

CÁLCULO DE SUPERFICIE DE QUEMADO EN MOTORES COHETE SÓLIDOS CON SISTEMAS CAD (COMPUTER AIDED DESIGN)

Andrés G. Pereyra¹ y Diego Storaccio¹

¹*Departamento Mecánica Aeronáutica, Instituto Universitario Aeronáutico, Córdoba, Argentina,
0351-155139605 - apereyra@iua.edu.ar.*

Palabras clave: geometría, sólido, grano propulsante, frente de llama.

Resumen:

Cualquiera sea la geometría del motor cohete y estrella del grano propulsante se puede determinar con precisión el área de combustión (o área de frente de llama), área de pasaje de gases, volumen del propulsante y volumen de cámara de combustión; desde su estado inicial hasta que éste sea consumido en todo su espesor.

Una vez planteado geoméricamente, forma del motor y estrella del grano propulsante, se simulan superficies de combustión y avance de frente de llama, a intervalos especificados hasta completar la totalidad del espesor del grano propulsante, luego se determinan el área de la misma y pasaje de gases, volumen del propulsante remanente y cámara de combustión.

Los resultados obtenidos son graficados para analizar el comportamiento del grano propelente dentro de la cámara de combustión en función del avance del frente de llama, por otro lado se puede iterar indefinidamente sobre la geometría inicial de la estrella para realizar correcciones puntuales en su evolución a lo largo de la combustión.

Los datos obtenidos son de crucial importancia para determinar las performance del motor como tiempo de vuelo, empuje, etc.

1 INTRODUCCION

La geometría de los motores cohetes sólidos, pueden variar desde cilíndricos, esféricos, elípticos, etc. y en lo que respecta a la composición química del propelente sólido, pueden ser de muy diversas formulaciones, a los fines de controlar la velocidad de quemado, presión de cámara, impulso específico y otras; pasando de composiciones muy simples a otras más complejas con la adición de polímeros, inhibidores, metales etc.

Más allá de la composición química del propelente, todas son tratadas en forma similar desde el punto de vista geométrico, denominado **“GRANO PROPELENTE”**, que preliminarmente es definida según la misión requerida por el motor.

El núcleo del motor o sección transversal del grano propulsante expuestas a la combustión inicial definen el empuje con el tiempo, pudiéndose controlar por su forma, pasando desde canal circular, estrella de “n” puntas, cruz, hueso, slot en profundidad, slot parcial, etc. (ver [Figura 1](#)).

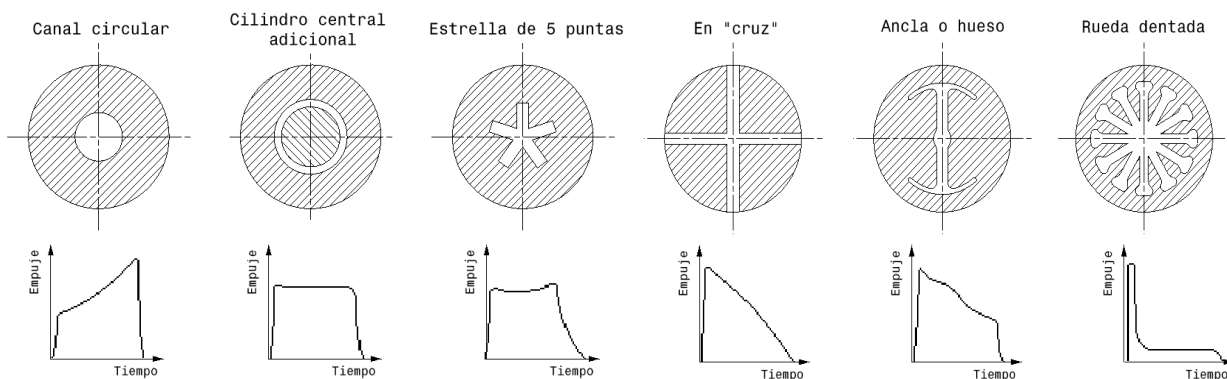


Figura 1: Secciones transversales de granos propulsivos

Una vez definido geoméricamente el grano propulsante, en dicha configuración se simula la superficie de combustión y avance de frente de llama, a intervalos especificados hasta completar la totalidad del espesor del grano propulsante, luego se determinan el área de la misma y pasaje de gases, volumen del propulsante remanente y cámara de combustión. En el mismo también se puede determinar el área de pasaje de gases el cual no se incluirá en dicho informe.

A medida que se pretende determinar superficies de combustión por métodos matemáticos o tablas empíricas en motores de formas más complejas como elípticos, esférico, etc. aumenta la complejidad del cálculo respecto a motores cilíndricos del cual se tienen mayor experiencia e información. En otras palabras la complejidad de las secciones transversales del grano propulsivo sumado a la forma de motor, trae aparejado una complejidad en el cálculo.

En el presente informe, se establecen valores necesarios para el cálculo de performance de un motor cohete de combustible sólido, según la variación del área de combustión en función del espesor de quemado.

2 ESPECIFICACIONES GENERALES

Para realizar un estudio preliminar del grano propulsivo según la forma de motor definida, debemos asumir ciertas consideraciones:

- La combustión del propelente evoluciona en forma normal a la superficie de combustión.
- La superficie en combustión es total y a lo largo de toda la superficie expuesta a la combustión.
- La combustión del propelente es uniforme y completa.
- El proceso de combustión es constante en el tiempo.
- Definimos a espesor de quemado con la sigla “w”.

3 CONFIGURACION GEOMETRICA DE MOTOR COHETE

A modo de ejemplo, se definen 2 geometrías diferentes de motor junto a complejas estrellas de grano propulsivo.

Cabe aclarar que el análisis de los siguientes motores no pretende hacer una comparación de performance entre ellos, mas bien, verificar el comportamiento del espesor de quemado, en geometrías de motor y superficies de quemado diferentes; en otras palabras se intenta interpretar la resolución de diferentes formas de granos propulsivos en función de la forma de motor planteada para su misión.

3.1 Motor Cilíndrico

A continuación vemos un layout de un motor cualquiera cilíndrico; este se encuentra seccionado para una mejor interpretación de sus partes. Ver [Figura 2](#).

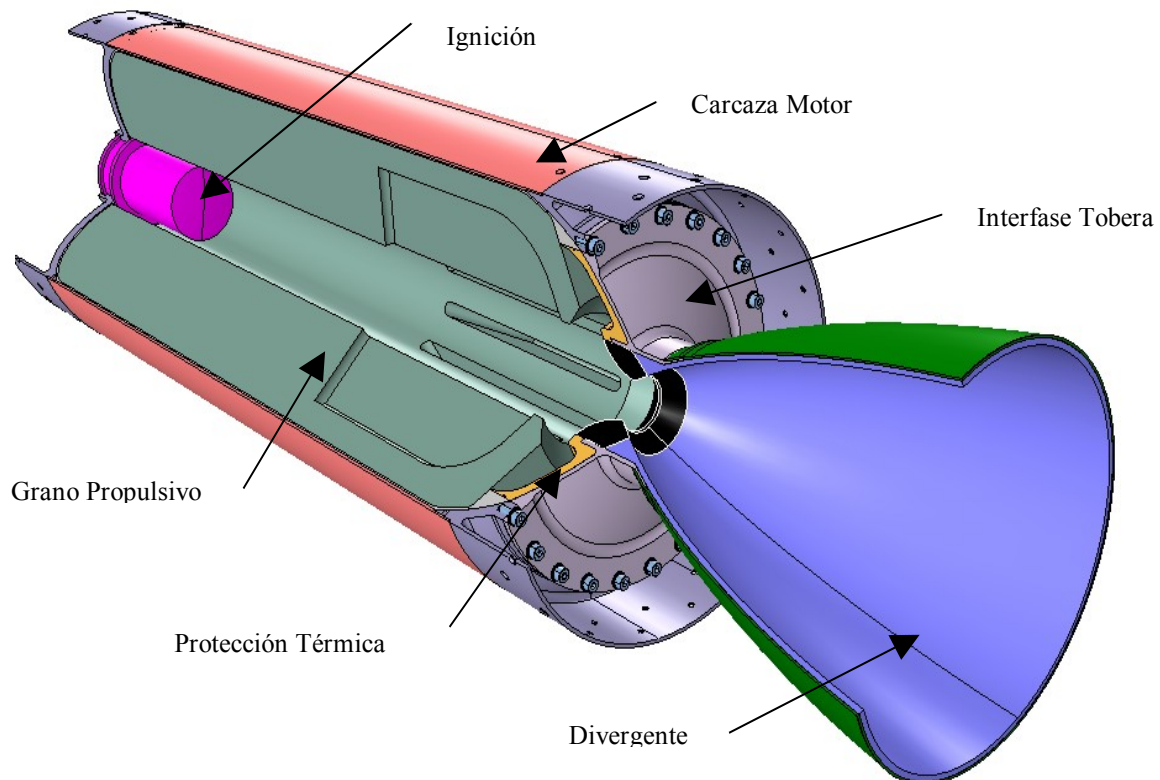


Figura 2 – Conjunto Motor Cilíndrico

3.2 Motor Esférico

A continuación vemos un layout de un motor cualquiera esférico; este se encuentra seccionado para una mejor interpretación de sus partes. Ver [Figura 3](#).

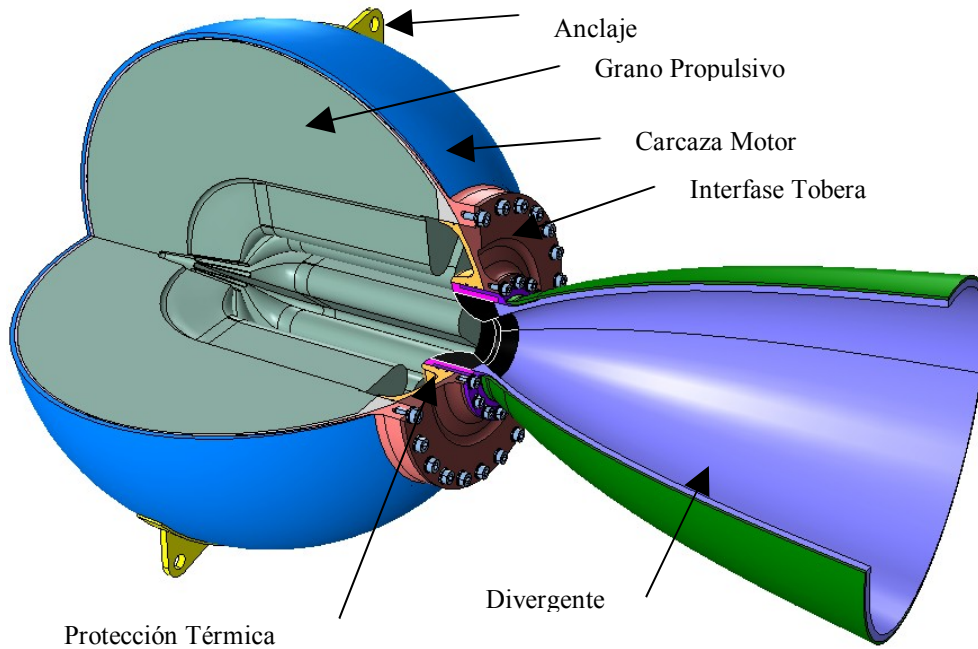


Figura 3 – Conjunto Motor Esférico

4 CONFIGURACION GEOMETRICA DE GRANO PROPULSIVO

4.1 En Motor Cilíndrico

Ocho slots parciales y rectos con inclusión en grano propulsivo cilíndrico y terminación cónica. Ver [Figura 4](#) y [5](#). El volumen de grano inicial es de $94930,34\text{cm}^3$, el área expuesta a la combustión inicial es de $8672,84\text{ cm}^2$ y el volumen de cámara es de $14271,14\text{ cm}^3$.

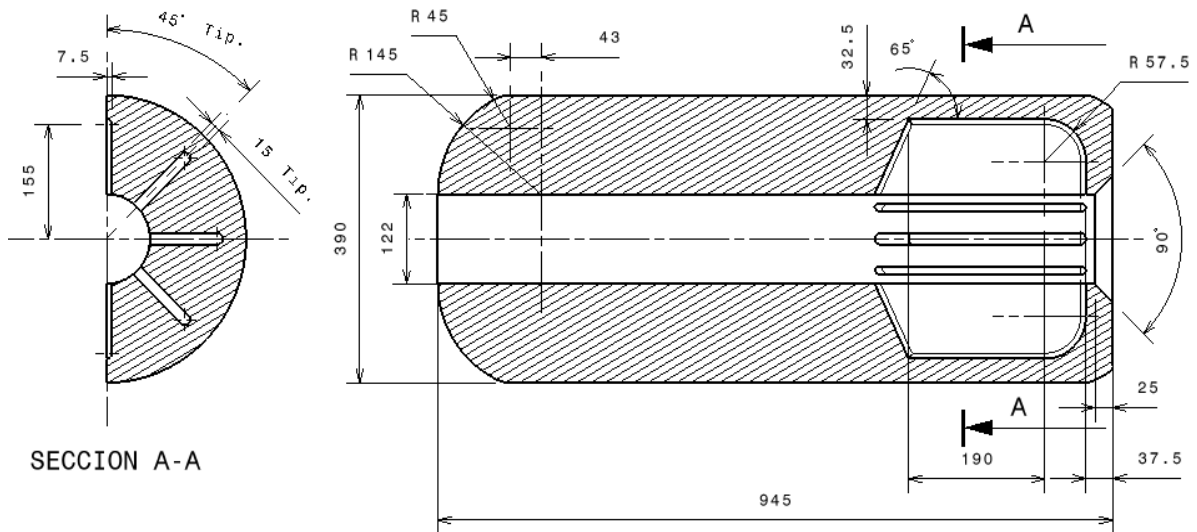


Figura 4 – Grano propulsivo Cilíndrico

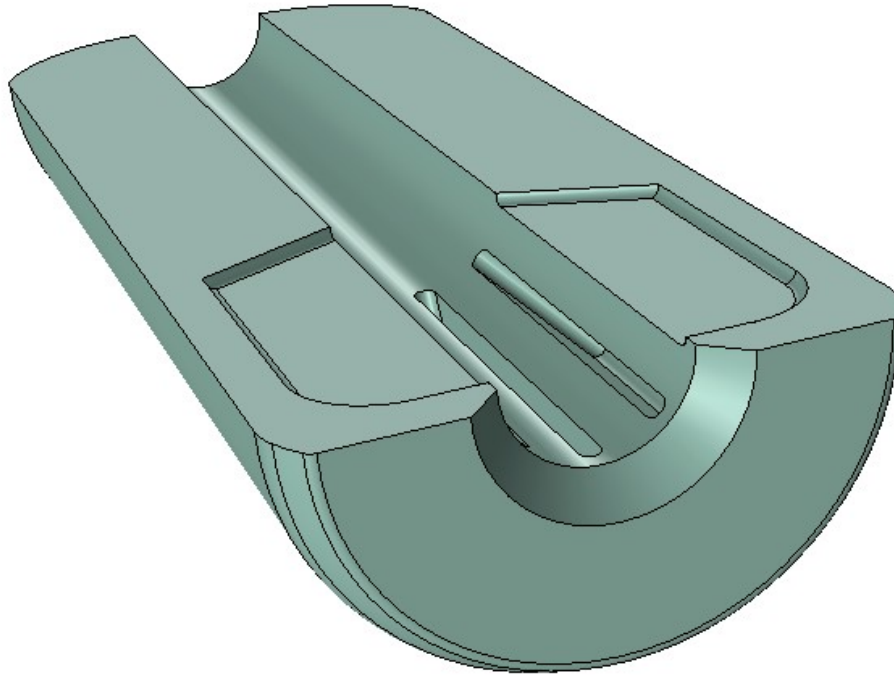


Figura 5 – Vista 3D de Grano propulsivo Cilíndrico seccionado

4.2 En Motor Esférico

Este posee una estrella de 8 puntas y tramo recto integrado a una terminación cónica hacia adelante. Ver [Figura 6](#) y [7](#). El volumen de grano inicial es de $15778,75 \text{ cm}^3$, el área expuesta a la combustión inicial es de $1851,37 \text{ cm}^2$ y el volumen de cámara es de $1074,548 \text{ cm}^3$.

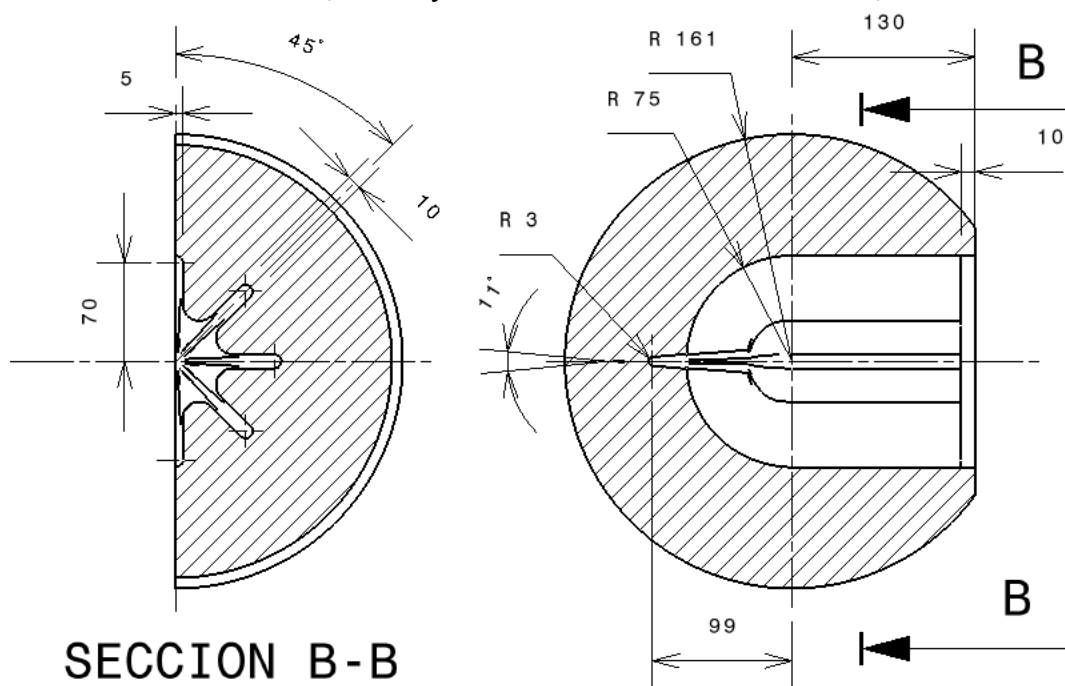


Figura 6 – Grano propulsivo Esférico

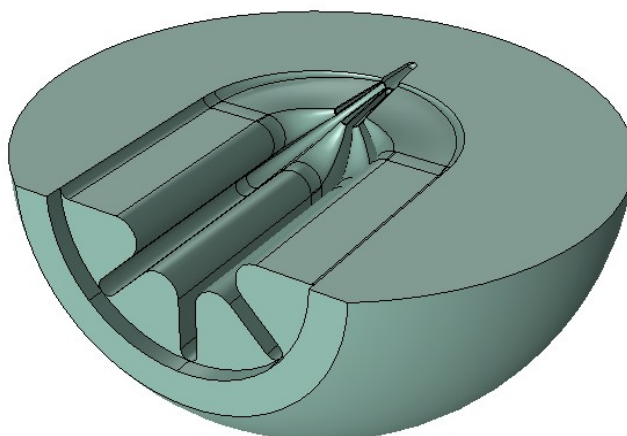


Figura 7 – Vista 3D de Grano propulsivo Esférico seccionado

5 CALCULO DE SUPERFICES EN COMBUSTIÓN

5.1 Metodología Aplicada

Definida la forma inicial del grano propulsivo y realizada por métodos CAD, se procede a:

- Definir claramente la superficie expuesta a la combustión y la superficie exterior del grano (aquella que se encuentra en contacto con la inhibición).
- El paso de cálculo inicial es de 10mm y en aquellos caso que se pretenda realizar un cálculo con más precisión será entre 2.5 y 5 mm.

5.2 Procedimiento en Motor Cilíndrico

El espesor de quemado total es 134,4mm el cual será representado hasta 130mm ya que el incremental es de 10mm y el 4,4mm restante es sliver.

Ver [Tabla 1](#) y [Gráficos 1, 2 y 3](#).

w	Área de Quemado (cm ²)	Volumen de Grano (cm ³)	Volumen de Cámara (cm ³)
0	8672,84	94930,34	14271,144
10	9510,38	85817,14	23384,282
20	10125,06	75951,27	33250,152
30	10113,94	65776,33	43425,098
40	8609,10	56365,74	52835,682
50	7294,85	48438,83	60762,596
60	6253,99	41686,18	67515,242
70	5514,89	35817,64	73383,784
80	5503,04	30352,89	78848,54
90	5582,86	24808,12	84393,302
100	5633,99	19196,78	90004,646
110	5644,50	13553,67	90004,646
120	5600,19	7925,95	101275,48
130	5475,04	2379,81	106821,62

Tabla 1 – Cálculo en Motor Cilíndrico

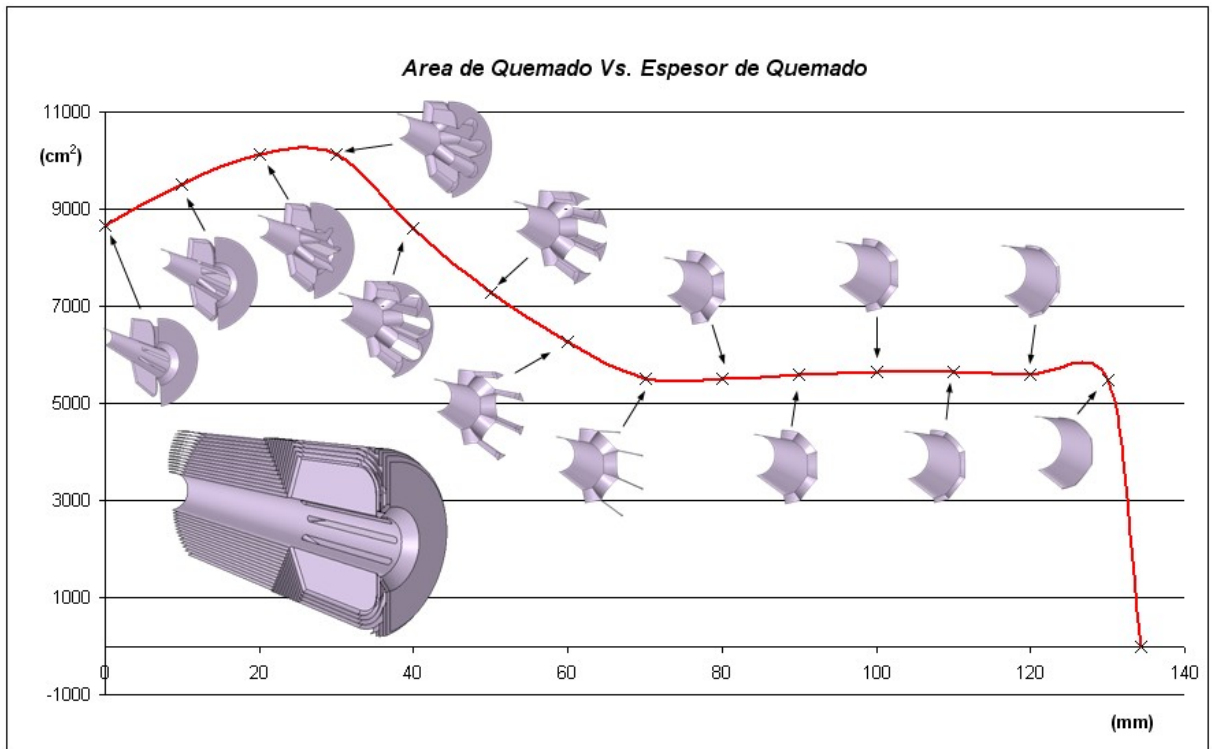


Gráfico 1 – Superficie expuesta a Combustión

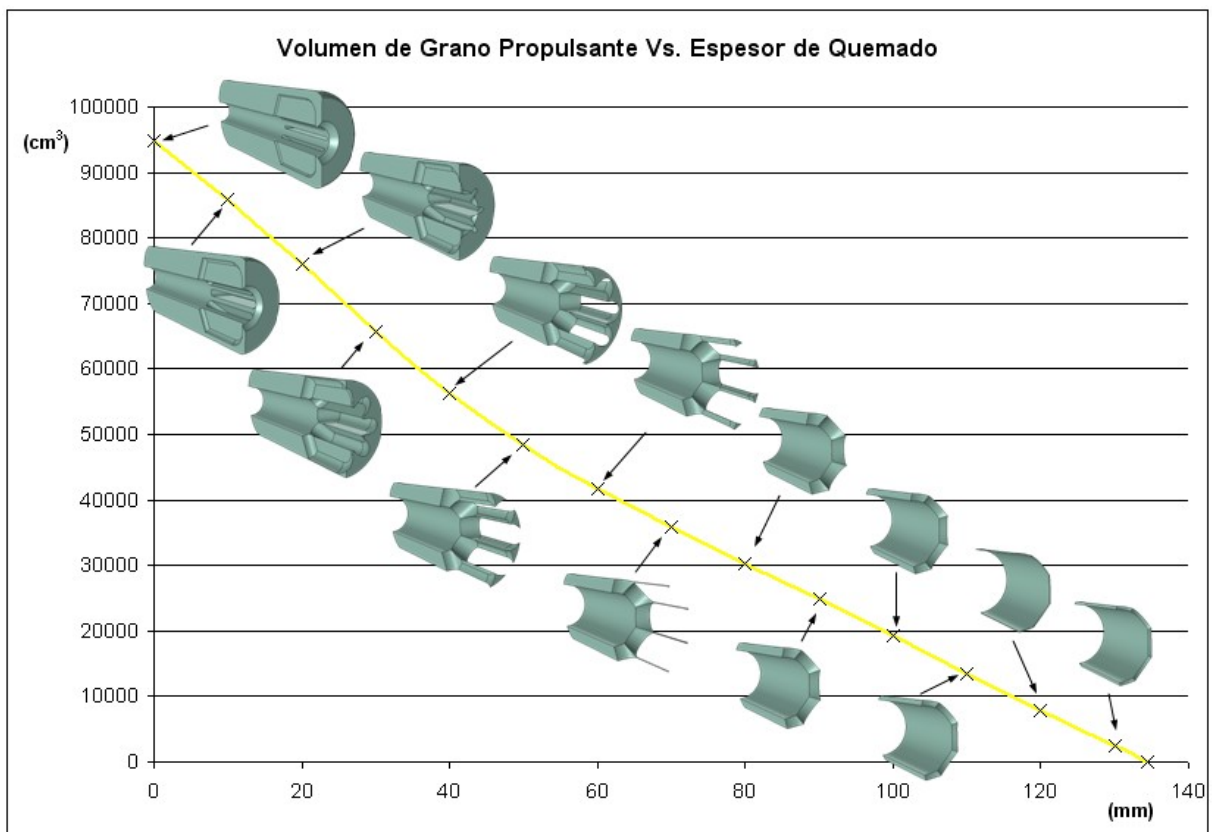


Gráfico 2 – Volumen de Grano Propulsante

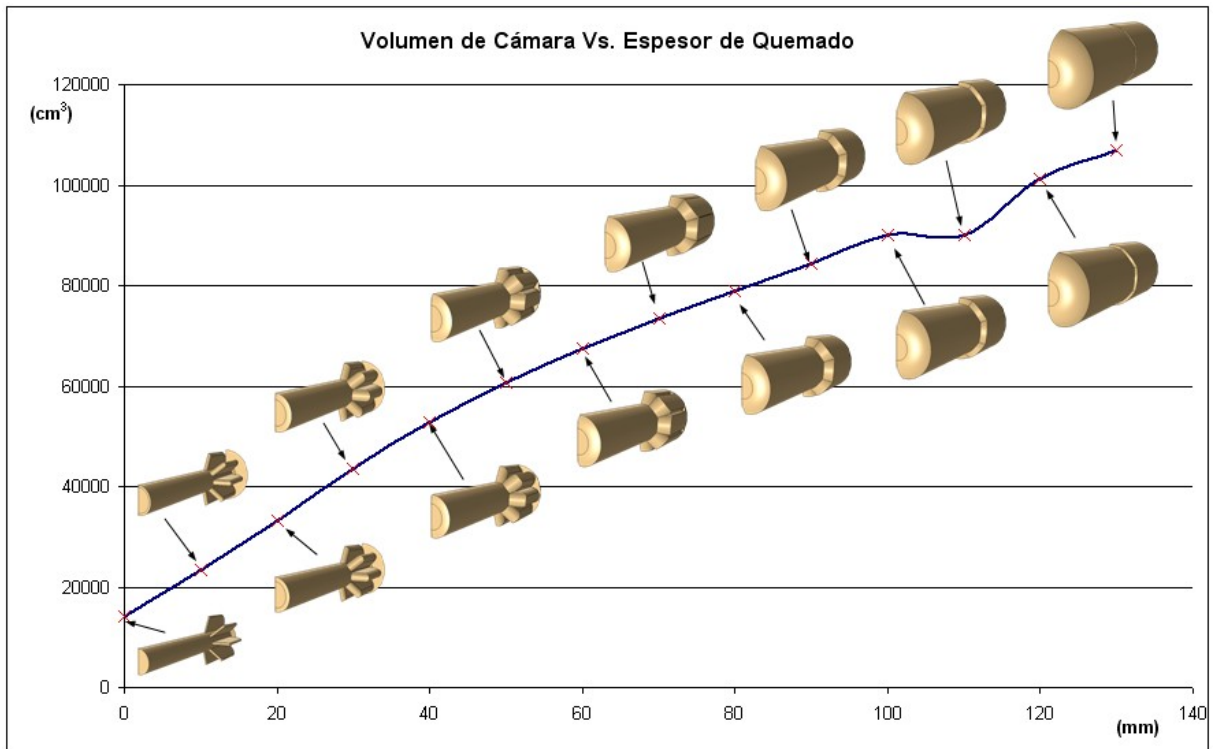


Gráfico 3 – Volumen de Cámara de Combustión

5.3 Procedimiento en Motor Esférico

El espesor de quemado total es 88mm el cual será representado hasta 86mm; por lo tanto el incremental es de 10mm mas 6mm finales para representación y finalmente los 2 mm restantes es sliver. Ver [Tabla 2](#), [Gráficos 4, 5 y 6](#).

w	Área de Quemado (cm ²)	Volumen de Grano (cm ³)	Volumen de Cámara (cm ³)
0	1851,37	15778,75	1074,548
10	1873,46	13900,27	2580,742
20	1676,88	12095,62	3931,004
30	1615,67	10460,93	5036,394
40	1696,19	8801,43	6097,02
50	1791,05	7052,84	7183,87
60	1876,25	5211,86	8306,636
70	1879,58	3326,89	9422,118
80	1833,17	1489,88	15992,486
86	1635,13	417,83	17022,61

Tabla 2 – Cálculo en Motor Cilíndrico

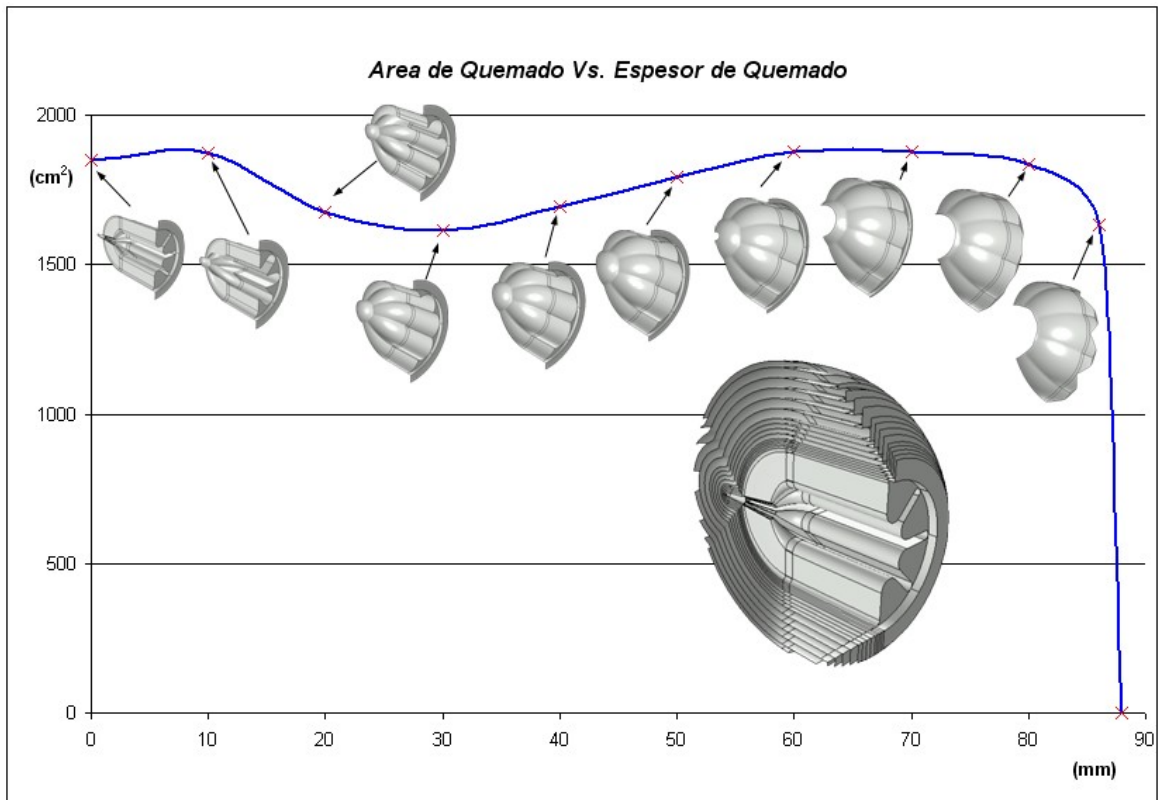


Gráfico 4 – Superficie expuesta a Combustión

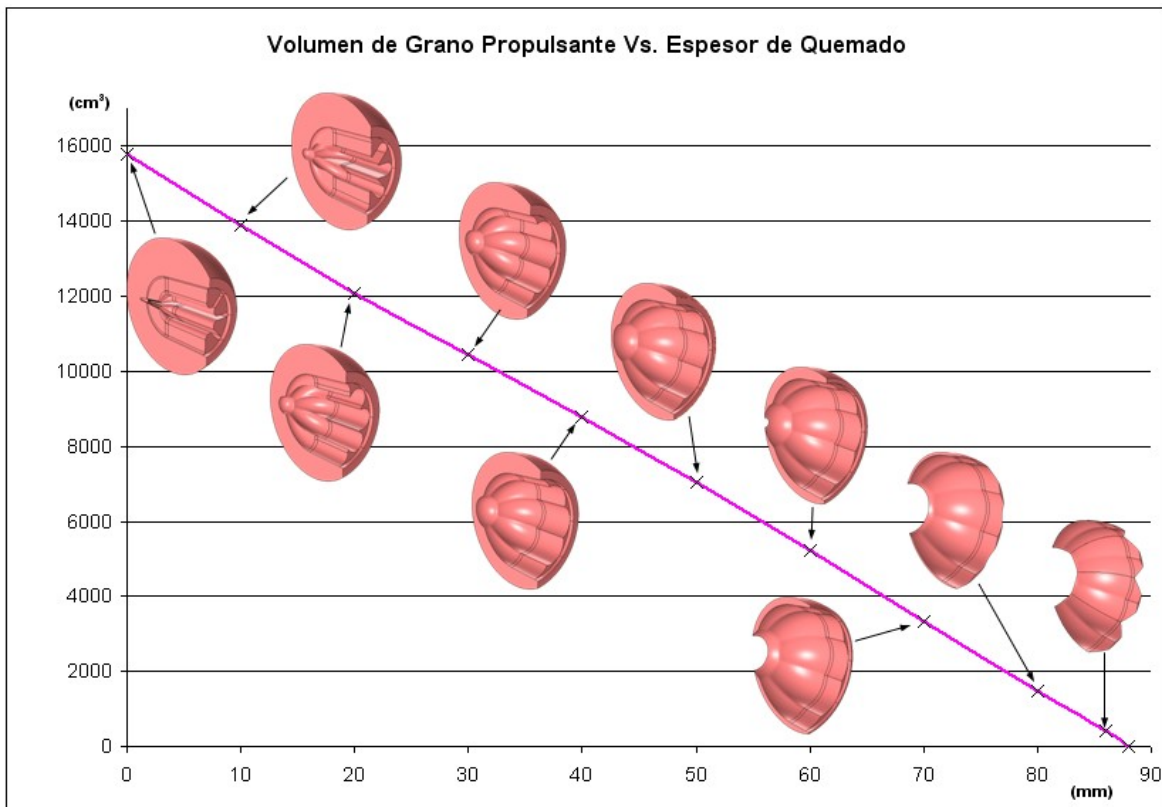


Gráfico 5 – Volumen de Grano Propulsante

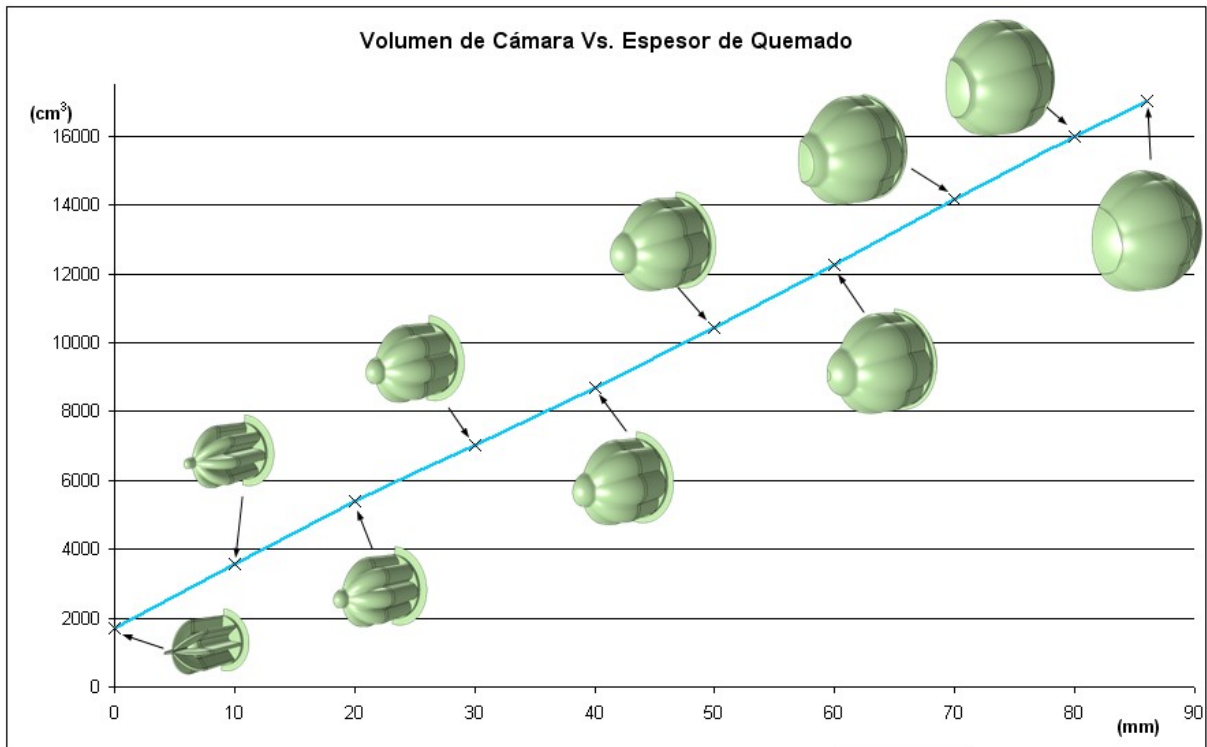


Gráfico 6 – Volumen de Cámara de Combustión

5.4 Procedimiento para mayor precisión

Si necesitamos analizar el comportamiento en el momento inicial de encendido del motor, realizamos una iteración del cálculo con pasos más pequeños, por ejemplo entre 2.5 y 5mm. Ver [Tabla 3](#) y [Gráfico 7](#).

w	Área de Quemado (cm ²)	Volumen de Grano (cm ³)	Volumen de Cámara (cm ³)
0	1851,37	15778,75	1702,17
2,5	1881,13	15315,68	2165,048
5	1884,62	14843,61	2637,354
7,5	1889,30	14250,35	3108,656
10	1873,46	13900,27	3580,724
15	1788,25	12970,05	4510,846
20	1676,88	12095,62	5385,116
25	1608,73	11269,43	6211,582
30	1615,67	10460,93	7020,122

Tabla 3 – Cálculo con mayor precisión

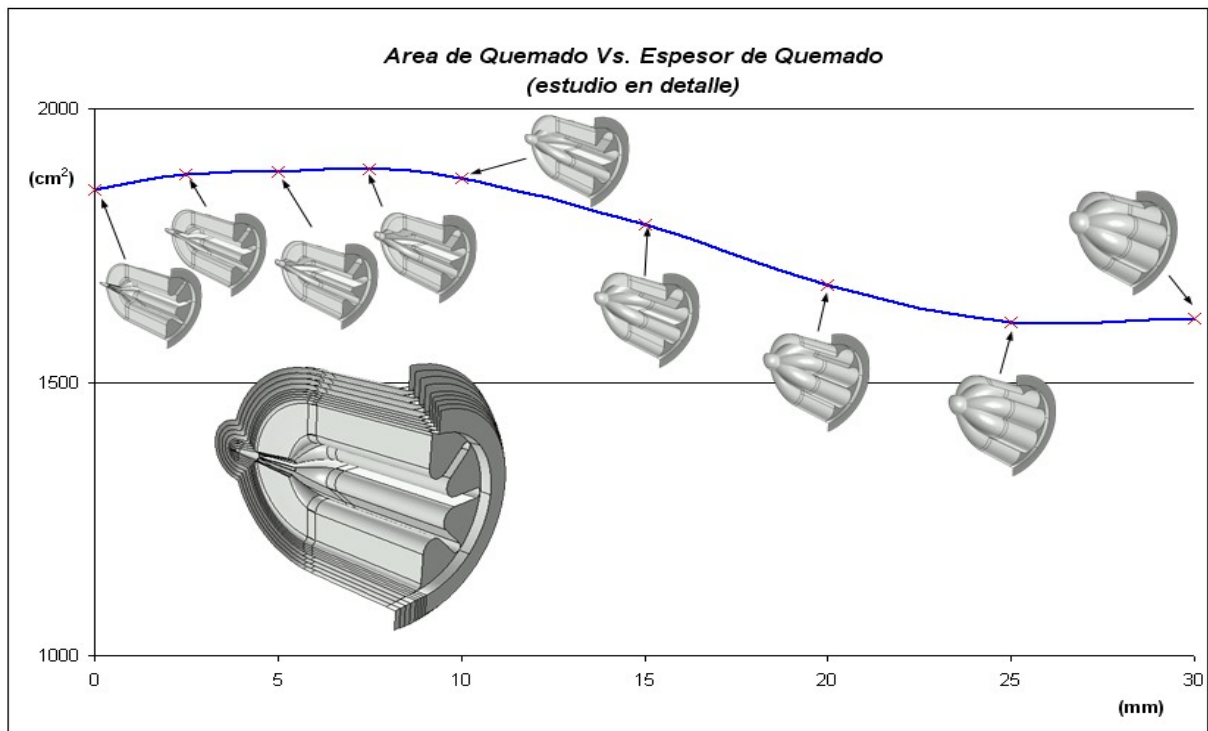


Gráfico 7 – Superficie expuesta a Combustión

6 CALCULOS BALISTICOS

La tasa de regresión de la superficie expuesta a combustión de un cohete se denomina velocidad de combustión (mm/seg). Conocer el comportamiento de ésta y como cambia en diversas condiciones, definen el éxito de un motor cohete de propulsión sólida.

Con datos necesarios de motor como impulso total, peso del propulsante y estructura, además de datos del propulsante como peso específico y velocidad de combustión, se calcula la distribución de presión de combustión en función del tiempo para luego calcular el área de pasaje en la tobera y finalmente el impulso específico. Ver [Gráfico 8](#) (típico).

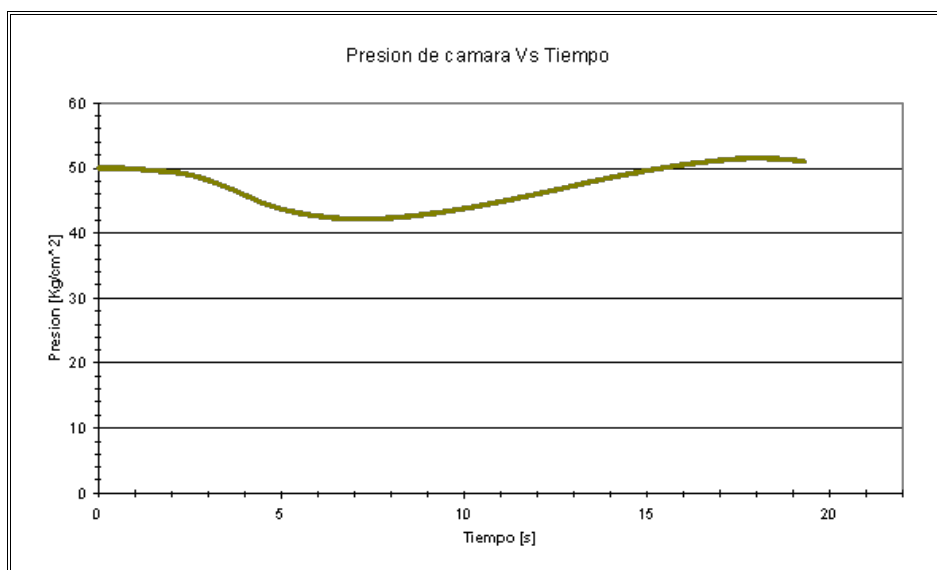


Gráfico 8 – Distribución de presión en función del tiempo

Es de fundamental importancia conocer el área máxima de superficie expuesta a combustión, ya que ésta definirá la máxima presión de cámara y así dimensionar diversas partes de motor.

Al final si adoptamos las presiones de salidas de un motor obtendremos una curva típica de distribución de empuje en función del tiempo. Ver [Gráfico 9](#).

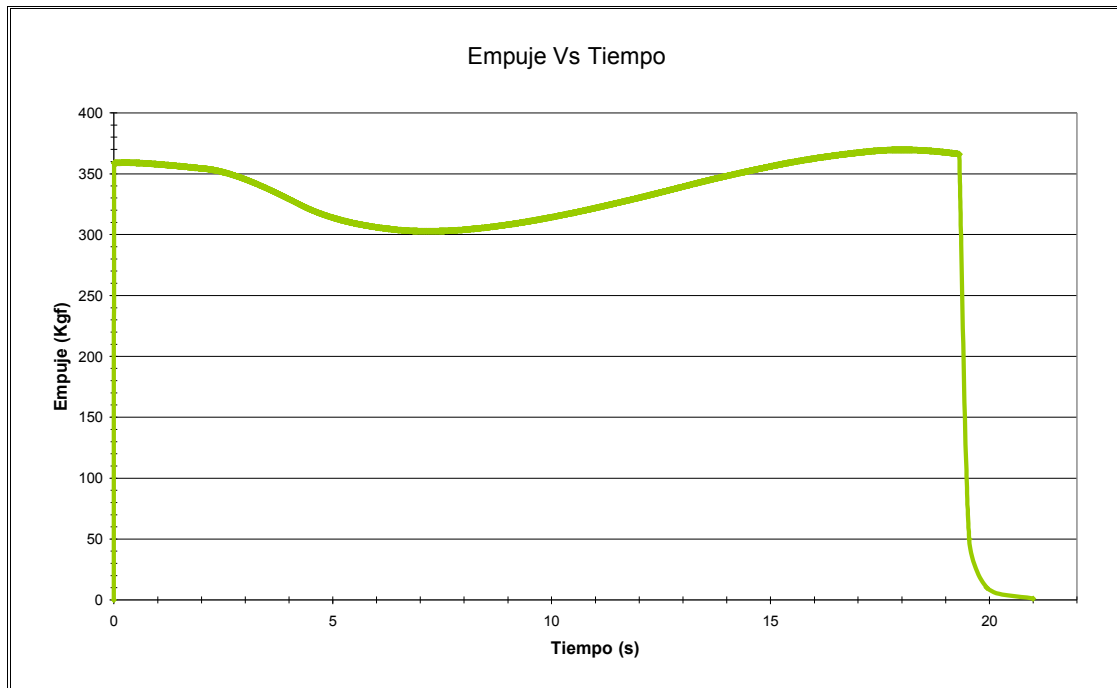


Gráfico 9 – Distribución de empuje en función del tiempo

7 CONCLUSION

Con la realización de este estudio, se puede demostrar que cualquiera sea la forma de motor de combustible sólido y cualquiera la forma del grano propulsivo adecuado a la misión definida por este, se puede determinar con total precisión valores de áreas expuestas a combustión pudiendo iterar cuantas veces sea necesario (modificando parcial o totalmente la geometría inicial en el caso de usar métodos CAD con herramientas paramétricas). Los métodos matemáticos o empíricos en muchas ocasiones son insuficientes para calcular sobre formas de motores no muy comunes, sumadas a geometrías de granos propulsivos complejas.

REFERENCIAS

- NASA, Solid Rocket Motor Internal Insulation, Nasa Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion), Diciembre 1976.
- Barrère Marcel, Jaumotte André, Fraeijs De Veubeke Baudouin, Vandekerckhove jean, Rocket Propulsion, Elsevier Publishing Company, 1960.
- Nakka Richard, Solid Propellant Rocket Motor Design and Testing, 1984.
- Rocket Propulsion, <http://www.braeunig.us/space/>.