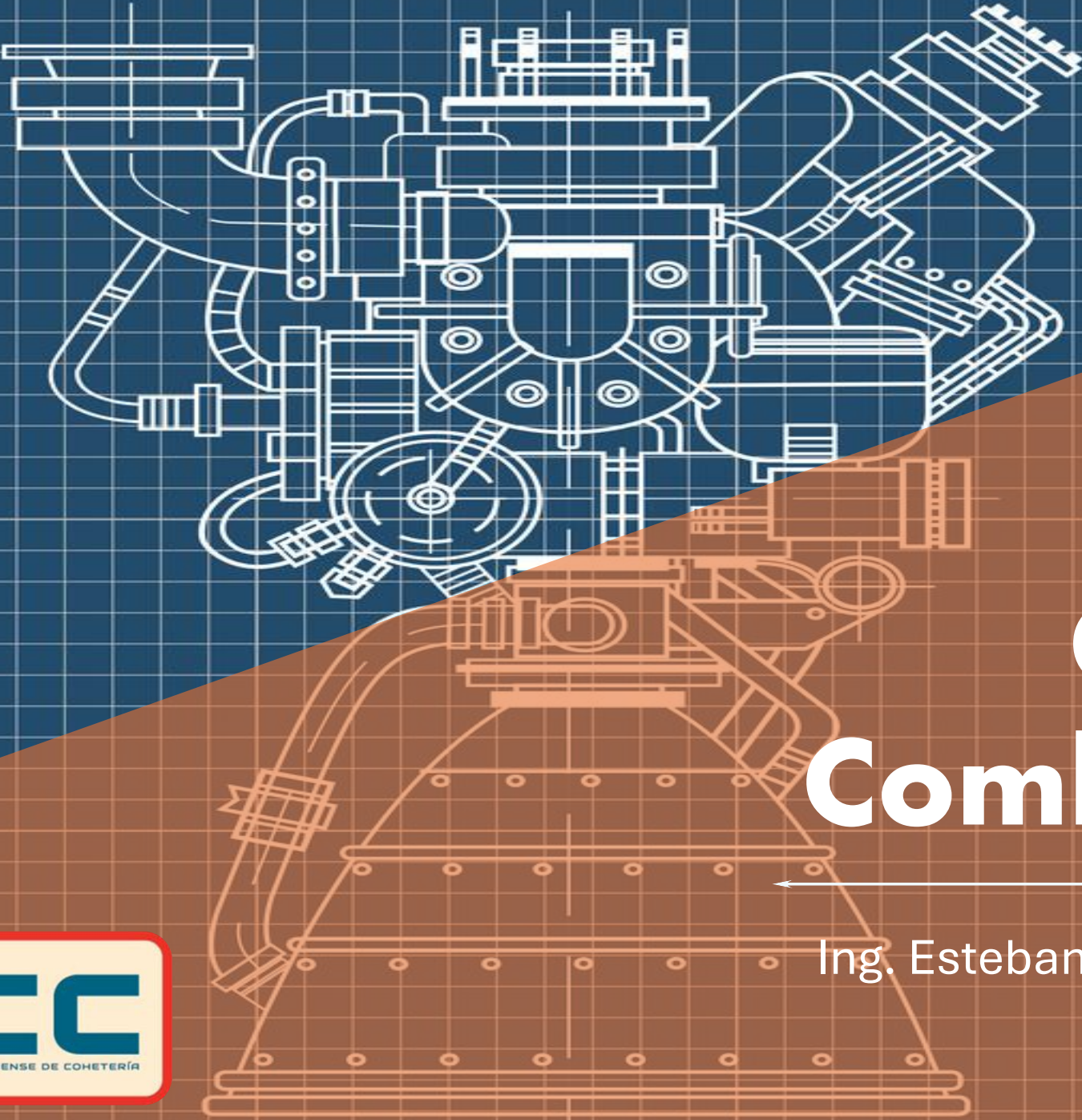


A detailed technical line drawing of a rocket engine, showing various components like the combustion chamber, nozzle, and various ports and connections. The drawing is split by a diagonal line: the upper part is on a blue grid background and the lower part is on an orange grid background.

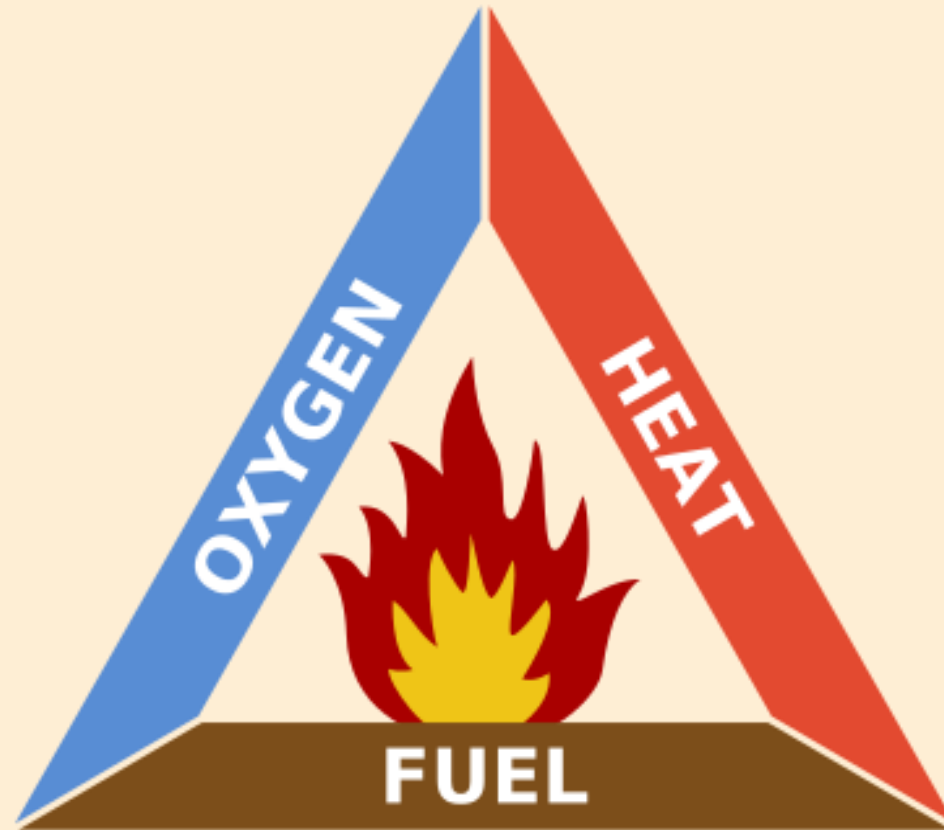
Clase 2: Combustión

Ing. Esteban Jiménez Sánchez



ACC
ASOCIACIÓN COSTARRICENSE DE COHETERÍA

Combustión



Propelentes



Bipropelentes

Combustible
+
Oxidante

Monopropelentes

Combustible y
Oxidante como parte
de la misma molécula

Combustibles Líquidos

- **Hidrógeno Líquido (LH₂)**: Criogénico, Alto ISP ($\approx 400s$)
- **Rocket Propellant 1 (RP-1)**: Estable a temperatura ambiente, ISP medio ($\approx 320s$), “barato”, denso.
- **Metano (CH₄)**: Desarrollo reciente, Criogénico
- **Etano (C₂H₆) & Etileno (C₂H₄)**
- **Propano (C₃H₈)**
- **Hipergólicos**
 - Hidrazina (N₂H₄)
 - Monomethylhydrazine (MMH)
 - Unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH)
 - Aerozine 50 (Hidrazina + MMH)

Oxidantes Líquidos

- **Oxígeno Líquido (LOX)**: Criogénico
- **Oxígeno Gaseoso (GOX)**: Eficiencia Media a Baja
- **Peróxido de Hidrogeno (H₂O₂)**: Eficiencia media, usos como monopropelente
- **Óxido Nitroso (N₂O)**: Eficiencia media, usos como monopropelente
- **Flúor (F₂)**
- **Hipergólicos**
 - Nitrogen tetroxide (N₂O₄)(NTO)
 - Tetrafluorohidrazina (N₂F₄)



Combinaciones Comunes (Líquidos)



- Metano + Oxígeno Líquido: METHALOX
- Keroseno + Oxígeno Líquido: KEROLOX
- Hidrogeno Líquido + Oxígeno Líquido: HYDROLOX
- UDMH / MMH + Tetróxido de Nitrógeno (NTO)

Propelentes Sólidos



Oxidantes	Nitrato de Potasio (KNO ₃)	Perclorato de Potasio	Perclorato de Amonio (AP)	Nitrato de Amonio (AN)
Combustibles	Azúcar (KNSU / Candy Fuel)	Azúcar	Hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB)	HTPB
	Dextrosa (KNDX)	Dextrosa	Polybutadiene acrylonitrile (PBAN)	PBAN
	Sorbitol	-	Carboxyl-terminated polybutadiene (CTPB)	CTPB
	Eritritol		-	-
	Carbón + Azufre (Pólvora)			
I _{sp}	115s – 130s	~ 205s	180s – 260s	~ 205s

Double-Base (DB) Propellants



- Dos monopropelentes, uno de alta energía y otro de baja energía

Nitroglicerina + Nitrocelulosa

- $I_{sp} \sim 235s$
- Posibilidad de aumentar I_{sp} a 250s con Aluminio.

Propelentes Compuestos



- Propelentes compuestos de:
 - Oxidante en polvo
 - Combustible (usualmente metálico) en polvo (Aluminio, Magnesio o Zinc)
 - Aglutinante gomoso que opera también como combustible.
- $I_{sp} \sim 210s - 296s$

Ejemplo: Propelente Compuesto de Perclorato de Amonio (APCP)

- Perclorato de Amonio (AP) (NH_4ClO_4) como oxidante
- Aluminio (Más común)
- Polibutadieno terminado en hidroxilo (HTPB) como aglutinante y combustible



Composite Modified Double Base Propellant (CMDB)



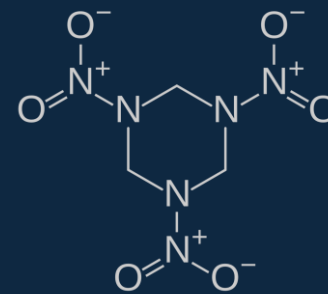
Propelentes que contienen:

- Propelentes de Base Doble (Nitrocelulosa y Nitroglicerina)
- Perclorato de Amonio (AP)
- Aluminio (Al)

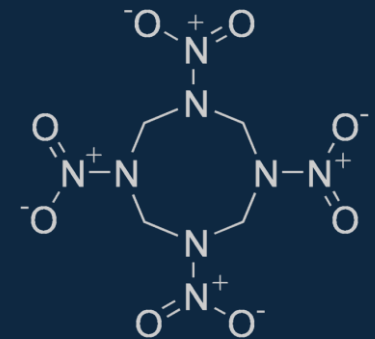
Propelentes Compuestos de Alta Energía (HEC)



- Consiste en una mezcla estándar de propelente compuesto con el ingrediente añadido de explosivos de alta energía.
- Explosivos usados:
 - RDX ($(\text{CH}_2\text{N}_2\text{O}_2)_3$)
 - HMX ($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$)



RDX



HMX

Aditivos



Modifican la velocidad de la reacción.

Aceleradores

- Óxido de Hierro (Fe_2O_3)
- Thermite (Aluminio + Óxido de Hierro)
- Aluminio (Al)
- Ferrocene ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$)
- Catocene
- Copper Chromite ($\text{Cu}_2\text{Cr}_2\text{O}_5$)

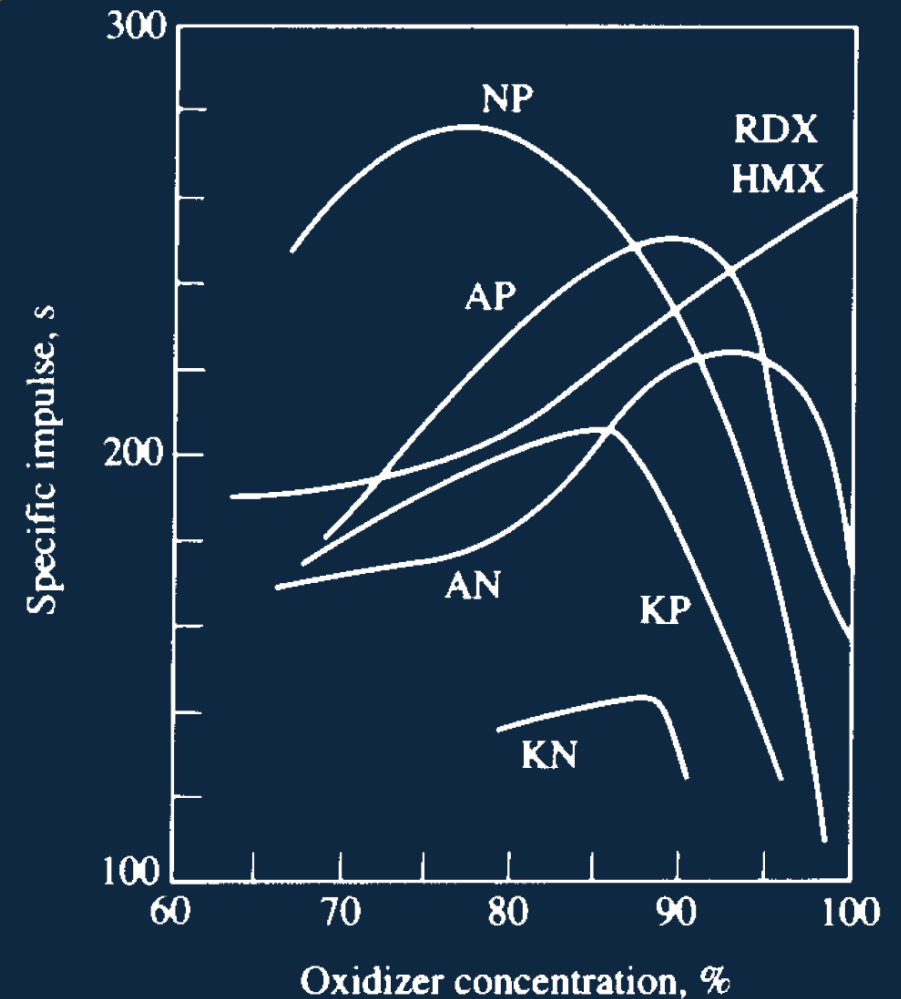
Supresores

- Bicarbonato de Sodio (NaHCO_3)
- Agua / Humedad (H_2O)

Razón O/F

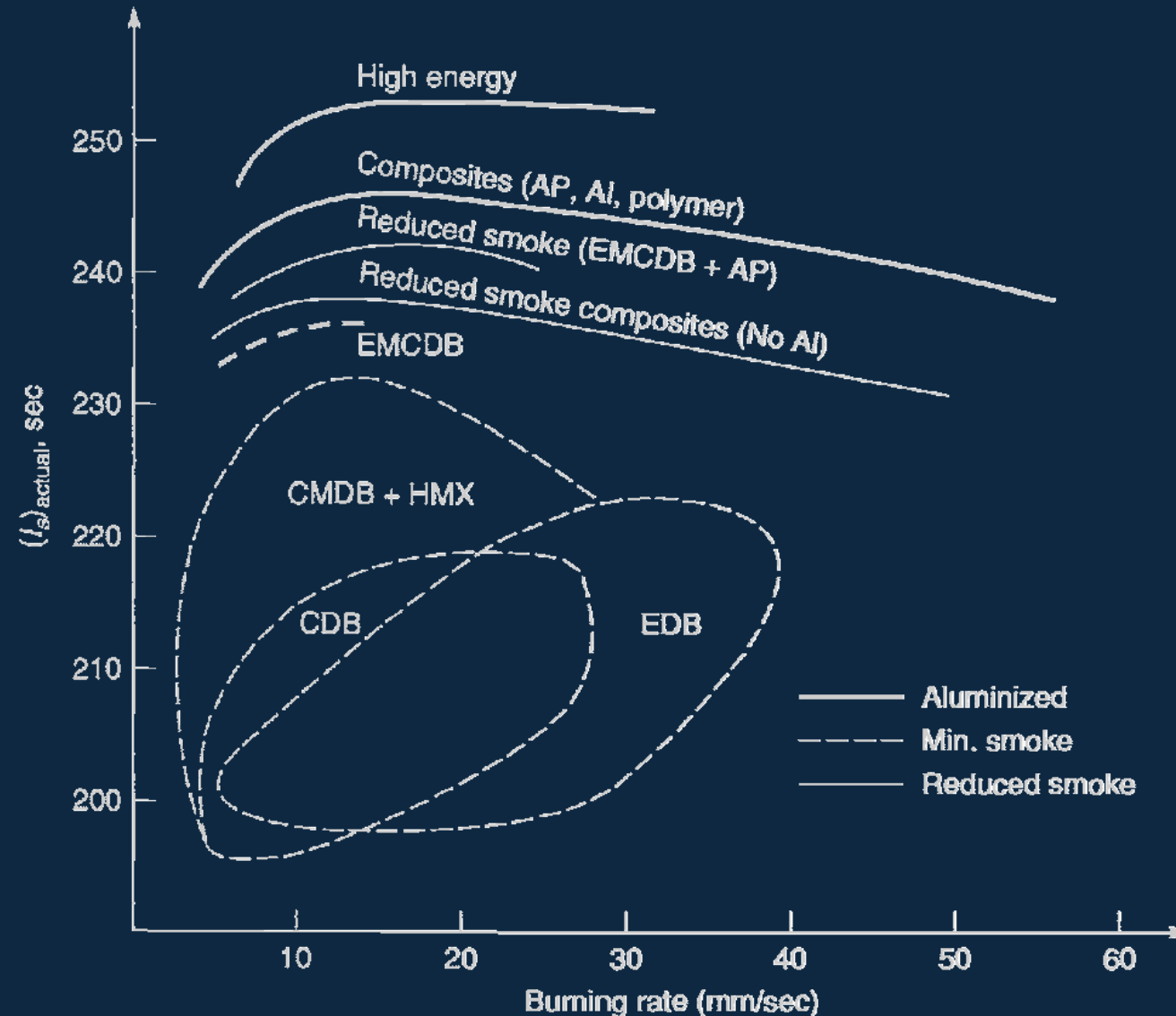


- Se refiere a la razón de oxidante y combustible.
- Cada mezcla de combustible y oxidante tiene su propia relación ideal con respecto a su composición.



Usando HTPB como combustible

Comparación de Eficiencias



Candy Fuel

KNSU / KNDX / KNSB

Nitrato de
Potasio (KNO_3)

Sacarosa
Dextrosa
Sorbitol



Ammonium Perchlorate Composite Propellant

APCP

Perclorato de
Amonio
(NH_4ClO_4)

Aluminio
(Al)

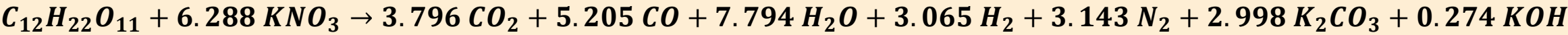
Hydroxyl-
terminated
polybutadiene
(HTPB)*



Candy Fuel



Razón O/F	1.86 (65/35) Ideal: 1.94 (66/34)
Temperatura de Flama Adiabática	1720 K
Razón de Calores Específicos	1.044
Densidad	1776 kg/m ³
Constante a	0.0665
Constante n	0.319
Constante de Gas Específico	195.71 J/(kg K)



Métodos de Preparación – KNSU



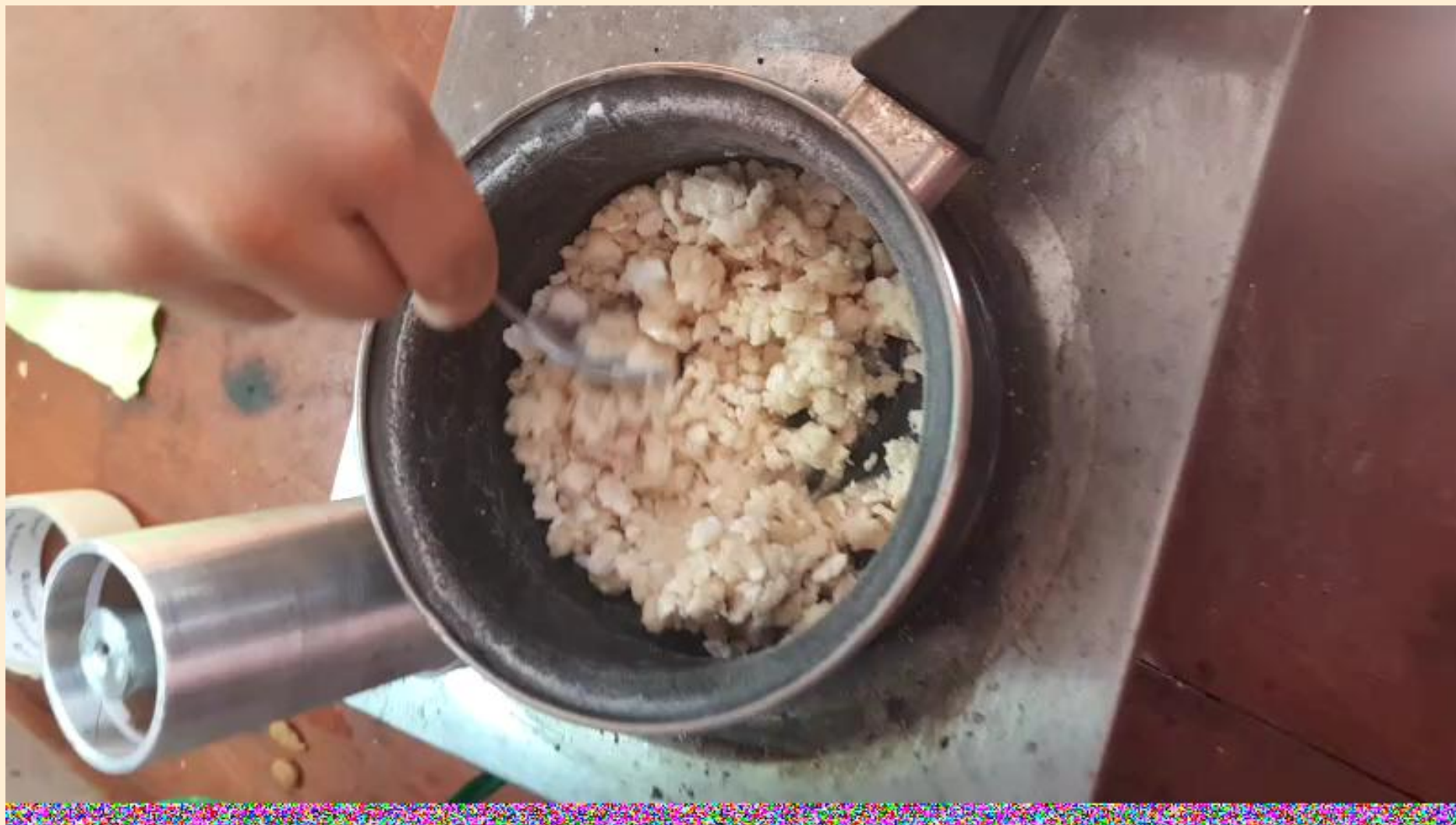
- Compactado
- Cocinado
 - Simple
 - “Baño Maria” (Parafina)
 - Con Agua
 - Con Glycerol



Cocinado Simple



Cortesía: Kevin Rodríguez



Caramelizado



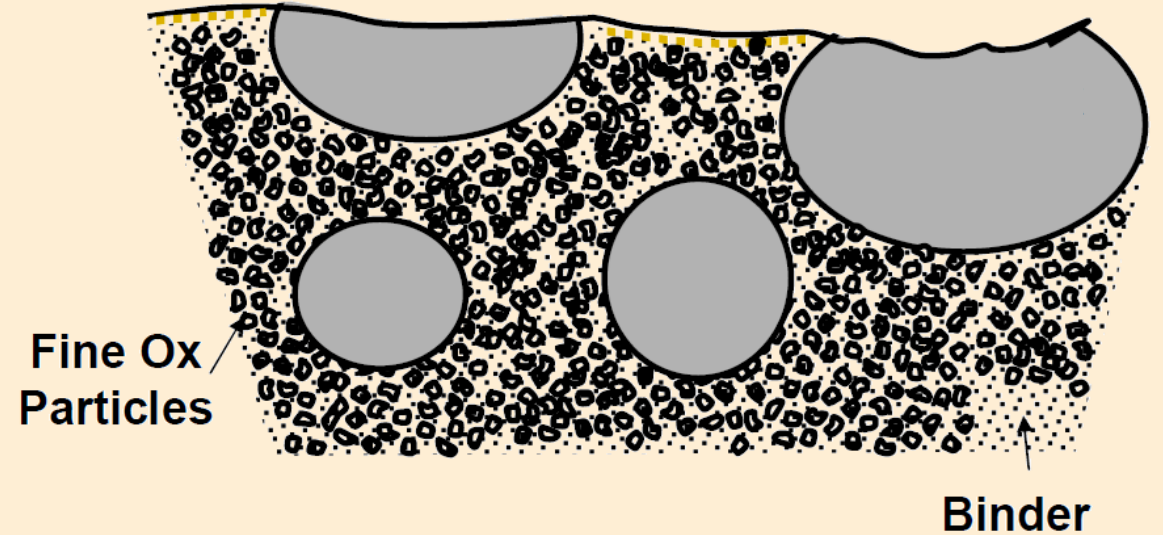
Evitar lo máximo posible



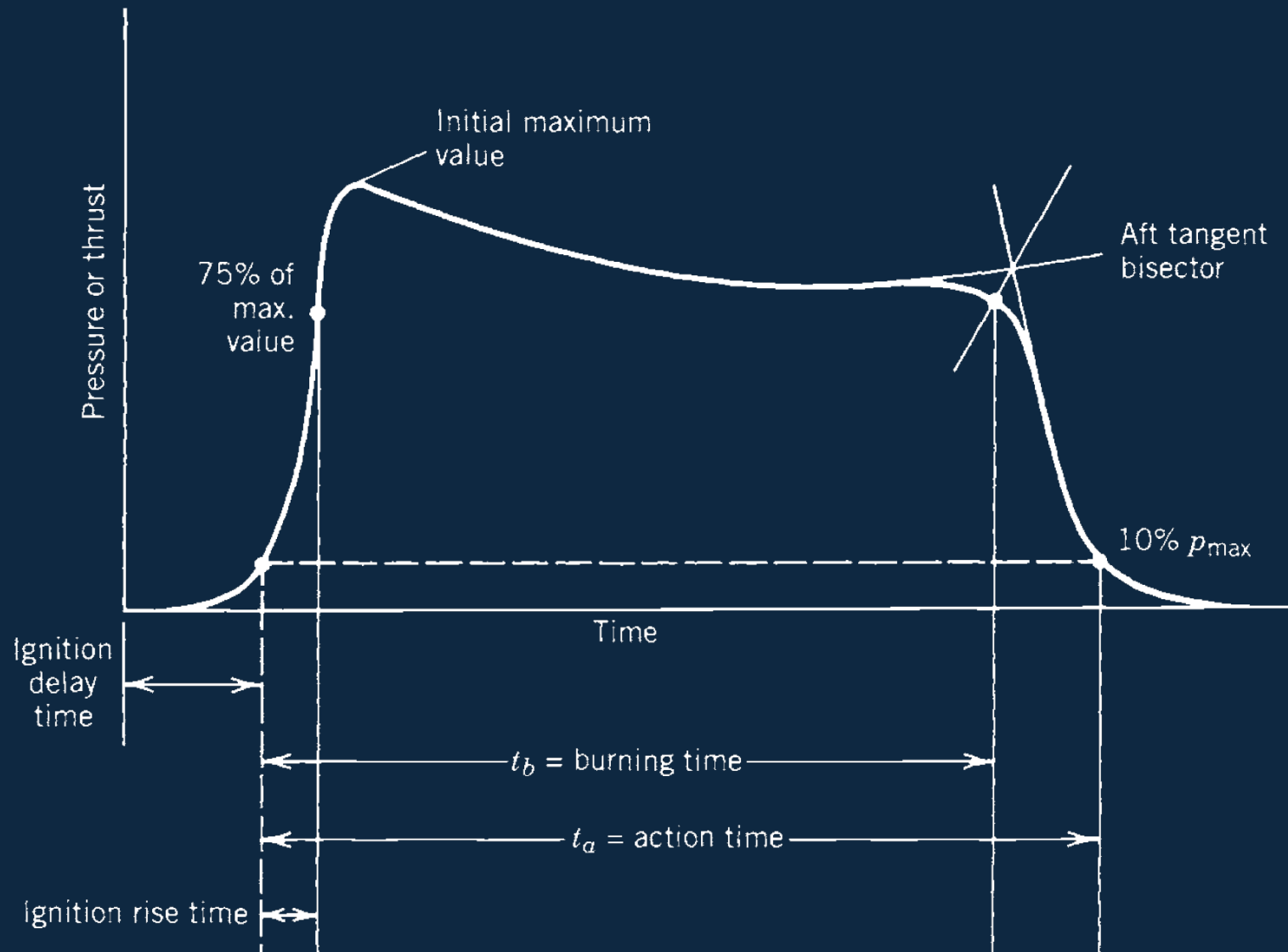
Preparación de componentes



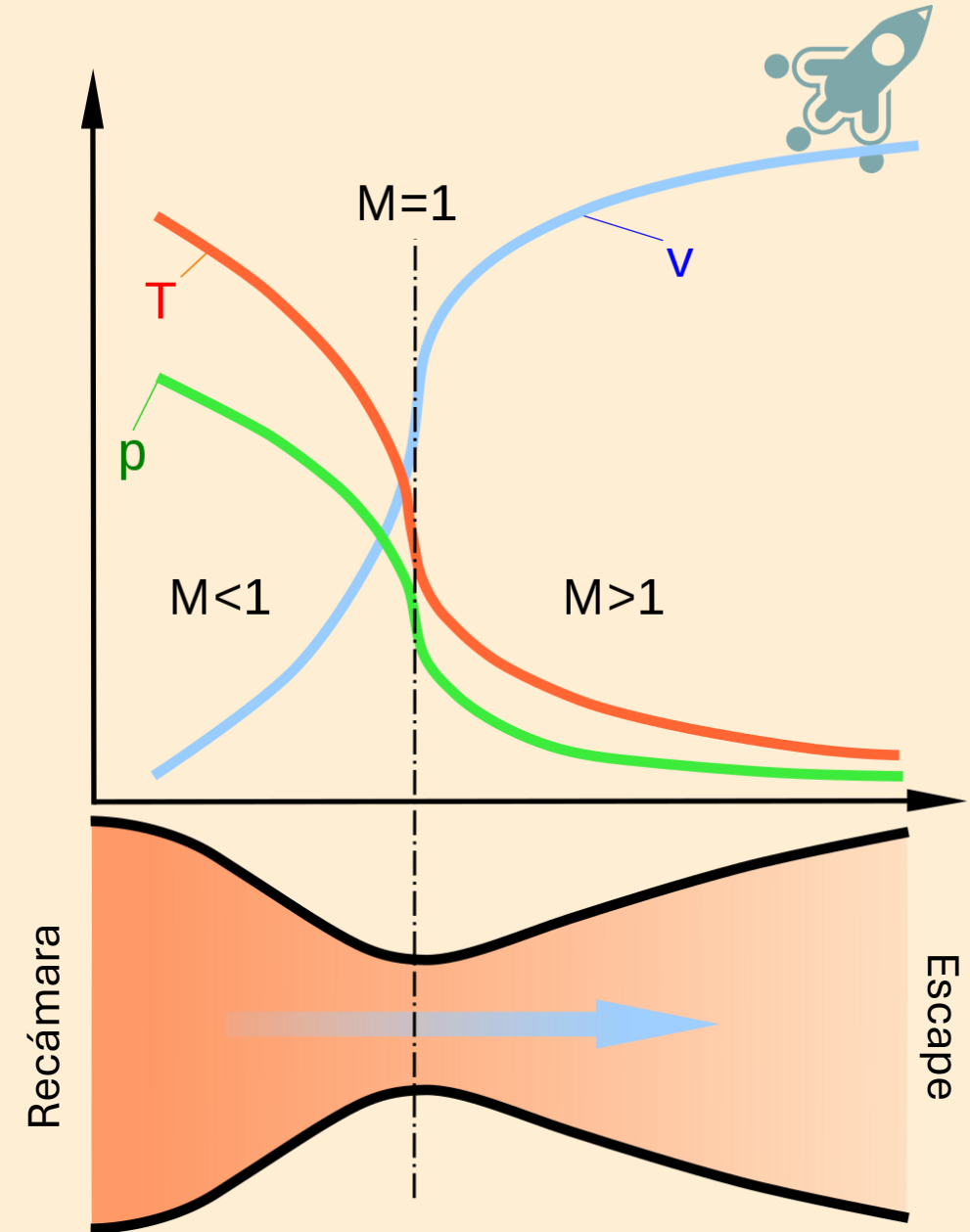
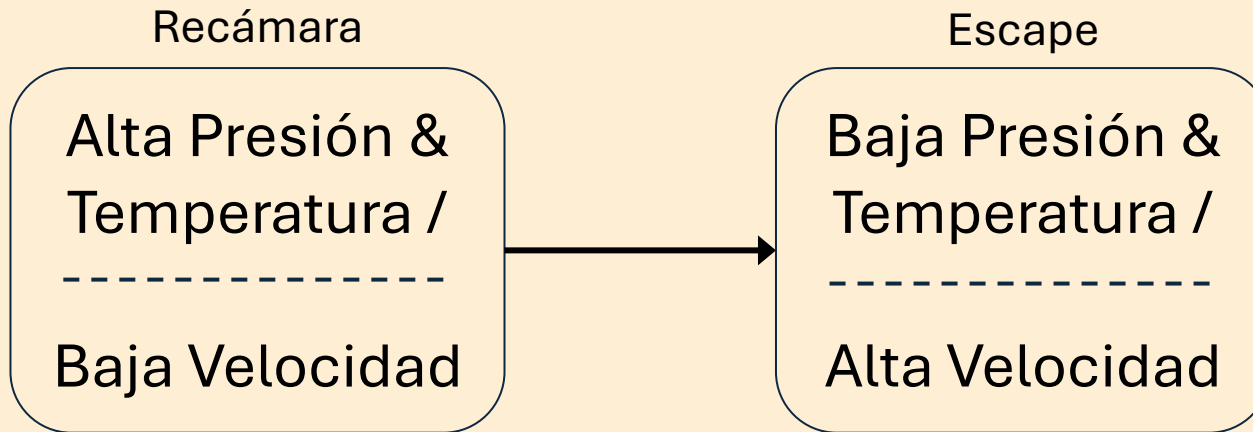
- El tamaño de las partículas puede afectar la combustión.
- Al disminuir el tamaño, se logra una combustión más limpia, pero puede por tanto llevar a un aumento de la velocidad de reacción.



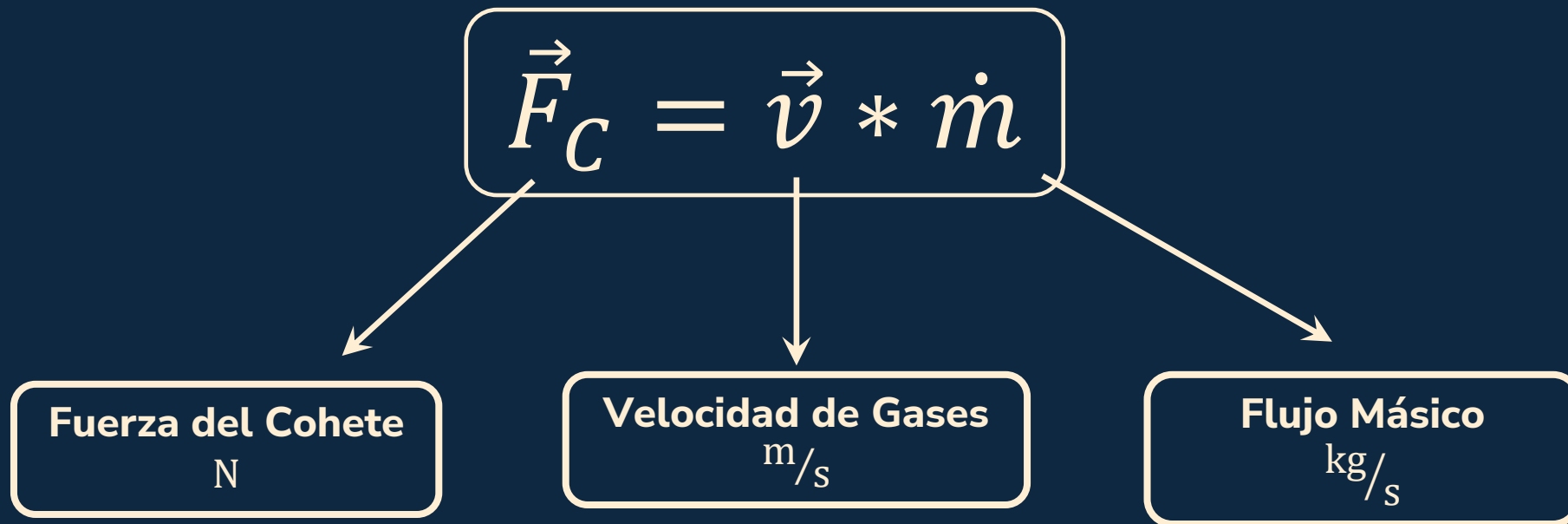
Comportamiento de Quemado



Comportamiento del motor



Fuerza del Cohete



➤ Maximizar Velocidad y Flujo Másico

Control de Variables



Velocidad de los Gases
[$\vec{v}$]



Control de expansión de los gases modificando la forma de las paredes de la tobera y la selección de propelentes

(Expansión Isoentrópica)

Flujo Másico
[$\dot{m}$]



Control del flujo de gases controlando el crecimiento del “frente de llama”

Flujo Másico Generado



$$\dot{m}_g = A_b * \rho * b_r$$

$$F_C \propto \dot{m} \propto A_b$$

A_b : Área de Quemado (m^2)

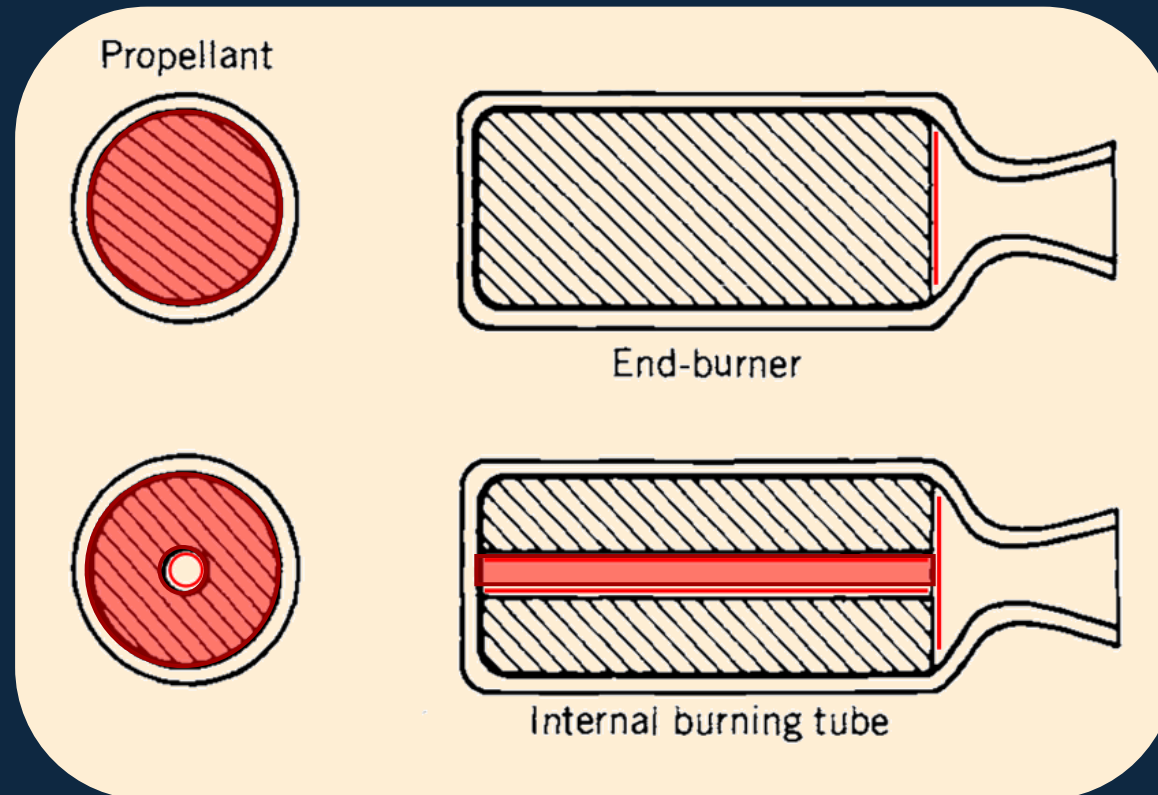
ρ : Densidad del Combustible (kg/m^3)

b_r : Tasa de Quemado (m/s)

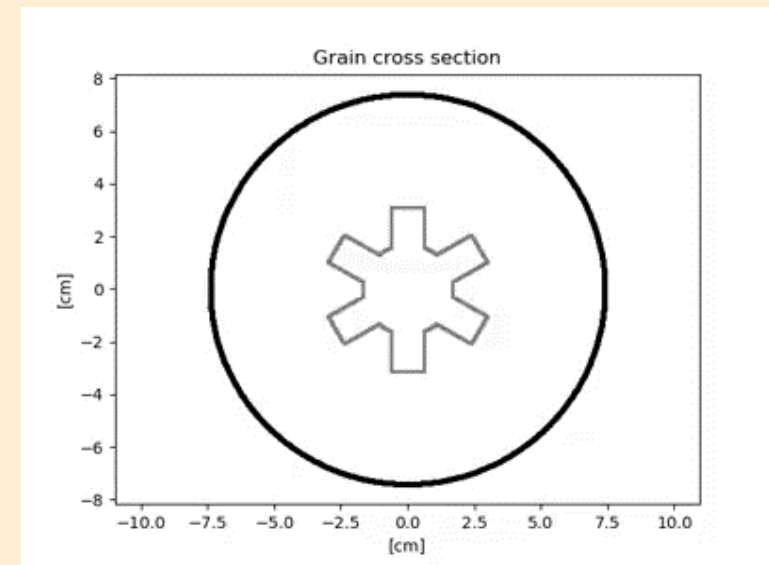
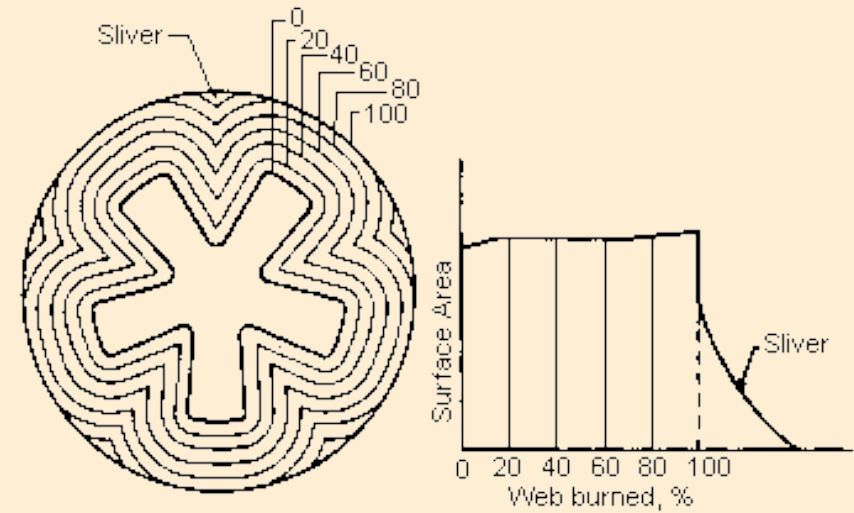
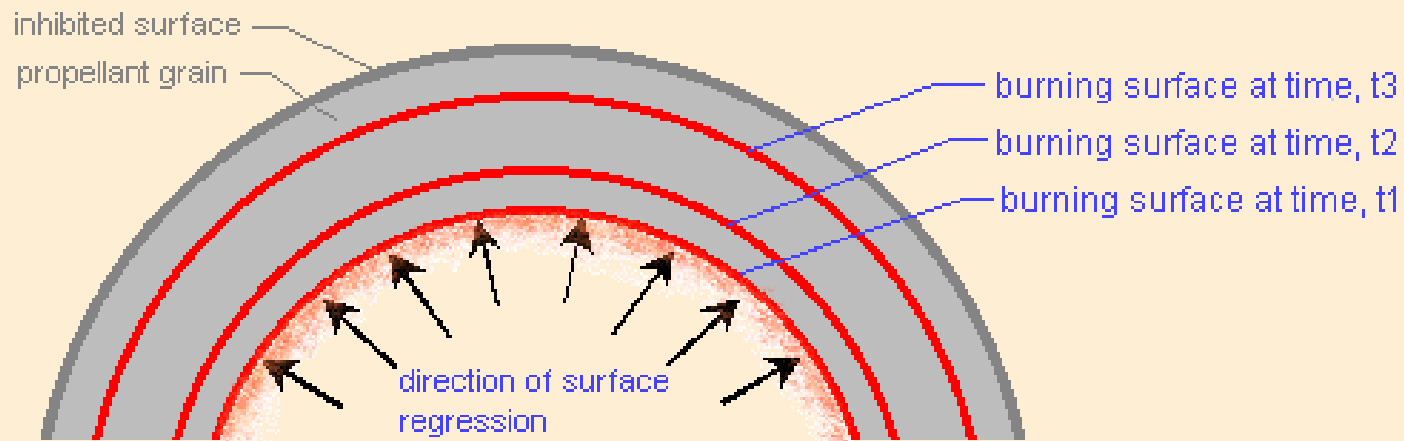
Área de Quemado



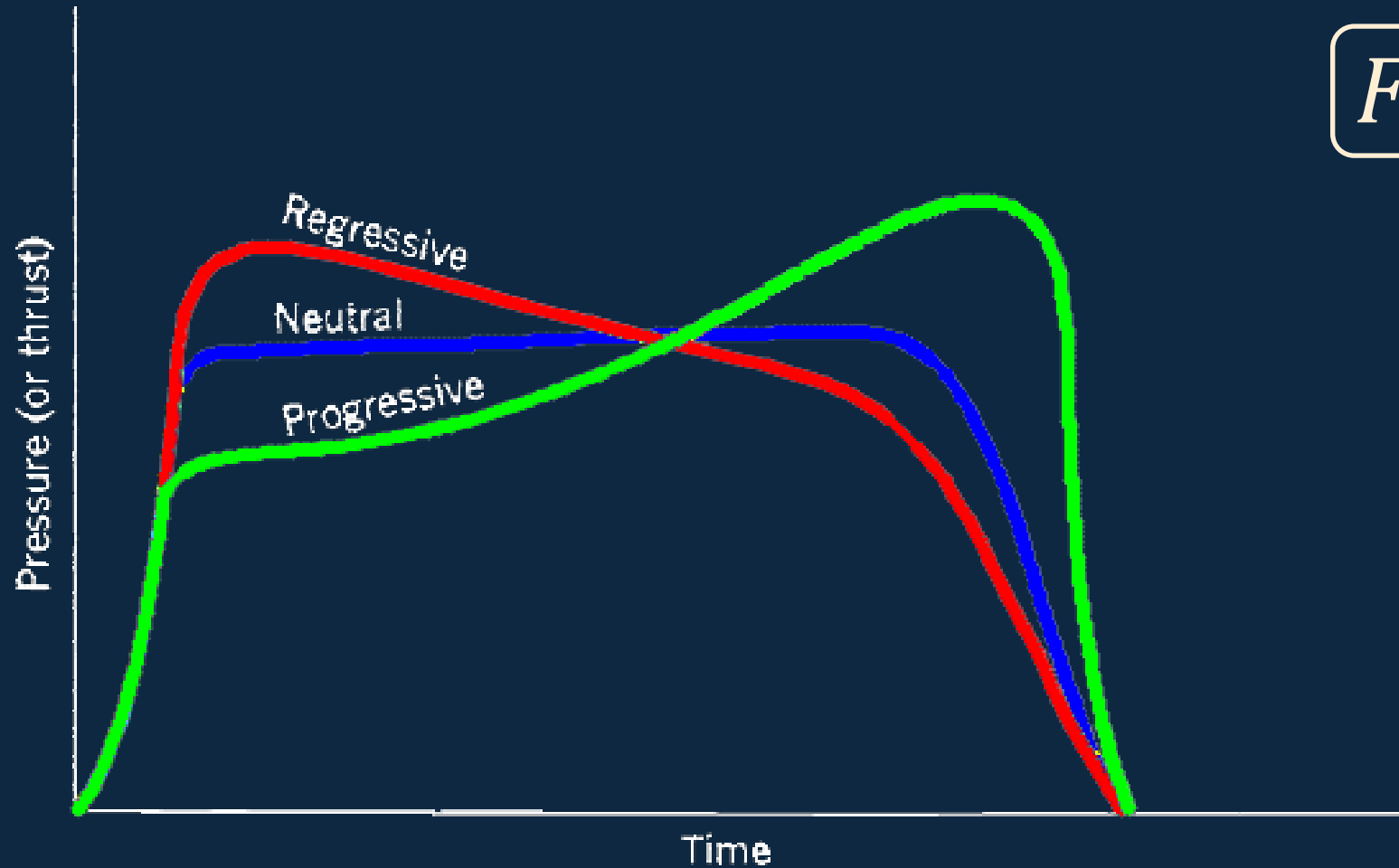
Área del propelente expuesta al frente de llama.



Variación de Área de Quemado



Comportamiento de Quemado

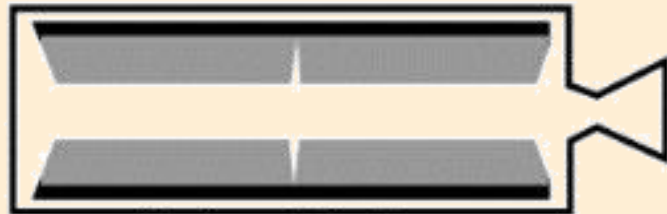


$$F_C \propto \dot{m} \propto A_b$$

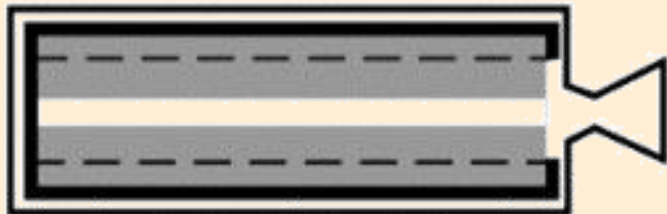
Tipos de Granos



Internal Burning Core



Bates Grain



Internal Star



Moon Burn

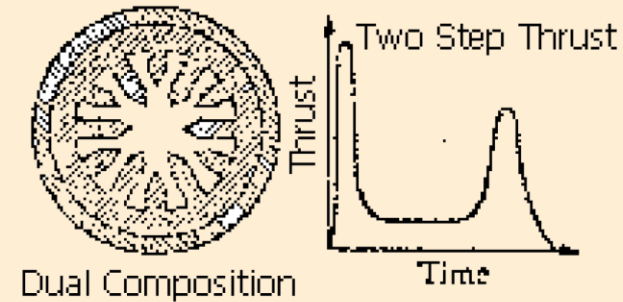
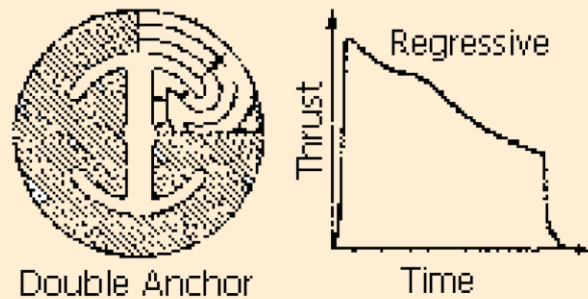
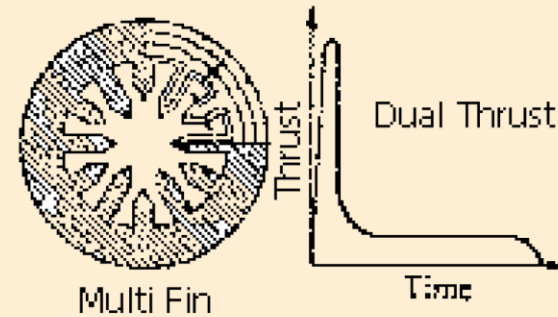
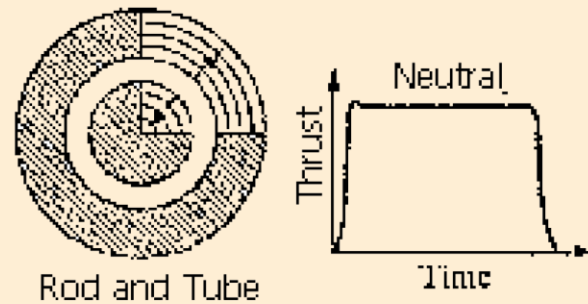
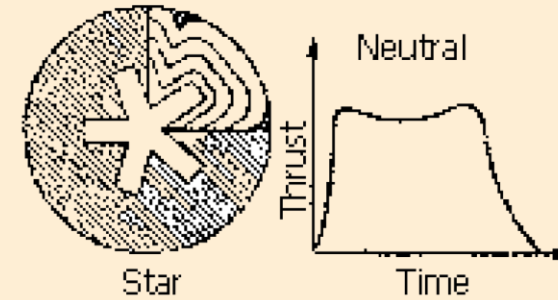
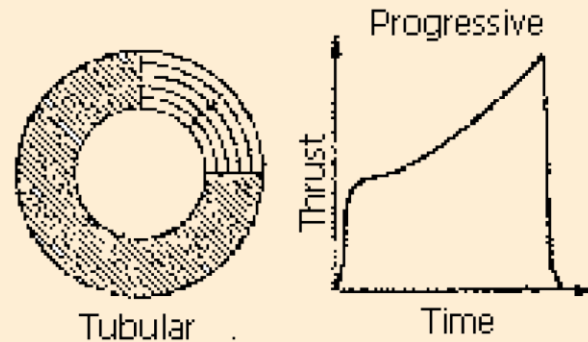


Rod & Tube



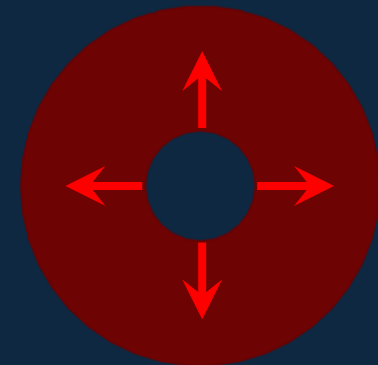
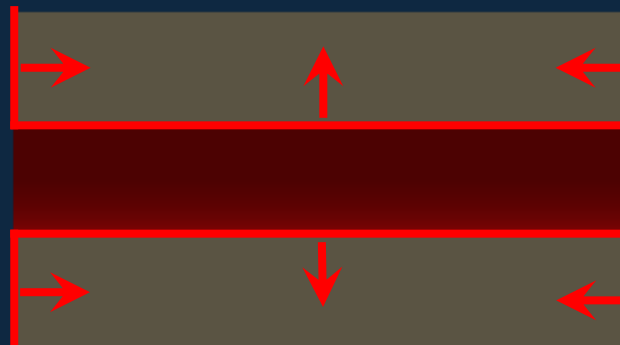
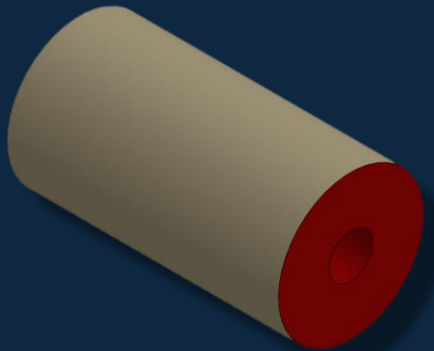
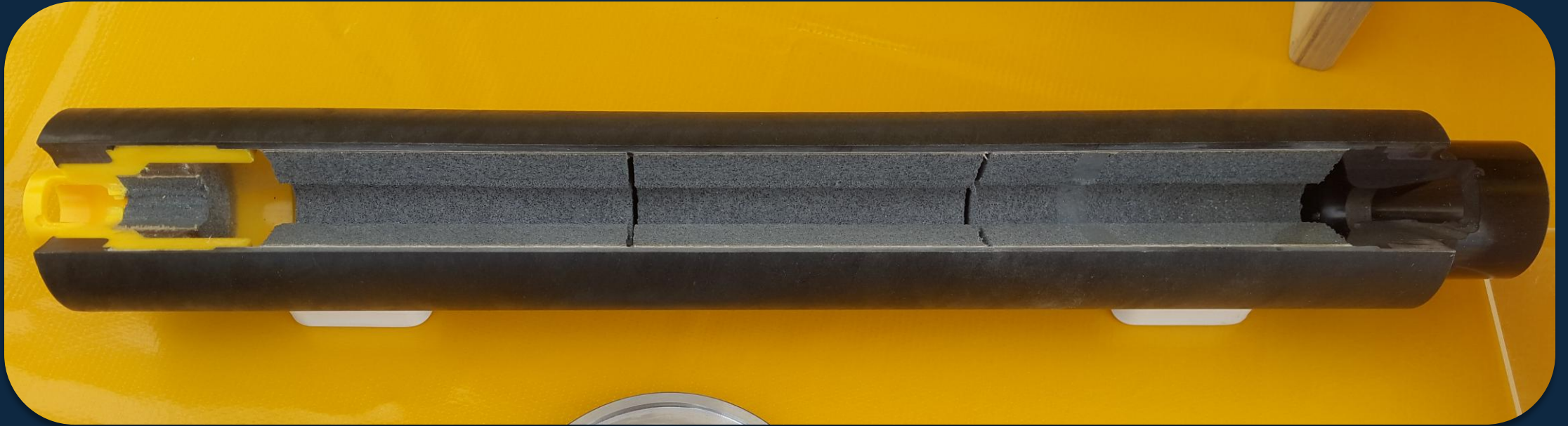
Endburn

Tipos de Granos

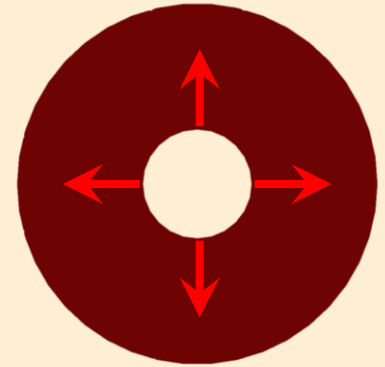
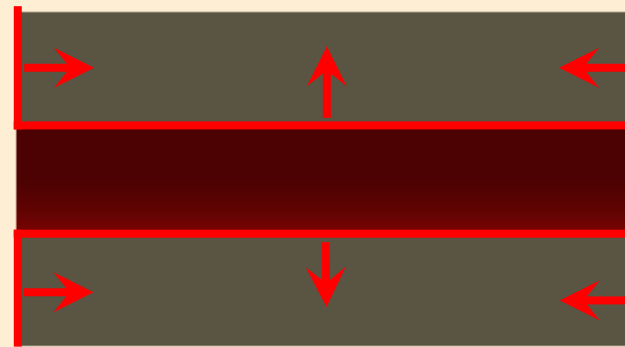
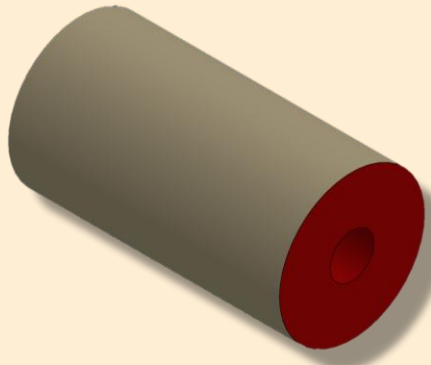


Grano de Bates

$$\dot{m}_g = A_b * \rho * b_r$$



Cálculo del área de quemado



$$A_b = A_{cilindro} + 2 * A_{Tapa}$$

$$A_{cilindro} = (2 * \pi * R_i) * L_G$$

$$A_{Tapa} = \pi * (R_e^2 - R_i^2)$$



Tasa de Quemado



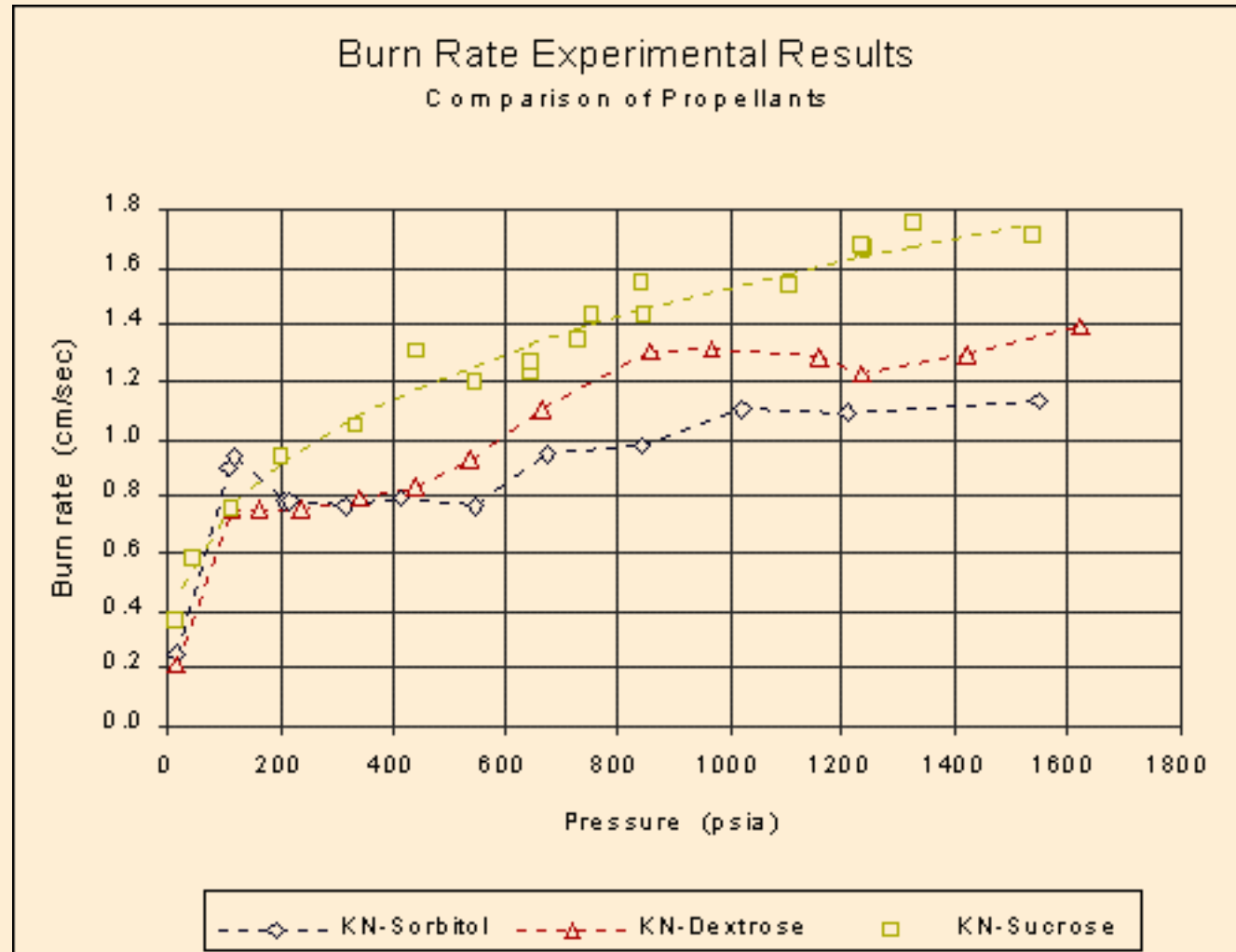
$$B_r = a * (P_c)^n$$

$$50 \text{ psi} < P_c < 3000 \text{ psi}$$

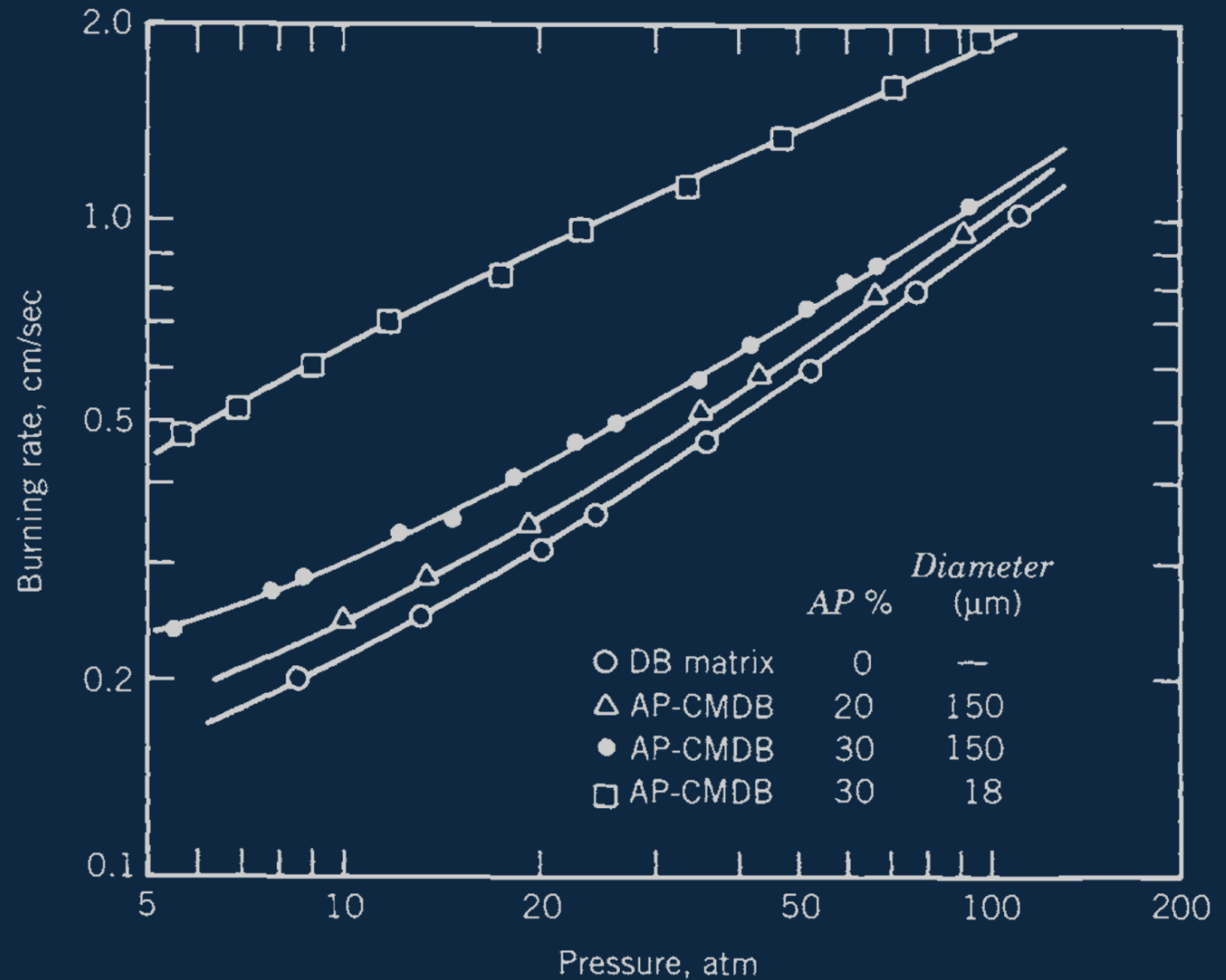
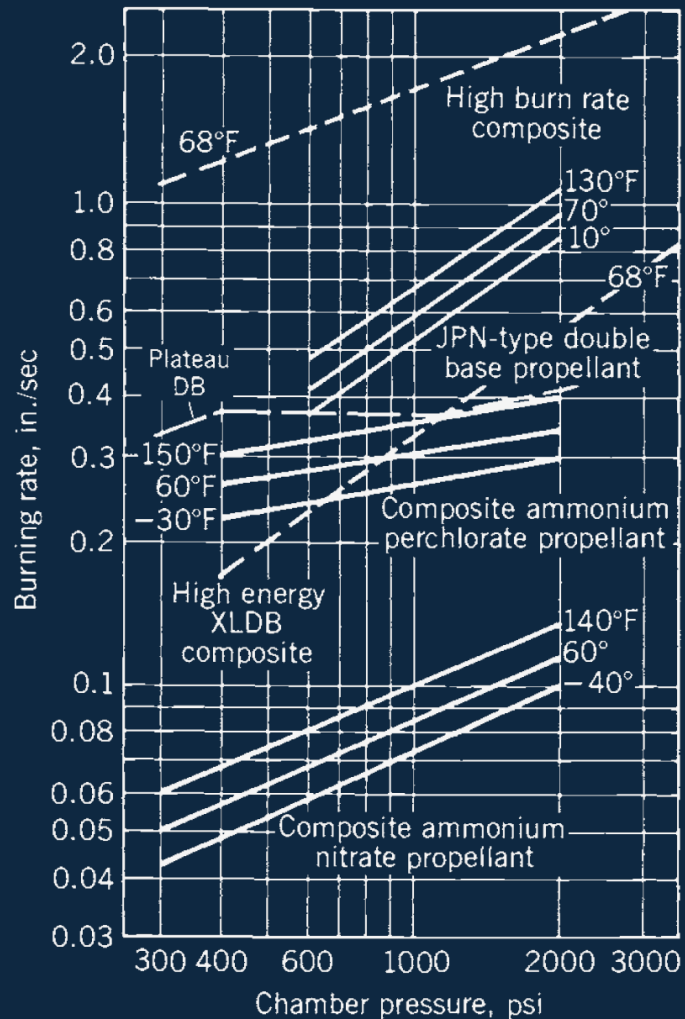
a : Coeficiente de Temperatura

n : Exponente de Tasa de Quemado

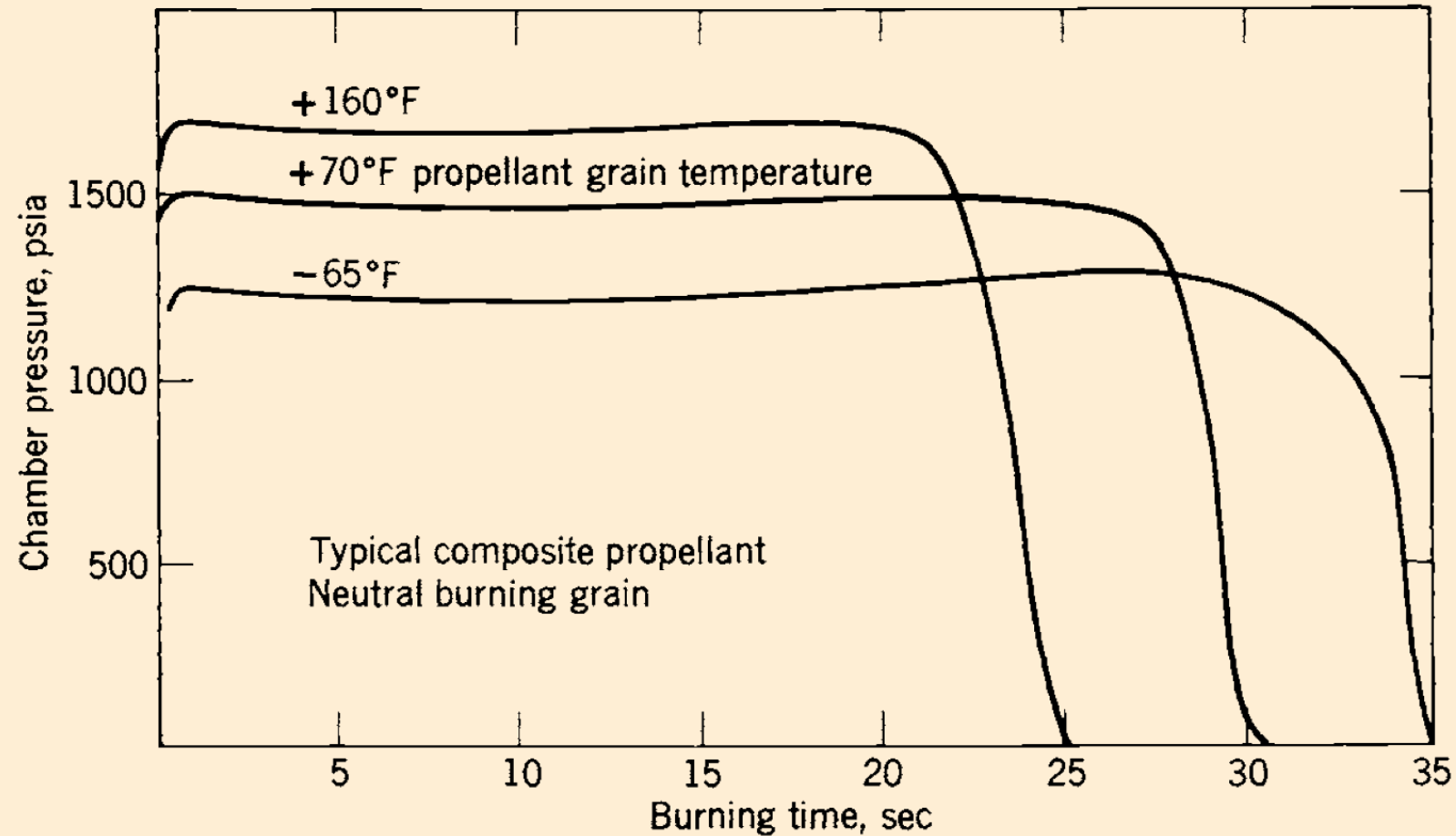
P_c : Presión en Recámara



Variación de Tasa de Quemado



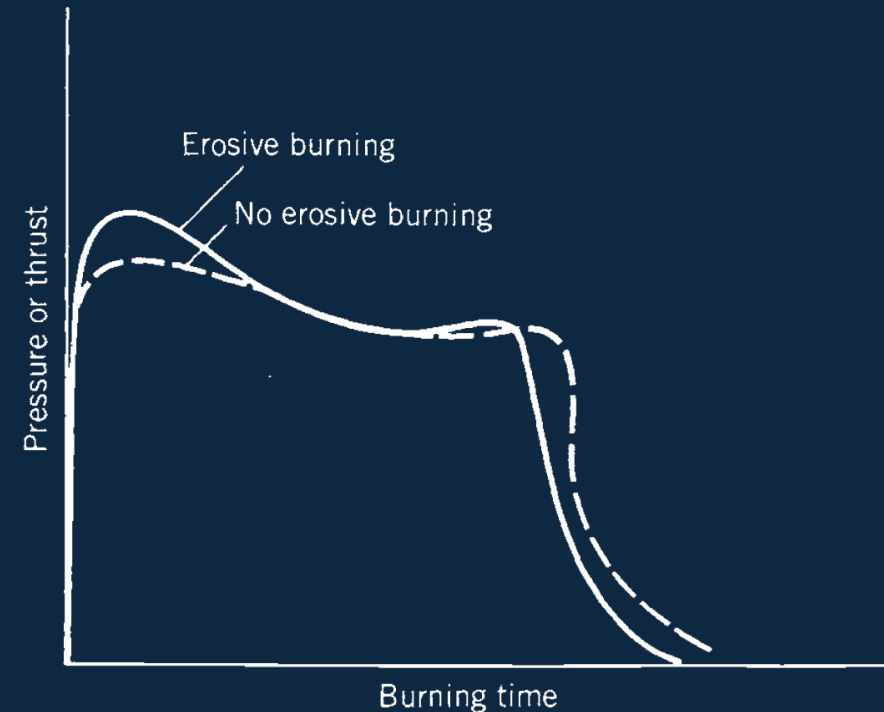
Efecto de la Temperatura



Quemado Erosivo



- ▶ El quemado erosivo se da principalmente por un efecto de expansión de los gases dentro de la recamara de combustión en el espacio entre el ultimo grano de combustible y el inicio de la tobera.
- ▶ Genera un quemado irregular de la superficie del grano al incrementar la tasa de quemado en un extremo del grano.



Port to Throat Ratio (ψ)



- ▶ El Port to Throat ratio, o razón entre canal (port) y la garganta se refiere a la relación entre las áreas transversales del canal de combustión y la garganta de la tobera.
- ▶ Es particularmente útil a la hora de dimensionar el canal de quemado, con el objetivo de evitar la condición de quemado erosivo.

$$\psi = \frac{A_p}{A_t}$$

$$\psi > 2$$

¿Como determinar Tasa de Quemado?



- Strand Burner
- Ballistic Evaluation Motor
- Pressure Data from firing Motor

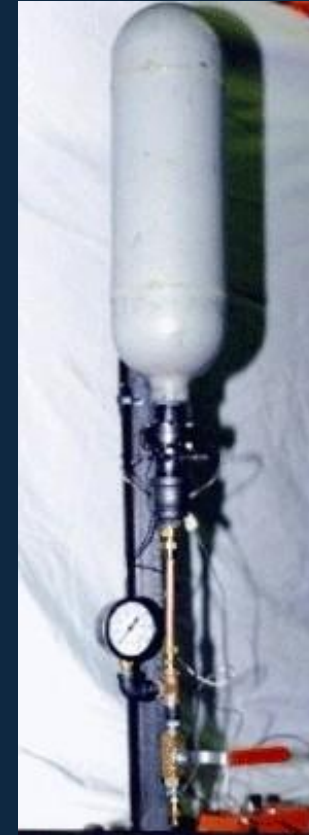
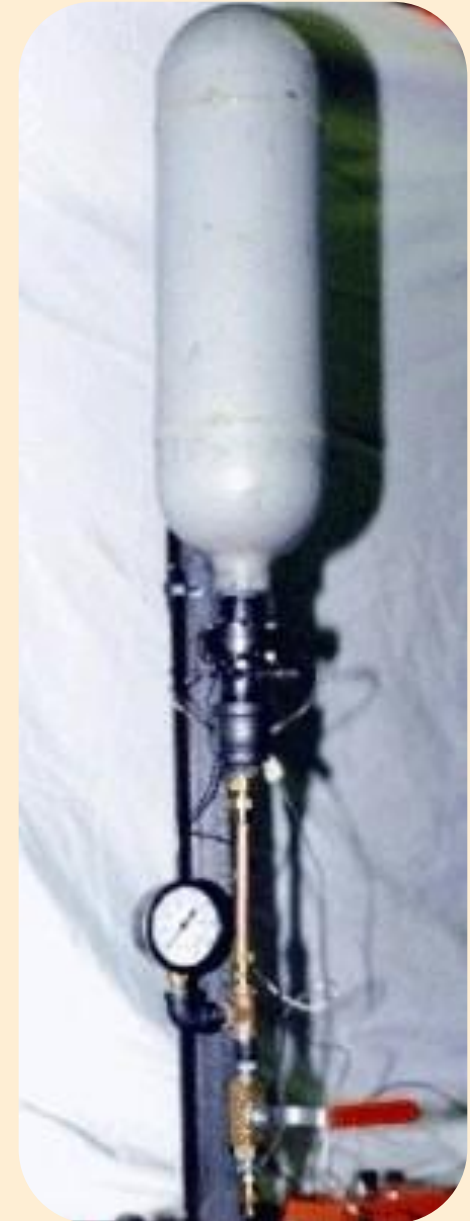
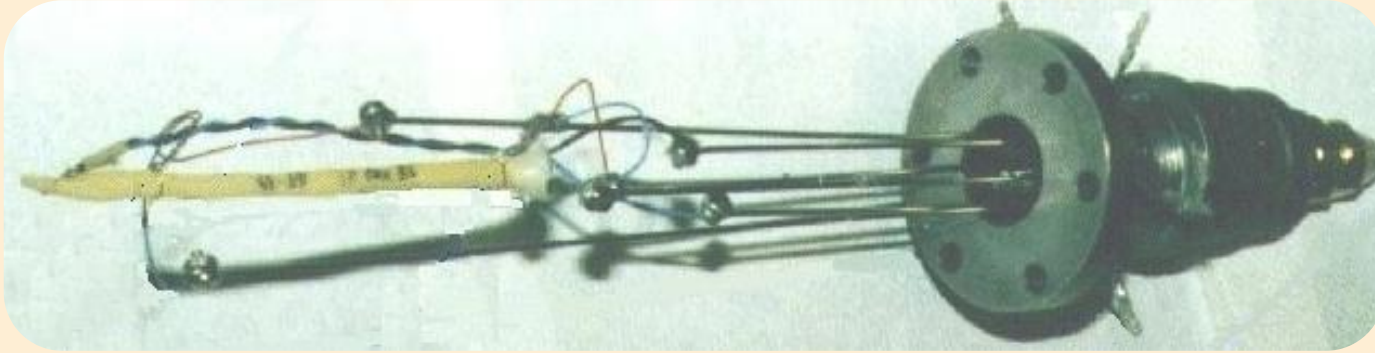


Figure 1 -- Strand Burner

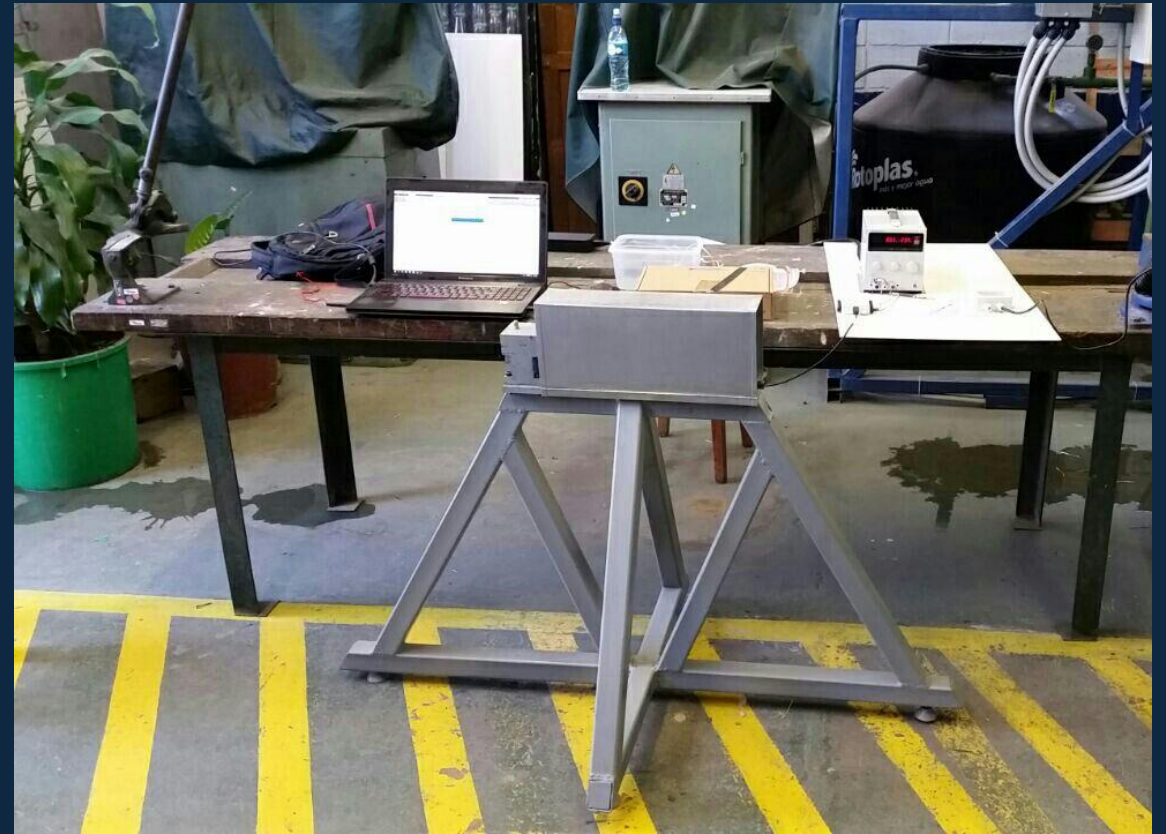
Strand Burner



Banco de Pruebas



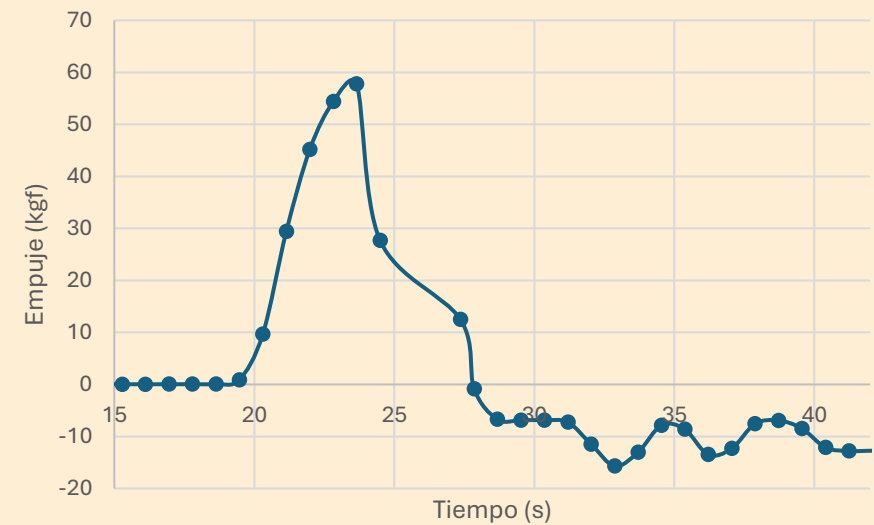
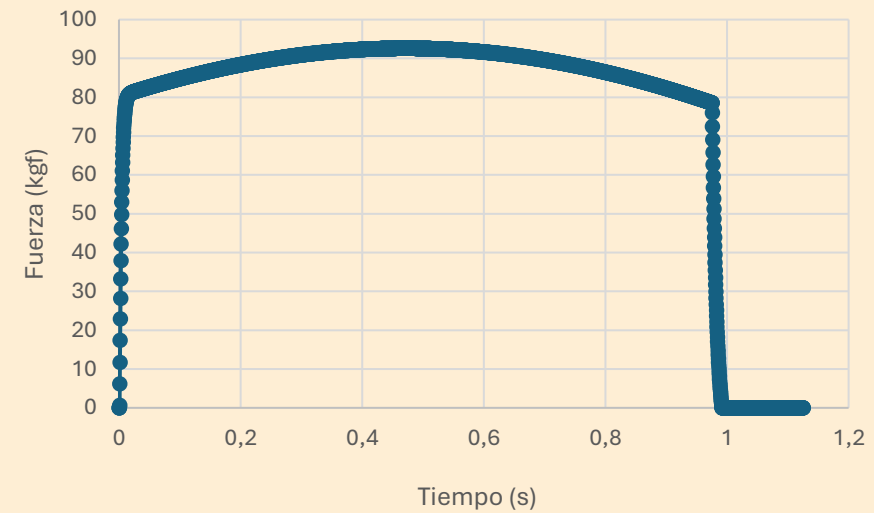
Es una estructura capaz de sostener la fuerza ejercida por un motor de cohete y al mismo tiempo permitir la **medición de la fuerza** de un cohete, entre otras variables.



Cuando las cosas no salen bien



Cuando las cosas no salen bien



Caracterización de combustibles



Implica la determinación de ciertos valores para el diseño de motores:

- Valores de Tasa de Quemado (a y n)
- Densidad (ρ)
- Masa Molecular (M)
- Razón de Calores Específicos (k)
- Temperatura de Llama (T_c)

ProPEP 3



ProPEP es un software de análisis de reacciones químicas para diferentes combinaciones de combustibles



Tarea



- Ver video sobre Ecuación de Bernoulli

<https://youtu.be/DW4rltB20h4?list=PL5k3TSSndmQ846dkG6VldrznwBITirOyU>

- Descargar OpenMotor
- Descargar Hoja de Excel de Nakka
nakka-rocketry.net
- Hacerse una cuenta en Meteor
<https://meteor.open-sky.fr/home>