

VI Congreso Argentino de Tecnología Espacial

**DISEÑO, DESARROLLO Y ENSAYO  
DE UN MOTOR COHETE  
de BAJO COSTE DE 13.500 N-s.**

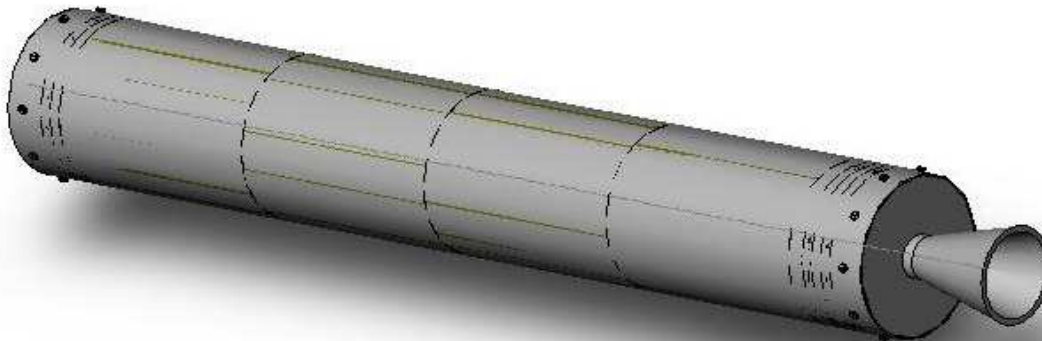
**Ing. JUAN PARCZEWSKI**

**Proyecto Vettor**

e-mail: [juanpamas@gmail.com](mailto:juanpamas@gmail.com)

# RESUMEN

- En este trabajo se presenta una síntesis de la experiencia de diseño, fabricación y ensayos realizados para desarrollar un motor cohete de 13.500 N-s, con 10 kg de propergol sólido.
- El objetivo logrado fue desarrollar un motor cohete de bajo coste, de mediana potencia y alto margen de seguridad.
- Este tipo de motor cohete puede cubrir las necesidades de instituciones de investigación y educación, pudiendo llegar a lanzar una carga útil de 3 kg a 5 km y hasta de 1 kg a 15 km de altura en configuración tipo dardo.
- Para su desarrollo se construyeron dos bases de pruebas estáticas, con sistemas digitales para adquisición de datos y registro. Se construyó un motor para validar su performance.
- Se desarrolló un sistema no destructivo para el control de los segmentos de propergol mediante videoradioscopia.



# INTRODUCCIÓN

- Hay una brecha entre los motores cohete que se utilizan para hacer sondeos e investigaciones espaciales que son motores caros, de alta potencia y alto nivel de performance y por otro lado hay motores que bajo costo pero de bajo empuje. El tipo de motor cohete desarrollado puede cubrir esta brecha entre estos dos tipos de motores cohete existentes y cubrir las necesidades de instituciones de investigación y educación.
- Con este motor se puede impulsar un cohete de hasta 80 kg de peso. En función de la configuración usada, por ejemplo en simple etapa, se logra un apogeo de 5 km y usándolo en configuración multietapa permite llegar a apogeos de 10 a 20 km. También se lo puede usar como acelerador (“booster”) para otras configuraciones.
- Obtener un bajo costo y seguridad operativa también es importante, aun a costas de mermas en el rendimiento. Este motor cohete es reutilizable cambiando sólo las partes consumibles.

# METODOLOGIA: Primera Etapa

La primer etapa fue definir los requerimientos del motor cohete :

- Motor cohete de bajo costo operativo.
- Diseño sencillo
- Operación confiable y segura
- Bajos costos de fabricación
- Posibilidad de ser reutilizado

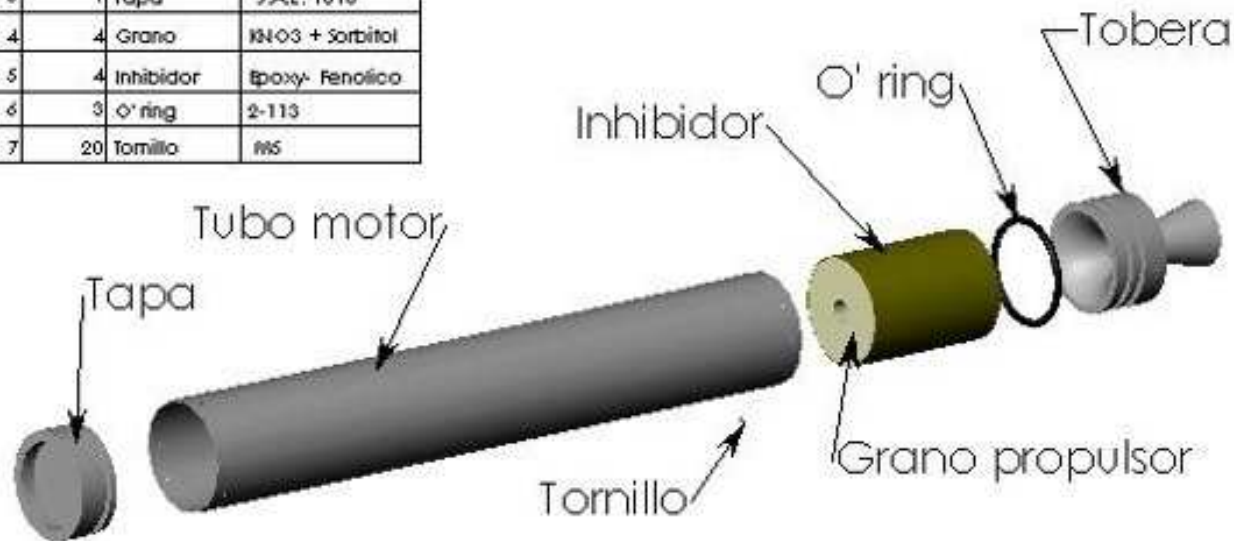
Esto se resumió en un lema: *“Simple, Seguro y Barato”*.

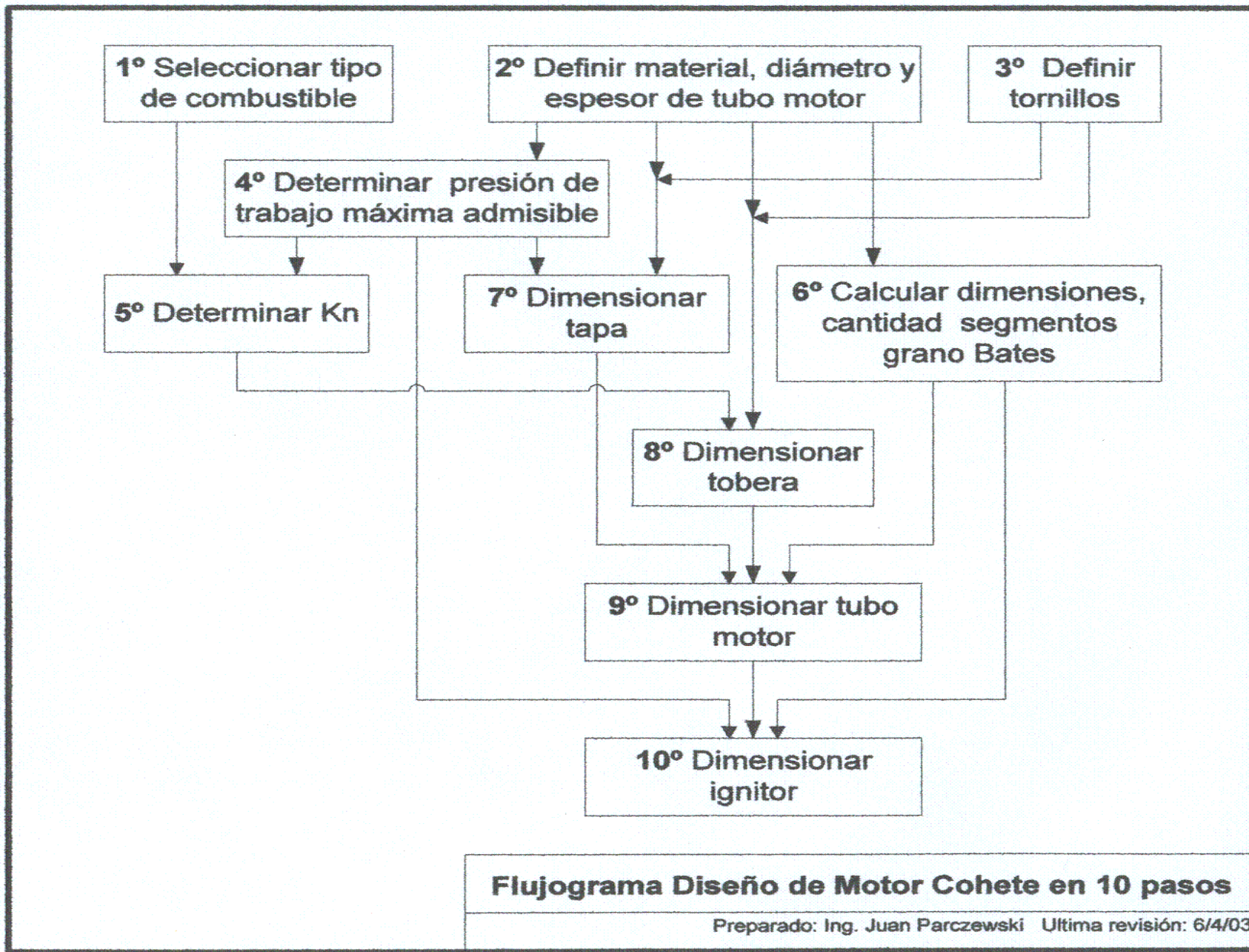
Para el diseño conceptual general se definió el tipo de propulsión a utilizar. Se descartó el sistema líquido por su alto costo y complejidad para implementarlo. Además no se dispone de un oxidante que sea seguro de manipular y almacenar. El sistema híbrido si bien es interesante, y podría ser una opción viable, se la descartó porque requiere una importante inversión en material de apoyo para la carga del oxidante. Por ello la decisión recayó sobre usar un sistema con propergol sólido.

# METODOLOGIA: Segunda Etapa

La segunda etapa fue concretar el diseño general del proyecto. Para el diseño teórico del motor cohete la aproximación metodológica empleada fue usar el “*Método de Diseño de Motores Cohete en 10 pasos*” [1], de desarrollo propio, y adaptado para un motor de mayor empuje como el del presente proyecto.

ITEM NO.	CANT.	NOMBRE.	DESCRIPTION
1	1	Tobera	S.A.E. 1010
2	1	Tubo motor	AISI 304
3	1	Tapa	S.A.E. 1010
4	4	Grano	KNO3 + Sorbitol
5	4	Inhibidor	Epoxy- Fenolico
6	3	O' ring	2-113
7	20	Tornillo	MS





# METODOLOGIA: Aéreas y Plan de Trabajo

Una vez realizado el diseño inicial se evaluó los recursos disponibles, los elementos faltantes y se trazó un Plan de Trabajo. Para llevar adelante esta parte práctica se definieron cinco áreas de trabajo simultáneas:

1. Desarrollo de medios para preparar los granos de propergol. Caracterización del propergol.
2. Sistema de ignición: tren pirotécnico y desarrollo del iniciador tipo micromotor.
3. Carcasa del motor cohete: realizar el mecanizado del tubo motor, tobera y tapa. Elementos para transporte de motor y componentes para las pruebas.
4. Control del propergol. Control de la materia prima. Desarrollo de método de control no destructivo de los granos mediante videoradioscopia.
5. Diseño y construcción de base de prueba estática con sistema de adquisición de datos de presión de trabajo y empuje. Sistema de calibración.

# Selección del tipo de propergol (Paso nº 1)

- Para seleccionar el propergol a utilizar un análisis preliminar mostró que no había alguno que no tuviese algún inconveniente respecto a los deseados en un propergol [2]. Usando una matriz de ponderación se evaluaron distintos tipos de propergoles en función de los oxidantes y ligantes de los cuales se tenían formulaciones desarrolladas.

Característica considerada en el propergol	Incidencia en ponderación
Costo	40 %
Energía disponible	25 %
Costo equipamiento preparación	20 %
Toxicidad/Seguridad	5 %
Disponibilidad componentes	5 %
Propiedades mecánicas	5 %

# Formulaciones de los propergoles considerados (I)

## **Propergol NK/SO.**

Preparación por mezcla y fusión.

Nitrato de potasio: 65 %

Sorbitol: 35 %

## **Propergol RE/PK/NK.**

Preparación por mezcla y curado en frío.

No colable.

Nitrato de potasio: 45 %

Perclorato de potasio: 20 %

Zinc: 8 %

Resina epoxi: 13 %

Endurecedor resina epoxi: 7 %

Oxido de hierro: 7 %

### **Acrónimos**

*NK: Nitrato de potasio*

*SO: Sorbitol*

*RE: Resina Epoxi*

*PK: Perclorato de Potasio*

*PVC: Cloruro de Polivinilo*

*PA: Perclorato de amonio*

*PS: Ligante Polisulfuro Thiokol*

## **Propergol PVC/PA.**

Preparación por amasado bajo vacío.

Curado en horno.

Perclorato de amonio: 73,2 %

Cloruro de polivinilo: 9,83 %

Diociltalato: 11,1 %

Estabilizante de PVC: 0,3 %

Aluminio: 4,7 %

Cromito de cobre: 0,87 %

## **Propergol PS/PA.**

Preparación por mezclado, amasado bajo vacío.

El curado es lento y a temperatura ambiente.

Perclorato de amonio: 60 %

Ligante Polisulfuro ( Thiokol): 18,49 %

Azufre: 0,05 %

Catalizador para Thiokol: 2,77 %

Negro de Humo: 1,69 %

Cromito de cobre: 2 %

# Formulaciones de los propergoles considerados (II)

## Propergol PBHT/PA.

Preparación por mezcla bajo vacío y posterior curado.

- Perclorato de amonio: 80,5 %
- Polibutadieno hidroxilo terminado: 10,73 %
- Dibutil ftalato: 3,36 %
- Aluminio: 2,15 %
- Triglicéridos del ácido rinooleico: 0,71 %
- Tepanol HX 878: 0,15 %
- Polidimetilsiloxano: 0,01 %
- Desmodur 44V20 L: 1,94 %
- Cromito de cobre: 0,45 %

## Propergol PBHT/NA.

Preparación por amasado bajo vacío.

- Nitrato de amonio: 60,5 %
- Polibutadieno hidroxilo terminado : 9,35 %
- Dibutil ftalato : 3,11%
- Magnesio: 22 %
- Polidimetilsiloxano : 0,01 %
- Desmodur 44V20 L : 1,85 %
- Bicromato de amonio: 3,18 %

### **Acrónimos**

*PBHT: Polibutadieno hidroxilo terminado*

*PA: Perclorato de amonio*

*NA: Nitrato de amonio*

Todos estos propergoles fueron preseleccionados por características físicas y térmicas que lo hacen posibles de usar en este tipo de proyecto.

El resultado de la ponderación fue:

<b>Propergol</b>	<b>Posición ponderada</b>
Propergol NK/SO	76
Propergol RE/PK/NK	69
Propergol PVC/PA	64
Propergol PS/PA	62
Propergol PBHT/PA	61
Propergol PBHT/NA	52

Siendo 100 el valor máximo el resultado favoreció al propergol de NK/SO. Es una mezcla de mediano rendimiento, estable, fácil de preparar, pero higroscópica. No presenta mayores problemas en su preparación.

Todo propergol que se seleccione debe ser preparado, almacenado, transportado y manejado siguiendo estrictas reglas de seguridad, además de cumplir con la legislación local en vigencia.

# Determinar material, diámetro y espesor del tubo motor (Paso nº 2)

Dentro de los materiales disponibles en el mercado se seleccionó el acero inoxidable AISI 304 por ser fácil de obtener y priorizar un tema de seguridad aún en detrimento del peso final. Luego se preparó una planilla de cálculo con los diámetros y espesores de los tubos disponibles en plaza para ver cual era el adecuado. La decisión recayó sobre un tubo diámetro de 114 mm y un espesor de pared de 2 mm.

Tubo motor					Grano							3 granos			4 granos			5 granos		
Diametro tubo	Espesor tubo	Presión de rotura	Incremento en diámetro	Peso tubo	Diam interno tubo	Espesor aislante	Dimetro grano exterior	Diam interno grano	Longitud grano	Volumen grano	Peso 1 grano	Impulso 3 granos	Longitud granos	Peso total comb	Impulso 4 granos	Longitud granos	Peso total comb	Impulso 5 granos	Longitud granos	Peso total comb
mm	mm	Mpa	mm	Kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm3	g	Nseg	cm	Kg	Nseg	cm	Kg	Nseg	cm	Kg
101.6	2	13.6	0.16	5.01	97.6	4	89.6	35.8	152	807	1444	5849	47.20	4.33	7798	62.93	5.78	9748	78.66	7.22
101.6	2.5	17.0	0.16	6.23	96.6	4	88.6	35.4	151	780	1396	5655	46.69	4.19	7540	62.25	5.59	9425	77.81	6.98
101.6	3	20.4	0.16	7.43	95.6	4	87.6	35.0	149	754	1350	5466	46.18	4.05	7287	61.57	5.40	9109	76.96	6.75
101.6	4	27.1	0.16	9.81	93.6	4	85.6	34.2	146	703	1259	5100	45.16	3.78	6800	60.21	5.04	8500	75.26	6.30
114.3	2	12.1	0.18	5.64	110.3	5	100.3	40.1	171	1132	2026	8204	52.65	6.08	10939	70.20	8.10	13673	87.76	10.13
114.3	2.5	15.1	0.18	7.02	109.3	5	99.3	39.7	169	1098	1966	7961	52.14	5.90	10615	69.52	7.86	13269	86.91	9.83
114.3	3	18.1	0.18	8.39	108.3	5	98.3	39.3	167	1065	1907	7723	51.63	5.72	10297	68.84	7.63	12872	86.06	9.53
114.3	4	24.1	0.18	11.1	106.3	5	96.3	38.5	164	1002	1793	7261	50.61	5.38	9682	67.48	7.17	12102	84.36	8.96
127	2	10.9	0.20	6.28	123	6	111	44.4	189	1534	2746	11120	58.11	8.24	14826	77.48	10.98	18533	96.85	13.73
127	2.5	13.6	0.20	7.82	122	6	110	44.0	187	1493	2672	10822	57.60	8.02	14429	76.80	10.69	18037	96.00	13.36
127	3	16.3	0.20	9.35	121	6	109	43.6	185	1452	2600	10529	57.09	7.80	14039	76.12	10.40	17549	95.15	13.00
127	4	21.7	0.20	12.37	119	6	107	42.8	182	1374	2459	9960	56.07	7.38	13281	74.76	9.84	16601	93.45	12.30

## Dimensionado de los tornillos retención tapa y tobera (Paso n° 3)

- Siguiendo la metodología descrita en el Paso n° 3 [1] se definió el tipo de tornillo a emplear. Seleccionándose tornillos M 5 x 0,8; cabeza Torx T-20, autoaterrajantes trilobulares, grado 10.9.
- Estos tornillos fueron ensayados midiendo la resistencia al corte; obteniéndose los siguientes valores promedio: 7.895 N, +/- 182 N.
- Cabe señalar que su comportamiento fue validado con los ensayos de las pruebas hidráulicas del motor cohete y con las pruebas estáticas realizadas.



*Tornillos utilizados  
en este proyecto*

## Cálculo de la presión de trabajo máxima (Paso nº 4)

Se determinó la presión máxima de trabajo ( $P_{max}$ ) en forma teórica [1]:

$$P_{max} = (2 * e * F_{ty}) / (D_o * S_d) \quad (1)$$

Siendo:

e: espesor del tubo motor (2 mm).

F<sub>ty</sub>: límite de fluencia (520 MPa).

D<sub>o</sub>: diámetro exterior tubo motor (114,3 mm).

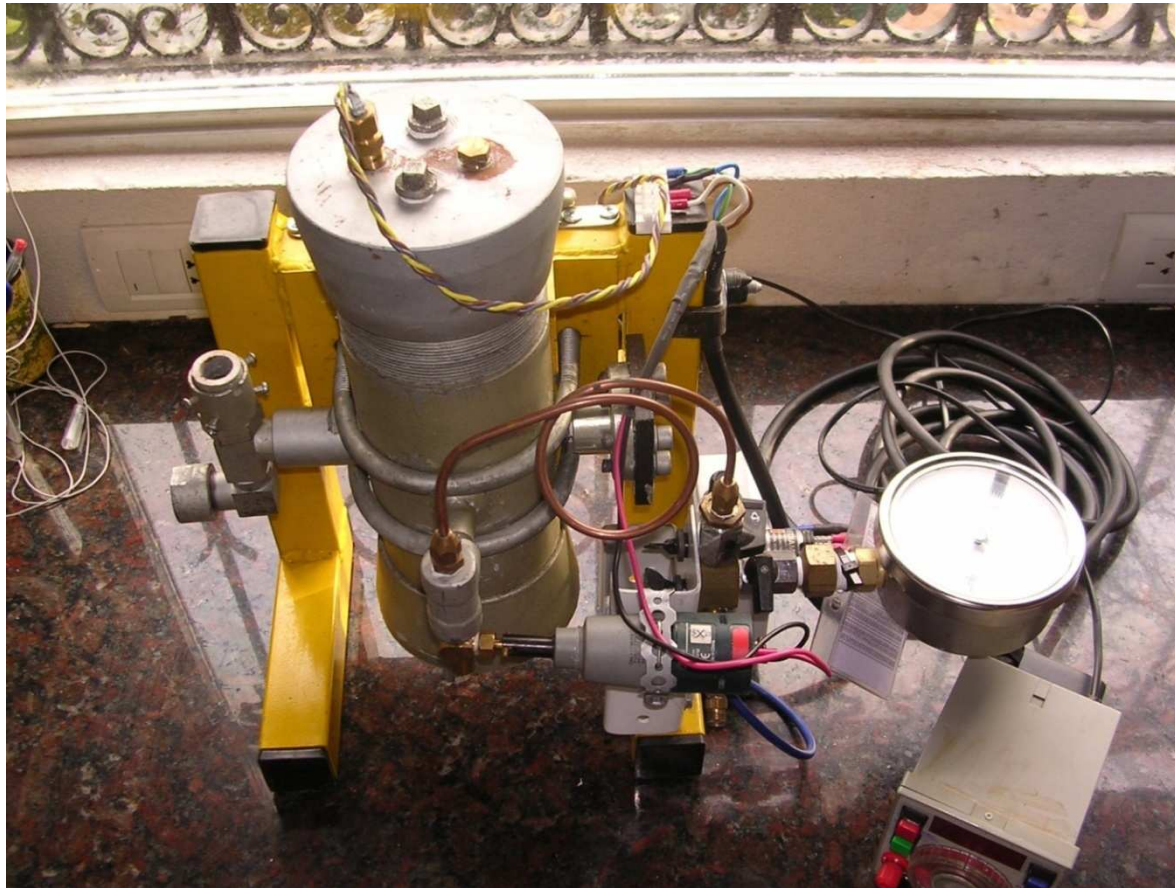
S<sub>d</sub>: coeficiente de seguridad (1,5).

$$P_{max} = 12,1 \text{ MPa}$$

Esto se corroboró mediante un ensayo hidráulico, manteniendo la presión a 11 MPa durante 15 segundos.

# Determinar el Kn (Klemmung) (Paso nº 5)

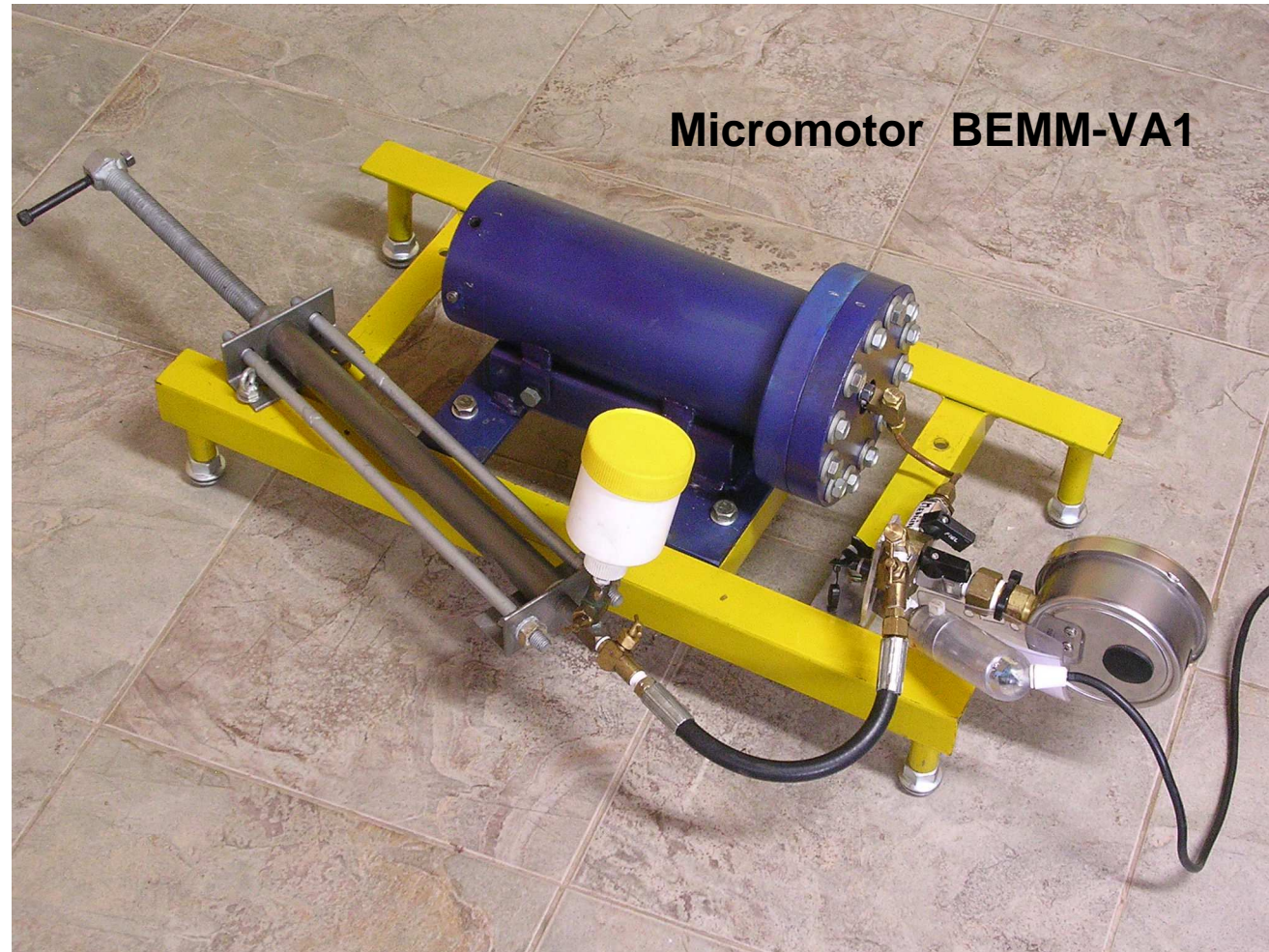
El Kn es por definición la relación entre el área de combustión y el área de la garganta de la tobera. Si bien se disponía información de este propergol (NK/SO), se decidió primero hacer un evaluación preliminar de la velocidad de combustión a diferentes presiones de trabajo con una Bomba Crawford .



*Bomba Crawford (Strand Burner) de armado propio. Se uso posición vertical para las probetas de propergol. Tiene sistema de medición de presión mediante transductor de presión con sistema digital de registro de valores, manómetro patrón para su calibrado, y consola de disparo múltiple*

Luego se determino el  $K_n$  usándose un Banco de Ensayo de Micromotor.

*El Micromotor BEMM-VA1 posee un sistema de medición digital de presión, consistente en un transductor de presión unido a un sistema conversor A/D registrándose los valores en una notebook. Se muestra el sistema para calibrarlo con bomba hidráulica manual y manómetro patrón, que son removidos para los ensayos.*



Se realizaron ensayos midiendo la presión de trabajo para varias relaciones de “*superficie de quemado a superficie de garganta de tobera*”; usándose granos en forma de paralelepípedo recto, con imprimación y sus bordes inhibidos. Se varió la superficie de la garganta usándose insertos de grafito con distintos diámetros en la garganta de la tobera.

De los datos prácticos se obtuvo un valor de  $Kn = 345$  para una presión de trabajo de 5,5 MPa.



*Probetas de propergol NK/SO  
Están aún sin imprimación ni bordes  
inhibidos.*



*Insertos de grafito  
para la tobera.*

# Ensayo determinación Kn

Tobera diámetro: 7,5 mm



*Video ensayo Kn en micromotor*

# Ensayo determinación Kn

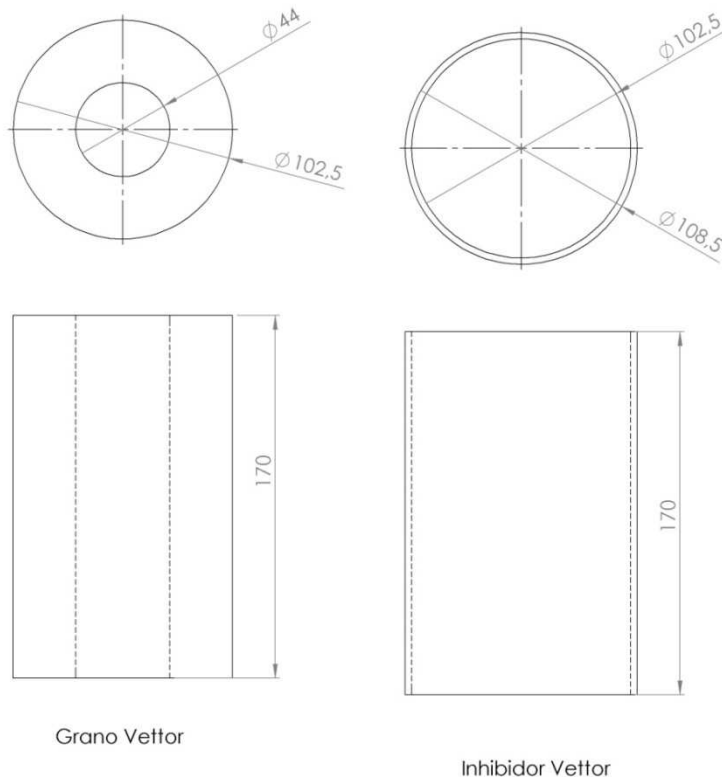
Tobera diámetro: 8,75 mm



*Video ensayo Kn en micromotor*

# Calculo de dimensiones y cantidad de segmentos de grano Bates (Paso nº 6)

- Definido el uso del propergol NK/SO la forma seleccionada para los granos es Bates. Son simplemente cilindros con su superficie exterior inhibida con un cilindro de cartón, el cual hace también de molde.



Esto simplifica los mandriles para hacerlos, no requiriendo hacer un mandril tipo estrella y permitiendo fraccionar toda la cantidad de propergol en cantidades menores. Siguiendo la metodología del Paso nº 6 [1] se determinaron las dimensiones de los granos.

*Segmentos de propergol (granos), e inhibidor, diseño inicial*

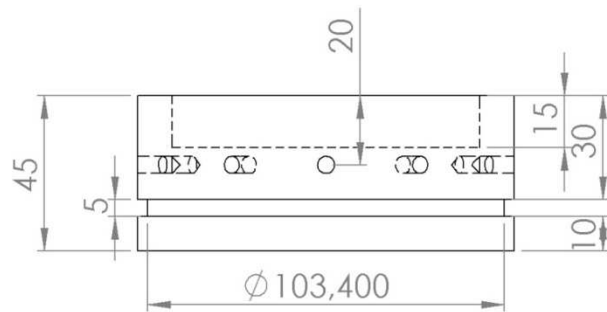
*Granos preparados de NK/SO*



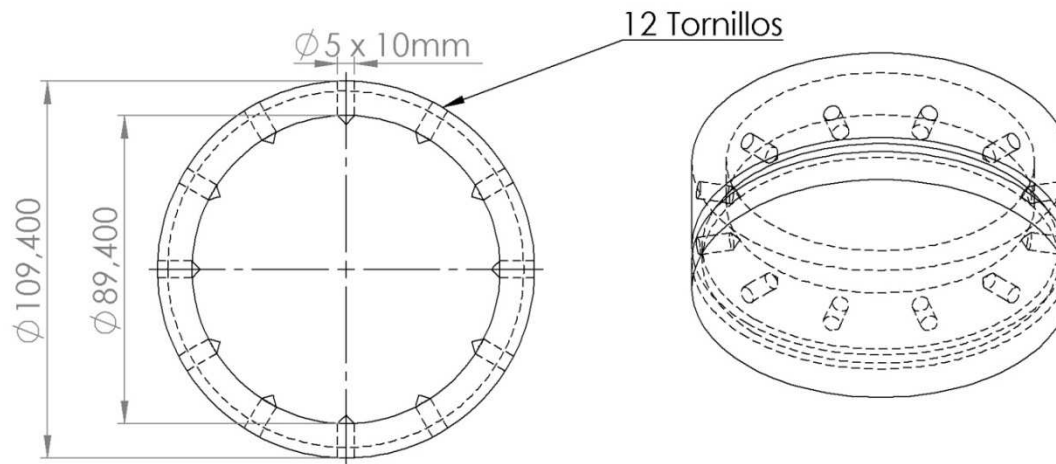
- Se realizaron varios cálculos para estimar el efecto que tendría la erosión durante el funcionamiento del motor [4] para asegurarse que no se vaya a superar la presión máxima de trabajo del tubo motor.

## Dimensionado de tapa (Paso n° 7)

- Siguiendo la metodología del Paso n° 7 [1] se determinaron las dimensiones de la tapa. Se seleccionó el material SAE 1010 para mantener un bajo costo, aunque aluminio o alguna de sus aleaciones sería aplicable con menor peso.



*Esquema de la tapa,  
diseño inicial*

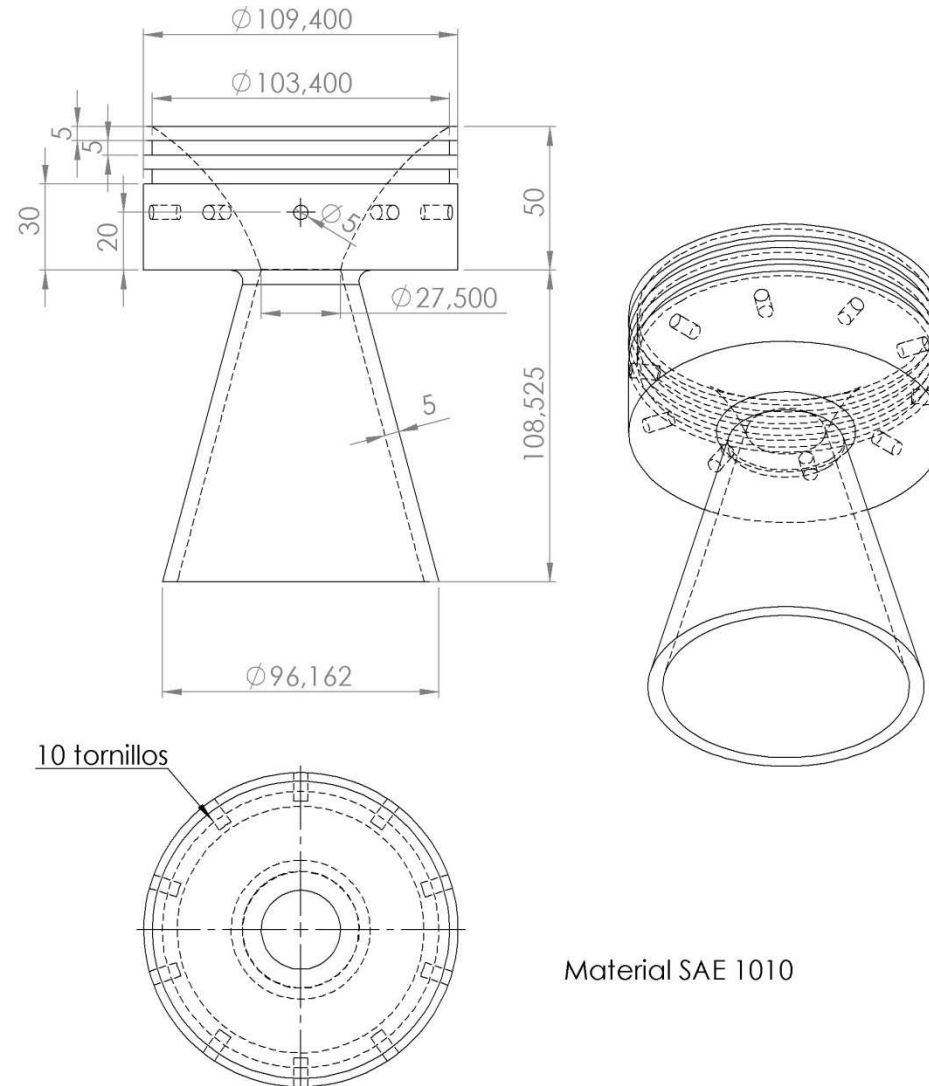


Material SAE 1010

# Dimensionado de la tobera (Paso n° 8)

- Siguiendo la metodología del Paso n° 8 [1] se determinaron las dimensiones de la tobera. Se seleccionó el material SAE 1010 por tema de costo.

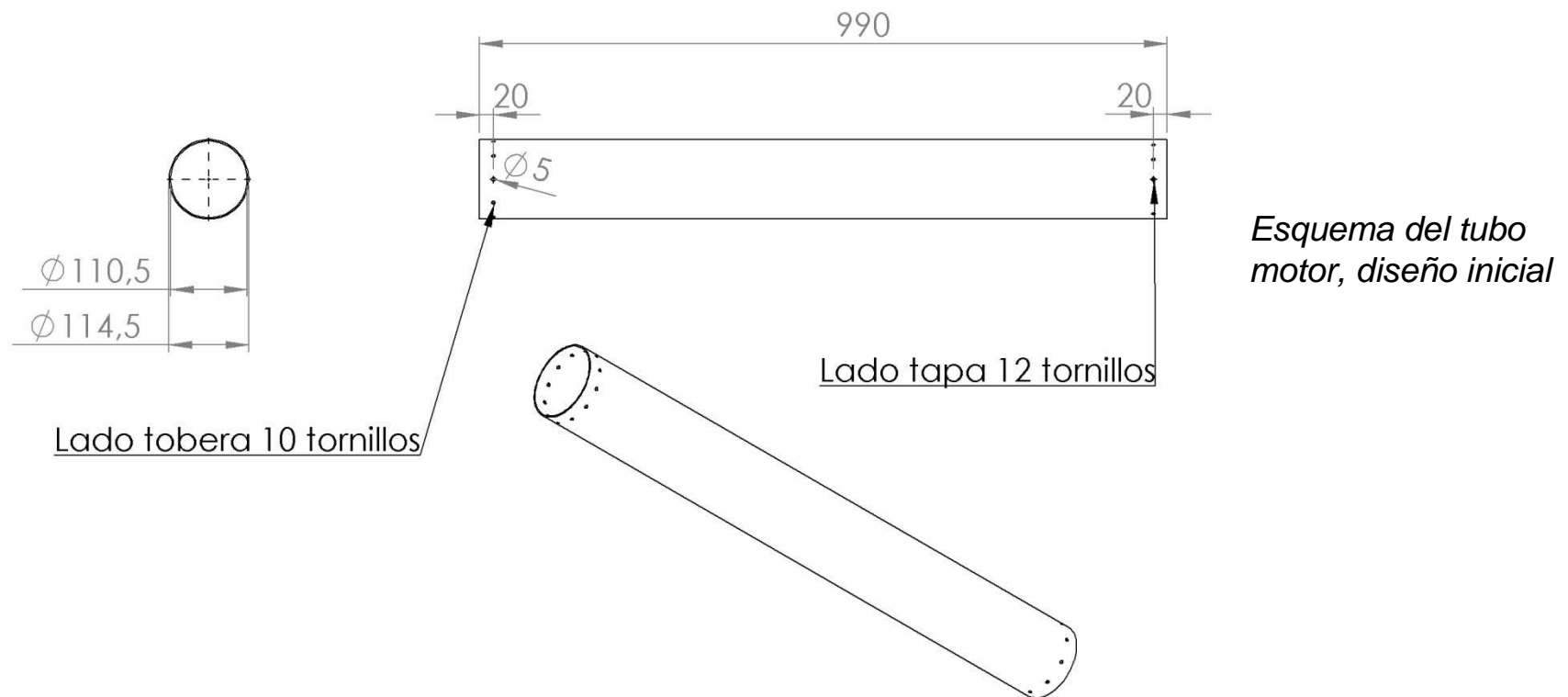
*Esquema de la tobera, diseño inicial*



Material SAE 1010

# Dimensionado del tubo motor (Paso nº 9)

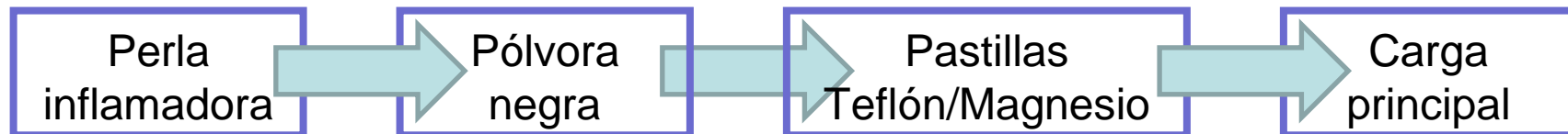
- Siguiendo la metodología del Paso nº 9 [1] se determinaron las dimensiones del tubo motor.



## Desarrollo del iniciador (Paso nº 10)

- Una de las áreas que requirió un desarrollo particular fue el sistema de ignición. El objetivo inicial fue desarrollar un tren pirotécnico energético que permita una rápida ignición de los granos de NK/SO, ya que se sabía que el encendido de este tipo de propergol era dificultoso y generaba un arranque lento del motor.
- Para motores pequeños de este tipo es usual usar un saquito con Pólvora Negra, pero para un motor de este tamaño no es conveniente usar esta filosofía de diseño. Lo indicado es un micromotor de cabeza. Por la longitud del motor se consideró no usar una caña con saquitos.
- Se debe considerar que hay que iniciar la combustión desde la primer cara del primer grano Bates, aparte del canal principal.

Se definió el tren pirotécnico:



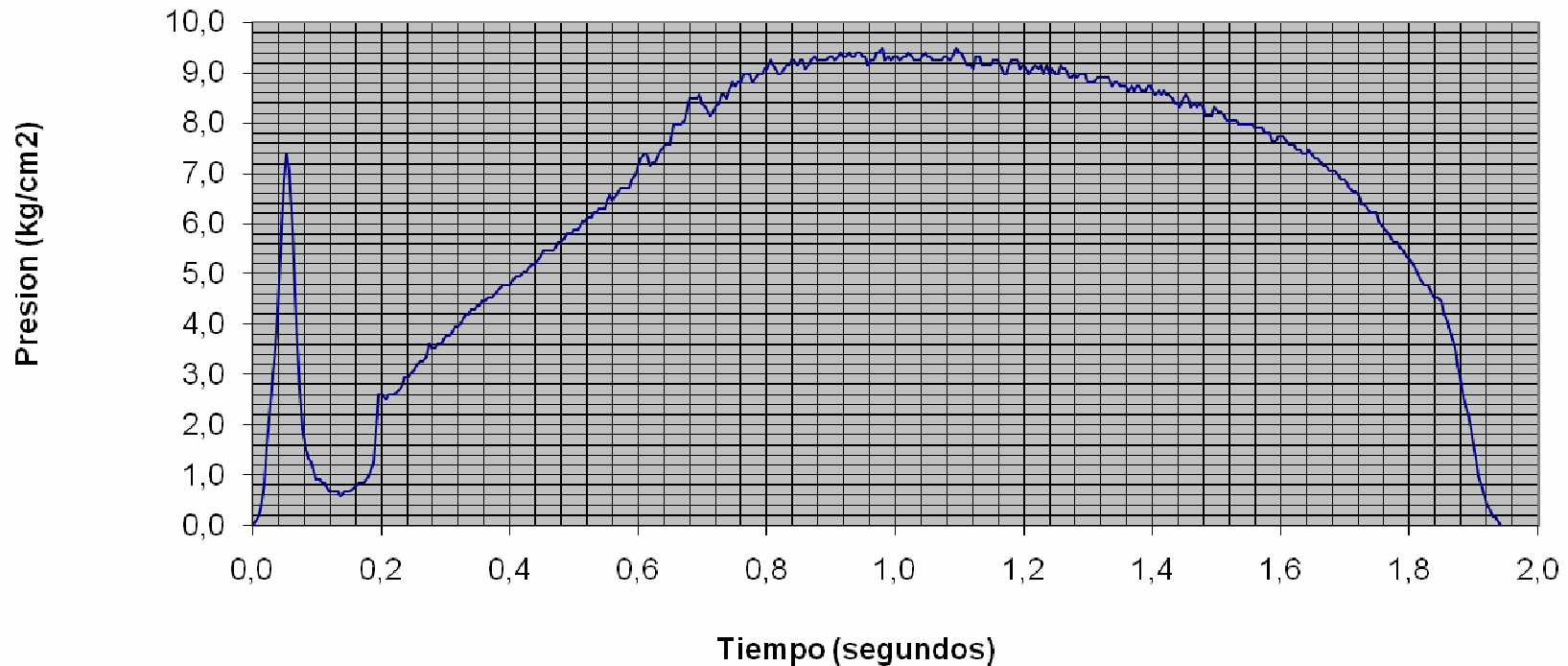
- Se realizaron cálculos preliminares [3] y se empezó caracterizando con bomba manométrica (Closed Bomb) los componentes del tren pirotécnico.



*Bomba manométrica (Closed Bomb)  
Posee un sistema de medición  
digital de presión, consistente en un  
transductor de presión unido a un  
sistema conversor A/D  
registrándose los valores en una  
notebook.*

El propergol NK/SO presenta dificultades en su ignición. Por ello se pensó en usar para el iniciador una mezcla altamente energética y realizar también la imprimación de los granos para facilitar su encendido.

*Ensayo de funcionamiento de un grano de NK/SO con encendido convencional con pólvora negra y grano sin imprimación  
Ensayo 080508*



- Se desarrolló una mezcla de PBHT/PA/Mg con alto contenido de catalizador y granulometría de PA menor a 5 micrones para tener una alta velocidad de combustión.



*Video ensayo mezcla PBHT/PA/MG en micromotor*

- Se comenzó haciendo un micro motor de cuerpo PVC y protección térmica , luego se pasó a usar uno de hierro.



*Componentes del micro motor iniciador, cuerpo de PVC.*



*Micromotor iniciador, cuerpo de PVC.*



*Micromotor iniciador ensayado, cuerpo de PVC.*

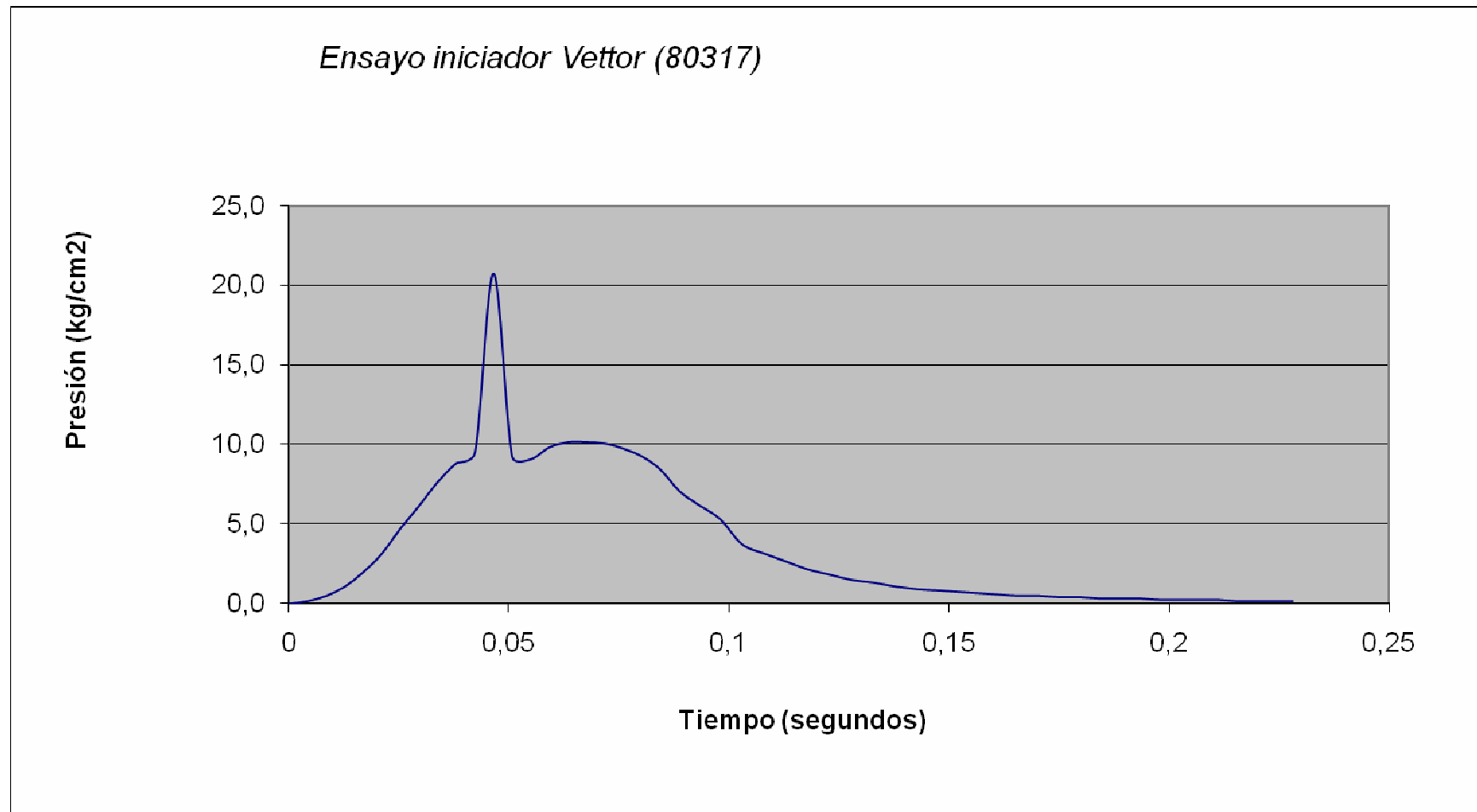


*Micromotor iniciador, cuerpo de hierro.*



*Micromotor iniciador ensayado, cuerpo de hierro.*

Una curva típica de este tipo de iniciador:



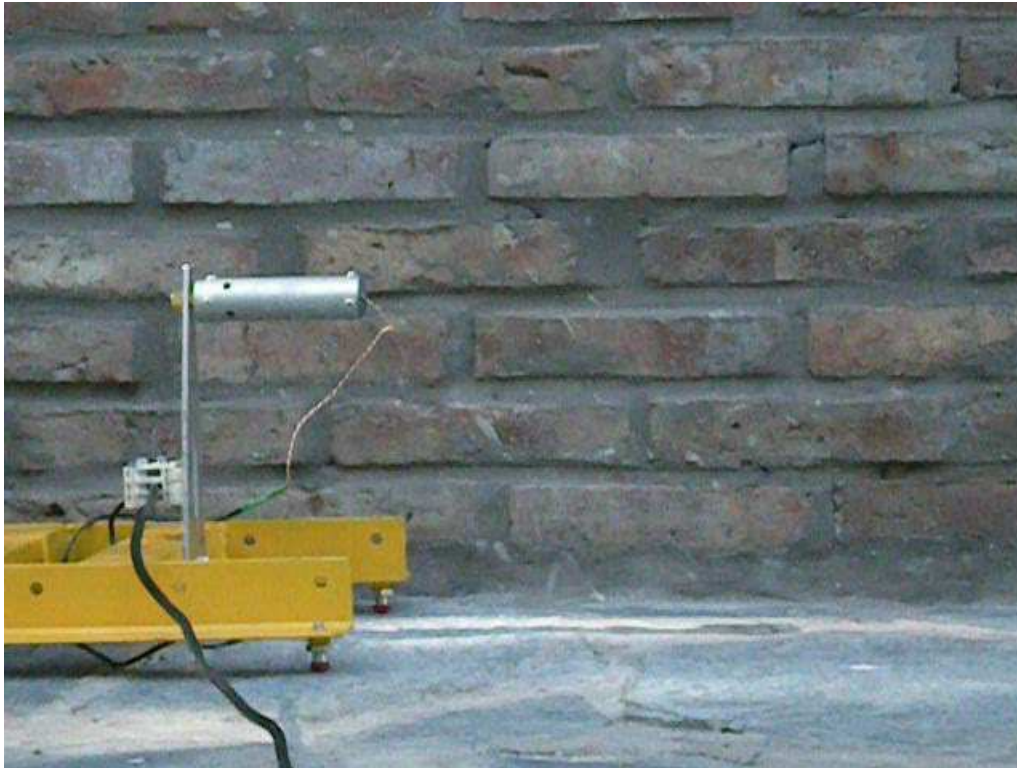
- El paso siguiente fue desarrollar el micromotor de encendido en escala 1:1.



*Video ensayo micromotor  
iniciador, escala 1:1.  
Pruebas iniciales.*

*Se observan defectos en el accionar del tren pirotécnico.*

- *Se fueron corrigiendo los defectos del accionar del tren pirotécnico, hasta lograr un funcionamiento satisfactorio.*



*Video ensayo micromotor  
iniciador, escala 1:1.*

La mezcla PBHT/PA/Mg del iniciador es altamente energética y junto con la imprimación de pólvora negra genera un encendido instantáneo de los granos de NK/SO. Todo parecía sumamente promisorio!!!!. Se dispusieron dos inflamadores con circuitos eléctricos independientes.

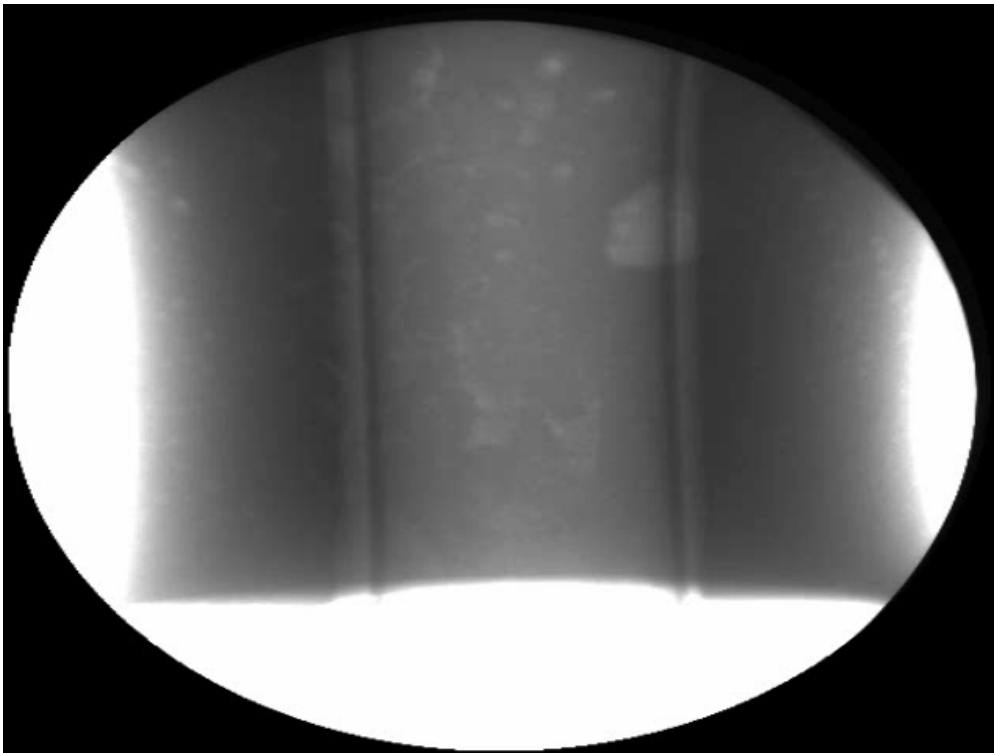


*Tapa del motor cohete Vettor con micro motor iniciador y toma de presión de cámara.*

El resultado del primer ensayo estático del motor cohete Vettor fue negativo por ser demasiado energético el sistema del iniciador. Por ello se lo rediseño, manteniendo el mismo tren pirotécnico, pero reemplazando la mezcla de PBHT/PA/Mg por una de Nitrato de potasio/Sacarosa/Oxido de hierro (NK/SU/OFe).

# Control del propergol por videoradioscopia

- Un tema que requirió un desarrollo especial fue el control no destructivo de los granos. Para ello se aplicó la videoradioscopia. Esto es el examen por medio de la imagen que se proyecta en una pantalla al ser atravesado por los Rayos X mientras el grano es girado. Se evidenciaron algunas fallas de llenado en zonas cercanas al manguito inhibidor. Este nivel de defectos menores no es detectado por el tradicional método de control de densidad del grano terminado.



Las mismas fueron corregidas y se pudo constatar que los granos usados no presentaron fallas.

*Videoradioscopia de un grano NK/SO con defectos.*

# Preparación de los granos de NK/SO

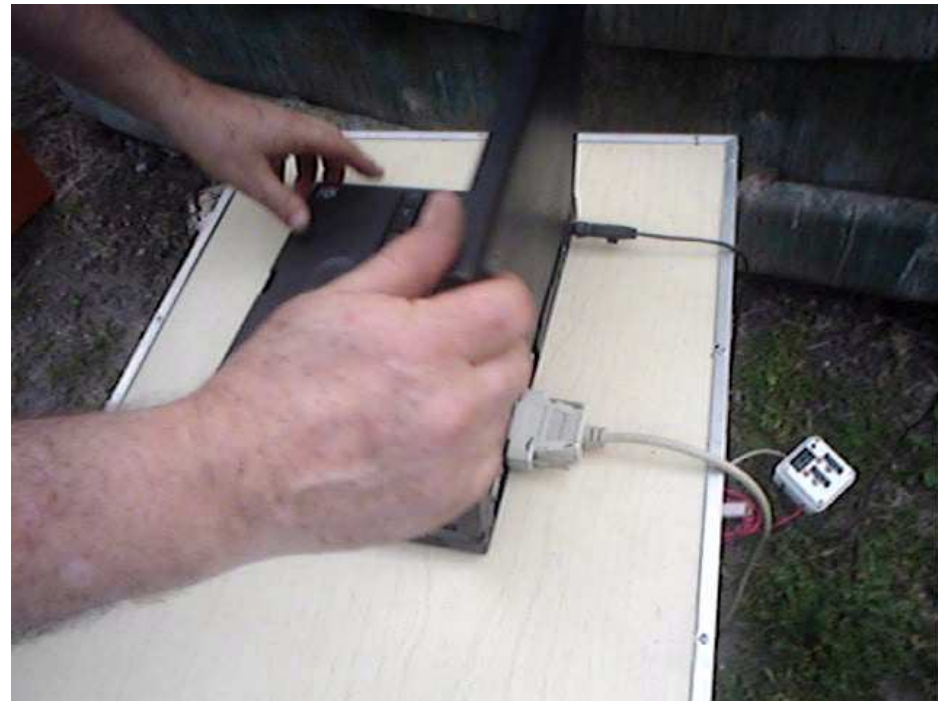
- Para el control de la materia prima se realizaron ensayos elementales sobre la misma y control en bomba Crawford .
- Para la preparación del propergol se usaron medios disponibles, debiéndose solo diseñar y construir una mezcladora de sólidos de 50 dm<sup>3</sup>.
- Los pasos son:
  1. Molido del Nitrato de potasio
  2. Pesada y mezcla del nitrato de potasio (65 %) con el sorbitol (35 %).
  3. Fusión y colado en los manguitos inhibidores.



*Mezcladora de sólidos de 50 dm<sup>3</sup>.*

# Pruebas del motor cohete Vettor

- Para validar el diseño se ensayó el motor cohete en un banco de pruebas estáticas. Para medir el empuje se utilizó una celda de carga y para medir la presión de la cámara de trabajo se usó un transductor de presión. Las señales analógicas eran procesadas por un conversor Analógico/Digital y registradas en una notebook para su posterior análisis.
- Para asegurar la calibración del sistema de presión se dispuso un manómetro al cual se le realizó una calibración en una firma de plaza usándose entonces como patrón, con un desvío no mayor a una unidad en todo el rango de trabajo.



*Video del Set Up para ensayo Vettor 1*

- Para calibrar la celda de carga no era práctico la aplicación de pesas calibradas, entonces se usó un sistema mecánico basado en un pistón que se presurizaba, midiéndose la presión y convirtiéndolo en fuerza, que era transmitido a la celda de carga mediante una palanca.



*Sistema mecánico para calibración celda de carga.*



- Todos los elementos necesarios para la calibración fueron transportados en una caja especial con trabas para evitar su deterioro.

*Componentes del sistema para calibración celda de carga y transductor de presión.*

# Prueba nº 1, motor cohete Vettor



*Banco de Ensayos estáticos BEMCO-EM10a*

Para el ensayo del motor cohete se preparó un banco de pruebas estáticas, el BEMCO-EM10a.

Para facilitar su traslado y almacenaje se lo dividía en tres partes principales. El motor va directamente apoyado sobre la celda de carga y tiene un transductor de presión con toma en la zona de la tapa del motor.

- En esta primera prueba al encender el motor el rápido incremento de presión del iniciador provocó la rotura de los granos de propergol, lo que aumentó la superficie de combustión y generó una sobre presión. Tal como estaba diseñado se desprendió la tobera (actuó de fusible), evitando así la rotura del tubo motor.
- Cabe señalar que los ensayos previos en micromotor no revelaron este problema motivado por el iniciador energético. En el micromotor la presión de trabajo actuó como una carga de compresión mientras que en el motor la carga dinámica generó fuerzas de tracción sobre los granos de NK/SO, rompiendo algunos granos, evidenciado en los manguitos inhibidores rotos por la mitad que fueron expulsados del motor.



*Manguitos inhibidores rotos, recuperados del ensayo motor cohete Vettor, prueba primera.*

# Prueba n° 2, motor cohete Vettor

- Para el segundo ensayo se reparó el banco de pruebas estáticas y se modificó el micromotor del iniciador. Luego de arrancar el motor en forma normal se produjo nuevamente una sobre presión y el desprendimiento de la tobera.
- El análisis posterior permitió determinar que se desprendió el cuerpo del micromotor iniciador lo que provoca una obturación parcial de la tobera. Esto generó una sobre presión desprendiendo nuevamente la tobera. La base de pruebas quedó seriamente dañada.



*Conversor A/D y Notebook para registro datos 2° ensayo Vettor.*



*Banco de Ensayos estáticos BEMCO-EM10b*

## Prueba n° 2, motor cohete Vettor



*Video del segundo ensayo motor cohete Vettor*

# Prueba n° 3, motor cohete Vettor

- Para la tercera prueba se realizaron algunos cambios importantes.
- Se iniciaron ensayos para desarrollar materiales ablativos. Para ello se prepararon insertos para la tobera y se ensayaron en el micromotor BEMM-VA1.

*Video de ensayos de materiales ablativos en la tobera*

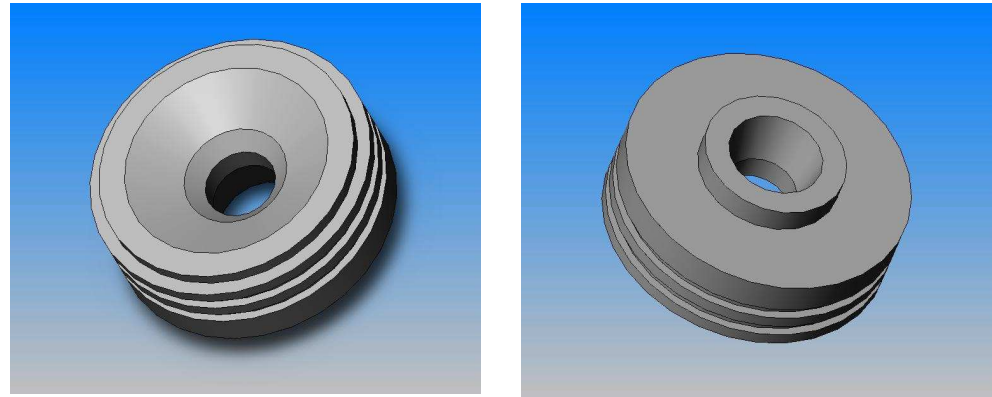


*Insertos de tobera ablativos, antes y después de su ensayo.*

- Se incorporó para esta tercer prueba una protección térmica en la zona convergente de la tobera. Casi toda la parte divergente fue realizado con material ablativo.

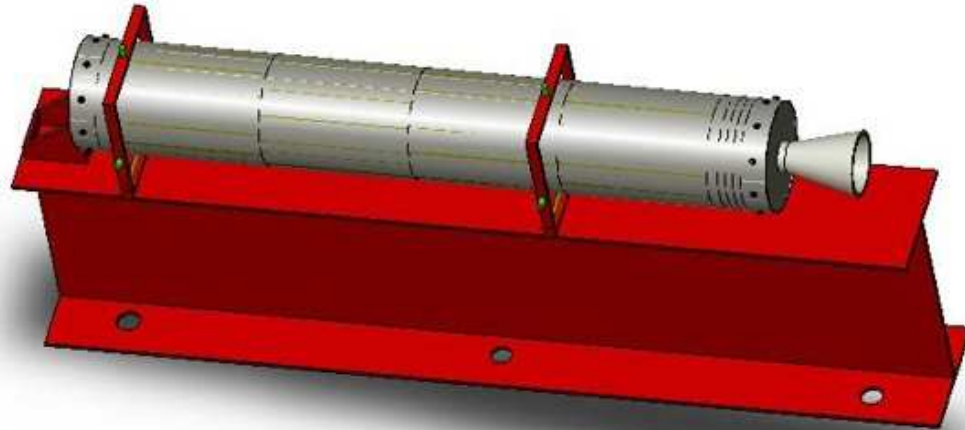


*Tobera motor cohete Vettor 3.  
Sección divergente de material  
ablativo.*



*Diseño tobera motor cohete Vettor 3. Sección  
convergente.*

La base de pruebas estáticas BEMCO-EM10b quedó dañada solo en la parte del soporte de carga pero con la experiencia acumulada se decidió rediseñarla. Se implementó una mayor protección de la celda de carga y una configuración de tobera horizontal para facilitar su recuperación en caso de desprenderse.



*Diseño inicial BEMCO-EM11.*

*Diseño final BEMCO-EM11a*



- El sistema del conversor A/D, fuente de energía y Notebook para registro de los datos de la tercera prueba del motor cohete se instalaron en una maleta con el fin de mejorar su seguridad y comodidad de uso.



*Maleta con todo el sistema electrónico para toma y registro de valores del ensayo del motor cohete.*

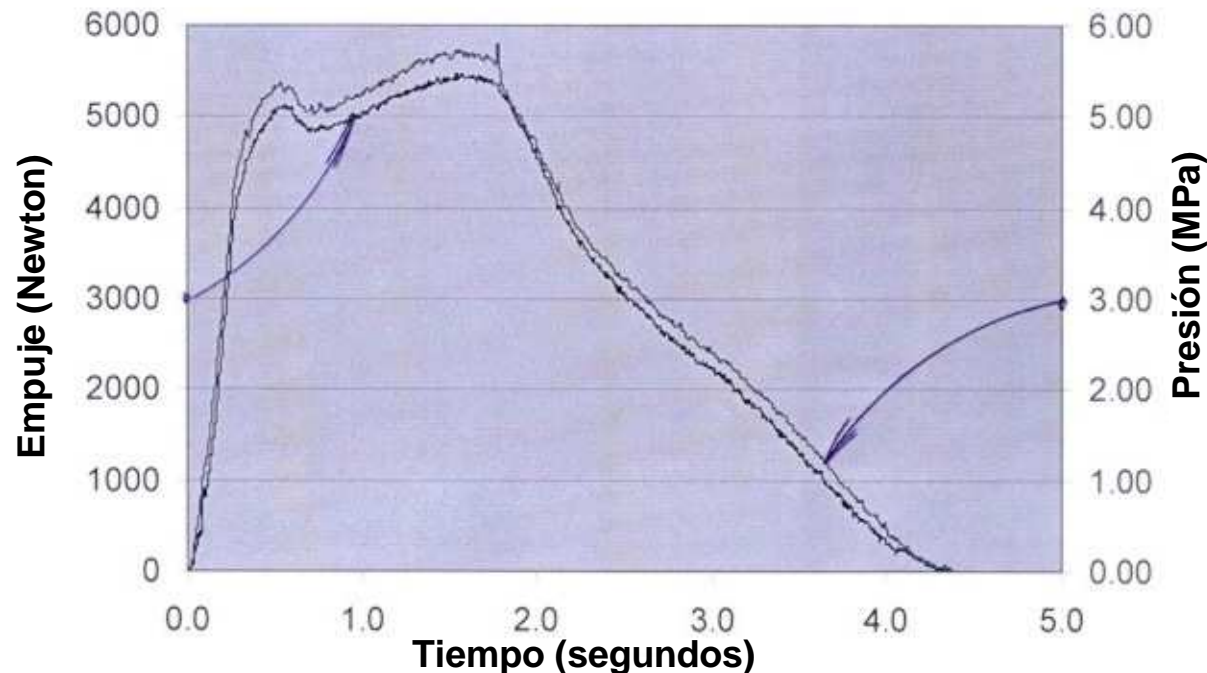


*Ubicación de los elementos para el tercer ensayo del motor cohete Vettor.*

Superados los problemas del sistema iniciador el resultado de este tercer ensayo fue exitoso.

Las características medidas del motor cohete Vettor 3, fueron:

- Peso total del propergol: 10.074 g.
- Empuje total: 13.682 N-s.
- Impulso específico: 138,4 s.



*Resultados de la prueba del motor cohete Vettor, prueba tercera. Curvas Empuje y Presión en función del tiempo.*

## Prueba nº 3, motor cohete Vettor: Éxito!



*Video del tercer ensayo motor cohete Vettor*

# CONCLUSIONES

- Se logró el objetivo deseado de diseñar un motor de bajo coste y mediana potencia.
- Se desarrollo y validó el control no destructivo de los segmentos de propergol mediante la aplicación de la videoradioscopia.
- El uso de un micromotor iniciador con propergol en base a NK/SU/OFe es satisfactorio, evitándose el uso de materiales de más dificultosa obtención, y mas caros, como el PBHT/PA/Mg.
- Usar una tobera hecha con la sección divergente de material ablativo permite abaratar los costos del material y del mecanizado. El uso de materiales ablativos para proteger la zona convergente de la tobera es efectivo.

# Discusión de resultados, aplicaciones

- Es conocido el interés que despierta el uso de cohetes en ámbitos de enseñanza debido a lo integrador de diversas aéreas de la enseñanza y al ser un motivador de interés por las ciencias. Es posible encontrar muchos ejemplos de esto. Sin embargo uno de los limitantes son los aspectos económicos. Con este desarrollo se logró tener un motor cohete de mediano empuje a bajo coste. La filosofía del diseño de empleada permite hacer un motor reutilizable, lo cual también ayuda a tener un menor costo operativo.
- Es importante destacar que la metodología de trabajo empleada es válida para desarrollar motores mas potentes y/o con otro tipo de propergol.

# Discusión de resultados, aplicaciones

- Uno de los aspectos es que se piensa que se debe usar propergoles de mayor rendimiento, ya que 138 s de impulso específico parece poco frente a propergoles con base a perclorato de amonio que tienen 200 a 220 segundos de Impulso Específico. Sin embargo para que usar este tipo de propergol si se compensa a menor costo total con el NK/SO?. O sea para llevar una carga útil a determinada altura simplemente se hace un motor un poco mas grande que resulta igualmente mas barato.
- Este tipo de motor de bajo coste puede integrarse en proyectos de mayor envergadura, sirviendo como para ensayo de las bases de ensayo estático, pruebas de los sistemas de lanzamiento, sistemas de separación de etapas, etcétera.

# AGRADECIMIENTOS

- Este trabajo fue posible terminarlo gracias a la participación de Emiliano Grgic, del **Grupo GP Ciencias Aeroespaciales**, quien le dio un fuerte impulso al desarrollo del proyecto, ocupándose de completar trabajos del área técnica en todos los pasos del proceso de manufactura.



- Se agradece al Ing. Raúl Jorge Martínez y a Juan Carlos Zabalgoitia por su participación en las pruebas y aporte de material auxiliar para las mismas.

# CONCLUSIONES

- Se logró el objetivo deseado de diseñar un motor de bajo coste y mediana potencia.
- Se desarrollo y validó el control no destructivo de los segmentos de propergol mediante la aplicación de la videoradioscopia.
- El uso de un micromotor con propergol en base a NK/SU/OFe es satisfactorio, evitándose el uso de materiales de más dificultosa obtención, y mas caros, como el PBHT/PA/Mg.
- Usar una tobera hecha con la sección divergente de material ablativo permite abaratar los costos del material y del mecanizado. El uso de materiales ablativos para proteger la zona convergente de la tobera es efectivo.

# REFERENCIAS

- [1] PARCZEWSKI Juan (2004). **Diseño de motores cohete en 10 pasos, parte I y parte II**, sitio WEB [www.jpcoheteria.com.ar](http://www.jpcoheteria.com.ar) accedido Diciembre/2010.
- [2] SUTTON George, BIBLARZ OSCAR (2000) **Rocket Propulsion Elements**, 7th ed. pag. 480-481.
- [3] SHORR Morton, ZAEHRINGER Alfred (1967) **Solid Rocket Technology**, pag. 167-169.
- [4] VYVERMAN Tony (2007) **Burner Calculador**, versión **VB2**, acce. Enero/2011 ,[www.vro.be/content/view/100/135/lang,GB/](http://www.vro.be/content/view/100/135/lang,GB/)