were no target organ effects noted following ingestion or

dermal exposure in animal studies.

**Skin:** LD50(dermal/rabbit) > 2000 mg/kg

**Ingestion:** LD50(oral/rat) > 5000 mg/kg.

**Further information:** No information available

## 12. ECOLOGICAL INFORMATION

To avoid being taken by ocean species or birds, disposal of the waste to the ocean and water sources is inhibited.

## 13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Controlled incineration or landfill according to local, state or national laws and regulations concerning health and pollution. Inadequate incineration may generate toxic gases such as CO, HCN, AN and SM.

## 14. TRANSPORT INFORMATION

U. S. Department of Transportation (DOT):

Proper shipping name: None

Hazard class: Not regulated.

UN-No: None

Packing group: None

Hazardous substances (RQ): None

IMDG:

Proper shipping name: None

Hazard class: Not regulated.

UN/Id No.: None

Packing group: None



ICAOMATA:

Proper shipping name: None

Hazard Class: Not regulated.

UN-No.: None

Packing group: None

## 15. REGULATORY INFORMATION

Product name: ESUN ABS filament

## 16. OTHER INFORMATION

Label information: ESUN ABS filament

Reason for revision: Not applicable

Revision date: 19/2/2014

## ANEXO 3

## Ficha técnica del papel cerámico.

## THERMAL CERAMICS

## Papers

**Physical characteristics**

- Classification temperature up to 3000°F (1649°C)
- Excellent tensile strength
- Low thermal conductivity
- Thickness availability of 1/32" to 1/4" (0.8mm to 6mm)

**Applications**

- High temperature gaskets and seals
- Refractory back-up insulation
- Filtration
- Separating media

**Brands**

- Kaowool®
- K-Shield™
- Superwool®

## Papers

Thermal Ceramics manufactures a wide range of high temperature rated paper products. We meet requirements ranging from economical mineral wool grades to high purity alumina and alumina-silica grades for demanding applications.

Paper products are specially processed to offer excellent performance in high-temperature applications and offer an alternative to traditional solutions due to its unique properties of high refractoriness and excellent non-wetting characteristics to applications requiring direct contact with molten aluminum and stability and resistance to chemical attack.

Insulating paper conforms easily to complex shapes and can be die-cut and used in a wide range of applications as thermal insulation and are especially suited to use in gaskets and as a parting medium.

Many of our paper products also meet strict automotive, aerospace, and industry specifications.

**In use high temperature insulation fiber will :**

- Contribute to protecting people and property from excessive heat
- Reduce greenhouse gas emissions
- Reduce energy usage
- Improve efficiency of furnaces and process equipment

