

## 6 Ensayos y pruebas de NAOS

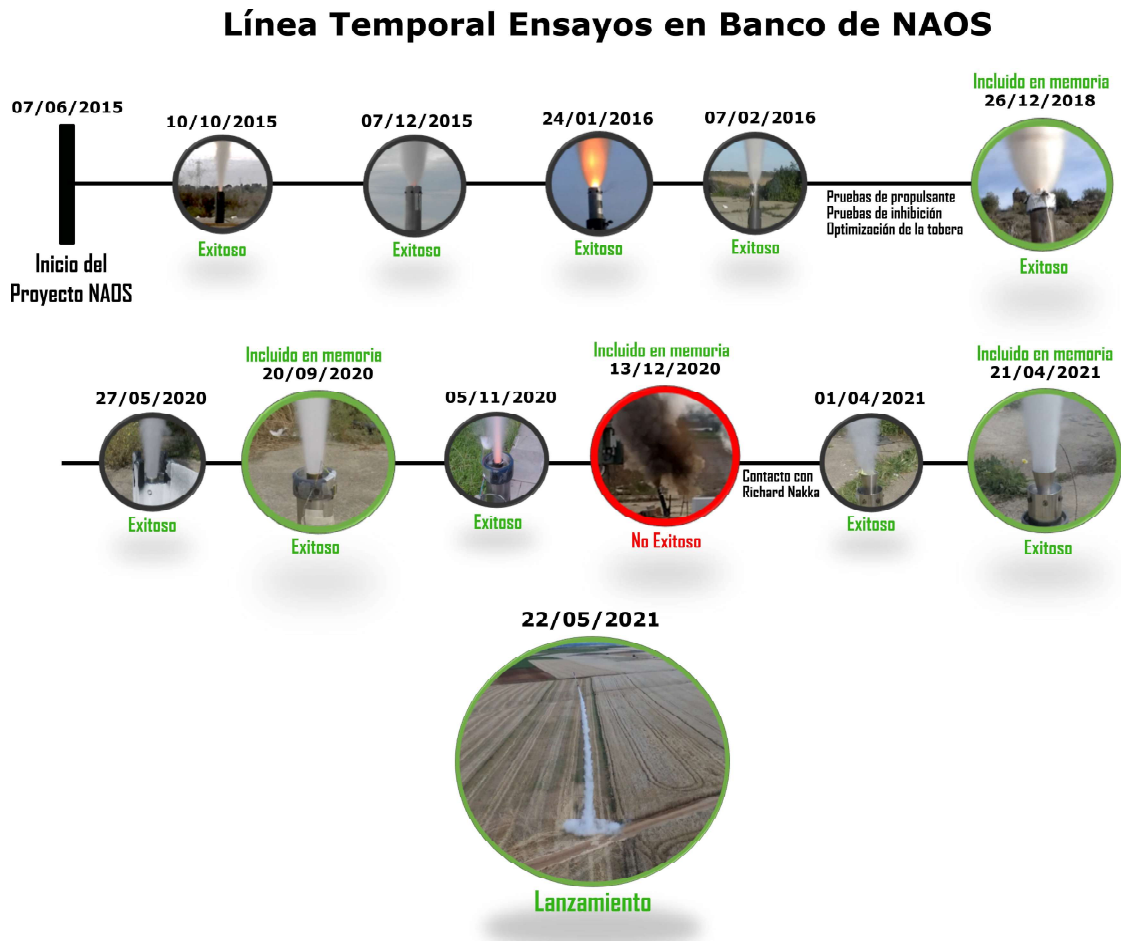
---

Los ensayos en banco son una herramienta esencial para el desarrollo de los cohetes reales. Gracias a ellos podemos conocer el comportamiento que tiene el motor cohete antes de realizar el lanzamiento, obteniendo datos de Empuje-Tiempo que serán los que nos muestren si es necesario un rediseño, una mejora, una medida de seguridad, etc. En el caso de NAOS no podía ser diferente, ya que los ensayos en banco han sido una herramienta primordial para la toma de muchas decisiones. Entre ellas están la elección de propulsante sólido tras la experimentación con alguno de ellos, la mejora de la inhibición del motor cohete, la variación en la sección, la longitud y el diámetro del grano de propulsante o incluso el estudio de vibraciones, sobrepresiones y perturbaciones del motor cohete durante la combustión. Estudio que no habría sido posible de predecir de manera teórica con tanta precisión.

Sin embargo, los ensayos en banco no sólo han aportado información relativa al motor cohete y sus características, sino que también han servido para predecir con mayor bondad las actuaciones que realizaría el cohete NAOS durante el lanzamiento, favoreciendo que el cálculo los tiempos de apertura del paracaídas, los esfuerzos aerodinámicos durante el vuelo, las consecuencias de abrir antes o después el paracaídas, los cálculos de la estabilidad, las alturas en los diferentes momentos del vuelo o incluso el diseño de muchos de los elementos del cohete, sean considerablemente más exactos.

Por otro lado, también se expondrán brevemente en este capítulo algunas de las pruebas llevadas a cabo previas al lanzamiento, que han permitido dotar al cohete y sus sistemas de una confianza y seguridad suficiente como para plantearse el lanzamiento. De hecho, también se describirá en profundidad dicho evento.

Tras la realización de más de 50 ensayos en banco totales y más de 20 lanzamientos de cohetes de diferentes tamaños, dimensiones y características, se han escogido varios ensayos en banco ideales para ilustrar apropiadamente el objetivo y las ventajas de los mismos. Todos ellos se han realizado con el motor cohete de NAOS, por lo que han conformado un pilar esencial en el desarrollo de la aeronave en cuestión, que finalmente se lanzó en mayo de 2021. Veamos un pequeño diagrama en el que se muestra la cronología de los ensayos en banco de NAOS, donde aparecen con el contorno en verde aquellos de los que se va a tratar más a fondo en este capítulo. No obstante, en el esquema temporal se eluden muchos de los pasos intermedios realizados. De hecho, hay algunos grandes saltos temporales entre ensayos, entre los cuales se trabajó en desarrollar y pulir la tecnología del cohete, con nuevos procedimientos de fabricación, nuevos diseños, alternativas a la inhibición, etc.



**Figura 6.1** Cronología de los ensayos en banco de NAOS.

## 6.1 Ensayos en banco del motor cohete

En esta sección nos centraremos en estudiar en profundidad los distintos ensayos en banco realizados con el motor cohete D60, que el que llevará incorporado NAOS en el lanzamiento.

### 6.1.1 Descripción de los ensayos

En primer lugar, antes de empezar a ver las pruebas como tal, es pertinente explicar qué nos encontraremos en cada uno de los documentos Excel de los ensayos a estudiar. De este modo, cuando se analicen dichos documentos se tendrán los conocimientos necesarios para comprender de dónde se obtienen las gráficas y los valores principales de las actuaciones del cohete durante el hipotético vuelo. Veamos una por una las que nos aportan cada una de las hojas del Excel de una prueba en banco genérica.

#### Introducción

Esta hoja sólo está en algunos de los archivos Excel de los ensayos que se estudiarán más adelante. En ella se explica cómo deben actualizarse los datos de las distintas hojas que iremos viendo. Por ejemplo, se dan pautas sobre cómo obtener la presión en cámara a partir de los resultados obtenidos en el ensayo en banco. Recordemos que lo que se obtiene de la célula de carga y el equipo de adquisición de datos son los valores del empuje del cohete en (en kg) frente al tiempo (en s). Por lo



tanto, la presión en cámara se obtendrá mediante otro fichero Excel con una Macro que la calcula automáticamente. Dicha Macro aparecerá adjunta en el Archivo comprimido de cada prueba, con el nombre de "Po\_v5" (ver figura 6.2). Como vemos, en las columnas "Time" y "Thrust" será donde coloquemos los datos obtenidos del ensayo en banco. Posteriormente sólo habrá que hacer click en el botón de "CALCULAR Po" y se iniciará. Cuando haya acabado, los datos de la columna "Po absoluta (atm)" serán los que se nos indicará en la hoja de "introducción" del documento principal de la prueba dónde deben copiarse. Viene todo explicado de modo muy intuitivo en el propio Excel, por lo que no debería haber pérdida.

|              |             |                            |          |                            |        |               |        |                   |                  |          |
|--------------|-------------|----------------------------|----------|----------------------------|--------|---------------|--------|-------------------|------------------|----------|
| Dt_Diámetro  | 19          | At_Áreas garganta          | 0,000284 | Gamma                      | 1,1308 | Pa (Pa)       | 101325 | Poi (Pa)          | 101325,00        |          |
| Ds_Diám. Sal | 24          | As_Área salida tobera (m2) | 0,000449 | Mach salida                | 1,80   | Mach salida   | 0,41   | E (N)             | -5,1             | Contador |
|              |             |                            |          | Supersonic                 |        | Subsonic      |        | Supersonic        |                  |          |
|              |             |                            |          | f(Ms,As/At)=0              | 0,00   | f(Ms,As/At)=0 | 0,00   | E (N)             | 0,0              | 0        |
|              |             |                            |          | Po critica supersonic (Pa) | 175215 |               |        | Po absoluta (atm) | Po absoluta (Pa) |          |
| Time (s)     | Thrust (kg) |                            |          |                            |        |               |        |                   |                  |          |
| 0            | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0001       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0002       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0003       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0004       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0005       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0006       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0007       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0008       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0009       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,001        | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0011       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0012       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0013       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0014       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0015       | 1,01        |                            |          |                            |        |               |        | 1,1               | 113918,1         |          |
| 0,0016       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0017       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0018       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,0019       | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |
| 0,002        | 0,00        |                            |          |                            |        |               |        | 1,0               | 101325,0         |          |

Figura 6.2 Fichero Excel "Po\_v5.xlsm" (extensión de Macro).

En esta hoja también se explicará como modificar la hoja principal del documento Excel, denominada "Sim lan\_Cd(v)" (Simulación de Lanzamiento con Cd variable con la velocidad). La veremos más adelante.

## Prueba Propulsante

Es típico en los ensayos en banco, realizar en paralelo y previo a éste, una prueba del propulsante. Dicha prueba consiste en fabricar un cilindro esbelto con el sobrante de propulsante sólido obtenido de las mismas remesas usadas para fabricar los granos de propulsante que van dentro de la cámara de combustión durante la prueba. A este cilindro de propulsante se le dibujan líneas equiespaciadas (ver figura 6.3) para poder ver cuánto tiempo tarda en quemarse la longitud entre ellas. Con ello se puede calcular con muy buena precisión la velocidad de quemado del grano de propulsante a presión ambiente (1 atm).

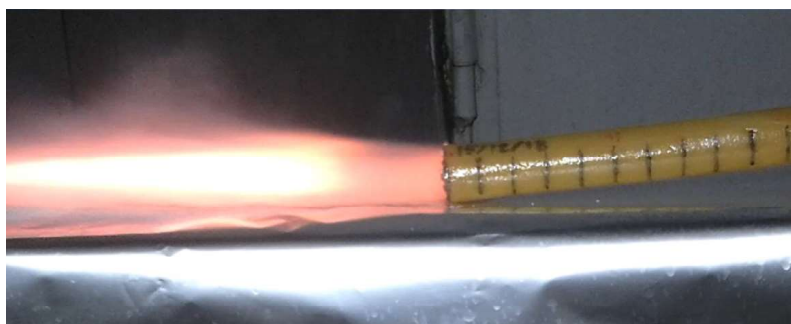


Figura 6.3 Hoja "prueba propulsante" del excel del ensayo en banco.

En esa misma hoja aparecen valores de la velocidad de quemado a presión atmosférica (que es el caso de la prueba de propulsante) y varias temperaturas. Con ello, seremos capaces de comprobar la velocidad de quemado con la de las tablas. En caso de que fueran muy diferentes se desecha el grano de propulsante, ya que esa desviación podría evidenciar una deficiencia en la fabricación.

Y por otro lado, se ha habilitado una tabla donde se compara la densidad del grano de propulsante con la densidad teórica proveniente de la literatura. No es necesario decir que cuanto más cercana sea a la densidad teórica más eficientes serán los granos de propulsante. De hecho, en general se suelen desechar granos de propulsante con un ratio  $\rho_{real}/\rho_{teorica} \cdot 100$  inferiores al 90 %. En la siguiente figura se muestra dicha tabla, que se tiene que rellenar con las dimensiones del grano de propulsante lo más exactas posibles y con su peso, de este modo la comparativa entre la real e ideal es inmediata.

|                                                   |                                                |                                     |           |            |            |                  |                       |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------|------------|------------------|-----------------------|
|                                                   | THEFINTELS (% RNakka (% Densidad ideal (Kg/m3) |                                     |           |            |            |                  |                       |
| KNDX anhidrida                                    |                                                | 155                                 | 1.879     |            |            |                  |                       |
| KNDX monohidratada                                |                                                | 135                                 |           |            |            |                  |                       |
| James Yawn (Disuelto en agua y secado en plancha) |                                                |                                     |           |            |            |                  |                       |
| KNO3 - 65%, Sucrose - 35%                         |                                                | Temperatura: 130-150°C (260-300°F). |           |            |            |                  |                       |
| Richard Nakka (slurry method)                     |                                                |                                     |           |            |            |                  |                       |
| KNO3 - 65%, Sucrose - 35%                         |                                                | Temperatura: 380°F (193 °C)         |           |            |            |                  |                       |
| KNO3 - 60%, Sucrose - 40%                         |                                                | Temperatura: 370°F (188°C)          |           |            |            |                  |                       |
|                                                   |                                                |                                     |           |            |            |                  |                       |
|                                                   | diam grano (mm)                                | Long (mm)                           | diam aguj | masa grano | volumen (m | densidad (Kg/m3) | Relación (real/ideal) |
| Prueba motor 1_1                                  | 58,37                                          | 61,35                               | 25        | 222,60     | 134.051    | 1660,6           | 88,4%                 |
| Prueba motor 1_2                                  | 58,01                                          | 61,3                                | 25        | 223,70     | 131.925    | 1695,7           | 90,2%                 |
| Prueba motor 1_3                                  | 58,37                                          | 55,88                               | 25        | 216,30     | 122.099    | 1771,5           | 94,3%                 |
| Prueba motor 1_4                                  | 58,14                                          | 58,09                               | 25        | 218,84     | 125.705    | 1740,9           | 92,7%                 |
| Prueba motor 1_5                                  | 58,24                                          | 56,84                               | 25        | 212,94     | 123.520    | 1723,9           | 91,7%                 |
| Prueba motor 1_6                                  |                                                |                                     |           |            |            |                  | 0,0%                  |
|                                                   | 58,23                                          | 58,69                               |           | 1094,38    |            |                  | 91,5%                 |
|                                                   |                                                | 293,46                              |           |            |            |                  |                       |

**Figura 6.4** Hoja "prueba propulsante" tabla de eficiencia del grano de propulsante.

## LOG

Log (registro en inglés) es una tabla donde se anotan todos los datos relevantes relativos al ensayo en banco y previos a él. Algunos de ellos son los siguientes:

- Tipo de propulsante
- dimensiones del grano
- Objetivo del ensayo en banco
- Número de granos de propulsante para la prueba
- Tipo de inhibición del grano de propulsante
- Fecha de los Lotes de propulsante
- Etc.

Esta hoja es clave para posteriormente analizar los resultados de la prueba, ya sean satisfactorios o no. Además, toda esa información será de gran ayuda en el futuro, cuando se deban recordar los objetivos del ensayo y sus características principales.

## Resultados

En la hoja de resultados se registra todo lo relacionado con las conclusiones extraídas del ensayo en banco. Todo ello se hace una vez que se analiza el vídeo del ensayo en banco y se explora el interior de la cámara de combustión en busca de los restos de la inhibición de los granos u otras sustancias que nos puedan dar datos de cómo ha sido la combustión durante la prueba en banco. En general interesará que los restos de la inhibición estén lo más enteros posibles, significando que habrán cumplido su función.

También se incluyen pautas para la siguiente prueba en banco. Si alguna implementación nueva ha resultado ser una buena decisión y ha mejorado las prestaciones o la evolución de la combustión, sin duda se volverá a tener en cuenta en el siguiente ensayo. Por contraposición, cualquier innovación que no haya resultado tan buena o que no haya optimizado el comportamiento, no se tendrán en cuenta para la siguiente.

## Teórico Prueba 1

En esta hoja nos encontraremos con todos los parámetros y valores teóricos que se habrán calculado previos al ensayo en banco, y que nos servirán como orientación al comportamiento real del motor durante la prueba. Dichos resultados y gráficas se obtienen del ya nombrado programa de Richard Nakka que aparece en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6. De hecho, estas gráficas nos sirven de guía para saber a gráfica que se debe converger en los ensayos y así poder identificar desviaciones, sobrepresiones, comportamientos inesperados, malfuncionamientos, etc. De este modo, se podrán implantar las medidas correctivas que se crean oportunas y volver a realizar otro ensayo en banco con el objetivo de que sea más parecido a la curva teórica. Sin embargo, debe tenerse en mente en todo momento que jamás se va a obtener una curva real extremadamente similar a la teórica.

## Prueba 1

En esta hoja nos encontraremos todos los datos relacionados con las prestaciones del motor cohete y su evolución a lo largo del tiempo. De hecho, estos ya son datos reales que se han calculado a partir de la curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco e introduciendo dichos datos en el archivo Excel de "Calculo Po\_v5-xlsm". Con ello se obtiene la presión en cámara a lo largo del tiempo de combustión. Posteriormente, se calcula la velocidad de quemado del propulsante, con ello la disminución de área en el grano a lo largo del tiempo, la variación de masa de propulsante y el coeficiente de empuje. Con todo ello, quedan caracterizados los datos temporales más importantes del motor cohete. Además, se pueden ver algunas gráficas de la curva Presión en cámara-Tiempo o del Empuje-Tiempo.

Por último, hay una pequeña tablita con los datos de impulso específico, empuje máximo, empuje medio, impulso específico, etc. Todos ellos calculados de forma empírica gracias a la curva Empuje-Tiempo.

## Sim lan\_Cd(v)

Ésta, probablemente sea la hoja más importante de todo el documento Excel, ya que en ella se usan todos los datos extraídos del ensayo en banco para simular el lanzamiento del cohete con las condiciones iniciales de carga de propulsante, características de tobera, eficiencia, etc. Se calculan valores de aceleración mediante un equilibrio de fuerzas entre Empuje, Peso del cohete (teniendo en cuenta la disminución de masa a medida que se consume el propulsante) y la Resistencia Aerodinámica (con variación del  $C_d$  con la velocidad). Por otro lado se calcula la velocidad y la altura, "integrando" a partir de la aceleración.

También se incluyen las gráficas correspondientes a las curvas: Empuje-Tiempo, Aceleración-Tiempo, Velocidad-Tiempo, Altura-Tiempo, la trayectoria con paracaídas desplegado y la trayectoria en caída libre. Con todos estos datos es con lo que se estipula el tiempo de apertura del paracaídas, en caso de que se quiera desplegar justo en el apogeo.

Del mismo modo, se incluye una tabla que recoge los parámetros principales de las actuaciones de la simulación del lanzamiento como el apogeo (altura máxima), velocidad máxima, impulso total, tiempo total de vuelo, aceleración máxima, etc.

### **Comparativa**

En esta pestaña, simplemente se establece una comparativa entre las gráficas Empuje-Tiempo de los distintos ensayos en banco realizados a lo largo del tiempo. Dicha comparativa es especialmente útil para ver como va siendo el progreso de los distintos ensayos, si se va mejorando la curva real pareciéndose cada vez más a la teórica o para analizar el efecto de introducir mayor carga de propulsante o inhibiciones diferentes, incluso las consecuencias de introducir el ignitor en las distintas zonas del motor cohete.

#### **6.1.2 Ensayo en banco Diciembre 2018**

##### **Objetivo y preparación**

Este ensayo en banco tuvo lugar el 26 de Diciembre de 2018 y tenía como objetivo realizar un ensayo en banco del motor cohete D60 de NAOS previo a su lanzamiento, y con carga máxima. Para ello, se fabricaron 7 granos de propulsante que en total ocuparon un 97 % de la carga máxima del motor.

Las características principales de la prueba fueron las siguientes:

- Grano 1 (longitud 66,21 mm), Grano 2 (longitud 67,30 mm), Grano 3 (longitud 69,54 mm), Grano 4 (longitud 64,72 mm), Grano 5 (longitud 72,71 mm), Grano 6 (longitud 66,09 mm), Grano 7 (longitud 63,31 mm) (figura 6.5)
- Tipo de propulsante: KNDX (Nitrato Potásico + Dextrosa)
- Diámetro exterior de los granos: 57,37 mm
- Diámetro interior de los granos: 16 mm
- Inhibición: 3 capas de cartulina y 1 de liner de 0,3 mm
- No se pinta el interior de los granos de propulsante con pólvora negra (mezcla de alcohol y pólvora negra).
- No se introduce separador o tope para evitar el movimiento de los granos en el interior de la cámara de combustión.
- Posición del ignitor: Se posiciona entre el fondo de la cámara de combustión y el punto medio de los granos.



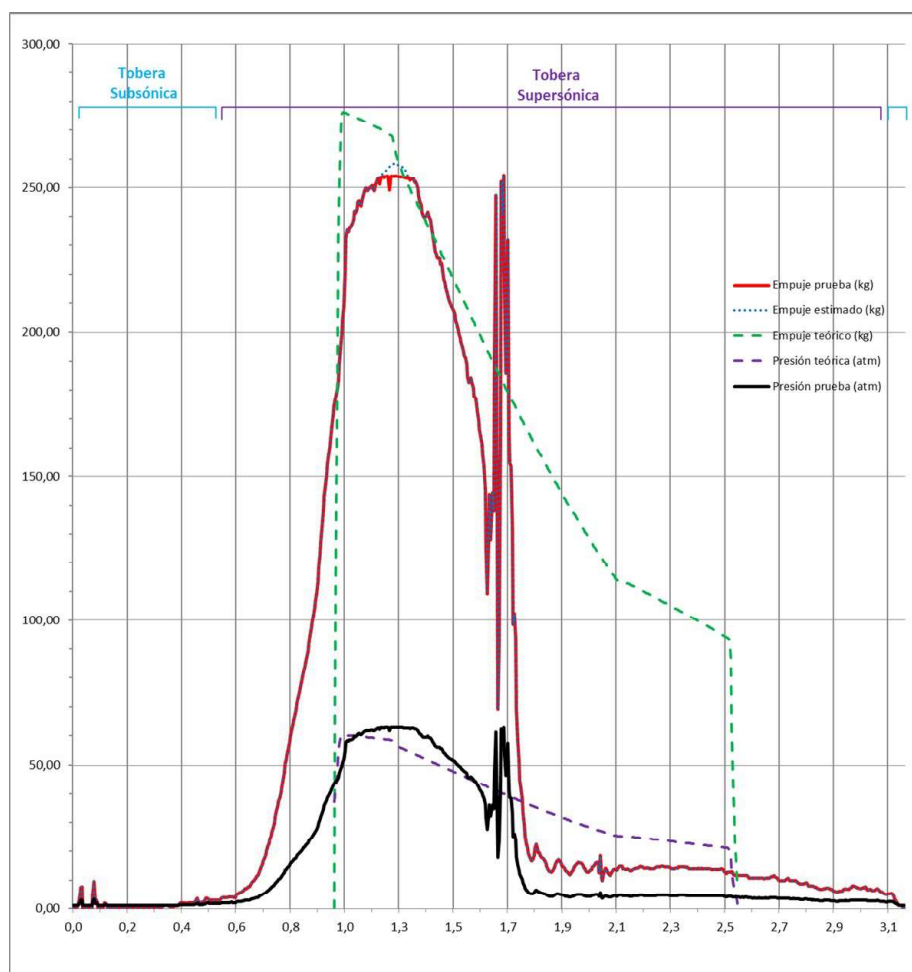
**Figura 6.5** Carga de 7 granos de propulsante para el ensayo en banco de Diciembre del 2018 .

### Ensayo en banco

Tras realizar el ensayo en banco y registrar los datos de Empuje(kg)-Tiempo(s) mediante el equipo de adquisición de datos y la célula de carga, cuya calibración aparece indicada en las hojas "procedimiento de calibración" y "calibración célula de carga", se obtuvo la siguiente curva. En ella también se han añadido las curvas Empuje-Tiempo teórica y Presión en cámara-Tiempo teórica y real. Además, también se adjuntan las principales prestaciones del motor cohete y la simulación del lanzamiento.

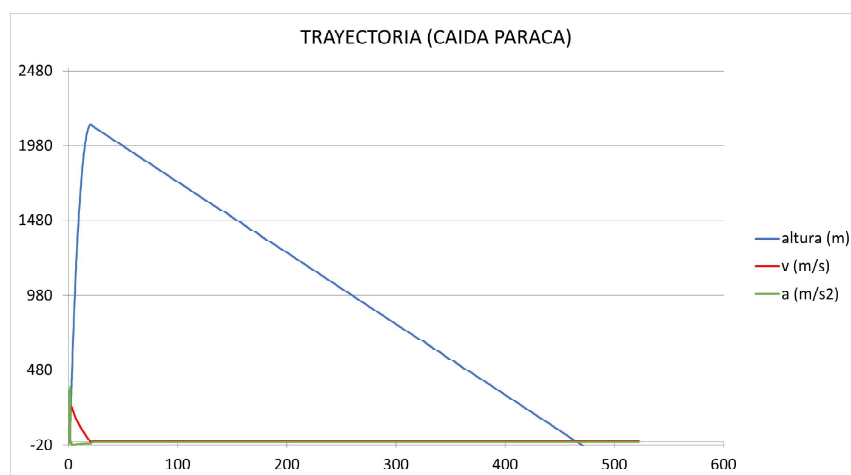
|                                         | valor | tiempo (s) |
|-----------------------------------------|-------|------------|
| $P_{0max} (atm)$                        | 63    | -          |
| $Empuje_{max} (kg)$                     | 254,4 | -          |
| $Empuje_{medio} (kg)$                   | 196,8 | -          |
| $a_{max} (g's)$                         | 38    | 1,65       |
| $a_{max} (m/s^2)$                       | 368   | 1,65       |
| $v_{max} (m/s)$                         | 235   | 2,02       |
| $v_{max} (km/h)$                        | 846   | 2,02       |
| $Apogeo (m)$                            | 2117  | 20,4       |
| $D_{max}, Drag (kg)$                    | 3,75  | 43,2       |
| $I_t (N \cdot s)$                       | 1882  | -          |
| Tiempo hasta apertura de paracaídas (s) | 19,7  | -          |
| Tiempo de combustión (s)                | 0,975 | -          |
| Tiempo sin paracaídas (s)               | 70,6  | -          |
| Tiempo con paracaídas (min)             | 8,71  | -          |

Tabla 6.1. Prestaciones simulación lanzamiento Diciembre 2018

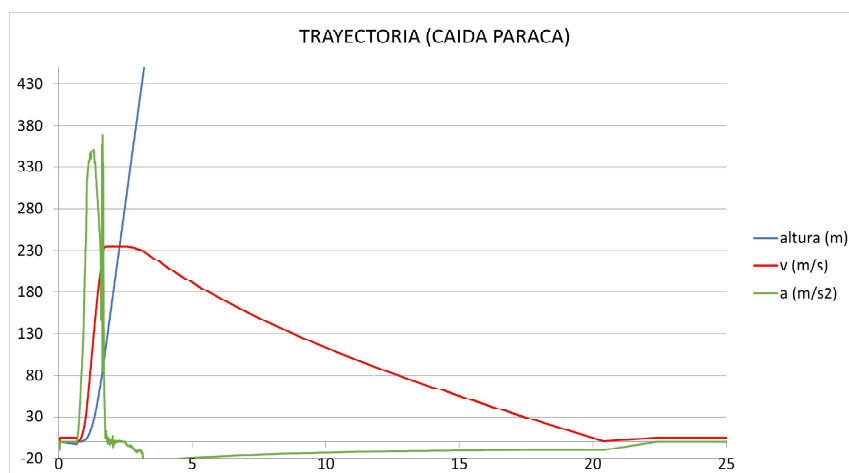


**Figura 6.6** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre de 2018.

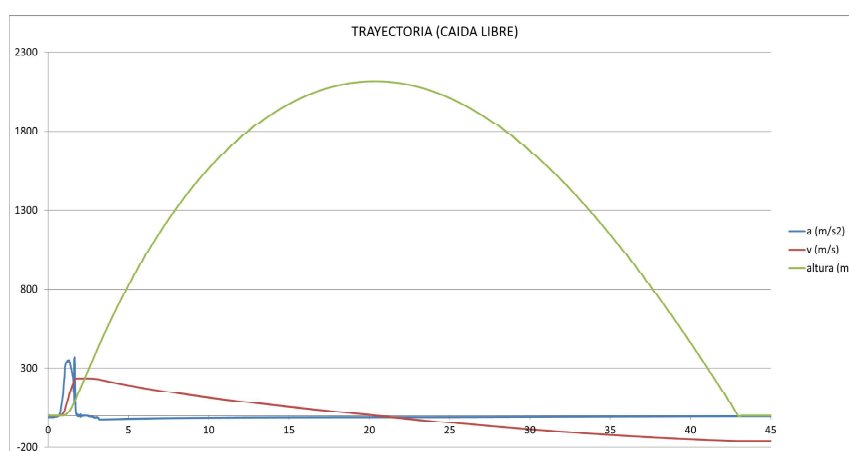
Veamos de igual modo dos gráficas, las figuras 6.7 y 6.8 muestran la gráfica de aceleración, velocidad y altura en el caso de que el paracaídas se abra correctamente, mientras que en la figura 6.9 se representa el caso en el que el cohete cayera en caída libre.



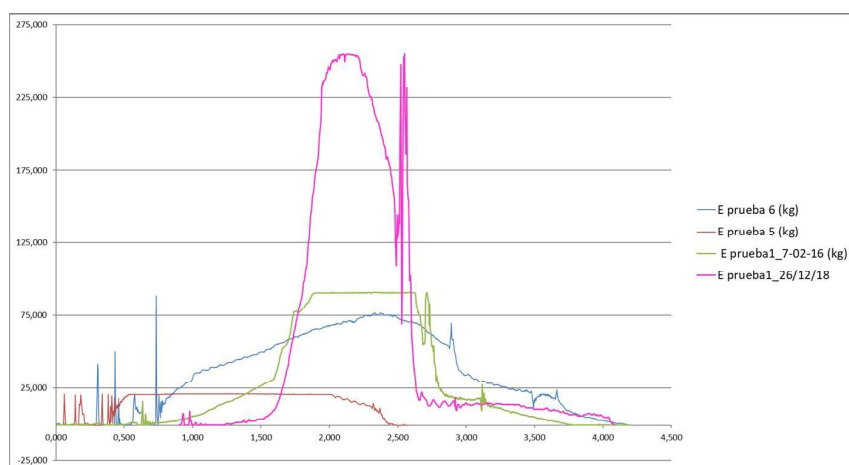
**Figura 6.7** Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Diciembre 2018.



**Figura 6.8** Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Diciembre 2018 (Zoom).



**Figura 6.9** Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Diciembre 2018.



**Figura 6.10** Comparativa del ensayo de Diciembre de 2018 con pruebas anteriores.

Comentemos los aspectos más característicos del ensayo en banco de Diciembre de 2018, así como algunos comportamientos indeseados. A continuación se hace una lista de dichos rasgos:

1. Si nos fijamos en la gráfica 6.6 lo que más llama la atención es la irregularidad que se da en el segundo 1,7 de la combustión, que llega a tener el mismo empuje que el propio máximo de la



curva, lo cual es un comportamiento indeseable que no ha sido contemplado en las gráficas Empuje-Tiempo teóricas (línea discontinua verde de la figura 6.6 ). Dicho instante de la gráfica coincide exactamente con el fotograma mostrado en 6.12, que analizando el vídeo se puede ver que la tobera sufrió un taponamiento debido, muy probablemente a la inhibición que llevaba el cohete. De esto se hablará mas tarde.

2. Por otra parte, si nos vamos a figura 6.10, donde se establece una comparativa de este ensayo concreto con otras pruebas realizadas en el pasado, salta a la vista la gran diferencia entre los tiempos de combustión. Mientras que en el resto de ensayos la combustión más apreciable ocupa en torno a los 3 segundos, en la gráfica obtenida en la prueba de Diciembre de 2018 el mayor área se concentra en unos 1,3 segundos. Dicho comportamiento no es adecuado a la hora de realizar un lanzamiento, pues lo que interesa (como se vio en los estudios preliminares) es una curva lo más neutra posible, con un empuje lo más constante posible y durante un tiempo prolongado. De hecho, es ese tipo de curva la que maximizará el apogeo del cohete. Por todo ello, para la siguiente prueba deberán tomarse acciones correctivas para disipar este comportamiento adverso de la curva. Sin embargo, es importante añadir que el resto de ensayos que aparecen en la curva comparativa no son a la carga máxima del motor cohete, por lo que es evidente que las condiciones de contorno iniciales de los ensayos no son las mismas.
3. Sin embargo, como podemos ver en la figura 6.7 contaríamos con un apogeo bastante digno a lo que se estableció en un principio en la misión. Es evidente que no se logran alcanzar los 3000 metros de altura debido al comportamiento adverso que sufre la curva Empuje-Tiempo que se han comentado en el punto anterior. Por su parte, la velocidad supone un problema a largo plazo, pues tiene su máximo en 230 m/s lo que se traduce en un Número de Mach de aproximadamente 0,7. De hecho, si por cualquier casualidad hubiera un error de cálculo y el cohete lograra alcanzar algo más de velocidad se quedaría muy cerca del régimen transónico, con todos los problemas que ello acarrearía, pues está diseñado para volar en régimen subsónico.
4. Otro gran inconveniente, si se observa la tabla 6.1, llama el imponente valor de la aceleración máxima del motor cohete que es de 38 g's. Si observamos las especificaciones del Sistema de Medidas Inerciales 4.3.3 (IMU) embarcado en el cohete, el límite de medida de aceleración está en los 16 g's de valor absoluto. Esto implicaría que el IMU se encontraría inutilizado durante gran parte del vuelo del cohete, perdiendo así su funcionalidad primordial.
5. Por último, vamos a hablar un poco de la célula de carga y el amplificador de señal. Si vemos la curva verde de la gráfica 6.10, se aprecia claramente cómo se produjo una saturación de la célula de carga, más precisamente de su amplificador de señal. Lo que ocurrió es que se sobrepasó la ganancia de amplificación durante el ensayo y se creó una "meseta" de saturación en torno al máximo de la curva. De hecho, esto produjo una pérdida de información para la que se tomaron medidas correctivas en este ensayo. Lo que se hizo fue ajustar la resistencia variable del amplificador para que fuera capaz de amplificar un mayor rango de valores de tensión. La desventaja de hacerlo es que puedes perder algo de fiabilidad en algunas mediciones de la célula de carga, ya que ahora, para la misma amplitud de voltaje se tienen un mayor cantidad de rango de mili Voltios procedentes de la célula. Sin embargo, es un precio a pagar para evitar esa pérdida de información. Tanto es así que para este ensayo se modificó la resistencia variable. A pesar de esto, podemos comprobar que en la curva roja de la figura 6.6 seguimos teniendo una leve saturación en el máximo de la misma. Esto significa que se tiene algo más de empuje máximo del que se tiene registro. De hecho, se estimó a mano mediante la línea de puntos azul cuál podría haber sido el comportamiento de la curva sin esa saturación.
6. Por último, se aprecia en la figura 6.11 claramente, que la tobera no se encuentra adaptada ni optimizada para las presiones en cámara de este ensayo, cuando sí debería estarlo. Al tratarse

de una tobera antigua, ésta se encuentra sub expansionada, lo que dio lugar a la aparición de ondas de expansión a la salida de los gases de combustión.



**Figura 6.11** Fotograma del ensayo de Diciembre de 2018 (tobera sub expansionada, ondas de expansión).



**Figura 6.12** Ondas de choque producidas por el taponamiento de la tobera.

### Inspección del motor

Tras la prueba se llevó a cabo una inspección del motor cohete en busca de signos visibles que evidenciarán algún posible comportamiento adverso de este. Tras dicho estudio se sacaron las siguientes conclusiones:

- Se aprecia en la figura 6.13 una evidente decoloración del acero inoxidable debida a las altas temperaturas de combustión. De hecho, en esta prueba se incorporó un termopar para medir la temperatura de los gases de salida. La máxima temperatura que alcanzó es la que se ve en la figura 6.12 (865 °C). Desgraciadamente, debido a la onda de choque por el taponamiento de la tobera y las vibraciones generadas, el multímetro con el que se medía la temperatura del termopar cayó al suelo y no se pudo ver cuál fue la máxima temperatura real alcanzada por los gases.
- Se produjo también la típica acumulación de residuos de los productos de combustión en las paredes internas de la tobera y el cierre posterior, lo cual también pudo tener una repercusión notable en el estrechamiento de la sección de la garganta, ver figura 6.14.

- Por último, y más importante, la inhibición durante esta prueba fue bastante deficiente, ya que si nos fijamos en la imágenes 6.15 comprobamos que únicamente quedaron restos de la inhibición del grano de propulsante que se encontraba más cercano al cierre posterior. De hecho, esto evidencia una clara aparición del efecto de una agresiva combustión erosiva debida a la alta velocidad de los gases dentro del motor cohete, dando lugar a dos consecuencias importantes:
  - Al quemarse más rápidamente los granos de propulsante la presión en cámara se ve altamente incrementada, lo que deriva en el estrechamiento de la curva Empuje-Tiempo, alcanzando valores máximos más altos pero reduciendo el tiempo de combustión.
  - Al quemarse por completo la inhibición del resto de los granos de propulsante, y haber incorporado liner (en esencia, plástico) en ella, se piensa que por acción de la temperatura, el liner se derritió y taponó la tobera, dando lugar al comportamiento que apreciamos en el segundo 1,7 de la figura 6.6, que coincide con el que se muestra en la figura 6.12.



**Figura 6.13** Decoloración de la superficie de acero inoxidable del motor cohete tras la prueba de Diciembre de 2018.



**Figura 6.14** Tobera y cierre posterior tras la prueba en banco de Diciembre de 2018.



**Figura 6.15** Restos de inhibición tras la prueba en banco de Diciembre de 2018.

### Resultados y acciones correctivas

A continuación se van a enumerar los diferentes resultados y conclusiones extraídos del ensayo en banco de Diciembre de 2018. Veámoslos:

- 1. Inspección del motor:** Desaparición casi completa de la inhibición (liner + cartulina) localizándose algunos restos enteros cercanos al cierre posterior (signo de combustión erosiva). El motor cohete presenta decoloración notable en el 75 % del motor cohete más cercano a la tobera (signo de combustión erosiva). Se aprecian también marcas de quemado en el cilindro de ajuste del motor con el banco de ensayo (ver figura 6.15). Por otro lado, se aprecia que la junta tórica de la tobera más cercana a la cámara de combustión se ha derretido por un lado, aunque no se aprecia escape de gases.
- 2. Observación del vídeo del ensayo:** El motor cohete funciona con la primera ignición. Sin embargo, se aprecia un rápido aumento de la presión en el segundo 1,7 de la combustión, debido al posible taponamiento de la tobera con los restos liner y cartulina. Sin embargo, no se aprecian daños estructurales visibles ni deformaciones plásticas, por lo que la resistencia del motor cohete es conforme a los cálculos de diseño. En el vídeo no se aprecia el sonido



real de la "explosión" o aumento repentino de la presión en cámara, debido a la saturación de los micrófonos de la cámara de vídeo.

3. **Conclusiones:** La célula de carga se satura y no mide más de 254,4 kg. La causa es la saturación del equipo de adquisición de datos debido a una ganancia del amplificador de señal que provoca que a ese empuje la señal sea de 5 V, que es el máximo que mide el equipo de adquisición de datos DI149. Además, La célula de carga se calibra para 125 kg con los datos recogidos en ensayos de la célula (ver pestaña "calibración célula de carga" en el fichero Excel).
4. **Acciones correctivas:** Los detalles a tener en cuenta para el siguiente ensayo en banco son los siguientes:
  - a) Mejora e incremento de la inhibición de los granos de propulsante:
    - Capa de resina + pintura resistente a altas temperaturas
    - Inhibir puntas de los granos de propulsante, reduciendo área de quemado para que el incremento de presión sea menos agresivo.
    - Usar 4 capas de cartulina de inhibición
  - b) Eliminar el liner de la inhibición para evitar problemas de taponamiento en futuros ensayos en banco.
  - c) Posicionar el ignitor en la zona más próxima del cierre posterior.

### 6.1.3 Ensayo en banco Septiembre 2020

#### Objetivo y preparación

Este ensayo en banco tuvo lugar el 20 de Septiembre de 2020 y tenía como objetivo realizar un ensayo en banco del motor cohete D60 de NAOS llevando a cabo las acciones correctivas de anteriores ensayos. Para ello, se fabricaron 2 granos de propulsante largos mediante un nuevo método de fabricación, que son equivalentes a 4 granos cortos como los vistos en el ensayo anterior, y que en total ocuparon un 52 % de la carga máxima del motor.

Las características principales de la prueba fueron las siguientes:

- Grano 1 (longitud 131 mm), Grano 2 (longitud 156 mm) (figura 6.16)
- Tipo de propulsante: KNDX (Nitrato Potásico + Dextrosa)
- Diámetro exterior de los granos: 58,64 mm (entran un poco ajustado)
- Diámetro interior de los granos: 16 mm
- Inhibición: 3 capas de cartulina de 0,22 mm de espesor
- No se pinta el interior de los granos de propulsante con pólvora negra (mezcla de alcohol y pólvora negra).
- No se introduce separador o tope para evitar el movimiento de los granos en el interior de la cámara de combustión.
- No se introduce un separador desde la tobera a la superficie del grano más cercana a la tobera para evitar el movimiento del grano en la cámara.
- No se introduce liner (cartel "se vende")
- Posición del ignitor: Se posiciona entre el fondo de la cámara de combustión y el punto medio de los granos.

- La célula de carga se calibra para 67 kg con los datos recogidos en ensayos de la célula (ver pestaña "calibración célula de carga").
- Se posiciona el grano corto (131 mm) junto a la tapa de cierre posterior mientras que el grano largo (156 mm) se coloca contiguo a éste quedando más cerca de la tobera.
- Las cuatro juntas tóricas (dos en la tobera y dos en la tapa posterior) se untan con grasa.



**Figura 6.16** Carga de 2 granos largos de propulsante para el ensayo en banco de Septiembre del 2020 .

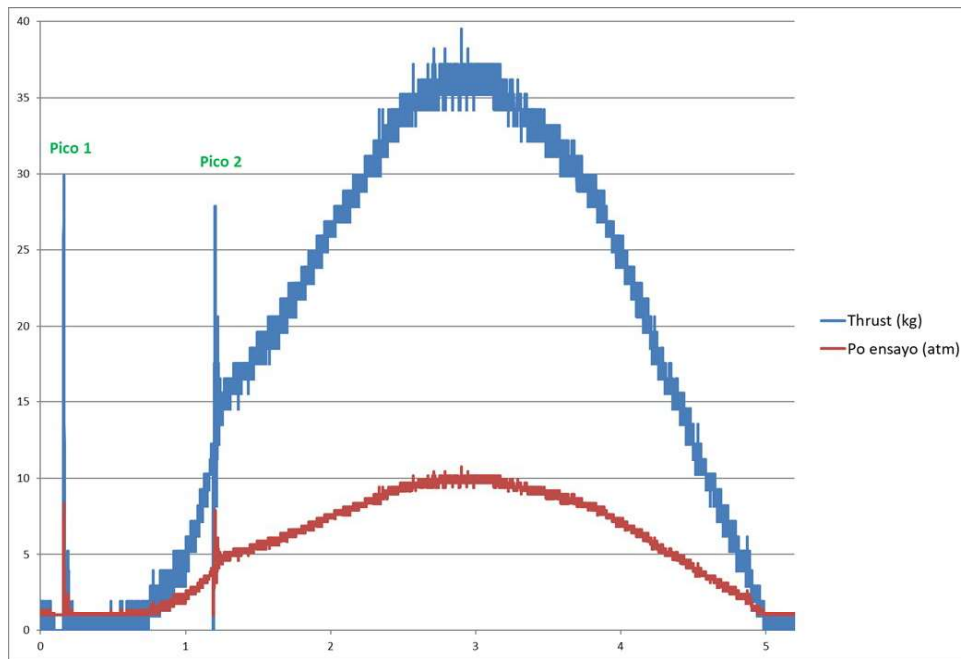
### Ensayo en banco

Tras realizar el ensayo en banco y registrar los datos de Empuje(kg)-Tiempo(s) mediante el equipo de adquisición de datos y la célula de carga, cuya calibración aparece indicada en las hojas "procedimiento de calibración" y "calibración célula de carga", se obtuvo la siguiente curva, donde también se incluye la gráfica Presión-Tiempo. Además se adjuntan algunas de las principales prestaciones del motor cohete con esta carga de propulsante.

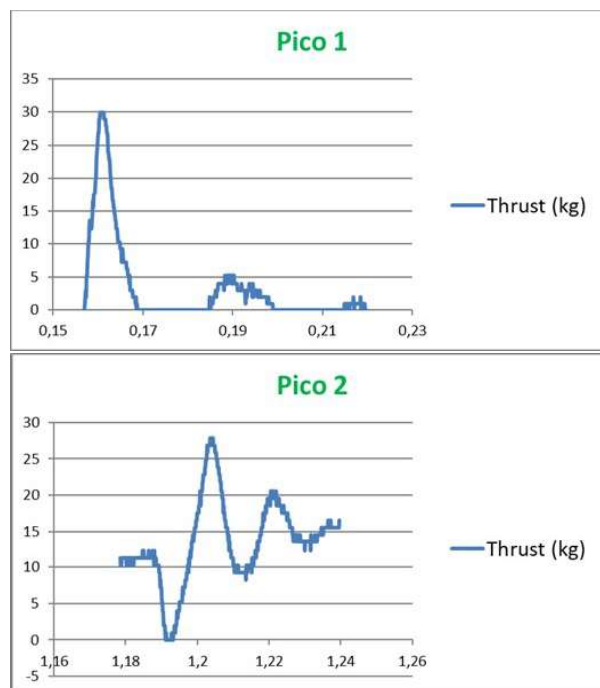
|                                         | valor | tiempo (s) |
|-----------------------------------------|-------|------------|
| $P_{0max}$ (atm)                        | 10,7  | -          |
| $Empuje_{max}$ (kg)                     | 39,5  | -          |
| $Empuje_{medio}$ (kg)                   | 22,8  | -          |
| $a_{max}$ (g's)                         | 5     | 2,38       |
| $a_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )           | 53    | 2,38       |
| $v_{max}$ (m/s)                         | 112   | 4,19       |
| $v_{max}$ (km/h)                        | 403,2 | 4,19       |
| Apogeo (m)                              | 756   | 14,5       |
| $D_{max}$ , Drag (kg)                   | 1,78  | 30,49      |
| $I_t$ (N·s)                             | 940   | -          |
| Tiempo hasta apertura de paracaídas (s) | 13,9  | -          |
| Tiempo de combustión (s)                | 3,95  | -          |
| Tiempo sin paracaídas (s)               | 32,9  | -          |
| Tiempo con paracaídas (s)               | 198,5 | -          |

Tabla 6.2. Prestaciones simulación lanzamiento Septiembre 2020

En esta gráfica pueden apreciarse dos picos en la primera parte de la curva, antes de llegar a su máximo. Veámoslos más de cerca para analizarlos.



**Figura 6.17** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Septiembre 2020.



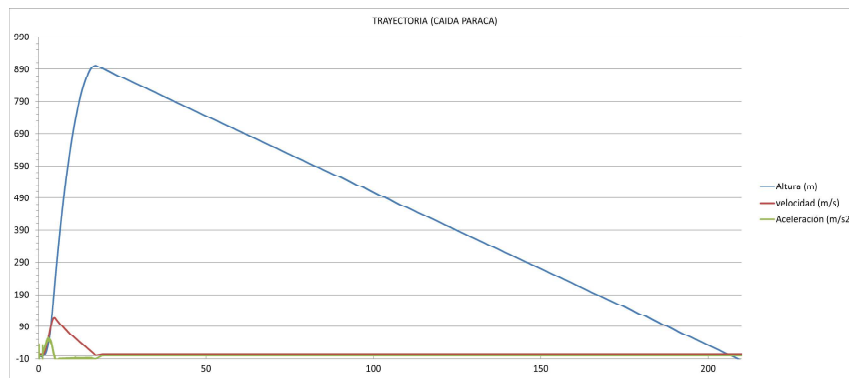
**Figura 6.18** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Septiembre 2020 con picos ampliados.

El primero de los picos corresponde a una pequeña fluctuación debida a la eyección del ignitor, que produjo un leve taponamiento con expulsión de gases negros procedentes de los restos de pólvora negra (ver figura 6.23). Por otro lado, el segundo pico es fruto de un pequeño salto que del motor cohete que puede apreciarse en los vídeos. Dicho salto podría estar provocado por la subida repentina de los granos de propulsante que al chocar con la tobera levantan el motor entero.

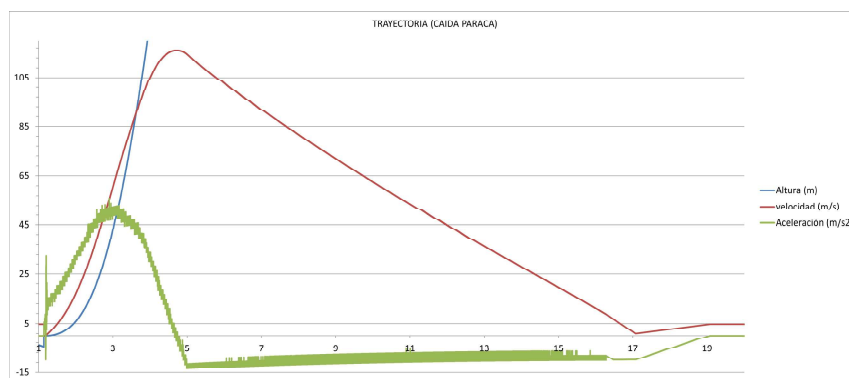
Veamos de igual modo dos gráficas, las figuras 6.19 y 6.20 muestran la gráfica de aceleración, velocidad y altura en el caso de que el paracaídas se abra correctamente, mientras que en la figura



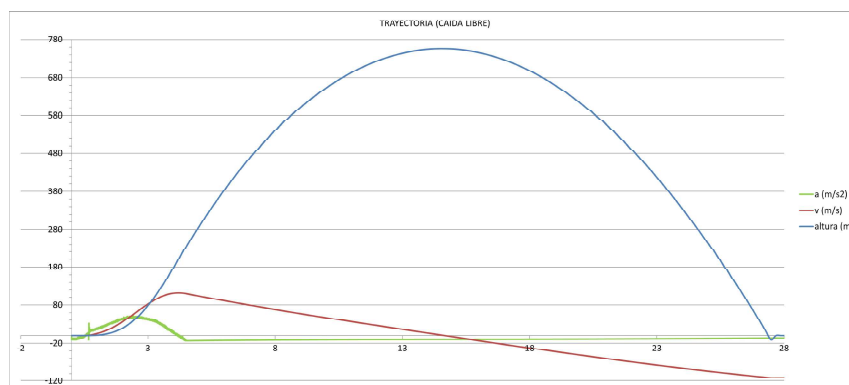
6.21 se representa el caso en el que el cohete cayera en caída libre.



**Figura 6.19** Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Septiembre 2020.



**Figura 6.20** Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Septiembre 2020 (Zoom).



**Figura 6.21** Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Septiembre 2020.

Comentemos los aspectos más característicos del ensayo en banco de Septiembre 2020, que se han analizado tras revisar los vídeos y las gráficas:

1. Una de las cosas más llamativas es la aparición de dos picos en la curva Empuje-Tiempo, cuando en realidad suele aparecer únicamente uno, debido a la eyección del ignitor (ver figura 6.23).
2. Es importante destacar que los granos largos (ver figura 6.16) se han fabricado para mejorar el comportamiento de la curva con respecto al ensayo de Diciembre de 2018, ya que el repentino aumento de presión podría corregirse mediante la inhibición de las puntas de los granos. Sin

embargo, dado que inhibir las puntas es algo bastante complejo, es más interesante fabricar granos el doble de largos lo que reduce el número de puntas expuestas al flujo de la combustión a la mitad.

3. Se aprecia claramente como al 52 % de la carga máxima del cohete disminuyen enormemente las prestaciones del motor cohete. No obstante, un tiempo de combustión de casi 4 segundos, que recordemos que es algo muy deseable, que en cierto modo permite que el motor esté más optimizado y maximice la altura alcanzada.
4. A pesar de los dos picos mencionados anteriormente, la curva Empuje-Tiempo presenta un comportamiento muy suave sin cambios bruscos de empuje.
5. Como curiosidad, volvemos a comprobar que la tobera no es la más óptima para el motor cohete en caso de que estuviera cargado al 100%. Pues con una carga del 52 % la tobera se encuentra muy cercana a estar adaptada (lo que conlleva un comportamiento óptimo prematuro), ver figura 6.22.



**Figura 6.22** Fotogramas del ensayo de Septiembre de 2020 .



**Figura 6.23** Fotograma de eyección de ignitor del ensayo de Septiembre de 2020.

### Inspección del motor

Tras la prueba se llevó a cabo una inspección del motor cohete en busca de signos visibles que nos aportaran más información sobre cómo se había desarrollado la combustión. Entre ellos, se encontraron los siguientes:

- Fijándonos en las figuras 6.24 nos percatamos de que la inhibición está prácticamente intacta. De hecho, en la parte de la inhibición más cercana a la tobera, el borde de la cartulina permanecer recto, como si no hubiera sufrido ninguna quemadura. Esto es una buena noticia y evidencia el buen comportamiento de los granos de propulsante largos, que al carecer de la mitad de las bases de los granos cortos, permite una presión y temperatura más controladas dentro de la cámara de combustión. Esto se ha comprobado también en las gráficas vistas anteriormente, en las que el tiempo de combustión se ha visto considerablemente incrementado.
- Observando la figura 6.25 vemos una gran acumulación de residuos endurecidos en el cierre posterior en mayor proporción que habitualmente. Esto puede significar que al no alcanzar presiones tan altas y tener una curva Presión-Tiempo mas moderada pero de mayor tiempo de combustión, la presión no haya sido suficiente para expulsar todos los productos líquidos de la reacción de combustión, y haya sido por tanto la gravedad la que produjera la precipitación de éstos en la base del cierre posterior.
- Por último, también salta a la vista el buen estado de las juntas tóricas ubicadas en la tobera de salida. Esto hace pensar que no sólo no ha habido fugas de gases a través de esta superficie, sino que las temperaturas de los gases no han sido extremadamente elevadas y no han dado lugar a que se derritan estas juntas tóricas.



**Figura 6.24** Restos de inhibición tras la prueba en banco de Septiembre de 2020.





**Figura 6.25** Residuos en el cierre posterior tras la prueba en banco de Septiembre de 2020.



**Figura 6.26** Estado de la tobera tras la prueba en banco de Septiembre de 2020.

### Resultados y acciones correctivas

A continuación se van a enumerar los diferentes resultados y conclusiones extraídos del ensayo en banco de Septiembre de 2020. Veámoslos:

- 1. Inspección del motor:** Las cartulinas de inhibición, que inicialmente estaban situadas al fondo del grano (junto al cierre posterior) han sufrido un desplazamiento hasta el borde de la tobera, lo que puede haber dado lugar al segundo pico (6.18) que se ve en la curva Empuje-Tiempo, que de hecho tiene un comportamiento sinusoidal amortiguado, como si de un rebote se tratara. Por otro lado, como ya se ha comentado, las cartulinas de inhibición (3 capas en cada grano) se encuentran en buen estado, observándose las 3 capas. Ambas puntas de la cartulina del grano más corto (situado inicialmente más cercano al cierre posterior), están bastante quemadas. La punta más cercana a la tobera del grano largo (situado inicialmente más cercano a la tobera) casi no está quemada, manteniendo el corte recto inicial. Por otro lado, las juntas tóricas se encuentran en buen estado, siendo reutilizables, y no se aprecia salida de gases a través de ella, ni por el cierre posterior.
- 2. Observación del vídeo del ensayo:** El motor cohete funciona con la primera ignición. Tanto en el vídeo como en la curva empuje tiempo se aprecia un taponamiento e incremento del empuje al expulsar el papel del ignitor (señal senoide atenuada de empuje máximo 29,9 kg,  $t = 0,161s$ ). Los gases durante esta sobrepresión son de color oscuro lo que indica que hay combustión de papel, es decir, que debe ser debida al taponamiento de la tobera al expulsar el papel del ignitor. Se observa otra sobrepresión 1,18 s después del anterior pico de empuje al expulsar el papel del ignitor. Los gases de esta sobrepresión son blancos aumentando su

grosor en la sección de salida de la tobera. De hecho, es esta sobrepresión la que puede haber originado el movimiento de los granos de propulsante dentro de la cámara de combustión, ya que inicialmente se encontraban pegados al cierre posterior, y al realizar la inspección del motor cohete, los restos de inhibición estaban pegados a la tobera.

Es importante añadir que han desaparecido las sobrepresiones (picos de empuje de la curva, antes y/o después del máximo) observados en pruebas anteriores, causadas por un posible taponamiento al expulsar parte del liner.

También se observa al final de la combustión que se sigue quemando propulsante durante varios segundos con un 1 kg de empuje aprox.

- 3. Conclusiones:** Se observa una mejora en la curva Empuje-Tiempo, al desaparecer las sobrepresiones producidas por el taponamiento de la tobera por la expulsión de partes del liner de plástico que veíamos en el ensayo de Diciembre de 2018. También se ha incrementado el tiempo de combustión, aplanando la curva Empuje-Tiempo gracias a los granos largos. La causa de que en el grano corto se haya quemado más parte de la inhibición, es posible que sea por la colocación del ignitor a 4 cm de su extremo, quemándose antes y llegando los gases de combustión a la cartulina del grano corto antes que al largo.

El hecho de que la cartulina del grano largo tenga el corte recto en su extremo más cercano a la tobera, podría ser una prueba de que no haya habido combustión erosiva. Sí así fuera, se habría mejorado una deficiencia más del motor con respecto al ensayo anterior.

- 4. Acciones correctivas e implementaciones para el siguiente ensayo en banco:** Los detalles a tener en cuenta para el siguiente ensayo en banco son los siguientes:
- a) Valorar cambiar la posición del ignitor dentro de la cámara de combustión para evaluar su influencia en la curva Empuje-Tiempo.
  - b) Mejorar el arranque del motor taponando la tobera inicialmente con una membrana y aumentando la cantidad de propulsante. De este modo, la curva Empuje-Tiempo podría parecerse más aún a la curva teórica.
  - c) Introducir una manta aislante de fibras cerámicas ignífuga entre motor y carcasa, para evaluar la capacidad de aislamiento que confiere, ya que en el lanzamiento será esto lo que se use para separar el fuselaje de PVC de NAOS del motor cohete.
  - d) Acoplar aletas de PLA al motor cohete y medir el tiempo que permanecen robustas y sin deformación. Esto nos servirá para darnos una idea de cuánto sufrirán las aletas de PLA de NAOS durante el vuelo el día del lanzamiento.

#### 6.1.4 Ensayo en banco Diciembre 2020 (CATO)

A continuación se mostrará el que ha sido el ensayo en banco menos gratificante de todos, pero sin embargo, con el que más se ha aprendido y avanzado. Se trata de un CATO (Catastrophe At Take Off), siglas que se utilizan para dar nombre a una explosión en términos de cohetería. Veamos qué ocurrió.

##### Objetivo y preparación

Este ensayo en banco tuvo lugar el 13 de Diciembre de 2020 y tenía como objetivo realizar un ensayo en banco del motor cohete D60 de NAOS llevando a cabo las acciones correctivas de anteriores ensayos. Para ello, se fabricaron 2 granos de propulsante largos mediante un nuevo método de fabricación, que son equivalentes a 4 granos cortos como los vistos en el ensayo anterior, y que en total ocuparon un 52 % de la carga máxima del motor.

Las características principales de la prueba fueron las siguientes:

- Grano 1 (longitud 147,75 mm), Grano 2 (longitud 147 mm) (figura 6.28)
- Tipo de propulsante: KNDX (Nitrato Potásico + Dextrosa)
- Diámetro exterior de los granos: 58,51 mm
- Diámetro interior de los granos: 16 mm
- Inhibición: 3 capas de cartulina de 0,22 mm de espesor
- Se usa papel de fumar en el ignitor, sin recubrir con  $\text{KNO}_3$ , en lugar del usado anteriormente (moldes de papel para magdalenas) más grueso que sí se recubría de  $\text{KNO}_3$ . Se ha evidenciado que este ignitor desaparece en la combustión del ignitor y no deja restos que puedan taponar la tobera.
- Se tapa la salida de la tobera con una membrana (ver figura 6.27) formada por dos capas de papel para conseguir un pico de presión inicial, mejorar la ignición de los granos y el arranque del motor. El objetivo es mejorar la eficiencia del motor mediante la mejora de la curva Empuje-Tiempo y del impulso total eliminando la combustión inicial de propulsante sin generar empuje suficiente para elevar el cohete.



**Figura 6.27** Membrana de papel en la tobera del motor cohete.

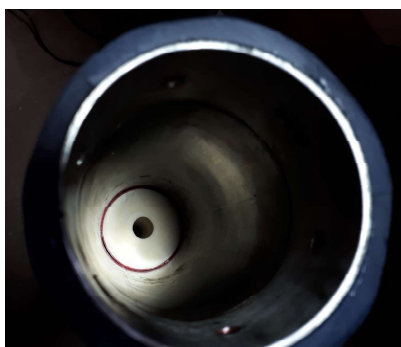
- No se pinta el interior de los granos de propulsante con pólvora negra (mezcla de alcohol y pólvora negra).



- No se introduce separador o tope para evitar el movimiento de los granos en el interior de la cámara de combustión.
- No se introduce liner (cartel "se vende")
- Posición del ignitor: Se posiciona a 4 cm del cierre posterior.
- La célula de carga se calibra para 67 kg con los datos recogidos en ensayos de la célula (ver pestaña "calibración célula de carga").
- El grano 1 (147,75 mm, que se posiciona más cercano a la tobera) es difícil de desmoldear y se le golpea con una barra de madera ligeramente para facilitar su extracción del molde. Es posible que se haya dado lugar a la aparición de grietas internas o micro roturas. El grano 2 (147 mm, que se posiciona más cercano al cierre posterior) también es difícil desmoldearlo, aunque no tanto como el anterior, y se usa la tapa posterior del motor para desmoldearlo, aplicándole golpes ligeros con la maza de plástico en la parte superior del tubo para evitar dañarlo.
- Las cuatro juntas tóricas (dos en la tobera y dos en la tapa posterior) se untan con grasa.



**Figura 6.28** Carga de 2 granos largos de propulsante para el ensayo en banco de Diciembre del 2020



**Figura 6.29** Posición de los granos de propulsante en el ensayo en banco de Diciembre del 2020 .

### Ensayo en banco

Como ya se ha anticipado, el ensayo en banco resultó ser catastrófico, ya que derivó en una contundente y poderosa explosión, destruyendo gran parte de la cámara de combustión, en banco de ensayos e incluso detuvo las grabaciones de las cámaras de vídeo alrededor mediante la onda expansiva.

|                          | valor | tiempo (s) |
|--------------------------|-------|------------|
| $P_{0max} (atm)$         | 125,9 | -          |
| $Empuje_{max} (kg)$      | 512,9 | -          |
| $Empuje_{medio} (kg)$    | 67,4  | -          |
| $I_t (N \cdot s)$        | 632,6 | -          |
| Tiempo de combustión (s) | 1,55  | -          |

Tabla 6.3. Características del motor cohete en el ensayo en banco de Diciembre de 2020

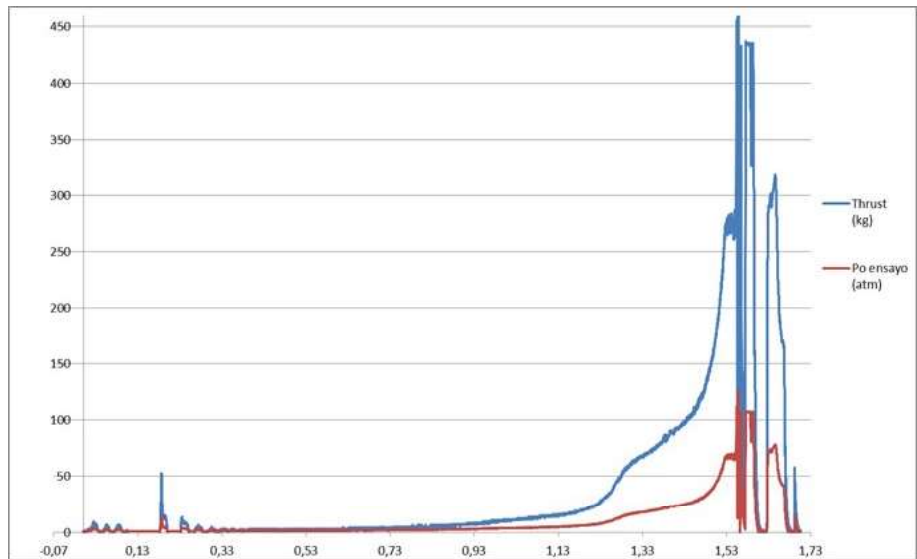


Figura 6.30 Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre de 2020.

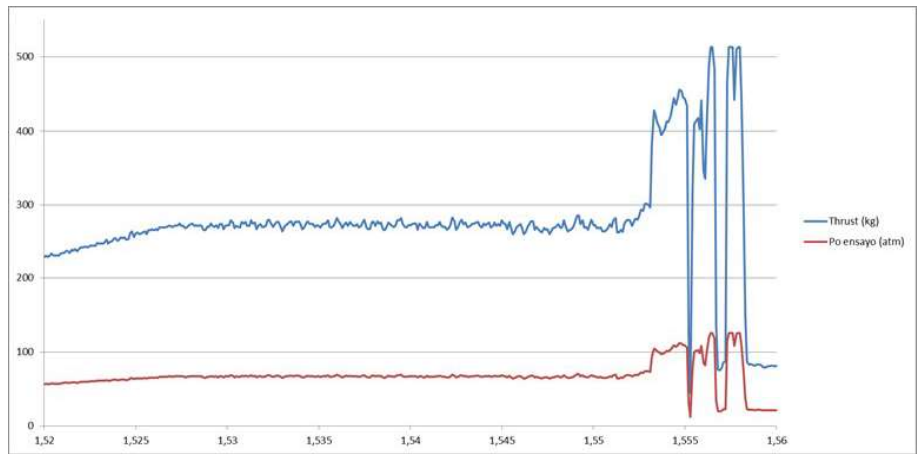
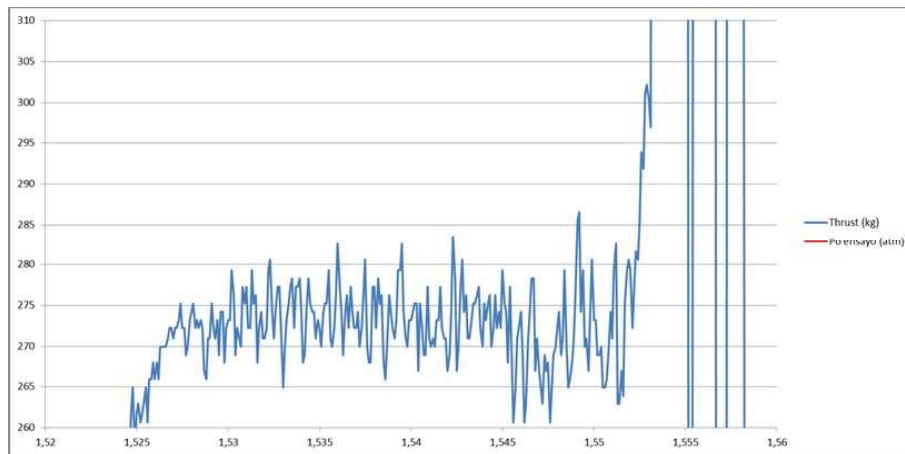


Figura 6.31 Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre 2020 (ampliado 1).

Comentemos los aspectos más característicos del ensayo en banco de Diciembre de 2020 (CATO), que se han analizado tras revisar los vídeos y las gráficas:

1. Lo que más llama la atención son los valores del empuje máximo y la presión máxima en la cámara de combustión. Está claro que dichos valores tienen sentido, ya que la explosión sobrepasó las presiones de diseño del motor generando una fuerza enorme. No obstante, estos



**Figura 6.32** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre 2020 (ampliado 2).

valores de empuje han podido verse afectados por la descalibración de la célula de carga en el momento en el que se le aplica esa tremenda fuerza.

2. En la figura 6.33 comprobamos que la explosión genera un impacto con el cual el motor cohete salde despedido del banco de ensayos. Es este impulso el que se registra en las gráficas.
3. Es apreciable también en las gráficas 6.31 y 6.32 que antes de la explosión es cohete se encuentra empujando "progresivamente" con algunas fluctuaciones, que pueden estar debidas a las vibraciones del motor, segundos antes de explotar.
4. En la figura 6.34 vemos como en un instante previo el cono de los gases de salida es extremadamente ancho, lo que se traduce en una tobera sub-expansionada, producto de las altas presiones de la cámara.



**Figura 6.33** Fotograma del ensayo de Diciembre de 2020 en el instante de la explosión.



**Figura 6.34** Fotograma de eyección de ignitor del ensayo de Diciembre de 2020, previo a la explosión.

### Inspección del motor

En este caso, la inspección del motor fue primordial para lograr comprender las razones por las que el ensayo había sido un siniestro total. A continuación se van a mostrar todas las imágenes tomadas del motor cohete tras la explosión del motor cohete el 13 de Diciembre de 2020.



**Figura 6.35** Restos de la inhibición tras el ensayo de Diciembre de 2020.

Veamos y analicemos ahora alguno de los rasgos más llamativos con respecto a la inspección "forense" de los restos del motor cohete de NAOS:

- La figura 6.36 muestra el aspecto de la tobera tras el ensayo en banco. Salta a la vista la excesiva decoloración por la temperatura, así como una zona desgastada ubicada en la garganta de la tobera. Esto nos da a entender que los gases no sólo salían con mucha velocidad, sino con altas temperaturas, llegando incluso a erosionar el acero inoxidable de la tobera. Este comportamiento podría evidenciar la presencia de una fuerte combustión erosiva dentro de la cámara durante la combustión. Vemos, además, algunas hendiduras deformadas plásticamente en la tobera.

- Ha existido, de igual modo una clara deformación plástica por desgarro de los tornillos de unión entre la carcasa y la tobera (ver figura 6.37). De hecho, uno de los desgarros llegó a partir alguno de los taladros pasantes por la mitad.
- En la figura 6.38 se aprecia que el cierre posterior ha sufrido un impacto. Al tener restos de madera, el impacto debió ser contra el banco de ensayos, produciendo esa muesca y haciendo esta pieza inservible. Sin embargo, no se perciben marcas que indiquen un escape de gases a través del cierre posterior, de modo que las juntas tóricas cumplieron su función de manera impecable.
- Veamos también que en la figura 6.39 se representa la forma con la que quedó la carcasa del motor cohete tras la explosión. Se aprecia que la rotura del motor se produjo a tracción. De hecho, si observamos las figuras 6.41 y 6.42, se comprueba la existencia de un estrechamiento en la zona de los 50 mm desde la tobera, resultado de la deformación plástica típica tras la rotura a tracción. De hecho, a pesar de la rotura de parte de la carcasa, se comprueba que la longitud es prácticamente la misma que la inicial, lo cual reitera la idea de que se produjo la rotura a tracción. Y, por último, los bordes del motor cohete se encuentran formando 45°, signo de una rotura a tracción.
- Por último, se comprueba que también se han producido dos ensanchamientos de la carcasa en las secciones de los 190 mm y los 510 mm aproximadamente. Dimensiones que coinciden casualmente con las puntas de los granos en el interior del motor. Esto pudo haberse debido a que el repentino aumento de presión se dio en la zona final de los granos de propulsante. Esto demuestra que las puntas de los granos pueden ser la zona más crítica a la hora de los aumentos de presión espontáneos.



**Figura 6.36** Aspecto de la tobera tras el ensayo de Diciembre de 2020.



**Figura 6.37** Aspecto del borde de unión tobera y carcasa tras el ensayo de Diciembre de 2020.





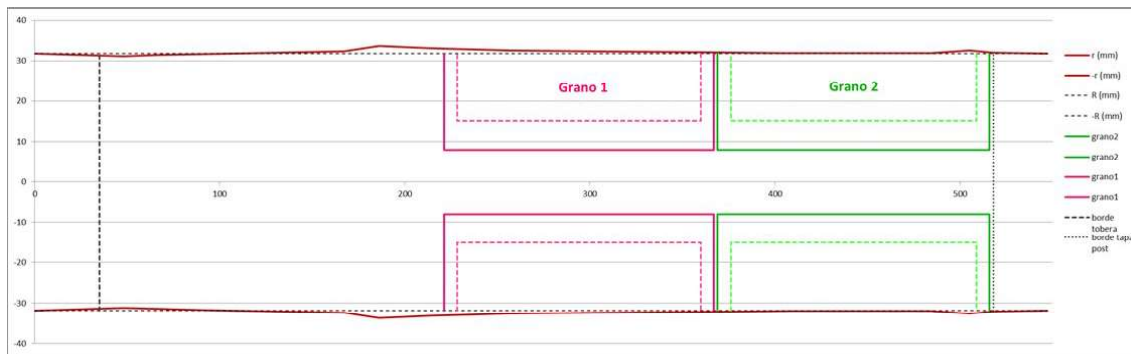
**Figura 6.38** Aspecto del cierre posterior tras el ensayo de Diciembre de 2020.



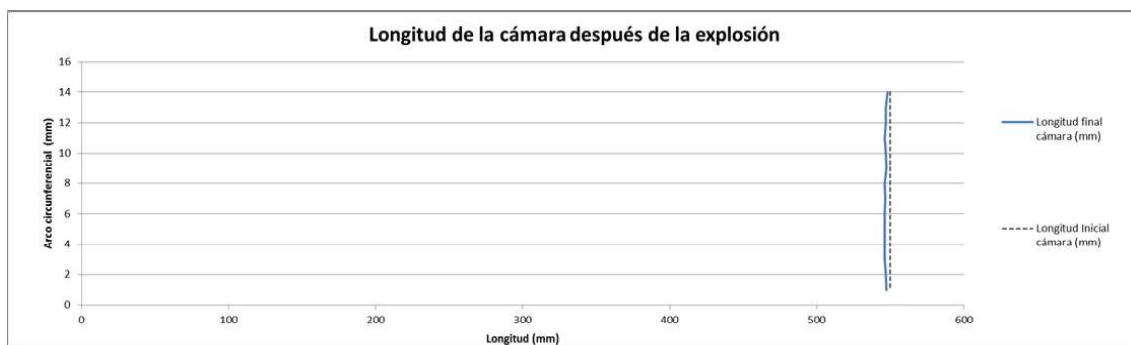
**Figura 6.39** Aspecto de la carcasa tras el ensayo de Diciembre de 2020.



**Figura 6.40** Aspecto del banco de ensayos tras el ensayo de Diciembre de 2020.



**Figura 6.41** Gráfica de las deformaciones plásticas localizadas en la carcasa del motor.



**Figura 6.42** Gráfica de las deformaciones plásticas en longitud localizadas en la carcasa del motor.

De todas maneras, todos los problemas y análisis se contemplaron en el documento de Reporte que está en los anexos, más precisamente en D.0.1. Ahí viene recogida toda la información recabada y las posibles causas del mal funcionamiento.

### Resultados y acciones correctivas

Tras el duro golpe que supuso el ensayo fallido de Diciembre de 2020, hubo que tomar medidas contundentes para lograr corregir los errores cometidos. Para ello, se tuvo que recurrir a enviar un Reporte (D.0.1) al experto en coherencia amateur, Richard Nakka. En él se exponían todos los factores involucrados en el ensayo en banco, así como distintos análisis: estructurales, químicos, térmicos, fluidodinámicos, etc. De este modo Richard Nakka podría elaborar una serie de pautas y acciones correctivas para lograr eludir los problemas de diseño en el ensayo en banco. El informe recibido de Richard Nakka es el que aparece en el apéndice D.0.2.

**Acciones correctivas e implementaciones para el siguiente ensayo en banco:** Con la ayuda de Richard Nakka se pudo volver a plantear la realización de un nuevo ensayo en banco pero con gran cantidad de métodos, trucos, elementos nuevos, rediseños, etc. Según Richard, el fallo catastrófico del motor cohete es debido a varias deficiencias que pudo comprobar a raíz del informe que se le envió. Veamos sus recomendaciones al respecto:

- 1. Diámetro interior del grano de propulsante inferior al de la garganta:** Si contamos con un diámetro del grano más pequeño que el de la garganta de la tobera, es sabido que generará problemas severos de combustión erosiva, generando un pico de presión en la curva y una no deseada sobre presión en la cámara. En los motores de propulsante basados en azúcar, Richard recomienda un diámetro interior de  $D_{int\ grano} = 1,5 \cdot D_{garganta}$ .

2. **Ausencia de espaciado entre granos de propulsante:** Aunque pueda sonar contradictorio, es importante espaciar los granos de propulsante entre ellos para permitir el quemado nominal de las puntas, tal y como se establece en los parámetros teóricos del ensayo en cuestión. Distinto sería si para la curva teórica se hubiera querido simular que las puntas de los granos estuvieran inhibidas, sin embargo, no es el caso. Pues bien, Richard recomienda usar juntas tóricas de goma para espaciar los granos de propulsante y que la curva real se aproxime más aún a la curva teórica. También añade que no se trata de un factor determinante en primera instancia para el fallo de motor, pero que sí puede haber tenido consecuencias derivadas.
3. **Mucho espacio vacío entre los granos y la cámara:** Comenta que en la zona vacía de la cámara de combustión (situada entre los granos de propulsante y la tobera) podría haberse generado un reflujo impredecible y no contemplado, de gases acumulados a alta temperatura, que puede haber fragilizado estructuralmente la carcasa del motor, haciendo que falle a una presión inferior a la de diseño. Por lo tanto, recomienda introducir un tocón de madera ajustado a la cámara de combustión, que cubra el espacio libre, y desplazar los granos de propulsante hasta pegarlos lo máximo posible a la tobera. Básicamente, hace el efecto de una cámara de combustión cargada al 100 % en cualquier ensayo, únicamente teniendo que cortar el tocón a medida para cada prueba.
4. **Deficiencia en la protección térmica de la cámara:** Señala que no haber usado liner para proteger la carcasa de las altas temperaturas de la cámara de combustión puede haber sido un factor secundario en el fallo del motor. Recomienda por tanto usar cartulina como protección térmica, algo que en cierto modo ya se estaba haciendo.
5. **Ineficiencia en la inhibición de los granos de propulsante:** Comenta que bajo un comportamiento nominal la inhibición utilizada puede ser suficiente. Sin embargo, no hay margen de error, ya que en el momento en el que el motor realice algún comportamiento indebido, la inhibición no será suficiente. Añade que éste puede haber sido un factor determinante en la explosión del motor cohete. Por lo que recomienda aumentar el espesor de la inhibición de los granos. En resumidas cuentas, se deben añadir más capas de cartulina.
6. **Granos de propulsante excesivamente ajustados a la cámara de combustión:** Los granos de propulsante tienen muy poco espaciado entre sus paredes exteriores y la carcasa de la cámara de combustión. Por lo tanto, se recomienda una holgura de 0,25 mm entre ambas superficies para permitir que los granos tengan libertad de deslizamiento, aunque en la práctica no deban hacerlo.
7. **Posible aparición de grietas en los granos de propulsante:** Se comenta que en la extracción de los granos pudo haberseles generado grietas internas a los granos de propulsante mediante los golpes aplicados en la extracción de los moldes. Richard mantiene que este puede haber sido un factor clave en el fallo del motor y recomienda usar parafina para facilitar la extracción del grano del molde. Por decisión propia, también se decide volver a los granos cortos vistos en los ensayos anteriores.
8. **Densidad de los granos de propulsante muy alejada de la ideal:** Por último, Richard asegura que la deficiencia en la densidad de los granos de propulsante ha sido un factor crítico en la explosión. Dice que él desecha granos que estén por debajo del 92 % de relación de densidad real entre ideal. Tanto es así, que las relaciones de los granos introducidos en esta prueba (86,9 % y 85,4 %) pueden evidenciar la existencia de impurezas o burbujas dentro de los lotes de propulsante, siendo peligroso para la combustión. Por ello, recomienda replantear todo el proceso de fabricación de los granos de propulsante. De hecho, el proceso recomendado es el que se ha explicado en esta memoria con anterioridad, ya actualizado y con las operaciones de fabricación optimizadas.

Con todas estas nuevas implementaciones ya sólo queda fabricar un motor cohete nuevo. En este caso se adaptará la tobera, tal y como se explicó en el capítulo de diseño de esta memoria, y se procederá a un último ensayo en banco, previo al esperado lanzamiento de NAOS.

### 6.1.5 Ensayo en banco Abril 2021

#### Objetivo y preparación

Este ensayo en banco tuvo lugar el 21 de Abril de 2021 y tenía como objetivo realizar un ensayo en banco del motor cohete D60 de NAOS previo a su lanzamiento. El motor se carga con 1094,4 g de propulsante sólido

Las características principales de la prueba fueron las siguientes:

- Grano 1 (longitud 61,35 mm), Grano 2 (longitud 61,30 mm), Grano 3 (longitud 55,88 mm), Grano 4 (longitud 58,09 mm), Grano 5 (longitud 56,84 mm) (figura 6.43)
- Tipo de propulsante: KNDX (Nitrato Potásico + Dextrosa)
- Diámetro exterior de los granos: 58,23 mm
- Diámetro interior de los granos: 25 mm
- Inhibición: 4 capas de cartulina de 0,2 mm de espesor
- Sí se pinta el interior de los granos de propulsante con pólvora negra (mezcla de alcohol y pólvora negra), ver figura 6.43.
- Sí se introduce separador entre los granos de propulsante (juntas tóricas de 4 mm de espesor).
- La masa del nuevo motor cohete sin propulsante y con la nueva tobera adaptada es de 2106,3 g.
- Se introduce un cilindro de madera macizo en la parte posterior del motor (junto al cierre posterior) de forma que los granos estén junto a la tobera y se rellene el volumen vacío al tener la cámara a máxima carga de propulsante.
- El ignitor se posiciona al fondo de la cámara, junto al cilindro de madera. También se incrementa la cantidad de pólvora de ignición.
- Varios granos se han desechado antes de la prueba porque se deforman y salen grietas (en algunos casos grandes, en el agujero central) debido a tensiones internas residuales tras la aplicación de presión con el sargento. Se han seleccionado los granos con menos grietas y menos deformados, habiendo hecho pruebas de combustión de un grano con grietas para ver su efecto en la velocidad de combustión observándose que es aceptable.
- **Observación:** Los granos son bastante flexibles internamente y más rígidos-frágiles en las puntas.



**Figura 6.43** Carga de 5 granos cortos de propulsante para el ensayo en banco de Abril de 2021 .

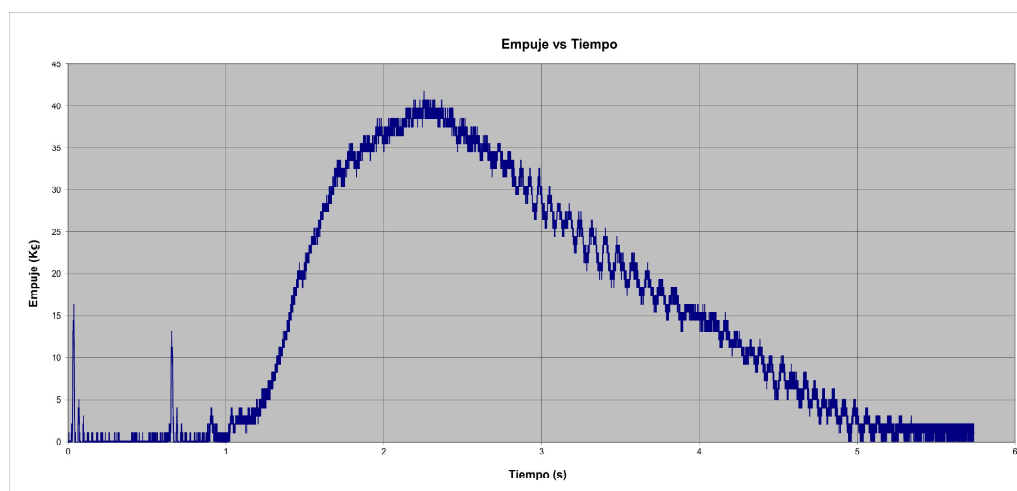
### Ensayo en banco

Tras realizar el ensayo en banco y registrar los datos de Empuje(kg)-Tiempo(s) mediante el equipo de adquisición de datos y la célula de carga, cuya calibración aparece indicada en las hojas "procedimiento de calibración" y "calibración célula de carga", se obtuvo la siguiente curva. En ella también se han añadido las curvas Empuje-Tiempo teórica y Presión en cámara-Tiempo teórica y real. Además, también se adjuntan las principales prestaciones del motor cohete y la simulación del lanzamiento.

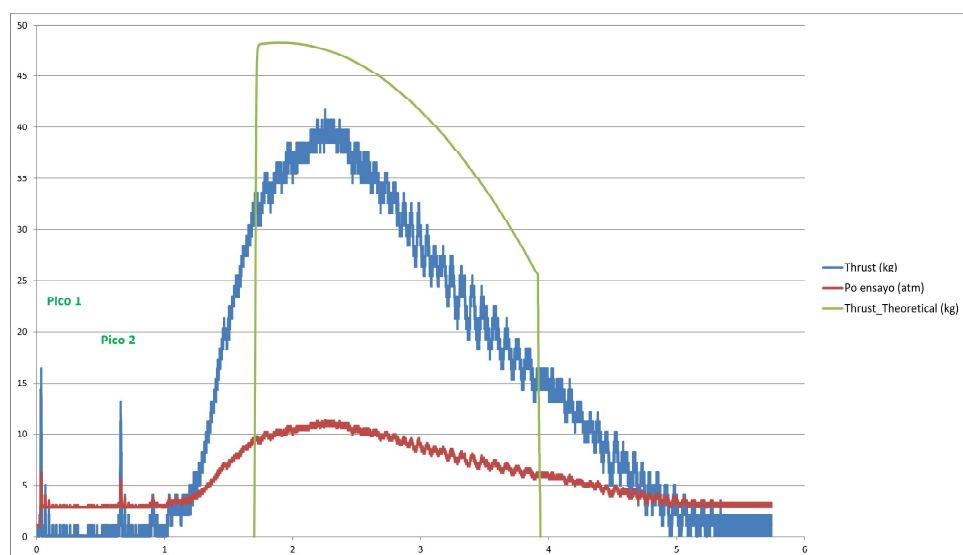
|                                         | valor | tiempo (s) |
|-----------------------------------------|-------|------------|
| $P_{0max}$ (atm)                        | 11,5  | -          |
| $Empuje_{max}$ (kg)                     | 41,7  | -          |
| $Empuje_{medio}$ (kg)                   | 22,6  | -          |
| $a_{max}$ ( $g's$ )                     | 6     | 2,2        |
| $a_{max}$ ( $m/s^2$ )                   | 59    | 2,2        |
| $v_{max}$ (m/s)                         | 99    | 4,55       |
| $v_{max}$ (km/h)                        | 356,4 | 4,55       |
| Apogeo (m)                              | 674   | 14,1       |
| $D_{max}$ , Drag (kg)                   | 1,63  | 26,54      |
| $I_t$ ( $N \cdot s$ )                   | 843   | -          |
| Tiempo hasta apertura de paracaídas (s) | 14,1  | -          |
| Tiempo de combustión (s)                | 3,70  | -          |
| Tiempo sin paracaídas (s)               | 26,5  | -          |
| Tiempo con paracaídas (min)             | 2,67  | -          |

Tabla 6.4. Prestaciones simulación lanzamiento Abril 2021

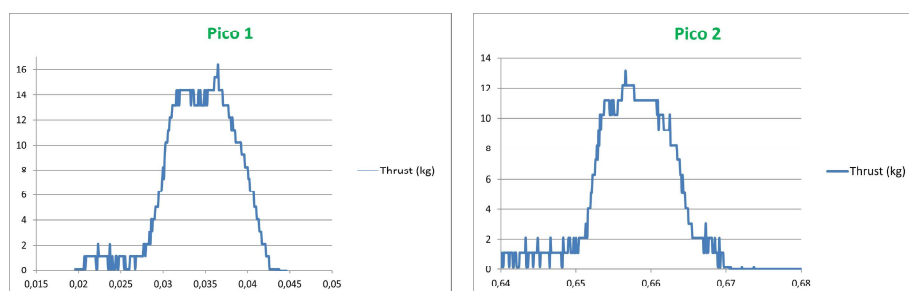




**Figura 6.44** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Abril 2021.



**Figura 6.45** Curva Empuje-Tiempo real y teórica del ensayo en banco de Abril 2021.



**Figura 6.46** Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Abril de 2021 con picos ampliados.

Veamos de igual modo dos gráficas, las figuras 6.47 y 6.48 muestran la gráfica de aceleración, velocidad y altura en el caso de que el paracaídas se abra correctamente, mientras que en las figuras 6.49 y 6.50 se representa el caso en el que el cohete cayera en caída libre, por fallo de paracaídas.

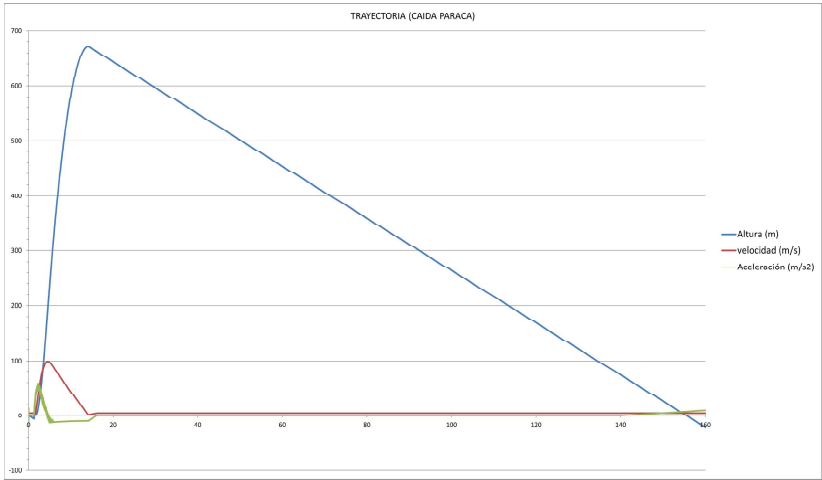


Figura 6.47 Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Abril de 2021.

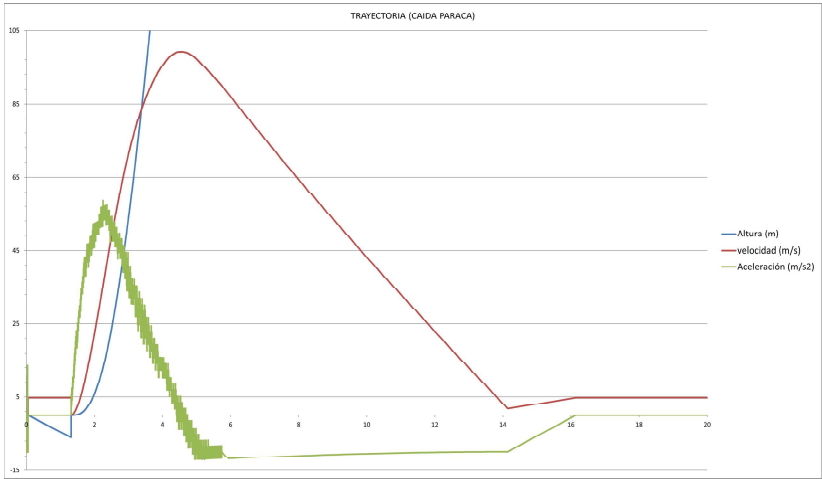
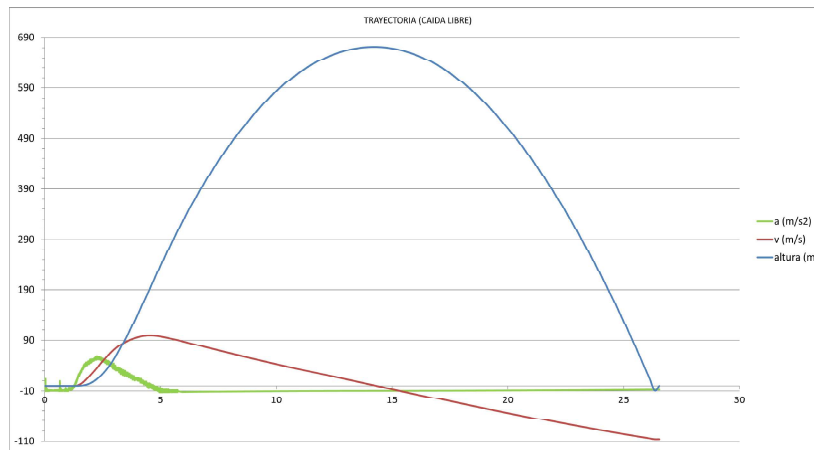
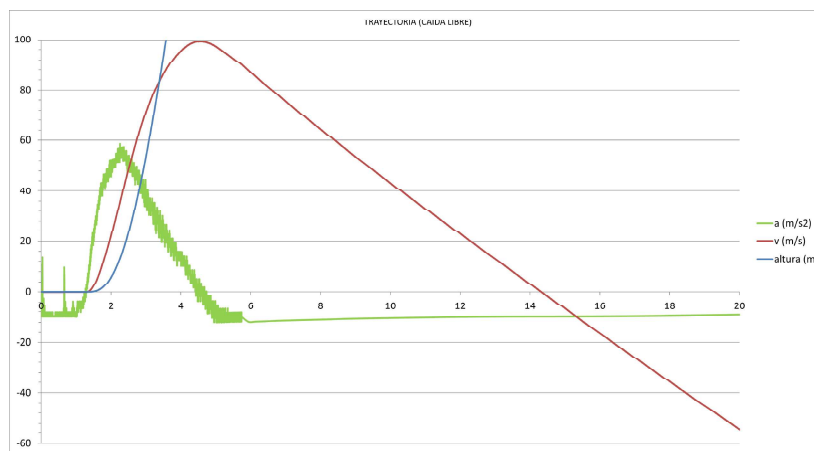


Figura 6.48 Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Abril de 2021 (Zoom).



**Figura 6.49** Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Abril de 2021.

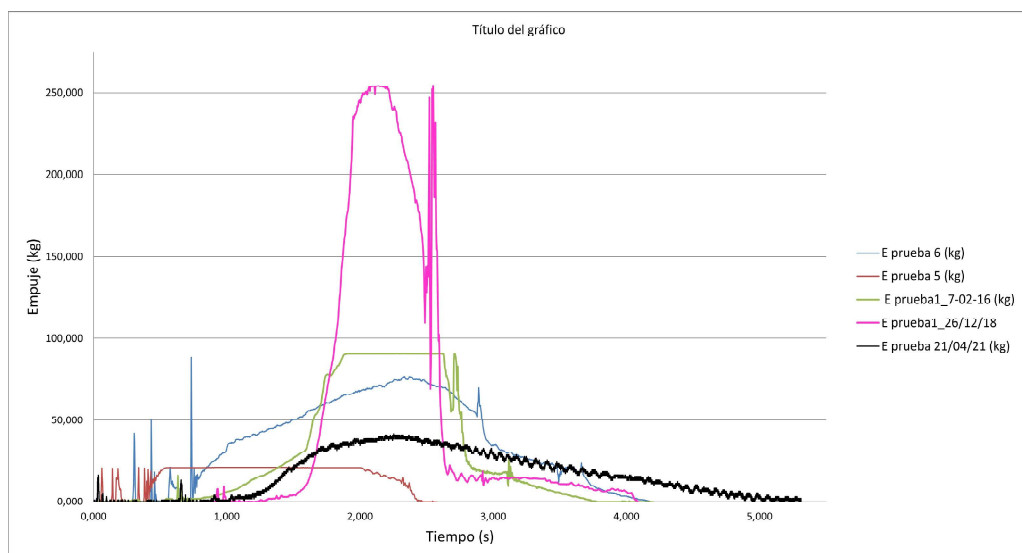


**Figura 6.50** Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Abril de 2021 (zoom).

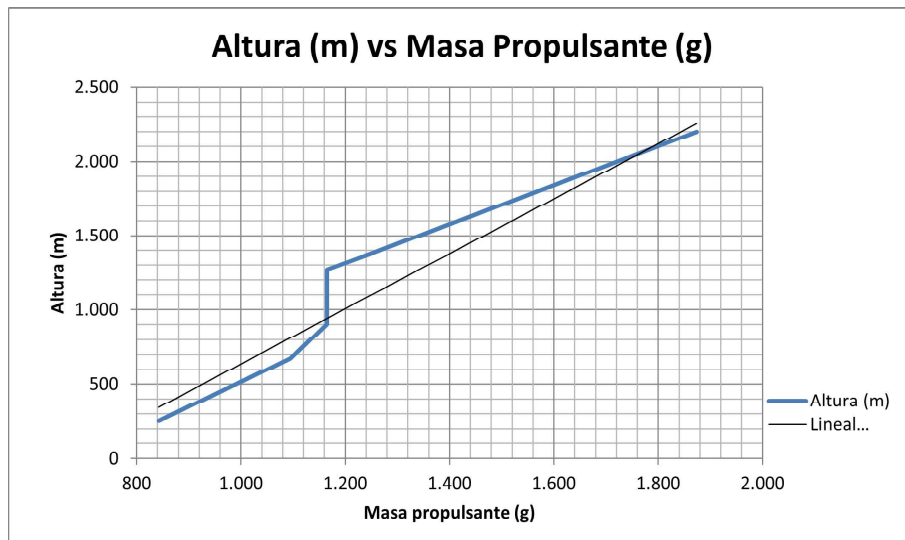
Comentemos los aspectos más característicos del ensayo en banco de Abril de 2021, así como algunos comportamientos indeseados. A continuación se hace una lista de dichos rasgos:

1. Tras las implementaciones recomendadas por Richard Nakka y fijándonos en la figura 6.45, vemos la gran similitud entre la curva Empuje-Tiempo real y teórica. Es lógico comprobar que las curvas tienen la misma tendencia, aunque en la curva real tenemos la zona de "Start-up" y la zona de "Tail-Off", ambas debidas al arranque del propulsante y a la disipación por completo de toda la presión en cámara tras la combustión completa del propulsante. Sin embargo, si en lugar de comparar la forma, comparamos el área bajo la curva (Impulso total) vemos que son muy similares (897 N·s para la teórica y 843 N·s para la real).
2. En la gráfica de Empuje-Tiempo se observan dos picos muy característicos (ver 6.46). El primero de ellos se debe a la expulsión repentina de los gases al quemarse el ignitor (que recordemos que tiene mayor cantidad de pólvora negra) y la pólvora negra que bordea el interior de los granos de propulsante. Unas milésimas de segundo después de esta sobrepresión se expulsa ignitor (figura 6.53), dando lugar al segundo pico. Es importante destacar que los picos no se tratan de una rebote, ya que no se percibe la sinusoidal atenuada típica de estos.
3. Destacar que los granos de propulsante han sido pintados con pólvora negra en su interior para hacer que el incremento inicial de presión ("Start-Up") sea más rápido. Efecto que se ha logrado y se aprecia en las figuras 6.44 y 6.51.

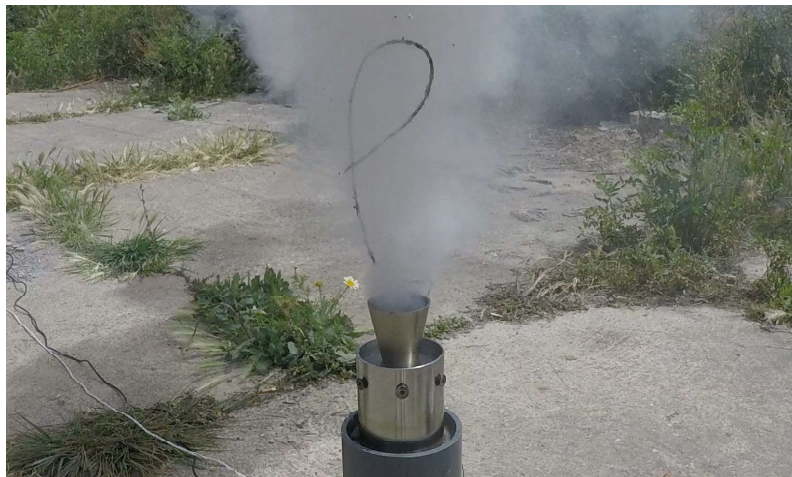
4. Llama la atención también que si nos fijamos en la gráfica 6.51 el tiempo de combustión de este ensayo es muy superior al del resto de pruebas en banco realizadas, llegando al objetivo marcado de obtener una curva con igual impulso total, menor empuje máximo pero con mayor tiempo de combustión, ya que estará manteniendo el empuje del cohete durante un tiempo más prolongado.
5. Se ha incluido la gráfica 6.52 de la altura que se alcanza con el mismo motor cohete en función de la carga de propulsante que se incorpore en éste. En ella se ha incluido información de todo el histórico de ensayos llevados a cabo hasta el momento con este motor cohete en particular. Como vemos, la tendencia se puede aproximar vagamente a una tendencia lineal. Esto nos permite predecir a grandes rasgos cómo va a ser el comportamiento y las prestaciones con respecto al apogeo en el caso de añadir una mayor o menor carga. Esto puede ser útil, como veremos, en el caso en el que se quiera realizar un lanzamiento con algo más de carga de propulsante del que se añadió en el ensayo en banco. Para no tener que realizar otro ensayo en con un poco más de carga y no gastar recursos y tiempo, se puede usar esta curva para predecir cualitativamente lo que ocurrirá.
6. Fijémonos con detenimiento en el flujo de salida de gases de la captura 6.53. Si recordamos la teoría de toberas (3.25) veremos que para que una tobera se encuentre adaptada el flujo de gases debe permanecer paralelo al eje longitudinal del motor cohete. Esa es la forma visual de identificar este régimen.



**Figura 6.51** Comparativa del ensayo de Abril de 2021 con pruebas anteriores.



**Figura 6.52** Gráfica de historico de ensayos en banco. Comparación de Masa de Propulsante y Apogeo alcanzado.



**Figura 6.53** Fotograma del ensayo de Abril de 2021 en el instante de eyección del ignitor.



**Figura 6.54** Fotograma del ensayo de Abril de 2021 en el instante de Tobera Adaptada.





**Figura 6.55** Fotografía aérea del ensayo en banco de Abril de 2021.

#### **Inspección del motor**

En este caso, la inspección del motor es un factor esencial en este ensayo. Ya que se quiso comprobar la eficacia de las nuevas tecnologías y procedimientos integrados en el motor. Con el estudio "forense" del motor cohete se logra sacar mucha información en este ensayo en particular. Veamos en primer lugar el magnífico estado en el que quedó la inhibición tras la prueba.



**Figura 6.56** Restos de la inhibición tras el ensayo de Abril de 2021.



**Figura 6.57** Restos de la inhibición tras el ensayo de Abril de 2021 (ampliados).

- Es apreciable que los restos de la inhibición están prácticamente enteros y no han sufrido

apenas quemaduras. De hecho, en muchos de ellos aun se pueden leer las características del grano. Todo ello demuestra un trabajo de inhibición del motor cohete impecable, y considerablemente mejor al del resto de ensayos realizados con anterioridad.

- Es curioso analizar todas las juntas tóricas. Las que se encontraban en el cierre posterior (6.59) están casi intactas, pudiéndose ver incluso la grasa que se le aplicó antes de la prueba para facilitar su integración con el motor. Esto podría ser resultado del taponamiento y aislamiento que en parte ha hecho el tocón de madera. Sin embargo, este no es el caso de las juntas tóricas separadoras de granos (6.60) ni de las juntas tóricas de la tobera (6.58) que se han encontrado en contacto directo con el flujo caliente de los productos de la combustión.
- Al inspeccionar el tocón de madera, llama la atención que la decoloración y quemado de éste se ha producido por la zona inmediatamente en contacto con el flujo de gases, mientras que la zona más cercana al cierre posterior (segunda imagen de la figura 6.61) aún mantiene el color madera y apenas ha sido afectada por la temperatura y la presión. No obstante, se observa una acumulación de los restos chamuscados de inhibición (6.62) que han precipitado por gravedad.
- El tocón de madera está en tan buen estado que si se le sierra una pequeña laja de la zona más quemada, puede volver a utilizarse para otro ensayo en banco o lanzamiento.
- Este fue el primer ensayo en banco con la nueva tobera convergente-divergente adaptada, y como se puede observar en 6.58 ya se ha producido una leve decoloración del acero, como viene siendo costumbre.
- Por otro lado, si miramos la figura 6.57, el motor cohete que se encuentra tras los restos de la inhibición no ha sufrido ninguna decoloración, lo que evidencia un buen empleo de la cartulina, no sólo para inhibir los granos sino también para aislar la carcasa del motor.



**Figura 6.58** Aspecto de la tobera tras el ensayo de Abril de 2021.



**Figura 6.59** Aspecto del cierre posterior tras el ensayo de Abril de 2021.



**Figura 6.60** Estado de las juntas tóricas de separación de granos de propulsante tras el ensayo de Abril de 2021.



**Figura 6.61** Aspecto de la carcasa tras el ensayo de Abril de 2021.



**Figura 6.62** Estado del tocón de madera tras el ensayo de Abril de 2021.

En líneas generales, este ensayo ha sido todo un éxito no sólo habiendo logrado corregir los fallos cometidos en la anterior prueba, sino habiendo mejorado las prestaciones del motor considerablemente con respecto al resto de ensayos exitosos realizados con anterioridad

### Resultados y acciones correctivas

A continuación se van a enumerar los diferentes resultados y conclusiones extraídos del ensayo en banco de Septiembre de 2020. Veámoslos:

1. **Inspección del motor:** La inhibición ha funcionado correctamente. El inhibidor de cartulina de los granos se encuentra casi al completamente en los cinco granos, evidenciándose en buen estado 3 de las 4 capas iniciales. Por otro lado, las juntas tóricas de la tobera se han fundido, estando peor la más cercana a la cámara de combustión. El resto se encuentran en buen estado.
2. **Observación del vídeo del ensayo:** El motor funciona con la primera ignición. El arranque del motor es mucho mejor que en pruebas anteriores (la pendiente inicial de la curva Empuje-Tiempo es mucho mayor), debido a la mayor cantidad de pólvora negra de ignición usada. El recubrimiento con pólvora negra de las superficies no inhibidas de los granos también mejora el arranque inicial.

Se observa que el  $I_t$  y el empuje del motor es un 19 % menor que el teórico con 95 % de eficiencia en la combustión. Se estima que la eficiencia es menor debido a la baja presión en cámara y se recalcula la curva teórica con un 70 % de eficiencia. De este modo, las curvas teórica y real se aproximan mucho más.

Se observan dos picos iniciales de presión debidos a la expulsión de los cables de ignición.

3. **Conclusiones:** La célula de carga se calibra para 80 kg con los datos recogidos en ensayos de la célula (ver hoja "Calibración célula de carga").

Debido al uso de la tobera adaptada se ha reducido el área de la sección del chorro de los gases de escape. Como consecuencia ahora el ángulo de salida del chorro de los gases es bastante menor. De hecho, ahora tenemos una tobera más cercana a la adaptación.

4. **Acciones correctivas e implementaciones para el siguiente ensayo en banco:** En este caso no hay demasiadas correcciones para la siguiente prueba ya que los resultados de ésta han sido excelentes. Sin embargo, se recomienda:
  - a) Seguir usando el mismo proceso de fabricación de granos, manteniendo los granos en los moldes después de su fabricación hasta la prueba.
  - b) Hacer prueba con el motor al 100 % de carga de propulsante para aumentar la presión en cámara y conseguir mayor eficiencia de la combustión.
  - c) Poner más cantidad de pólvora negra de ignición. De este modo se logrará aumentar aún más rápido la zona de "Start-Up" y la curva real será más parecida a la real.
  - d) Seguir recubriendo las supercifies de los granos con pólvora negra.

## 6.2 Pruebas del sistema electrónico y telemétrico

Las pruebas del sistema electrónico fueron determinantes para evaluar las prestaciones reales de los dispositivos que se habían diseñado. Únicamente se explicaran de manera cualitativa. Veamos en qué consistieron.

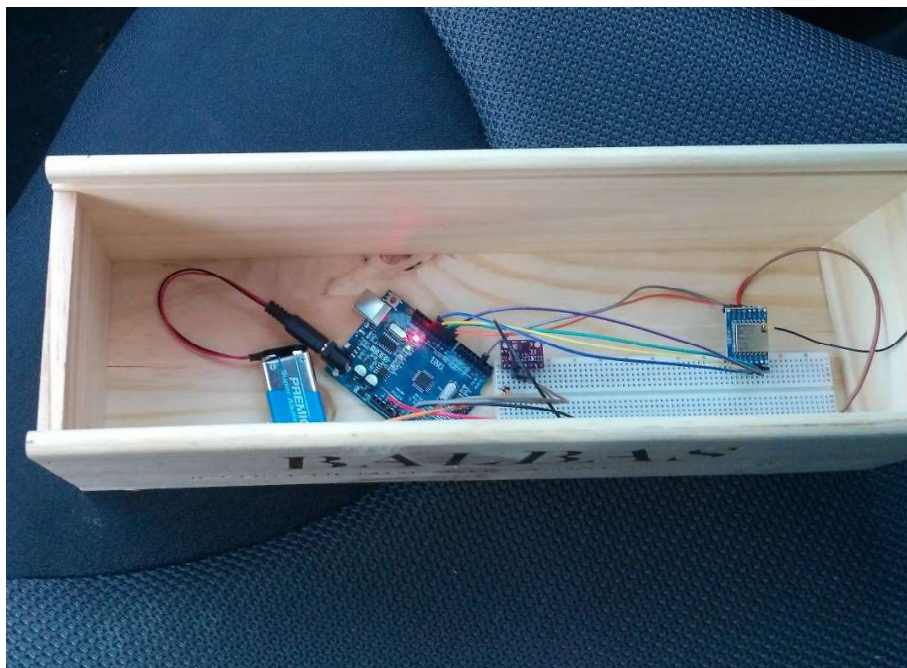


### 6.2.1 Prueba de alcance del LoRa

La prueba de alcance consiste en situar el dispositivo de rastreo y telemetría en un vehículo e ir alejándose progresivamente. En este caso, se situó el dispositivo en un coche (ver figura 6.63). Por otro lado, el receptor debe situarse en un punto fijo y a la mayor altura posible para comprobar en todo momento cuándo recibe o deja de recibir señal (figura 6.64). Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas:

- **Alcance con obstáculos:** Esta prueba consistía en comprobar el alcance de la antena en el caso de que hubiera elementos entre el emisor y receptor que apantallaran la transmisión de los paquetes de datos. Este experimento se llevó a cabo en numerosas ocasiones, llegándose a obtener una distancia máxima en línea recta de aproximadamente 5,4 km.
- **Alcance en línea de visión directa:** Esta prueba se realizó en lo alto de una montaña con línea de visión directa del coche en el que se encontraba la antena emisora. Esto permitió eliminar todos los obstáculos de por medio que pudieran disminuir la señal. En este caso se obtuvo un alcance máximo de 8,3 km. De hecho, este experimento es el que mejor representa la situación que se dará en el lanzamiento de NAOS.

Es importante añadir también, que se hicieron pruebas entre las antenas con mayor y menor ganancia para comprobar su comportamiento. En base a esto se decidió situar en el cohete NAOS la antena con menor ganancia de señal pero con un mejor comportamiento en la omnidireccionalidad, mientras que en el equipo terrestre se situaría la antena con mayor ganancia de señal (más alcance) pero con un comportamiento más direccional, por lo que se deberá ir direccionando manualmente hacia el dispositivo emisor para lograr la transmisión de datos.



**Figura 6.63** Prototipo de pruebas del dispositivo de rastreo y telemetría.



**Figura 6.64** Equipo de terrestre de recepción de datos.

### 6.2.2 Prueba del IMU y Lector Micro SD

La prueba más característica realizada fue introducir el dispositivo de registro de medidas inerciales junto con la batería en una lavadora. Tras hacerlo, se encendería la lavadora anulando el flujo de agua en ella, generando en el dispositivo una enorme aceleración centrífuga y ver si éste sería capaz de realizar las mediciones pertinentes y con qué precisión. Se conocía tanto la velocidad angular del tambor de la lavadora (800 rpm) como su diámetro. Con ello se calculó el valor de la aceleración centrífuga para luego poder comparar con los datos medidos por el dispositivo.

Otros ensayos llevados a cabo fueron los siguientes:

- Se coloca el dispositivo de registro de medidas inerciales en todas las posiciones de los ejes del IMU para comprobar que todos ellos registran la aceleración de la gravedad (9,8 m/s) correctamente. Se observa algo de variación en las mediciones.
- Se suben dos plantas de un piso con el dispositivo para comprobar que calcula correctamente los valores de la altura, en este caso se calculan mediante la diferencia de altitudes entre las dos mediciones.
- También se comprueba que la altitud que marca de base corresponder a la altitud de la zona en la que se ubica.
- Se realiza una prueba de orientación del magnetómetro, apuntando el dispositivo hacia el norte un rato para, posteriormente identificar las mediciones en el archivo de registro.
- Por último se realiza una comparación entre la temperatura que marca el dispositivo con respecto a la temperatura ambiente en ese momento. Los resultados en este caso presentar discrepancias bastante visibles.



### 6.2.3 Prueba de temporización del Timer

La prueba del temporizador del dispositivo Timer es muy simple. En primer lugar se regula la resistencia variable en función de si se requiere un mayor tiempo de retardo o no. Se enchufa la batería, se retira el trigger y se inicia la cuenta atrás. Es imprescindible tener a mano un cronómetro y contabilizar el tiempo transcurrido. Sabremos que el dispositivo Timer activa la salida "ignitor" cuando, colocando los dos polos de un multímetro, recibamos el voltaje correspondiente. Esta prueba será conveniente hacerla varias veces hasta que se consiga ajustar el tiempo deseado. De hecho, será imprescindible hacerla en los días previos al lanzamiento, para establecer el tiempo de retardo para la apertura del paracaídas que indican los archivos excel de los ensayos en banco mostrados con anterioridad.



Figura 6.65 Timer.

## 6.3 Pruebas del sistema de liberación y recuperación

Quizás sean éstas las pruebas más críticas para asegurar el correcto lanzamiento de NAOS. Como sabemos el conjunto del Sistema de Liberación y el Sistema de Recuperación son esenciales para garantizar la recuperación del cohete y la seguridad de los espectadores. El cohete debe descender lentamente una vez llegado al apogeo. Para ello debe eyectarse correctamente el paracaídas y cumplir su función de aminorar la velocidad de descenso de NAOS. Veamos cuáles fueron los ensayos llevados a cabo.

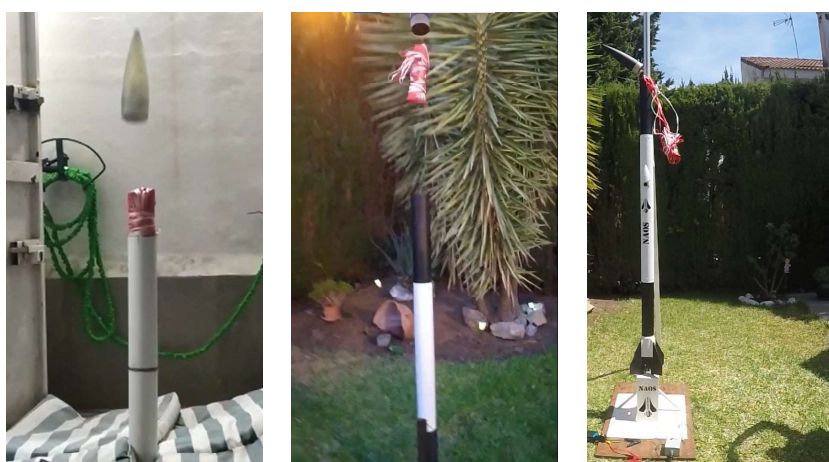
### 6.3.1 Prueba de liberación del paracaídas

Antes de proceder a la prueba del Sistema de Liberación deben haberse hecho numerosas pruebas del plegado del paracaídas (ver figura 6.66), hasta conseguir optimizar el espacio libre dentro del alojamiento del Sistema de Recuperación.

Una vez optimizada la encapsulación del paracaídas llega el momento de realizar un ensayo del Sistema de Liberación. Para ello, deben haberse hecho las pruebas anteriormente mencionadas del temporizador del Timer, para ajustar el tiempo deseado de apertura del paracaídas. Ya sólo queda fabricar un ignitor, anclarlos al Sistema de Liberación y conectar los cables al Timer. Se activará el Trigger e iniciará la cuenta atrás hasta la eyección del paracaídas. En algunas pruebas que se realizaron el Sistema funcionaba correctamente, pero el paracaídas no salía por completo (ver imagen 1 de la figura 6.67). Lo que hubo que hacer para solucionarlo fue ajustar aún más el empaquetamiento del paracaídas para disminuir la fricción con las paredes internas del fuselaje.



**Figura 6.66** Pruebas de plegado del paracaídas.



**Figura 6.67** Pruebas de plegado del paracaídas.

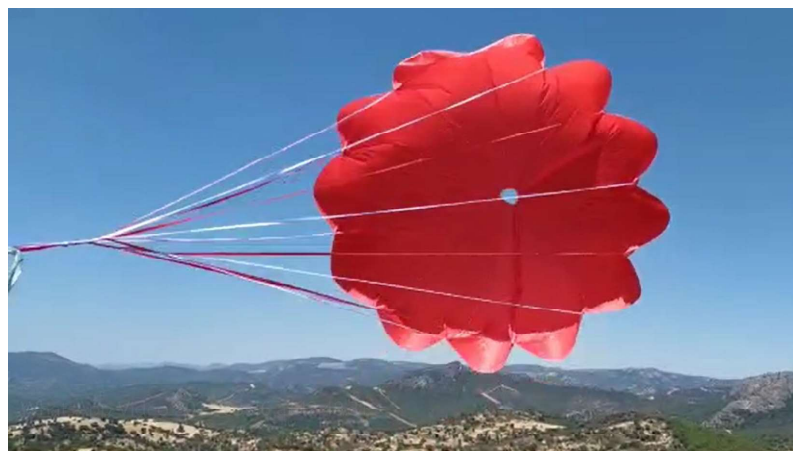
### 6.3.2 Prueba de apertura del paracaídas

Sin lugar a dudas, esta es la prueba más difícil de realizar y la más crítica. Se debe asegurar que tras la eyección del paracaídas, el tiempo de apertura del mismo es tal que no propicie que el cohete se acelere en exceso y el tirón en la apertura no sea aún mas agresivo. Para ello se llevaron a cabo dos pruebas diferentes:

- La primera de ellas consistió en empaquetar completamente el paracaídas, montarlo en un coche, mantener el vehículo a la velocidad a la que se supone que según los cálculos debe abrirse el paracaídas en función del tiempo hasta la apertura y la simulación del lanzamiento vista en el apartado de los ensayos en banco. Una vez el coche está a esa velocidad, el paracaídas se suelta por la ventanilla y se cronometra el tiempo que tarda en abrirse por completo. En la prueba llevada a cabo el tiempo de apertura fue alrededor de unos 3 segundos a una velocidad de aproximadamente 60 km/h.
- La otra prueba consistía en lanzar el paracaídas desde altura, con una carga que pesara lo mismo que el cohete en vacío, es decir 5,86 kg. En las figuras 6.68 y 6.69 podemos ver la forma del paracaídas completamente desplegado.



**Figura 6.68** Pruebas de plegado del paracaídas.



**Figura 6.69** Pruebas de plegado del paracaídas.

A pesar de todas las pruebas realizadas nunca se tiene toda la confianza que se desearía en los diferentes sistemas, ya que dependen de innumerables factores, muchos de ellos impredecibles o incalculables. Así como muchos elementos que pueden fallar y causar el siniestro. Sin embargo, las pruebas son una parte esencial del progreso y la ganancia de confianza en el sistema que se quiere probar.

## 6.4 Lanzamiento de NAOS Mayo 2021

En esta sección se hablará al fin, del tan esperado lanzamiento del cohete NAOS. Tras varios años de desarrollo de la tecnología y optimización de los procesos, se está en disposición de llevar a cabo un lanzamiento. El apogeo estimado del lanzamiento será de unos 671 metros de altura. Vamos a ver cómo fue el proceso de ensamblaje, preparación y organización del lanzamiento de NAOS.

### Preparación del lanzamiento de NAOS

Este ensayo en banco tuvo lugar el 21 de Abril de 2021 y tenía como objetivo realizar un ensayo en banco del motor cohete D60 de NAOS previo a su lanzamiento. El motor se carga con 1094,4 g de propulsante sólido

Las características principales de la prueba fueron las siguientes:

- Grano 1 (longitud 59 mm), Grano 2 (longitud 59,86 mm), Grano 3 (longitud 59 mm), Grano 4 (longitud 61,04 mm), Grano 5 (longitud 60,76 mm) (figura ??)
- Tipo de propulsante: KNDX (Nitrato Potásico + Dextrosa)
- Diámetro exterior de los granos: 58,23 mm
- Diámetro interior de los granos: 25 mm
- Inhibición: 4 capas de cartulina de 0,2 mm de espesor
- Sí se pinta el interior de los granos de propulsante con pólvora negra (mezcla de alcohol y pólvora negra).
- Sí se introduce separador entre los granos de propulsante (juntas tóricas de 4 mm de espesor).
- La masa del motor cohete sin propulsante y con la nueva tobera adaptada es de 2106,3 g.
- No se ha podido conseguir porcentajes de densidad real/ideal en los granos altos pero se ha conseguido eliminar las deformaciones y grietas.
- Se introduce un cilindro de madera macizo en la parte posterior del motor (junto al cierre posterior) de forma que los granos estén junto a la tobera y se rellene el volumen vacío al tener la cámara a máxima carga de propulsante.
- El ignitor se posiciona al fondo de la cámara, junto al cilindro de madera. También se incrementa la cantidad de pólvora de ignición.
- Se usa pólvora negra en el ignitor del motor con la máxima cantidad admisible en la mitad de una papelina de tabaco tamaño grande.
- El peso del cohete se mide antes del lanzamiento en una báscula, pesando 7,2 kg sin aletas (peso/aleta= 60 g), lo que implica un peso de 7,49 kg del cohete completo (incluyendo 1,1 kg de propulsante sin inhibición. La inhibición de los granos se estima que pesa 45g).
- El timer se ajusta a 10,5s aunque el apogeo se alcanza 11,7 s después de liberar el trigger, con el objetivo de tener en cuenta el tiempo de liberación del paracaídas (se han hecho pruebas y se ha visto que tarda unos segundos en salir por el efecto del muelle) y para mitigar los riesgos y reducir la tensión en la línea del paracaídas debido a la velocidad del cohete, de forma que tenga otros segundos después del apogeo para no llegar a una alta velocidad.
- Tanto para la preparación y puesta a punto del cohete, como para los procedimientos a seguir el día del lanzamiento, se han elaborado dos Check lists que se pueden consultar en los apéndices E.0.1 y E.0.2.



**Figura 6.70** Carga de 5 granos cortos de propulsante (sin pintar con pólvora negra) para el Lanzamiento de NAOS de Mayo de 2021 .

Durante la preparación del lanzamiento se tuvo que montar la plataforma de lanzamiento y acoplar el cohete a ella (ver 6.71). Una vez que se montó todo el sistema cohete-rampa se procedió a una charla informativa de las principales prestaciones del cohete, así como sus diferentes sistemas incorporados. Como apoyo a la explicación se repartió un tríptico, mostrado en el apéndice E.0.3. Seguidamente se procedió a la charla informativa (6.72)



**Figura 6.71** Anclaje de cohete NAOS a rampa de lanzamiento.





**Figura 6.72** Charla informativa impartida por Álvaro Sáez Zapata.

Tras ello, y siguiendo a rajatabla el resto de items de la check list, NAOS estaba preparado para el lanzamiento (6.73, 6.74). Además, se tomó una "foto familia" de todos los asistentes y espectadores junto al cohete NAOS (6.75). Y como no podía ser de otra forma, también se incluye una foto de NAOS con sus dos creadores: Jesús Sáez y Álvaro Sáez (6.76).



**Figura 6.73** NAOS en rampa de lanzamiento. Imagen 1.



**Figura 6.74** NAOS en rampa de lanzamiento. Imagen 2.



**Figura 6.75** Foto familia junto a NAOS.



**Figura 6.76** Foto NAOS con sus creadores.

### Lanzamiento de NAOS

El lanzamiento de NAOS tuvo lugar en torno a las 11:40 am. En él se tomaron todas las precauciones posibles, además de advertir al público sobre los peligros que conllevaba acercarse a NAOS. Tras una cuenta atrás de 10 segundos se pulsa el interruptor de ignición, y tras unos segundos el cohete comienza a elevarse, activando el trigger que se encontraba anclado a la plataforma de lanzamiento, y dando lugar a la cuenta atrás de la apertura del paracaídas.

Es conveniente comentar que aquel día había algo de viento, por lo que hubo que tenerlo en cuenta para predecir hacia donde se dirigiría NAOS. El viento soplaba del noroeste, por lo que, tal y como se ha estudiado anteriormente, el cohete se aproaría ligeramente al viento y seguiría una trayectoria ascendente escorada hacia el noroeste. Sabiendo esto, al público se le situó en el extremo opuesto, es decir, en el sureste desde el punto de vista de la plataforma de lanzamiento. Por su parte, a los dos responsables de recepción de señal GPS se les situó al norte y al sur de la plataforma de lanzamiento. Así, serían capaces de cubrir tanto la trayectoria de subida como el descenso con paracaídas.

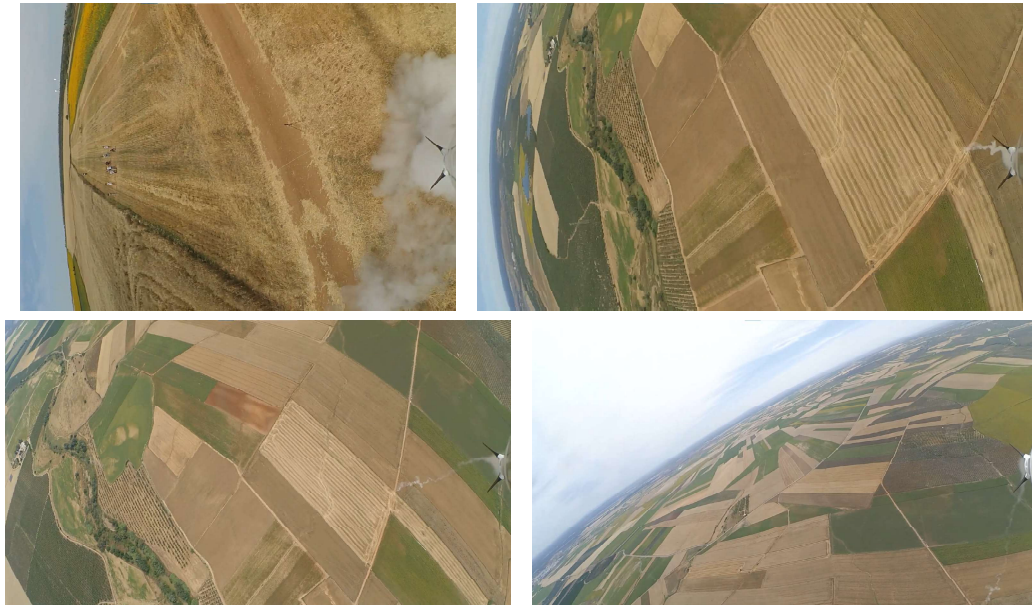
En las siguientes imágenes vemos el despegue de NAOS y la salida de la plataforma de lanzamiento. Ambas transcurrieron de forma nominal y sin perturbaciones o comportamientos inesperados. Rápidamente, NAOS, alcanza una velocidad muy alta, generando un ruido agudo y punzante correspondiente a la entrada en régimen supersónico de los gases de salida.



**Figura 6.77** Despegue de NAOS.

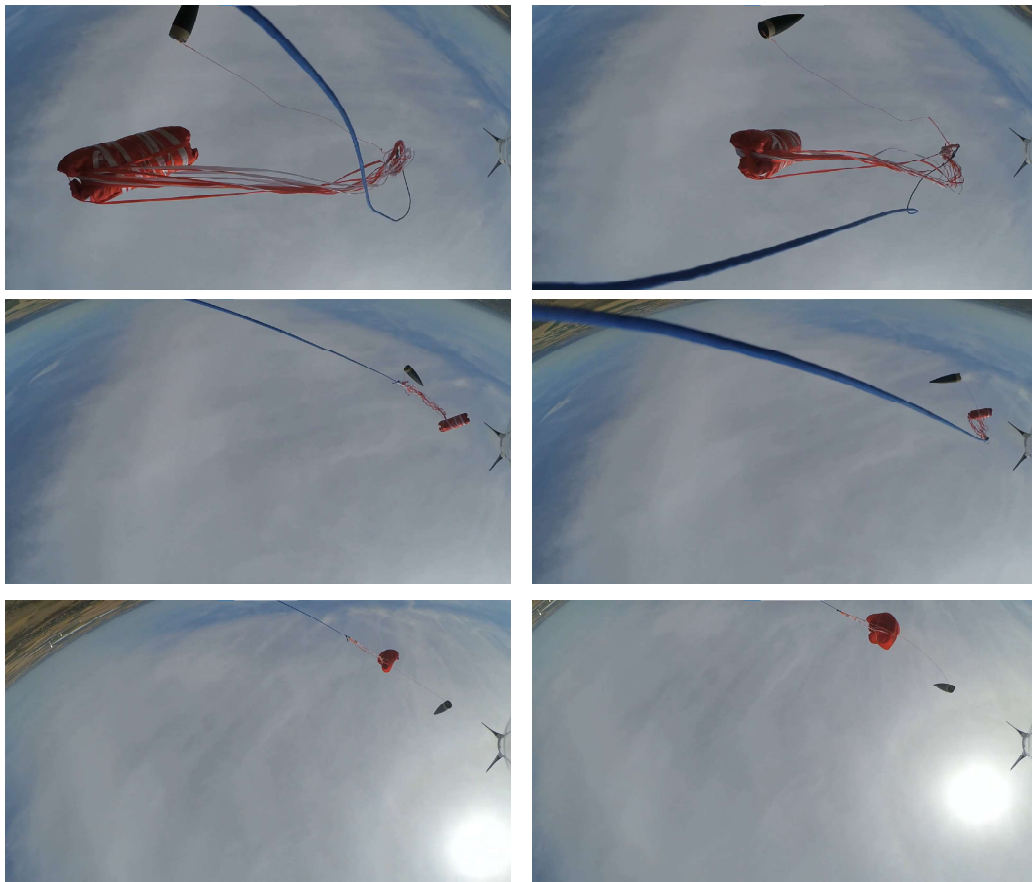
Posteriormente, el cohete continúa con su ascenso escorándose como se predijo, hacia el noroeste. En las siguientes imágenes se puede apreciar el ascenso desde la cámara de a bordo.





**Figura 6.78** Vuelo de subida de NAOS.

Una vez alcanzado el apogeo, se ve perfectamente con la cámara de a bordo que la salida del paracaídas ocurre en el momento idóneo.



**Figura 6.79** Apertura de paracaídas.

Desgraciadamente, tras la apertura del paracaídas, la cuerda que unía a este con el cohete se rompió

a cortadura, dejando el cohete en caída libre, y el paracaídas (sin apenas peso) planeando hacia el horizonte.

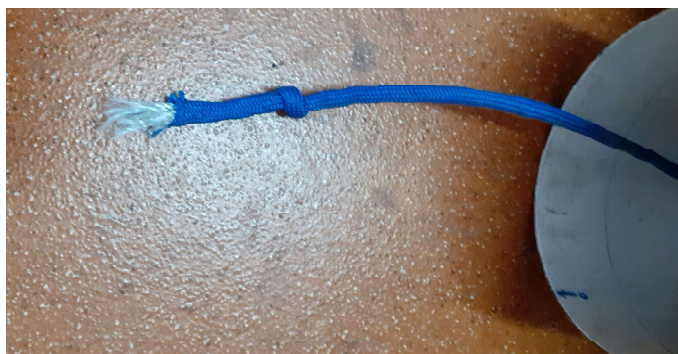


**Figura 6.80** Curvatura trayectoria vuelo NAOS.

#### Inspección de NAOS tras el impacto

Como ya se ha comentado, la cuerda del paracaídas se vio comprometida al romperse tras la eyección del paracaídas. Inspeccionando los restos, se llegó a la conclusión de que la cuerda había roto a cizalladura. Las razones que los justifican son las siguientes:

- La cuerda soportaba 300 kg de fuerza hasta su rotura. En el vídeo de la cámara de a bordo se percibe que la eyección del paracaídas se produce en el instante del apogeo, en el que las velocidades no son suficientemente grandes como para producir esa fuerza.
- Si se observa la imagen 6.81, se ve que el corte de la cuerda guarda mucha similitud con el resultado que obtendríamos si la cortáramos con unas tijeras o un cuchillo.



**Figura 6.81** Rotura a cizalladura de la cuerda del paracaídas.

- Por último, el émbolo que expulsaba el paracaídas y a través del cuál pasaba esta cuerda, estaba hecho de fibra de vidrio. Sin embargo, por error no se lijó el agujero por el que cruzaba la cuerda. De hecho, la fibra de vidrio en ocasiones puede ser muy cortante si no se trata adecuadamente. En definitiva el error fue no adecuar el orificio pasante del émbolo de NAOS. Es por ello, que en los diseños del nuevo émbolo contienen dos orificios pasantes, para tener



redundancia en las cuerdas del paracaídas. Y además están impresos en 3D y con radios de acuerdo para redondear las posibles zonas afiladas.



**Figura 6.82** Ángulo de impacto contra el suelo.

Analizando el modo de descenso y de caída, se comprobó que descendió en caída libre y de forma oblicua, tocando primero en el suelo el motor cohete con la tobera (6.82), ver modo de rotura de la sección de electrónica y la del motor cohete (6.83). Quizás fue esto lo que evitó que las zonas más vulnerables del cohete se vieran dañadas, ya que impactó en primer lugar con la parte más resistente del cohete. Otro factor que influyó en la preservación casi intacta de los diferentes dispositivos electrónicos fue el diseño concienzudo de las cápsulas de electrónica, que confirieron una protección excepcional. Y por último, otro factor determinante fue la rotura en múltiples trozos o partes tanto del fuselaje como de la cápsula de electrónica. Desde un punto de vista de resistencia de materiales, cada trozo roto nace a raíz de una grieta que se propaga. Dicha grieta absorbe energía durante su propagación. Por lo tanto, cada trocito de fuselaje que se ve en la figura 6.84 absorbió un porcentaje de la energía del impacto.



**Figura 6.83** Modo de rotura del acoplamiento entre secciones.



**Figura 6.84** Estado de NAOS tras el impacto con el suelo.

Por último, la inhibición, al igual que en el ensayo en banco realizado antes del lanzamiento resultó ser muy similar, encontrando segmentos de cartulina sin quemar y en casi perfecto estado. Ver imagen 6.85



**Figura 6.85** Efectividad de la inhibición del motor.

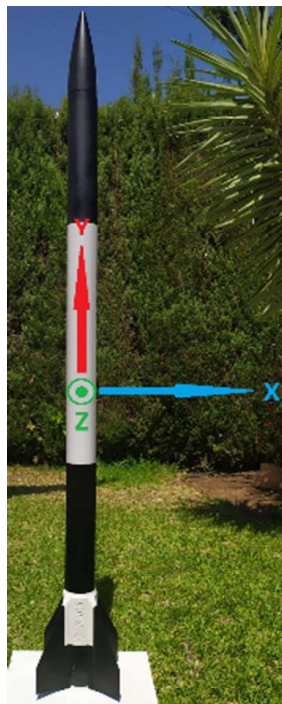
### Análisis del lanzamiento

El impacto, milagrosamente, no destruyó ninguno de los dispositivos electrónicos, permitiendo la recuperación completa de los datos registrados. Gracias a todos ellos tenemos 3 fuentes de datos diferentes: el IMU, el GPS y los cálculos teóricos del ensayo en banco. Veamos cada uno de ellos.

1. **Datos del IMU:** Recordemos que el IMU es la Unidad de Medidas inerciales, que entre otros mide aceleración, velocidad angular, temperatura, presión, actitud, etc.
2. **Datos del GPS:** El GPS no sólo nos envió datos sobre las coordenadas, sino que también nos arrojó una aproximación de la velocidad y la altura con respecto al tiempo.
3. **Datos del ensayo en banco:** Como ya vimos, el ensayo en banco nos da una simulación de cómo sería el lanzamiento de NAOS en caso de que la combustión del motor cohete se desarrollara tal y como lo hace en la prueba en banco.

Con estas fuentes diferentes y diversas de datos, se extrajeron gráficas y se compararon entre ellas. Asombrosamente, algunas de ellas son extremadamente similares a pesar de las diferentes maneras medir los datos. Vamos a estudiar cada pareja de datos por separado, correspondiendo cada una de ellas a una magnitud física:

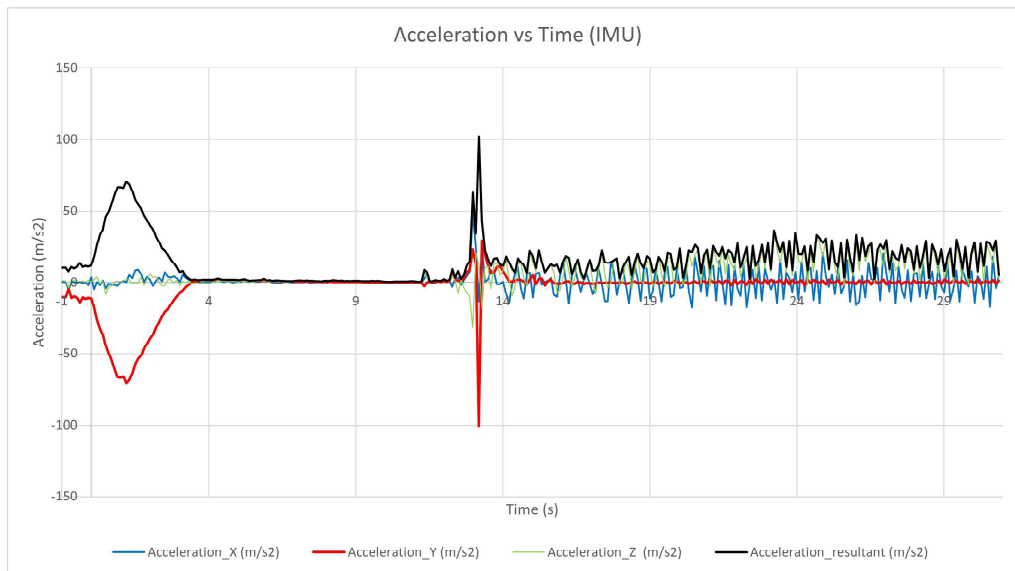
- **Aceleración:** El único dispositivo que podía medir aceleraciones durante el vuelo era el IMU. Sin embargo, para lograr entender a qué corresponde cada medida es importante definir los ejes del IMU con respecto al fuselaje del cohete (ver figura 6.86).



**Figura 6.86** Ejes de referencia del IMU dentro de NAOS.

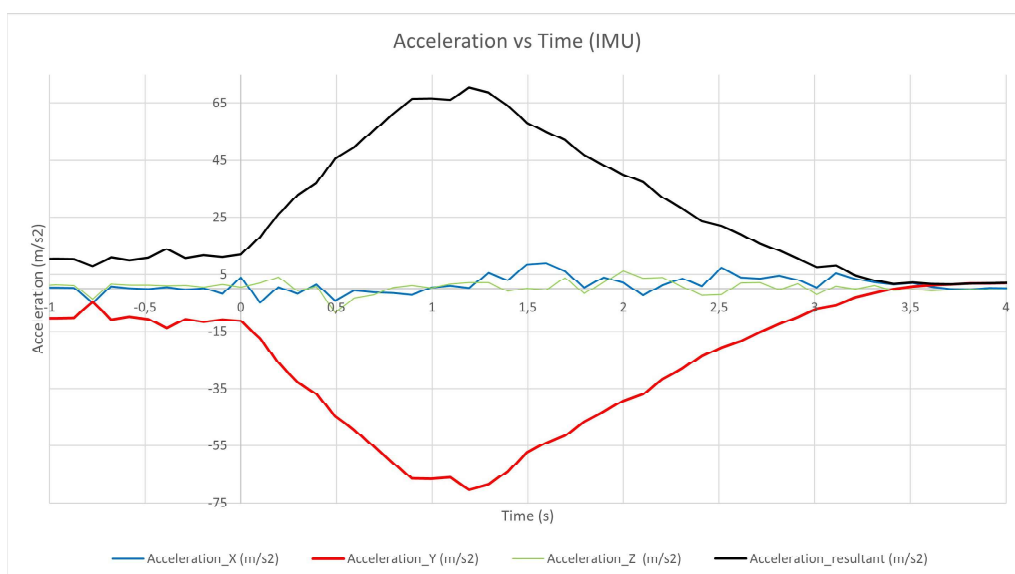
También se muestra una gráfica donde aparecen representadas todas las componentes de la aceleración en cada eje, y la resultante de todas ellas en color negro. La que nos interesa ver es la resultante, ya que, como el cohete se desvió un poco hacia el suroeste, será la resultante la que nos dé los valores del módulo de la aceleración más fiables. Si vemos la gráfica 6.87, distinguiremos dos zonas claramente diferenciadas. La primera de ellas es una curva creciente

con un máximo, que corresponder al tiempo de empuje del motor cohete. Luego en los 13 segundos más o menos se produce un pico de aceleración, que se corresponde con el momento de apertura del paracaídas y el tirón que hace éste, que es de unos 60 kg de fuerza, dato que corrobora la teoría de que la cuerda del paracaídas no pudo romper a tracción. Ya por último se aprecia una curva un tanto más fluctuante, que se explica fácilmente en tanto que el cohete se encuentra en caída libre y dando vueltas de campana. De ahí que los valores ahora sean tan impredecibles, aunque manteniendo un comportamiento "periódico" debido a la repetición más o menos parecida con cada tirabuzón que hace el cohete.



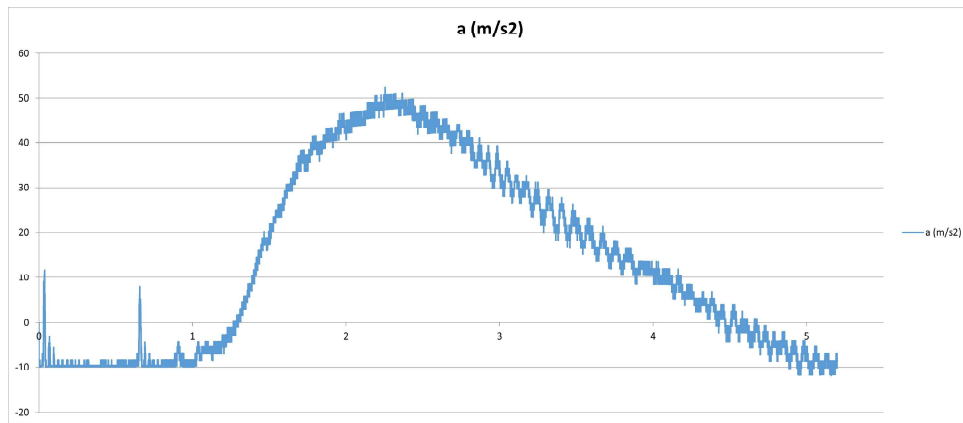
**Figura 6.87** IMU: Aceleración vs Tiempo.

Lo más asombroso es que si se compara la gráfica de aceleración medida por el IMU, con la que se predijo de manera teórica a raíz del ensayo en banco, resultan ser prácticamente idénticas. Ver figuras 6.88 y 6.89.



**Figura 6.88** IMU: Aceleración vs Tiempo (zoom).



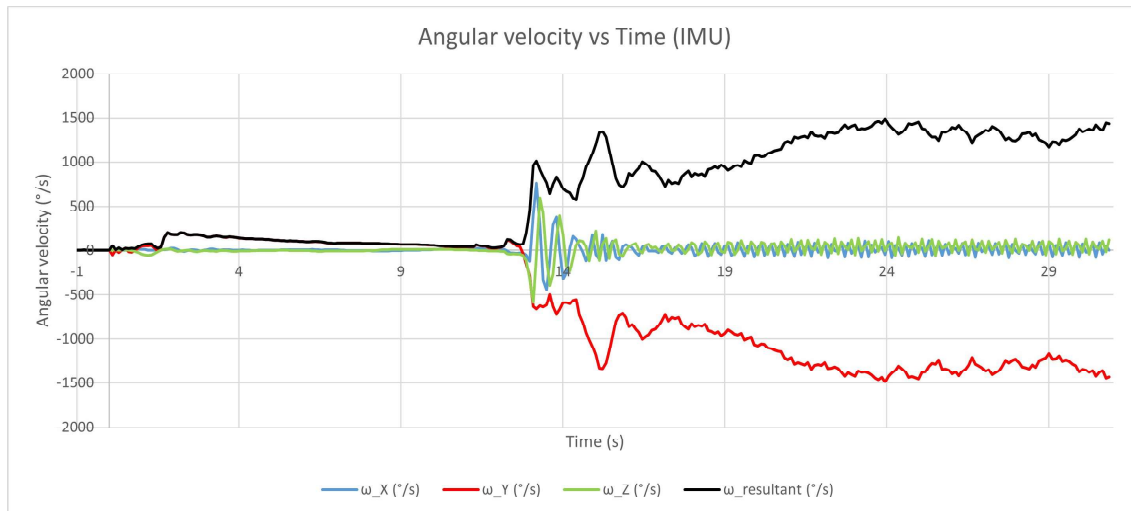


**Figura 6.89** Ensayo en banco: Aceleración vs Tiempo.

Con todo esto se llega a la conclusión de que se logró replicar casi de manera exacta la curva de Empuje-Tiempo que se obtuvo en el ensayo en banco de Abril de 2021, por lo que las nuevas implementaciones del motor vuelven a dar resultados satisfactorios.

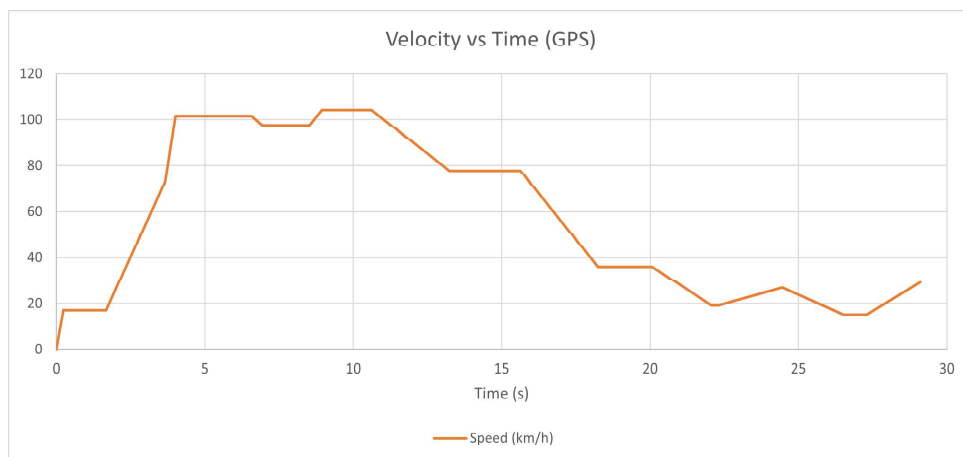
- **Velocidad angular:** El único dispositivo que mide la velocidad angular es el IMU. Con los datos obtenidos se calcula la gráfica 6.90. Esta gráfica es muy curiosa, y podemos diferenciar dos zonas claves:
  - La primera zona va desde el segundo 2 hasta el segundo 12. Como vemos la velocidad angular va decreciendo a medida que nos acercamos a los 12 segundos desde el lanzamiento. Esta disminución, si se analiza el vídeo de la cámara de a bordo, tiene su origen en el spin que lleva el cohete, que es mayor al salir de la plataforma de lanzamiento que en el apogeo. Recordemos que el spin se genera por pura aerodinámica del cohete y las aletas. Es por ello que a mayor velocidad, el spin también será mayor. Y como ya vimos la velocidad del cohete es muy alta en los primeros instantes del lanzamiento.
  - La segunda zona es la relativa a la caída libre del cohete tras el desprendimiento del paracaídas. Como vemos, justo en el apogeo, el cohete permuta sobre sí mismo respecto a los ejes "x" y "z", pero al cabo de unos segundos este giro se amortigua (ver segunda zona de 36.90) y el único giro que tiene el cohete durante el descenso vuelve a ser el spin. De hecho, tiene sentido que sea tan alto ya que las velocidades en caída libre también lo son. Además, en el vídeo en el que se graba la caída de NAOS no se le ve permutar respecto a "x" y "z", pero en la cámara de a bordo sí se aprecian giros mareantes, por lo que la única opción posible es que el cohete haya girado con spin durante el descenso.





**Figura 6.90** IMU: velocidad angular vs Tiempo.

- **Velocidad:** El único dispositivo que arrojó medidas sobre la velocidad durante el vuelo fue el GPS, y las envió directamente a los equipos de recepción terrestre. Una vez recogidos los datos (obtenidos de forma muy discreta) se pasó a realizar una gráfica y a compararla con la teórica, ver 6.91 y 6.92. En este caso las gráficas se parecen en cuanto a tendencia y máximo de la curva. Sin embargo, discrepan entre los 13 y 14 segundos que es el momento en el que se ha abierto el paracaídas. Es posible que los datos más fiables sean los del GPS ya que ha tenido en cuenta, no sólo el escoramiento que sufre el cohete, sino la velocidad más o menos constante que éste alcanza durante la caída libre.



**Figura 6.91** GPS: Velocidad vs Tiempo.

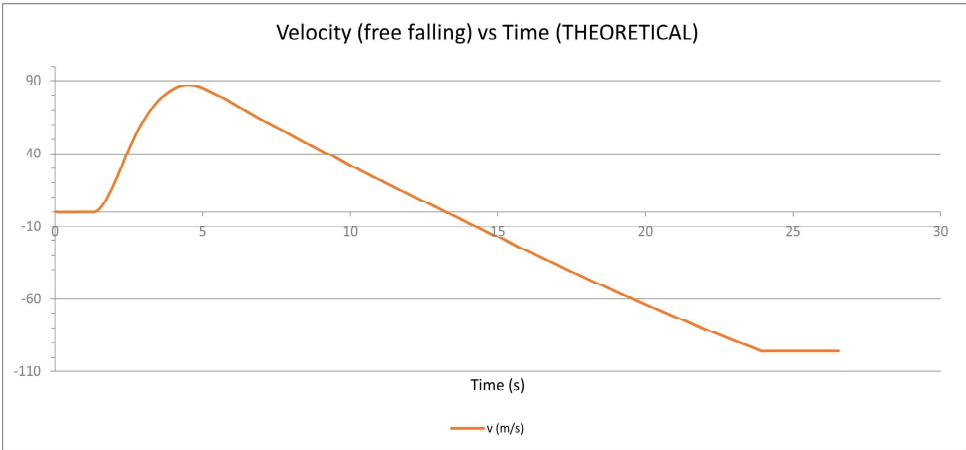


Figura 6.92 Teórico: Velocidad vs Tiempo.

- **Altura:** Por último, la altura se mide de las tres maneras, con GPS, IMU y de forma teórica. Hagamos una comparativa entre las tres gráficas que se adjuntan a continuación. En caso de que se requiera más información con respecto a los datos característicos obtenidos, se puede consultar la tabla 6.96.

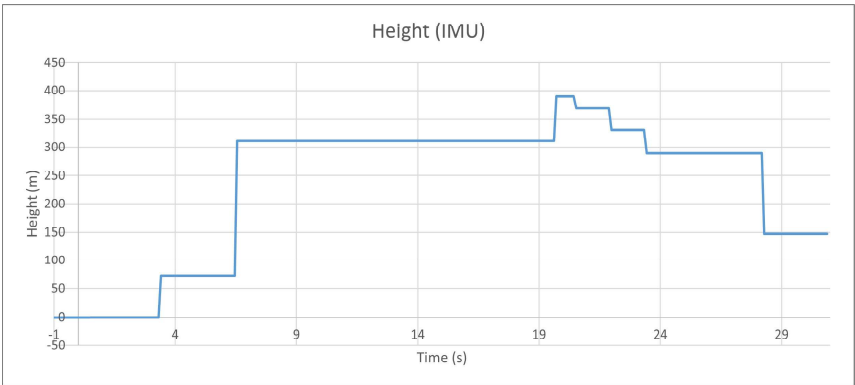


Figura 6.93 IMU: Altura vs Tiempo.

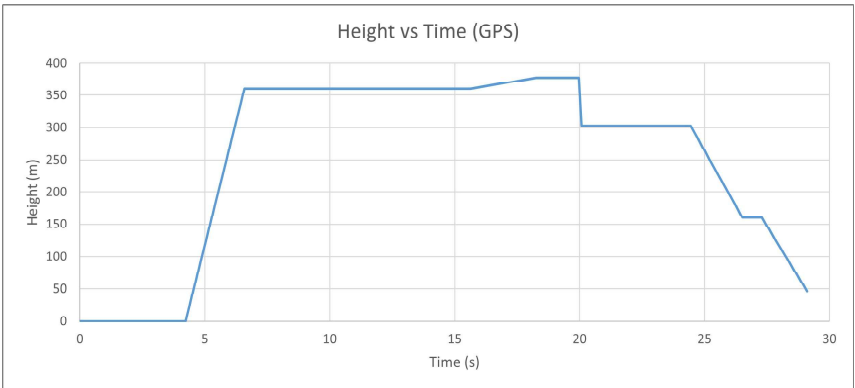
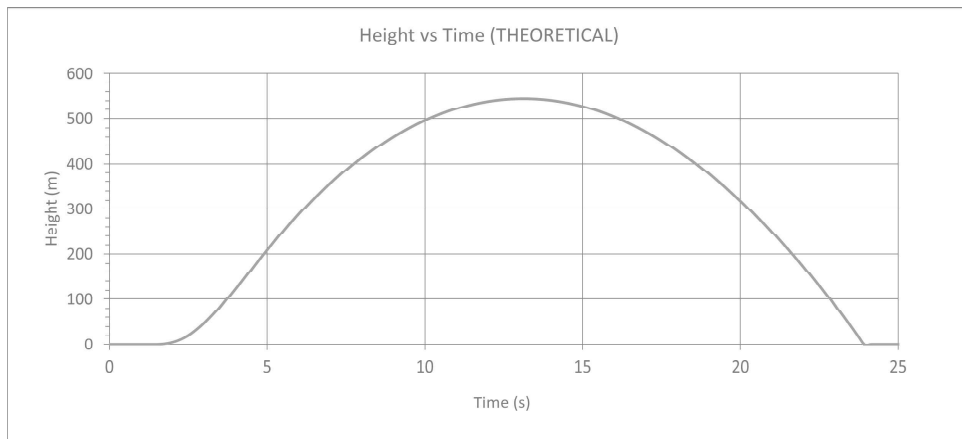


Figura 6.94 GPS: Altura vs Tiempo.



**Figura 6.95** Teórico: Altura vs Tiempo.

Se aprecia claramente que las tres gráficas tienen la misma tendencia, crecientes al principio y decrecientes tras el máximo, lo cual es absolutamente lógico. De hecho, el tiempo total desde que despegamos hasta que impacta, es muy parecido en las tres mediciones distintas. Lo que sí que varía un poco más entre ellos es el máximo de la curva, ver 6.96.

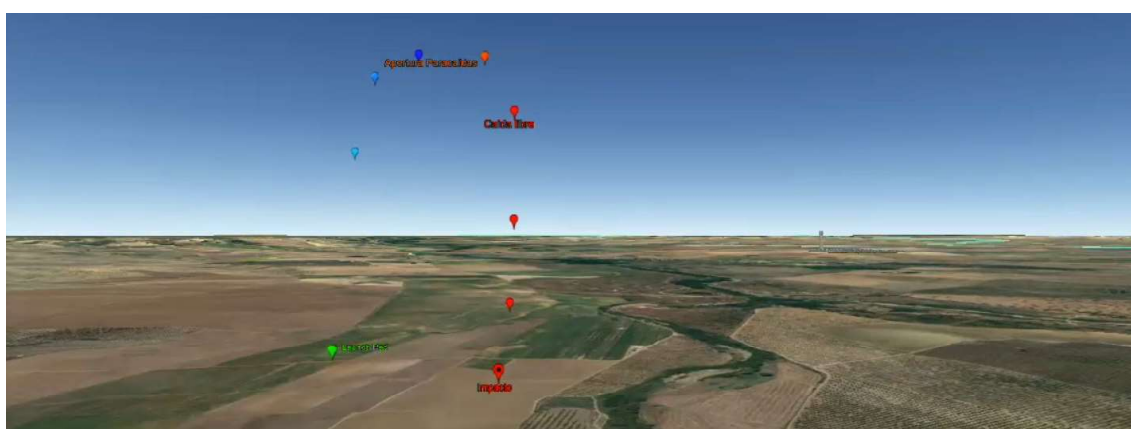
|                                                | Bench Test Based | Total Flight | Propelled Phase | Non Propelled Phase | Parachute opening | Free falling |
|------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------|
| <b>IMU</b>                                     |                  |              |                 |                     |                   |              |
| Time at end of phase (s)                       |                  |              | 3,4             | 11,3                | 13,2              | 30,87        |
| Max angular velocity Resultant (rad/s)         |                  | 26,0         | 3,5             | 2,7                 | 17,6              |              |
| Max acceleration Y (m/s <sup>2</sup> )         | 52,2             | 100,3        | 70,3            | 1,9                 | 100,3             |              |
| Max acceleration Y (g)                         | 5,3              | 10,2         | 7,2             | 0,2                 | 10,2              |              |
| Max acceleration Resultant (m/s <sup>2</sup> ) | 52,2             | 102,0        | 70,3            | 3,0                 | 102,0             |              |
| Max acceleration Resultant (g)                 | 5,3              | 10,4         | 7,2             | 0,3                 | 10,4              |              |
| Max. Height (m)                                | 544,5            | 389,4        |                 |                     |                   |              |
| <b>GPS</b>                                     |                  |              |                 |                     |                   |              |
| Max. Speed (m/s)                               | 98,0             | 28,9         |                 |                     |                   |              |
| Max. Speed (km/h)                              | 352,8            | 104          |                 |                     |                   |              |
| Mean Speed (m/s)                               |                  |              |                 |                     |                   | 6,1          |
| Mean Speed (km/h)                              |                  |              |                 |                     |                   | 22,0         |
| Max. Height (m)                                | 544,5            | 377,1        |                 |                     |                   |              |

**Figura 6.96** Datos característicos medidos por los diferentes dispositivos.

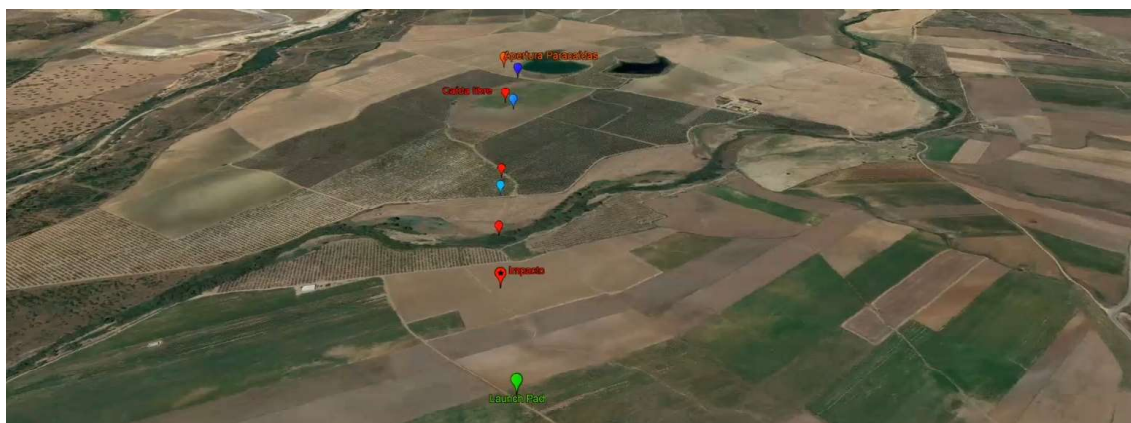
- **Trayectoria:** La única forma de medir la trayectoria del cohete es representando gráficamente las coordenadas registradas por el GPS. Esto se hizo y la trayectoria de NAOS es la que se ve en las figuras adjuntas. Se comprueba en la figura 6.99 cómo, efectivamente, el cohete sigue una trayectoria hacia el noroeste, desde la dirección que sopla el viento.



**Figura 6.97** Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 1.



**Figura 6.98** Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 2.



**Figura 6.99** Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 3.

### conclusiones

- **Observaciones:** El cohete se eleva según lo previsto, alcanzando un apogeo de 389 m frente a los 655 m teóricos. El sistema de liberación del paracaídas funciona correctamente pero la cuerda se rompe a cizalladura debido a la superficie afilada del émbolo (hecho de fibra de vidrio) por donde pasa la cuerda y junto con la tensión (60 kg aprox) . El paracaídas vuela durante más de 25 min junto con la ojiva y el cohete entra en caída libre. En el impacto se

rompe la sección de la electrónica, pero se puede recuperar la electrónica, la sección del paracaídas, la sección del motor y el motor, todos operativos.

Por su parte, la velocidad del viento era moderada. Se estima que del orden de 11 km/h.

- **Inspección del motor:** La inhibición ha funcionado muy bien. El inhibidor de cartulina de los granos se encuentra casi al completamente en los cinco granos, evidenciándose en buen estado 3 de las 4 capas iniciales. Además en lo que a aislantes respecta, la manta térmica aislante ha funcionado muy bien y está en perfecto estado, habiendo protegido la sección del motor, los anillos de las aletas y las aletas, sin que se deformen.
- **Observación del vídeo y datos registrados:** El motor funciona con la primera ignición. Además, el arranque del motor es mucho mejor que en pruebas anteriores, debido a la mayor cantidad de pólvora negra de ignición usada. El recubrimiento con pólvora negra de las superficies no inhibidas de los granos también mejora el arranque inicial.
- **Conclusiones:** El lanzamiento ha cumplido varios objetivos, quedando validados todos los sistemas excepto el de recuperación que requiere mejorar el diseño de la sección del paracaídas para que no se corte la cuerda. Los datos registrados muestran que las prestaciones han sido menores de las calculadas que se estima que es debido al aporamiento al viento y a que la resistencia aerodinámica es superior a la teórica.

Las implementaciones y directrices para el próximo lanzamiento deben ser las siguientes:

1. Hacer redundante la cuerda del paracaídas para tener un "back-up" en caso de fallo.
2. Diseñar y fabricar el émbolo con impresión 3D asegurando que no haya superficies afiladas, sobre todo en los orificios por donde pasan las cuerdas.
3. Matar las aristas vivas (lijar) del tubo de PVC de la sección del paracaídas para evitar que corte la cuerda.
4. Fijar la cuerda al émbolo (nudos antes y después de éste) de forma que el émbolo salga varias veces fuera del tubo de PVC.
5. Implementar mejoras en la cápsula de electrónica: Reducir el diámetro exterior del acoplamiento con la sección del motor, canaletas para pasar tornillos lug, refuerzo de las uniones de las superficies horizontales con las laterales, rebaje en las tapas de la batería para que quepan los tornillos).
6. Hacer prueba con el motor con 6 granos de carga de propulsante para aumentar la presión en cámara, conseguir mayor eficiencia de la combustión y tener datos para el siguiente lanzamiento.
7. Seguir usando el mismo proceso de fabricación de granos, manteniendo los granos en los moldes después de su fabricación hasta la prueba.
8. Seguir recubriendo las superficies de los granos con pólvora negra.
9. Reducir la estabilidad subiendo el centro de presiones (CP) para alcanzar  $2,5 \cdot D$  aprox entre CP y CP.





## 7 Estudio de costes

---

La intención de este capítulo es dar una idea general sobre los costes que ha conllevado el diseño, desarrollo, fabricación, pruebas y lanzamiento de NAOS. Para ello, se ha tenido en cuenta la gran mayoría de materiales, herramientas, procesos de fabricación y conformado, consumibles y demás elementos utilizados durante el proyecto. Por otro lado, también se incluye un pequeño estudio estimativo de las horas de trabajo invertidas en el desarrollo de NAOS desde el inicio del proyecto en Junio de 2015, teniendo en cuenta el coste/hora de un trabajo de ingeniería y de un trabajo de fabricación.

### 7.1 Costes de materiales, herramientas y otros elementos

En esta sección en particular se tratará el coste total de los materiales, herramientas, productos, dispositivos electrónicos, químicos, elementos prefabricados, maquinaria, etc. Todos ellos empleados para hacer posible la fabricación de NAOS, el banco de ensayos, la rampa de lanzamiento, el sistema de encendido y otros muchos productos que han posibilitado el desarrollo.

En la tabla que se muestra a continuación se puede ver información de cada uno de los distintos elementos. Entre ella, el coste unitario, la cantidad de unidades utilizadas, precio por cada lanzamiento/prueba, fecha de compra y algunos comentarios relevantes. Asimismo, se ha multiplicado el resultado total de costes de materiales, herramientas y otros elementos por un factor de contingencia de **1,3**. La razón de ello es contabilizar el resto de elementos empleados en el proyecto pero que por algún motivo no se han tenido en cuenta (costes bajos, pruebas extra, materiales y herramientas adicionales no contabilizados por desconocimiento de su valor o cantidad utilizada en el proyecto, elementos que hayan podido pasarse por alto, etc. )

|                                                         | Cantidad en el proyecto | Precio unitario (€)         | Precio total (€)  | Precio por lanzamiento o | Fecha    | Comentarios                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cono                                                    | 1                       | 20,00 €                     | 20,00 €           |                          |          | molde de PLA encargado                                                                                                    |
| <b>Sección paraca</b>                                   |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Muelle C.700.360.3200A                                  | 6                       | 16,80 €                     | 100,80 €          |                          | 02/09/16 | Incluye gastos de envío (5€)                                                                                              |
| Tela Paraca nylon ripstop                               | 3                       | 24,99 €                     | 74,97 €           |                          | 08/09/16 |                                                                                                                           |
| Tubo PVC gris                                           |                         | Despreciable                |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubo PVC blanco (diam 80 mm)                            | 9                       | 4,13 €                      | 37,14 €           |                          | 05/10/21 | Se vende en tubos de 3m                                                                                                   |
| <b>Sección Electrónica</b>                              |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| GPS                                                     | 4                       | 4,43 €                      | 17,72 €           |                          | 24/04/19 |                                                                                                                           |
| IMU (Altímetro, acelerómetro...)                        | 2                       | 4,35 €                      | 8,70 €            |                          | 25/09/20 |                                                                                                                           |
| LORA                                                    | 2                       | 5,16 €                      | 10,32 €           |                          | 25/09/20 | 1 embarcado y 3 receptores                                                                                                |
| USB receptor LORA                                       | 3                       | 5,41 €                      | 16,23 €           |                          | 25/09/20 | 3 receptores                                                                                                              |
| Antena                                                  | 4                       | 3,06 €                      | 12,22 €           |                          | 25/09/20 | 1 embarcado y 3 receptores                                                                                                |
| Módulo Tarjeta micro SD                                 | 1                       | 0,62 €                      | 0,62 €            |                          | 19/07/20 |                                                                                                                           |
| Arduino UNO                                             | 4                       | 19,90 €                     | 79,60 €           |                          | 12/12/19 |                                                                                                                           |
| PCB Shield LORA/GPS                                     | 5                       | 0,85 €                      | 4,25 €            |                          | 25/06/20 | Portes no incluidos, 12\$                                                                                                 |
| PCB Shield IMU/microSD                                  | 5                       | 0,85 €                      | 4,25 €            |                          | 25/06/20 | Portes no incluidos, 12\$                                                                                                 |
| PCB Timer                                               | 5                       | 0,85 €                      | 4,25 €            |                          | 25/06/20 | Portes no incluidos, 12\$                                                                                                 |
| Componentes Timer                                       | 1                       | 31,73 €                     | 31,73 €           |                          | 16/01/15 |                                                                                                                           |
| Cámara Xiaomi YI 2K                                     | 1                       | 25,00 €                     | 25,00 €           |                          | 24/09/20 | De segunda mano por wallapop                                                                                              |
| Tarjeta micro SD 32 GB                                  | 2                       | 3,90 €                      | 7,80 €            |                          | 25/09/20 | Cámara y Módulo logger microSD                                                                                            |
| Batería LIPO 8000 mAh                                   | 1                       | 39,30 €                     | 39,30 €           |                          | 31/08/20 |                                                                                                                           |
| Batería                                                 | 1                       | 30,00 €                     | 30,00 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Cargador batería LIPO                                   | 1                       | 21,50 €                     | 21,50 €           |                          | 31/08/20 |                                                                                                                           |
| Cable alargador USB 3m                                  | 3                       | 4,18 €                      | 12,54 €           |                          | 20/10/20 | Para colocar la antena con los USB receptores en un mástil a 2 m                                                          |
| <b>Sección Motor</b>                                    |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubo PVC gris                                           |                         | Despreciable                |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Manta térmica                                           | 1                       | 19,21 €                     | 19,21 €           |                          | 21/09/20 |                                                                                                                           |
| Aletas                                                  |                         | Incluido en coste PLA       |                   |                          |          | Impresión 3D                                                                                                              |
| Anillo aletas                                           |                         | Incluido en coste PLA       |                   |                          |          | Impresión 3D                                                                                                              |
| <b>Motor D80</b>                                        |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| <b>Material</b>                                         |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubo acero inoxidable (AISI 304L, EN 1.4307) diam 60 mm | 1,2                     | 15,00 €                     | 18,00 €           |                          |          | 15€/metro                                                                                                                 |
| Tocho                                                   | 2                       | 20,00 €                     | 40,00 €           |                          |          | Para mecanizado tobera y cierre posterior                                                                                 |
| Fabricación motor D80                                   | 2                       | 100,00 €                    | 200,00 €          |                          | 19/12/20 | Gratis el primer motor                                                                                                    |
| Juntas tóricas tobera y diere                           | 48                      | 0,42 €                      | 20,02 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Juntas tóricas separación granos                        | 30                      | 0,42 €                      | 12,51 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Fabricación tobera adaptada                             | 2                       | 100,00 €                    | 200,00 €          |                          |          | Gratis fábrica                                                                                                            |
| <b>Rampa de lanzamiento</b>                             |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Barra guía                                              | 6,3                     | 3,72 €                      | 23,44 €           |                          | 14/08/20 | 3,72 €/m                                                                                                                  |
| Plancha de acero (base)                                 | 1                       | 10,00 €                     | 10,00 €           |                          |          | Estimado                                                                                                                  |
| Plancha de acero doblada                                | 1                       | 4,00 €                      | 4,00 €            |                          |          | Estimado                                                                                                                  |
| Tubo cuadrado acero y base acero                        | 1                       | 10,82 €                     | 10,82 €           |                          | 01/09/20 |                                                                                                                           |
| <b>Banco de ensayo</b>                                  |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Célula de carga 200 kg                                  | 2                       | 36,97 €                     | 73,94 €           |                          | 21/04/15 |                                                                                                                           |
| Célula de carga 50 kg                                   | 2                       | 34,78 €                     | 69,56 €           |                          | 23/01/15 |                                                                                                                           |
| Equipo adquisición datos DAQ                            | 1                       | 100,00 €                    | 100,00 €          |                          | 7/02/19  | Incluye costes de transporte/aduanas. Estimado                                                                            |
| Amplificador                                            |                         | Incluido en coste del timer |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubo PVC                                                | 1                       | 10,00 €                     | 10,00 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubo cuadrado acero y base acero                        | 1                       | 8,00 €                      | 8,00 €            |                          |          |                                                                                                                           |
| <b>Consumibles</b>                                      |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| <b>Propulsante</b>                                      |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Dextrosa                                                | 3                       | 3,92 €                      | 35,24 €           | 2,6                      | 21/09/20 | No incluye gastos de envío<br>0,656 kg para motor llenado al 100% (7 granos cortos)<br>18,55 eur 3 kg con gastos de envío |
| KNO3                                                    | 2                       | 1,78 €                      | 88,82 €           | 2,2                      |          | 1,218 kg para motor llenado al 100% (7 granos cortos)                                                                     |
| Pólvora Negra                                           |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Resina poliéster                                        | 4                       | 13,64 €                     | 54,56 €           |                          |          | No incluye gastos de envío                                                                                                |
| Fibra de vidrio. Mat 100 g/m2                           | 3                       | 4,78 €                      | 14,34 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Pegamento PVC                                           | 2                       | 3,00 €                      | 6,00 €            |                          |          |                                                                                                                           |
| Pintura                                                 | 2,165                   | 4,00 €                      | 8,66 €            |                          |          |                                                                                                                           |
| PLA para impresión 3D                                   | 3                       | 20,30 €                     | 60,90 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| ABS para impresión 3D                                   | 1                       | 25,00 €                     | 25,00 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Hojas transparentes autoadhesivas                       | 2                       | 9,68 €                      | 19,36 €           |                          | 10/09/20 |                                                                                                                           |
| Hilo ignición                                           | 1                       | 12,99 €                     | 12,99 €           |                          | 16/05/20 | precio del rollo                                                                                                          |
| cinta raso paraca                                       | 2                       | 10,99 €                     | 21,98 €           |                          | 11/01/19 | precio del rollo                                                                                                          |
| Hilo NICROM                                             | 3                       | 7,00 €                      | 21,00 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Cable silicona rojo                                     | 2                       | 1,45 €                      | 2,90 €            |                          | 11/11/20 | Para conectar la batería LIPO a los módulos electrónicos                                                                  |
| Cable silicona negro                                    | 2                       | 1,45 €                      | 2,90 €            |                          | 11/11/20 | Para conectar la batería LIPO a los módulos electrónicos                                                                  |
| DataQ                                                   | 1                       | 51,04 €                     | 51,04 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Sargentos                                               | 2                       | 26,50 €                     | 53,00 €           |                          |          |                                                                                                                           |
| Tubos termoretractiles                                  | 2                       | 2,18 €                      | 4,36 €            |                          | 17/11/20 |                                                                                                                           |
| <b>Otros</b>                                            |                         |                             |                   |                          |          |                                                                                                                           |
| Tripode                                                 | 1                       | 22,99 €                     | 22,99 €           |                          | 5/09/20  |                                                                                                                           |
| Cuerda línea de vida                                    | 30,5                    | 9,99 €                      | 9,99 €            | 0,66                     | 18/05/20 |                                                                                                                           |
| GOPRO Hero 5                                            | 1                       | 274,99 €                    | 274,99 €          |                          | 07/04/19 |                                                                                                                           |
| Batería ignición                                        | 1                       | 42,99 €                     | 1,41 €            |                          | 22/11/18 |                                                                                                                           |
| Balanza electrónica 1000 g                              | 2                       | 6,19 €                      | 12,38 €           |                          | 12/11/17 |                                                                                                                           |
| Multímetro 16,96                                        | 2                       | 16,96 €                     | 33,92 €           |                          | 31/03/16 |                                                                                                                           |
| Dremel                                                  | 2                       | 49,97 €                     | 99,94 €           |                          | 25/08/20 |                                                                                                                           |
| Amoladora Bosch                                         | 2                       | 45,99 €                     | 91,98 €           |                          | 24/11/17 |                                                                                                                           |
| Taladro Black&Decker                                    | 2                       | 49,00 €                     | 98,00 €           |                          | 24/11/17 |                                                                                                                           |
| <b>TOTAL</b>                                            |                         |                             | <b>2.507,09 €</b> |                          |          |                                                                                                                           |
| <b>TOTAL (con contingencia)</b>                         |                         |                             | <b>3.259,21 €</b> |                          |          |                                                                                                                           |

## 7.2 Coste de horas de trabajo

Esta sección va dirigida únicamente a plantear escrupulosamente la cantidad total de horas de trabajo invertidas en el proyecto. Para ello se ha tenido en cuenta, evidentemente, las horas de trabajo, el número de personas involucradas en cada tarea, las veces que se ha realizado una misma tarea y el coste/hora en función de si es un trabajo de **ingeniería (35 €/hora)** o de **fabricación (25 €/hora)**. Por último, también se adjunta un valor de costes totales en el que se ha multiplicado por un factor de contingencia de **1,3** en el que se tiene en cuenta todas aquellas horas invertidas en procesos y tareas que hayan podido escaparse del recuento, o que por ser muy pocas, directamente no se han tenido en cuenta. Cabe destacar también, que cada recuento de horas individuales es resultado de una minuciosa suma de horas estimadas en los diferentes aspectos de cada área (diseño, fabricación, pruebas...).

|                                   | Bases de estimación                                                                                                                                                                         | Horas Ingeniería y pruebas | Horas Fabricación | Coste Ingeniería (€) | Coste fabricación (€) | Coste total (€)    |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| <b>Cono</b>                       |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Molde antiguo y diseño cono 3D                                                                                                                                                              | 9 -                        |                   | 315,00 € -           |                       | 315,00 €           |
| Fabricación                       | Molde antiguo y 3 conos en 3D                                                                                                                                                               | -                          | 12 -              |                      | 300,00 €              | 300,00 €           |
| <b>Sección paracaídas</b>         |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Cápsula, estudio fuerza muelle y dimensiones alojamiento paraca, Embudo, émbolo,                                                                                                            | 172 -                      |                   | 6.020,00 € -         |                       | 6.020,00 €         |
| Fabricación                       |                                                                                                                                                                                             | -                          | 0 -               |                      | 0,00 €                | 0,00 €             |
| Sección                           | Sistema de liberación (émbolo, embudo, soporte ignitor,...) y sección (acoplamiento,...)                                                                                                    | -                          | 10,5 -            |                      | 262,50 €              | 262,50 €           |
| Paracaídas                        |                                                                                                                                                                                             | -                          | 104 -             |                      | 2.600,00 €            | 2.600,00 €         |
| Pruebas                           | Eyección paraca, Paracaídas                                                                                                                                                                 | 16 -                       |                   | 560,00 € -           |                       | 560,00 €           |
| <b>Sección Electrónica</b>        |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Capsula, PCB, timer, Altium, Arduino, livewire                                                                                                                                              | 192 -                      |                   | 6.720,00 € -         |                       | 6.720,00 €         |
| Fabricación                       | Capsula, PCB, timer                                                                                                                                                                         | -                          | 320 -             |                      | 8.000,00 €            | 8.000,00 €         |
| Pruebas                           | Timer, Arduino (software, I2C, serial, IMU, Datalogger, GPS, LORA), alcance LORA, batería, Shields, protoboard                                                                              | 460,8 -                    |                   | 16.128,00 € -        |                       | 16.128,00 €        |
| <b>Sección Motor</b>              |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Aletas, anillo aletas, molde anillo ajuste motor, Estudio sistema innovador refrigeración aire motor, Estudio pesos y CG, Estudio estabilidad aerolab, sección, acoplamiento, manta térmica | 119,8 -                    |                   | 4.193,00 € -         |                       | 4.193,00 €         |
| Fabricación                       | Anillo ajuste motor, aletas, anillo aletas, sección, acoplamiento, manta térmica                                                                                                            | -                          | 14 -              |                      | 350,00 €              | 350,00 €           |
| <b>Motor D80</b>                  |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Estudio resistencia estructural, optimización motor, cálculo de presiones con programa R. Nakka, software adaptación toberas                                                                | 28,5 -                     |                   | 997,50 € -           |                       | 997,50 €           |
| Fabricación                       | Comprado                                                                                                                                                                                    | -                          | 0 -               |                      | 0,00 €                | 0,00 €             |
| <b>Rampa de lanzamiento</b>       |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Estructura, guía, búsqueda de componentes, estudio longitud guía                                                                                                                            | 7,5 -                      |                   | 262,50 € -           |                       | 262,50 €           |
| Fabricación                       | Soldadura, taladrado y montaje                                                                                                                                                              | -                          | 37,5 -            |                      | 937,50 €              | 937,50 €           |
| <b>Banco de ensayo</b>            |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Data Q, amplificador, célula de carga, estructura, sistema encendido (cajas, batería, cable con conectores)                                                                                 | 33 -                       |                   | 1.155,00 € -         |                       | 1.155,00 €         |
| Fabricación                       | Pruebas Data Q, amplificador, célula de carga, estructura, sistema encendido (cajas, batería, cable con conectores)                                                                         | -                          | 52 -              |                      | 1.300,00 €            | 1.300,00 €         |
| <b>Ensayos en banco</b>           |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Diseño                            | Desarrollo software simulación lanzamiento                                                                                                                                                  | 40 -                       |                   | 1.400,00 € -         |                       | 1.400,00 €         |
| Fabricación                       | Granos de propulsante, moldes                                                                                                                                                               | -                          | 90 -              |                      | 2.250,00 €            | 2.250,00 €         |
| Pruebas                           | Análisis teóricos previos y log, estudios de datos adquiridos y elaboración informe de resultados, calibración (con pesas y previo a prueba), inspección motor, documentar prueba           | 174,6 -                    |                   | 6.111,00 € -         |                       | 6.111,00 €         |
| <b>Propulsante</b>                |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Pruebas propulsante e inhibición  |                                                                                                                                                                                             | 8 -                        |                   | 280,00 € -           |                       | 280,00 €           |
| Preparación lanzamiento           | Análisis teóricos previos y log, estudios de datos adquiridos y elaboración informe de resultados, inspección motor, documentar prueba                                                      | 154 -                      |                   | 5.390,00 € -         |                       | 154,00 €           |
| Lanzamiento                       | Incluye horas de diferentes responsables                                                                                                                                                    | 32 -                       |                   | 1.120,00 € -         |                       | 32,00 €            |
| <b>Otros</b>                      |                                                                                                                                                                                             |                            |                   |                      |                       |                    |
| Checklist                         |                                                                                                                                                                                             | 32 -                       |                   | 1.120,00 € -         |                       | 1.120,00 €         |
| Aprendizaje data Q                |                                                                                                                                                                                             | 24 -                       |                   | 840,00 € -           |                       | 840,00 €           |
| Aprendizaje arduino               |                                                                                                                                                                                             | 90 -                       |                   | 3.150,00 € -         |                       | 3.150,00 €         |
| Aprendizaje Altium                |                                                                                                                                                                                             | 40 -                       |                   | 1.400,00 € -         |                       | 1.400,00 €         |
| Aprendizaje de impresión 3D       |                                                                                                                                                                                             | 5 -                        |                   | 175,00 € -           |                       | 175,00 €           |
| Aprendizaje CURA                  |                                                                                                                                                                                             | 4 -                        |                   | 140,00 € -           |                       | 140,00 €           |
| Gestiones de compra de materiales |                                                                                                                                                                                             | 90 -                       |                   | 3.150,00 € -         |                       | 3.150,00 €         |
| Marketing y videos youtube        |                                                                                                                                                                                             | 40 -                       |                   | 1.400,00 € -         |                       | 1.400,00 €         |
| <b>TOTAL</b>                      |                                                                                                                                                                                             | <b>1772,2</b>              | <b>640</b>        | <b>62.027,00 €</b>   | <b>16.000,00 €</b>    | <b>71.703,00 €</b> |
| <b>TOTAL (con contingencia)</b>   |                                                                                                                                                                                             | <b>2303,86</b>             | <b>832</b>        | <b>80.635,10 €</b>   | <b>20.800,00 €</b>    | <b>93.213,90 €</b> |



## 8 Conclusiones

---

Ya lo dijo el gran Albert Einstein "un barco está más seguro en la orilla, pero no es ese el propósito por el que se construye". No obstante, me he tomado la libertad de reformular esta cita famosa de la siguiente manera: "Un cohete está más seguro en el banco de ensayos, pero no es ese el propósito por el que se construye". Y es que es esta fuerza e ilusión por alcanzar los objetivos lo que ha impulsado el progreso de este ambicioso proyecto y las ganas de aprender más de este apasionante mundo de la cohetaría amateur. Son muchas las lecciones aprendidas y las conclusiones a las que se ha llegado. De hecho, intentaré en la medida de lo posible condensarlas todas en este capítulo.

### 8.1 Conclusiones y lecciones aprendidas

Dado que se hablará de varios puntos diferentes en relación a las diferentes áreas tratadas durante el proyecto, es conveniente dividir las conclusiones en varios puntos:

- **Diseño:** Las conclusiones sobre la parte de diseño y desarrollo de los elementos de NAOS son las que se cuentan a continuación:
  1. Al tratarse de un proyecto a nivel amateur tanto los medios como el presupuesto son escasos y limitados. Por lo tanto a la hora de diseñar los diferentes elementos que compondrían el cohete se tuvo que partir de productos que estuvieran disponibles en el mercado y a un precio asequible. Sin embargo, fue esta carencia de libertad en el diseño la que activó el ingenio y las ocurrencias.
  2. El mayor reto de este proyecto y el área de la que menos experiencia se tenía es sin duda la electrónica. Se necesitaron varios meses de estudio y aprendizaje para lograr iniciar un diseño conceptual de cómo sería la electrónica embarcada en NAOS. Entre otras, hubo que tomar decisiones entre cuál sería el micro controlador (Arduino), que componentes utilizar, de qué tamaño, con qué características, potencia, tensión y amperaje de la batería, programación del Arduino, diseño de los shield, etc. Sin embargo, el aprendizaje fue quizás el más satisfactorio, ya que se pasó de no conocer apenas nada del mundo de la electrónica, a un primer contacto con éste. Sin lugar a dudas, en el siguiente proyecto se intentará incluir más electrónica y de mejor calidad, con redundancias y dispositivos nuevos, como por ejemplo un tubo de pitot para medir velocidades. En definitiva, la electrónica ha sido uno de los mejores descubrimientos realizados en este proyecto. Además, ha aportado mucha información útil que posteriormente fue interpretada y que ha servido para cuestionar algunos resultados teóricos de los archivos excel de simulación del lanzamiento.

3. Un problema recurrente en el diseño fue ni más ni menos que errores en el propio diseño, cotas erróneas, holguras insuficientes, falta de aerodinámica en algunas piezas clave, etc. No obstante, con la experiencia adquirida, actualmente se afrontaría el diseño con una perspectiva diferente.
  4. Es esencial dedicar tiempo al diseño de las partes más críticas del cohete, como pueden ser el motor cohete, el sistema de liberación y recuperación o la propia estabilidad. Es por ello que sería un gran avance de futuro poder realizar simulaciones para ver el comportamiento de los diseños antes de fabricarlos.
  5. La clave para lograr tener un buen cohete es haber diseñado un motor cohete eficiente y resistente a la presión y temperatura, cuya tobera se encuentre adaptada y en condiciones óptima, y esté dotada de los radios de acuerdo idóneos para minimizar las pérdidas de carga.
  6. Una tarea pendiente para futuros cohetes podría ser un estudio exhaustivo de reducción de peso, ya que en los diseños se ha mirado más por la resistencia y fiabilidad que por el bajo peso. De hecho, esto ha conducido a que NAOS acabe teniendo un peso final superior al estimado en un primer momento.
- **Fabricación:** La fabricación quizás sea el área en la que se tengan más cosas que mejorar, en comparación con el resto. Para NAOS se han seguido muchos procesos de fabricación diferentes, fallando en muchas ocasiones y teniendo que refabricar muchas piezas. Veamos algunas de las lecciones aprendidas:

1. Comencemos hablando de los procesos de fabricación más recurrentes:

- En primer lugar tenemos el proceso de fabricación de los granos de propulsante. Cómo ya se ha visto a lo largo de la memoria, es crítico que la fabricación sea lo más adecuada y rigurosa posible. De hecho, ningún grano de propulsante sale igual al anterior, por lo que también se debe desarrollar un criterio en base a la experiencia para poder discernir entre qué granos son válidos y cuáles no lo son. Se sabe que el parámetro para evaluar la bondad de un grano es la relación entre las densidades real e ideal. Sin embargo, la experiencia te enseña que hay muchos más factores que pueden influir a la hora de desechar un grano: la fragilidad o ductilidad del segmento de propulsante (en función de si se deja más tiempo o menos cocinando), la presencia de grietas internas en el grano, la deformidad del mismo dando lugar a una forma alejada del cilindro, la presencia de huecos entre el grano y la inhibición, etc. Por todo esto, es cierto que la fabricación del propulsante requiere una metodología estricta para poder obtener un producto final digno. Sin embargo, en muchas ocasiones se podría catalogar de "arte" más que de "ciencia", ya que es la práctica la que te guía en la mayoría de decisiones que se toman. Por ello, es imprescindible fallar y fracasar para poder avanzar.
- Otro proceso de fabricación recurrente se podría decir que es la fabricación de la inhibición. Aunque más que la fabricación, la integración de ésta. A lo largo de los años se hicieron numerosas pruebas y ensayos (que no se han comentado en esta memoria) relativos a qué inhibidores son los más idóneos. Se ha trabajado con cartulina, papel, pintura ignífuga, liner (cartel de "Se Vende"), resina epoxi, etc. De hecho, el proceso de experimentación con cada uno de ellos juntos y por separado ha aportado mucho conocimiento y experiencia al respecto. Por ejemplo, se sabe se debe usar un inhibidor que se desintegre en caso de entrar en combustión, o de lo contrario puede taponar la tobera y provocar la explosión. En definitiva,

la inhibición se ha convertido en una línea de estudio muy importante, siendo imprescindible su correcta fabricación e integración.

- Por último, la fabricación de los ignitores también es un punto crítico del lanzamiento, pues como se explico en el capítulo de estudios preliminares la carga de pólvora negra que se introduzca en ellos es determinante a la hora de definir la zona de "Start-Up" en la curva Empuje-Tiempo. A menor carga de pólvora más pronunciada será la parte creciente y viceversa. Además, una buena implementación fue el uso de papel de fumar para el empaquetamiento del ignitor, ya que al quemarse y ser expulsado por la tobera, no generaba picos tan agudos en la curva Empuje-Tiempo.
2. Ya se ha comentado el hecho de que al no tratarse de un proyecto profesional, se disponía en todo momento de recursos limitados. Eso condujo al punto de usar de forma recurrente materiales de fabricación tales como PVC, PLA, ABS y fibra de vidrio, todos ellos baratos y fáciles de encontrar en el mercado. La fibra de vidrio se trata de un material muy versátil, fácilmente adaptable a un molde, ligero y resistente, perfecto para usarlo en aplicaciones aeronáuticas. El PVC también cuenta con muy buena resistencia, así como un acabado muy liso, candidato perfecto para ocupar el lugar del fuselaje. Por su parte, el PLA y el ABS son materiales utilizados en la impresión 3D. El PLA tiene menor resistencia a la temperatura pero presenta unos mejores acabados de impresión, mientras que el ABS es más exigente respecto a parámetros de la impresora 3D y condiciones de la habitación donde se imprima (no puede haber corrientes de aire o perturbaciones y la pieza necesita mantener temperaturas altas en el ambiente para no solidificar prematuramente), pero el producto final tiene una mayor resistencia a la temperatura y presenta una mayor rigidez.
  3. Volviendo al tema de la impresión 3D, uno de los mejores avances que se ha tenido en este proyecto ha sido la adquisición de una impresora 3D. Ello ha permitido diseñar las piezas en un programa de CAD a imagen y semejanza de la idea que se tenía. Y luego, el resultado final era exactamente el imaginado. De hecho, muchas de las piezas diseñadas en 3D no podrían haberse fabricado de forma manual, y las que sí habrían resultado ser mucho menos profesionales que las que en el caso de haber sido imprimidas. Un claro ejemplo es la ojiva del cohete, ya que en proyectos anteriores se fabricaba en fibra de vidrio sobre un molde de poliespan. El resultado era un cono con un acabado mediocre, que en términos de eficiencia aerodinámica dejaba mucho que desear. Por lo tanto, la impresión 3D ha permitido mejorar en aerodinámica, compacidad y aprovechamiento del espacio y fabricación de moldes, como por ejemplo los que se usaron para los anillos de ajuste del motor cohete.
  4. Quizás, uno de los mayores retos fue la fabricación del paracaídas, un proceso tedioso y exigente que requiere de habilidad y buenas manos. De hecho, en este caso, al ser un paracaídas de 1,9 m de diámetro, la dificultad se vio altamente incrementada. Y como ocurría en el caso del propulsante, aunque existe un procedimiento y unas pautas a seguir para la confección del paracaídas, es la experiencia la que te da la maña para fabricarlo correctamente. Por ello, en este caso se podría considerar a la confección del paracaídas como un "arte".
  5. Es probable que la conclusión más importante sea que en muchas ocasiones el proyecto se vio muy limitado por las herramientas, materiales y procesos de fabricación de los que se disponía. Por ejemplo, el torneado de la tobera y el cierre posterior fue algo muy complejo de lograr a un precio más o menos económico. Por lo que, si se quería testear algún lanzamiento con otro tipo de tobera se debía fabricar una nueva, con los costes que ello conlleva. Por eso, el CATO del ensayo en banco de Diciembre de 2020 fue un

duro golpe moral y económico. Otra limitación fue la de usar PVC para el fuselaje de la sección del motor cohete o ABS en las aletas y anillo de aletas, ya que se tenía el riesgo de que las altas temperaturas del motor cohete debilitaran o deformaran el material permanentemente, lo que supondría tener que volver a fabricar la sección y conllevaría un retraso en la obra de fabricación. No obstante, gracias a estas limitaciones se logró explorar muchos métodos de fabricación muy útiles y que se mantienen a día de hoy, y se mantendrán en el futuro.

6. En definitiva, la fabricación es el proceso de llevar a la realidad un concepto o diseño previo, por lo que en muchas ocasiones, lo que se ha diseñado no coincide con lo que finalmente se fabrica. Esto ha conducido a tener que desechar varias piezas y rediseñar de nuevo hasta tener pulido por completo el diseño. Sin embargo, para el siguiente proyecto, se intentará no volver a cometer los mismos errores de diseño. De hecho, la mayor moraleja de los procesos de fabricación es que en muchas ocasiones es realmente complejo fabricar un producto perfectamente, siempre existirán errores de fabricación con los que habrá que convivir, al menos a nivel amateur.
- **Ensayos en banco y lanzamiento:** en realidad todas las conclusiones de cada ensayo en banco y del lanzamiento aparecen reflejadas en cada una de las secciones correspondientes. Sin embargo, el importante remarcar que sin duda alguna el momento de mayor progreso durante todo este proyecto fue tras el CATO sufrido en Diciembre de 2020. Se llegó a aquel ensayo en banco con muy buenas expectativas, habiendo realizado varias pruebas con anterioridad en la que los granos de propulsante largos habían dado muy buenos resultados, aumentando considerablemente el tiempo de combustión en cámara. Sin embargo, aquel día algo salió mal, y lo que pudo ser un éxito rotundo y el ensayo previo al lanzamiento, se convirtió en un nuevo punto de partida, que hizo que se pusiera en entredicho la viabilidad de los granos largos y los procesos de fabricación de estos.

Tras unas semanas de investigación se sacaron muy pocas cosas en claro. Por ello se tomó la decisión de contactar con una eminencia en el mundo de la cohetería amateur, y del que se ha hablado recurrentemente en esta memoria, el gran Richard Nakka. Richard lleva desde antes del año 2000 dedicándose fielmente al diseño, fabricación y testeo de cohetes amateur. Por ello, cuenta con una amplia experiencia, gracias a la cual logramos avanzar a pasos agigantados. Se cambió prácticamente todo el proceso de fabricación de los granos, su disposición dentro de la cámara y hubo que ser más estricto en la evaluación e inspección de cada grano de propulsante antes de decidir si sería un buen candidato o no para ser cargado en el motor cohete.

Para finalizar, este proyecto empezó siendo algo inocente y divertido, lanzando cohetes pequeños de papel endurecido, posteriormente se pasó a motores cohete de PVC, que ya presentaban unas mejores prestaciones pero que no eran reutilizables. Seguidamente, se planteó la posibilidad de fabricar motores cohete en acero inoxidable. Los hubo de diferentes tamaños hasta alcanzar el de diámetro 60 mm que es el que hemos visto en esta memoria, embarcado en NAOS. Con cada paso hacia el frente iban naciendo nuevos objetivos y cada vez más ambiciosos. Introduciendo sistemas de recuperación, cámaras de a bordo, guías para la rampa, aletas intercambiables, electrónica, etc. Pero la mayor lección aprendida es que hay que fallar y fracasar, el fracaso es el hilo y los objetivos la aguja, juntos tejen el progreso. Y el progreso sólo puede llevar al éxito, de hecho como dijo el gran Elon Musk: "El fracaso es aquí una opción. Si las cosas no fallan es que no estás innovando lo suficiente". Este proyecto no ha hecho más que empezar, aún queda mucha innovación y objetivos que cumplir, y con cada avance se multiplican las ganas de seguir adelante, así que, ¡vayamos a por el siguiente objetivo!

# Apéndice A

## Información adicional de Estudios Preliminares

---

### A.1 Características químicas pólvora

#### A.1.1 Características del propulsante $KNO_3$ -Sacarosa

|          | Parámetros                                       |       | Unidades          | Notas                                                                    |
|----------|--------------------------------------------------|-------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|          | <b>Método de Proceso</b>                         |       |                   |                                                                          |
| $I_{sp}$ | Impulso Específico (ideal)                       | 166   | s                 | A 1000 psi de presión                                                    |
| $I_{sp}$ | Impulso Específico (real)                        | 130   | s                 | Medido en ensayo en banco                                                |
| $C^*$    | Velocidad Característica (teórica)               | 946,7 | m/s               |                                                                          |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (teórica a 1000 psi)   | 1447  | C                 | Resultados de la combustión en el PROPELLANT Evaluation Program (PROPEP) |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (real a 1000 psi)      | 1350  | C                 |                                                                          |
|          | Densidad ideal                                   | 1,89  | g/cm <sup>3</sup> |                                                                          |
|          | Densidad real                                    | 1,80  | g/cm <sup>3</sup> | Medido con el método de líquido desplazado                               |
| $k$      | Ratio de Calentamiento Específico                | 1,044 | -                 | En condiciones de cámara (en condiciones estáticas k=1.133)              |
|          | <b>Comportamiento de la Velocidad de quemado</b> |       |                   |                                                                          |
| $r_0$    | Velocidad de quemado a 1 atm                     | 0,396 | cm/s              |                                                                          |
| $r$      | Velocidad de quemado a 1000 psi                  | 1,529 | cm/s              |                                                                          |
| $T_{cr}$ | Temperatura de autoignición                      | > 300 | °C                |                                                                          |



A.1.2 Características del propulsante  $KNO_3$ -Dextrosa

|          | Parámetros                                       |       | Unidades          | Notas                                                                    |
|----------|--------------------------------------------------|-------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|          | <b>Método de Proceso</b>                         |       |                   |                                                                          |
| $I_{sp}$ | Impulso Específico (ideal)                       | 164   | s                 | A 1000 psi de presión                                                    |
| $I_{sp}$ | Impulso Específico (real)                        | 137   | s                 | Medido en ensayo en banco                                                |
| $C^*$    | Velocidad Característica (teórica)               | 912   | m/s               |                                                                          |
| $C^*$    | Velocidad Característica (real)                  | 891   | m/s               | Medido en una prueba de recipiente cerrado                               |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (teórica a 1000 psi)   | 1437  | C                 | Resultados de la combustión en el PROPELLANT Evaluation Program (PROPEP) |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (real a 1000 psi)      | TBD   | C                 |                                                                          |
|          | Densidad ideal                                   | 1,879 | g/cm <sup>3</sup> |                                                                          |
|          | Densidad real                                    | 1,859 | g/cm <sup>3</sup> | Medido con el método de líquido desplazado                               |
| $k$      | Ratio de Calentamiento Específico                | 1043  | -                 | En condiciones de cámara (en condiciones estáticas $k=1.131$ )           |
|          | <b>Comportamiento de la Velocidad de quemado</b> |       |                   |                                                                          |
| $r_0$    | Velocidad de quemado a 1 atm                     | 0,213 | cm/s              |                                                                          |
| $r$      | Velocidad de quemado a 1000 psi                  | 1,29  | cm/s              |                                                                          |
| $T_{cr}$ | Temperatura de autoignición                      | > 300 | °C                |                                                                          |

A.1.3 Características del propulsante  $KNO_3$ -Sorbitol

|          | Parámetros                                       |       | Unidades          | Notas                                                                    |
|----------|--------------------------------------------------|-------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|          | <b>Método de Proceso</b>                         |       |                   |                                                                          |
| $I_{sp}$ | Impulso Específico (ideal)                       | 164   | s                 | A 1000 psi de presión                                                    |
| $C^*$    | Velocidad Característica (teórica)               | 938   | m/s               |                                                                          |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (teórica a 1000 psi)   | 1327  | °C                | Resultados de la combustión en el PROPELLANT Evaluation Program (PROPEP) |
| $T_0$    | Temperatura de Combustión (real a 1000 psi)      | TBD   | °C                |                                                                          |
|          | Densidad ideal                                   | 1,841 | g/cm <sup>3</sup> |                                                                          |
|          | Densidad real                                    | 1,82  | g/cm <sup>3</sup> | Medido con el método de líquido desplazado                               |
| $k$      | Ratio de Calentamiento Específico                | 1,042 | -                 | En condiciones de cámara                                                 |
|          | <b>Comportamiento de la Velocidad de quemado</b> |       |                   |                                                                          |
| $r_0$    | Velocidad de quemado a 1 atm                     | 0.259 | cm/s              |                                                                          |
| $r$      | Velocidad de quemado a 1000 psi                  | 1.125 | cm/s              |                                                                          |
| $T_{cr}$ | Temperatura de autoignición                      | > 300 | °C                |                                                                          |

# Apéndice B

## Características de los paracaídas

### B.1 Tablas coeficientes de interés para diferentes geometrías de paracaídas

TABLE 5-1. Solid Textile Parachutes.

| TYPE                      | CONSTRUCTED SHAPE |         | $\frac{D_c}{D_o}$ | INFLATED SHAPE<br>$\frac{D_p}{D_o}$ | DRAG COEF<br>$C_{D_o}$<br>RANGE | OPENING FORCE COEF<br>$C_X$<br>(INF MASS) | AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES | GENERAL APPLICATION                  |
|---------------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                           | PLAN              | PROFILE |                   |                                     |                                 |                                           |                                       |                                      |
| FLAT CIRCULAR             |                   |         | 1.00              | 0.67 TO 0.70                        | 0.75 TO 0.80                    | ~1.7                                      | ±10 TO ±40                            | DESCENT, OBSOLETE                    |
| CONICAL                   |                   |         | 0.93 TO 0.95      | 0.70                                | 0.75 TO 0.90                    | ~1.8                                      | ±10 TO ±30                            | DESCENT, M < 0.5                     |
| BICONICAL                 |                   |         | 0.90 TO 0.95      | 0.70                                | 0.75 TO 0.92                    | ~1.8                                      | ±10 TO ±30                            | DESCENT, M < 0.5                     |
| TRICONICAL POLYCONICAL    |                   |         | 0.90 TO 0.95      | 0.70                                | 0.80 TO 0.96                    | ~1.8                                      | ±10 TO ±20                            | DESCENT, M < 0.5                     |
| EXTENDED SKIRT 10% FLAT   |                   |         | 0.86              | 0.66 TO 0.70                        | 0.78 TO 0.87                    | ~1.4                                      | ±10 TO ±15                            | DESCENT, M < 0.5                     |
| EXTENDED SKIRT 14.3% FULL |                   |         | 0.81 TO 0.85      | 0.66 TO 0.70                        | 0.75 TO 0.90                    | ~1.4                                      | ±10 TO ±15                            | DESCENT, M < 0.5                     |
| HEMISPHERICAL             |                   |         | 0.71              | 0.66                                | 0.62 TO 0.77                    | ~1.6                                      | ±10 TO ±15                            | DESCENT, M < 0.5, OBSOLETE           |
| GUIDE SURFACE (RIBBED)    |                   |         | 0.63              | 0.62                                | 0.28 TO 0.42                    | ~1.2                                      | 0 TO ±2                               | STABILIZATION, DROGUE, 0.1 < M < 1.5 |
| GUIDE SURFACE (RIBLESS)   |                   |         | 0.66              | 0.63                                | 0.30 TO 0.34                    | ~1.4                                      | 0 TO ±3                               | PILOT, DROGUE, 0.1 < M < 1.5         |
| ANNULAR                   |                   |         | 1.04              | 0.94                                | 0.85 TO 0.95                    | ~1.4                                      | < ±6                                  | DESCENT, M < 0.5                     |
| CROSS                     |                   |         | 1.15 TO 1.19      | 0.65 TO 0.72                        | 0.60 TO 0.85                    | 1.1 TO 1.2                                | 0 TO ±3                               | DESCENT, DECELERATION                |

## NWC TP 6575

TABLE S-2. Slotted Parachutes.

| TYPE                             | CONSTRUCTED SHAPE                                                                   |                                                                                     | $\frac{D_c}{D_o}$  | INFLATED SHAPE<br>$\frac{D_p}{D_o}$ | DRAG COEF<br>$C_{D_o}$<br>RANGE | OPENING FORCE COEF<br>$C_X$<br>(INF MASS) | AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES | GENERAL APPLICATION                          |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                  | PLAN                                                                                | PROFILE                                                                             |                    |                                     |                                 |                                           |                                       |                                              |
| FLAT (FIST) RIBBON               |    |    | 1.00               | 0.67                                | 0.45<br>TO<br>0.50              | -1.05                                     | 0<br>TO<br>±3                         | DROGUE, DESCENT, DECELERATION, OBSOLETE      |
| CONICAL RIBBON                   |    |    | 0.95<br>TO<br>0.97 | 0.70                                | 0.50<br>TO<br>0.55              | -1.05                                     | 0<br>TO<br>±3                         | DESCENT, DECELERATION, 0.1 < M < 2.0         |
| CONICAL RIBBON (VARIED POROSITY) |    |    |                    | 0.70                                | 0.55<br>TO<br>0.60              | 1.05<br>TO<br>1.30                        | 0<br>TO<br>±3                         | DROGUE, DESCENT, DECELERATION, 0.1 < M < 2.0 |
| RIBBON <sup>1</sup> (HEMISFLO)   |    |    | 0.62               | 0.62                                | 0.30 <sup>1</sup><br>TO<br>0.46 | 1.00<br>TO<br>1.30                        | ±2                                    | SUPERSONIC, DROGUE, 1.0 < M < 3.0            |
| RINGSLOT                         |    |    | 1.00               | 0.67<br>TO<br>0.70                  | 0.56<br>TO<br>0.65              | -1.05                                     | 0<br>TO<br>±5                         | EXTRACTION, DECELERATION, 0.1 < M < 0.9      |
| RINGSAIL                         |   |   | 0.84               | 0.69                                | 0.75<br>TO<br>0.86              | -1.10                                     | ±5<br>TO<br>±10                       | DESCENT, M < 0.5                             |
| DISC-GAP-BAND                    |  |  | 0.73               | 0.65                                | 0.52<br>TO<br>0.58              | -1.30                                     | ±10<br>TO<br>±15                      | DESCENT, M < 0.5                             |

<sup>1</sup>FOR SUPERSONIC APPLICATION, SEE SECTION 5.8

TABLE S-3. Rotating Parachutes.

| TYPE        | CONSTRUCTED SHAPE                                                                   |                                                                                     | $\frac{n_i}{n_o}$ | INFLATED SHAPE<br>$\frac{n_p}{n_o}$ | DRAG COEF<br>$C_{D_o}$<br>RANGE | OPENING FORCE COEF<br>$C_X$<br>(INF MASS) | AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES | GENERAL APPLICATION  |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
|             | PLAN                                                                                | PROFILE                                                                             |                   |                                     |                                 |                                           |                                       |                      |
| ROTAFOIL    |  |  | 1.0               | -0.90                               | 0.85<br>TO<br>0.99              | 1.05                                      | 0<br>TO<br>±2                         | DROGUE<br>$D_o < 7$  |
| VORTEX RING |  |  | 1.9               | N/A                                 | 1.5<br>TO<br>1.8                | 1.1<br>TO<br>1.2                          | 0<br>TO<br>±2                         | DESCENT, SMALL $D_o$ |
| SANDIA RFD  |  |  | 1.0               | -0.9                                | 1.25                            | 1.1                                       | 0<br>TO<br>±2                         | DROGUE               |

TABLE S-4. Maneuverable (Gliding) Parachutes.

| TYPE                        | CONSTRUCTED SHAPE                                                                   |                                                                                     | AREA<br>RATIO<br>$\frac{S_w}{S_D}$ | AERODYNAMIC<br>FORCE COEF<br>$C_R$<br>RANGE | GLIDE<br>RATIO<br>$L/D$ MAX     | GENERAL<br>APPLICATION |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
|                             | PLAN                                                                                | PROFILE                                                                             |                                    |                                             |                                 |                        |
| TOJO, TU<br>SLOTS, ETC      |    |    | 1.0                                | 0.85<br>TO<br>0.90                          | 0.5<br>TO<br>0.7                | DESCENT                |
| LEMOIGNE<br>(PARACOMMANDER) |    |    | 1.0                                | 0.90<br>TO<br>1.00                          | 1.1                             | DESCENT                |
| PARAWING<br>(SINGLE KEEL)   |   |   | 1.0                                | 0.90<br>TO<br>1.10                          | 2.0<br>TO<br>2.5                | DESCENT                |
| PARAWING<br>(TWIN KEEL)     |  |  | 1.0                                | 1.00<br>TO<br>1.10                          | 2.8 <sup>1/2</sup><br>TO<br>3.0 | DESCENT                |
| PARAFOIL                    |  |  | 0.27                               | 0.75<br>TO<br>0.85                          | 2.8 <sup>1/2</sup><br>TO<br>3.5 | DESCENT                |
| SAILWING                    |  |  | 0.80<br>TO<br>0.90                 | N A                                         | 2.8 <sup>1/2</sup><br>TO<br>3.5 | DESCENT                |
| VOLPLANE                    |  |  | 0.60                               | N A                                         | 2.0 <sup>1/2</sup><br>TO<br>3.0 | DESCENT                |

<sup>1/2</sup>GLIDE RATIO IS AFFECTED BY ASPECT RATIO,  $W$ , AND CANOPY LOADING,  $W/S$ .

Note: Maneuverable parachutes with a glide ratio  $L/D$  of 2.5 or better have been defined in the literature as "hi-glide parachutes." This includes the parawing, the parafoil, the sailwing, and the volplane.





## Apéndice C

# Diseño de NAOS

---

### C.1 Tablas normalizadas de tubos de PVC

| Diámetro exterior mm. | Referencia      | Espesor mm. | Peso tubo Kgrs. | Long total tubo mts. | Precio € metro | Precio € por tubo |
|-----------------------|-----------------|-------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------------|
| 50                    | 800.050.058     | 1,50        | 2,122           | 5,80                 | 3,20           | 18,57             |
| 63                    | 800.063.058     | 1,50        | 2,691           | 5,80                 | 3,48           | 20,17             |
| (1) 83                | 800.083.030     | 1,80        | 2,154           | 3,00                 | 5,25           | 15,76             |
| (1) 83                | 800.083.050     | 1,80        | 3,589           | 5,00                 | 5,25           | 26,27             |
| 110                   | 800.110.030     | 2,20        | 3,468           | 3,00                 | 8,48           | 25,43             |
| (2) 110               | 800.110.030.010 | 2,20        | 3,468           | 3,00                 | 8,74           | 26,23             |
| 110                   | 800.110.050     | 2,20        | 5,779           | 5,00                 | 8,48           | 42,38             |
| (2) 110               | 800.110.050.010 | 2,20        | 5,779           | 5,00                 | 8,74           | 43,72             |
| 125                   | 800.125.030     | 2,50        | 4,471           | 3,00                 | 10,92          | 32,76             |
| 125                   | 800.125.050     | 2,50        | 7,452           | 5,00                 | 10,92          | 54,60             |

**Figura C.1** Tabla normalizada de tubos de PVC Pluvial.

| DIÁMETROS NORMALIZADOS (NOMINAL E INTERIOR) PARA TUBERIAS DE PVC |         |       |        |        |
|------------------------------------------------------------------|---------|-------|--------|--------|
| DN (mm)                                                          | DI (mm) |       |        |        |
|                                                                  | 4 atm   | 6 atm | 10 atm | 16 atm |
| 16                                                               | -       | -     | -      | 13,6   |
| 20                                                               | -       | 17,5  | -      | 17     |
| 25                                                               | 22,6    | 22,6  | 22     | 21,2   |
| 32                                                               | 29,6    | 29,2  | 28,4   | 27,2   |
| 40                                                               | 37,2    | 36,4  | 36     | 34     |
| 50                                                               | 47,2    | 46,4  | 45,2   | 42,6   |
| 63                                                               | 59,4    | 59,2  | 57     | 53,6   |
| 75                                                               | 71,4    | 70,6  | 67,8   | 63,8   |
| 90                                                               | 86,4    | 84,6  | 81,4   | 76,6   |
| 110                                                              | 105,6   | 103,6 | 99,4   | 93,6   |
| 125                                                              | 120     | 117,6 | 113    | 106,4  |
| 140                                                              | 134,4   | 131,8 | 126,6  | 119,2  |
| 160                                                              | 153,6   | 150,6 | 144,6  | 136,2  |
| 180                                                              | 172,8   | 169,4 | 162,8  | 153,2  |
| 200                                                              | 192     | 188,2 | 180,8  | 170,4  |
| 225                                                              | 216     | 211,8 | 203,4  | 191,4  |
| 250                                                              | 240,2   | 235,4 | 226,2  | 213    |
| 280                                                              | 269     | 263,6 | 253,2  | 238,4  |
| 315                                                              | 302,6   | 296,6 | 285    | 268,2  |
| 355                                                              | 341     | 334,2 | 321,2  | 302,4  |
| 400                                                              | 384,2   | 376,6 | 361,8  | 340,6  |
| 450                                                              | 432,4   | 423,8 | 407    | 383,2  |
| 500                                                              | 480,4   | 470,8 | 452,2  | 425,8  |

Figura C.2 Tabla normalizada de tubos de PVC.

## C.2 Tablas normalizadas de tubos de Acero Inoxidable

| Tubos Inoxidable Grakdo 304 / Grado 316 |                         |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| Dimensiones<br>mm                       | Peso Teórico<br>Kg / mt |
| 50.8 x 1.2                              | 1.48                    |
| 50.8 x 1.5                              | 1.84                    |
| 50.8 x 2.0                              | 2.43                    |
| 63.4 x 1.2                              | 1.86                    |
| 63.4 x 1.5                              | 2.32                    |
| 63.4 x 2.0                              | 3.06                    |
| 76.2 x 1.2                              | 2.25                    |
| 76.2 x 1.5                              | 2.80                    |
| 76.2 x 2.0                              | 3.70                    |

Figura C.3 Tabla normalizada de tubos de Acero Inoxidable.

**ACERO INOXIDABLE 304  
(UNS S30400)**

**1. Descripción:** éste es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidable de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

**2. Normas involucradas:** ASTM A 276

**3. Propiedades mecánicas:** Resistencia a la fluencia 310 MPa (45 KSI)  
Resistencia máxima 620 MPa (90 KSI)  
Elongación 30 % (en 50mm)  
Reducción de área 40 %  
Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.8 g/cm³ (0.28 lb/in³)

**5. Propiedades químicas:** 0.08 % C mín  
2.00 % Mn  
1.00 % Si  
18.0 – 20.0 % Cr  
8.0 – 10.5 % Ni  
0.045 % P  
0.03 % S

**6. Usos:** sus usos son muy variados, se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego.

**7. Tratamientos térmicos:** éste acero inoxidable no puede ser endurecido por tratamiento térmico. Para el recocido, caliente entre 1010 y 1120°C y enfríe rápidamente

NOTA:  
Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

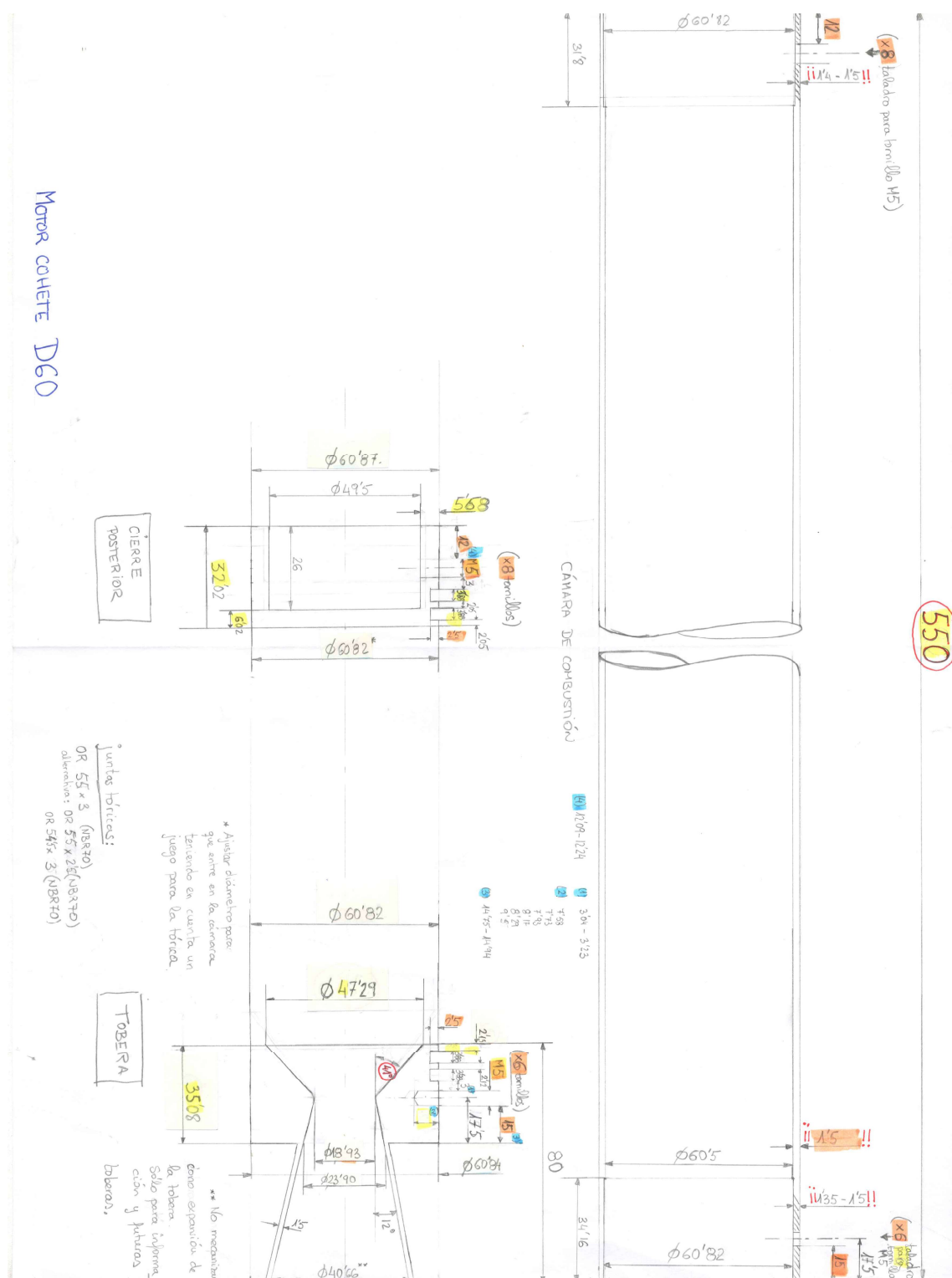
Figura C.4 Propiedades Acero Inoxidable 304.

## C.3 Tabla de la clase del motor cohete

| Rocket Motor Classification |                                   |   |           |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|-----------|
| Class                       | Total Impulse<br>(Newton-seconds) |   |           |
|                             | Equal or greater than             |   | Less than |
| A                           | 1.26                              | > | 2.5       |
| B                           | 2.5                               | > | 5         |
| C                           | 5                                 | > | 10        |
| D                           | 10                                | > | 20        |
| E                           | 20                                | > | 40        |
| F                           | 40                                | > | 80        |
| G                           | 80                                | > | 160       |
| H                           | 160                               | > | 320       |
| I                           | 320                               | > | 640       |
| J                           | 640                               | > | 1280      |
| K                           | 1280                              | > | 2560      |
| L                           | 2560                              | > | 5120      |
| M                           | 5120                              | > | 10240     |
| N                           | 10240                             | > | 20480     |
| O                           | 20480                             | > | 40960     |
| P                           | 40960                             | > | 81920     |
| Q                           | 81920                             | > | 163840    |
| R                           | 163840                            | > | 327680    |
| S                           | 327680                            | > | 655360    |
| T                           | 655360                            | > | 1310720   |

**Figura C.5** Clase del motor cohete en función de su impulso total [1].

**C.4 Planos de secciones del motor cohete**



**Figura C.6** Planos de las secciones del motor cohete.

## C.5 DataSheet e hojas de información de los componentes electrónicos

### C.5.1 DataSheet del Potenciómetro PT-15 (Timer)



## 15 mm Carbon Potentiometer

- Carbon resistive element.
- IP54 protection according to IEC 60529.
- Polyester substrate.
- Also upon request:
  - Long life model for low cost control pot. applications
  - Low torque option
  - Supplied in magazines for automatic insertion.
  - Wiper positioned at initial, 50% or fully clockwise.
  - Self extinguishable plastic UL 94V-0.
  - Cut track option.
  - Special Tapers.
  - Mechanical detents.

- Mechanical rotation angle:  $265^{\circ} \pm 5^{\circ}$   
 $240^{\circ} \pm 5^{\circ}$  available under drawing (blue housing only)
- Electrical rotation angle:  $240^{\circ} \pm 20^{\circ}$
- Torque: 0.5 to 2.5 Ncm.  
(0.7 to 3.4 in-oz)
- Stop torque: > 10 Ncm. (>14 in-oz)
- Life\*: Up to 100K cycles

\*\* Up to 85°C depending on application.

- Range of values\*:  
 $100\Omega \leq R_n \leq 5\text{ M}$  (Decad. 1.0 - 2.0 - 2.2 - 2.5 - 4.7 - 5.0)
- Tolerance\*:  
 $100\Omega \leq R_n \leq 1\text{M}\Omega$        $\pm 20\%$   
 $1\text{M}\Omega < R_n \leq 5\text{M}$        $\pm 30\%$
- Max. Voltage: 250 VDC (lin) 125 VDC (no lin)
- Nominal Power 50°C (122°F) (see power rating curve)  
0.25 W (lin) 0.12 W (no lin)
- Taper\*: (Log. & Alog. only  $R_n \geq 1\text{K}$ )    Lin ; Log; Alog.
- Residual resistance\*:  $\leq 0.5\%$   $R_n$  (5  $\Omega$  min.)
- Equivalent Noise Resistance:  $\leq 3\%$   $R_n$  (3  $\Omega$  min.)
- Operating temperature\*\*:  $-25^\circ\text{C} + 70^\circ\text{C}$  ( $-13^\circ\text{F} + 158^\circ\text{F}$ )

|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|----------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>PT15</b>                                              | <b>L</b> | <b>H01 - 223 A 2020</b>                                                                                                                                                 | - |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       | S                                |                                                             |
| <b>Series</b>                                            |          | Code Mounting Method                                                                                                                                                    |   | <b>Taper</b>                                          |                                                                            | <b>Life</b>                                                       |  | <b>Detents</b>                                     |                                                                  | <b>Flammability</b>                                                                                                                   |                                  | <b>Wiper position</b>                                       |
|                                                          |          | H01 H2.5<br>H05 H5<br>H25 HC5<br>H06 B<br>H02 H2.5P<br>H10 H5P<br>V02 V12.5<br>V12 VA<br>V15 V15<br>V17 V17.5<br>V18 D<br>V24 VD15<br>V21 V12.5P<br>V22 VAP<br>V23 V15P |   | A = Lin.<br>B = Log.<br>C = Alog.                     |                                                                            | E= Long life<br>U= Extra Long life<br><small>(See note 5)</small> |  | PAI<br>PAM<br>PAF<br>P1I<br>P1F<br>P02<br>:<br>P38 |                                                                  | I= non flammable<br><small>(See note 6)</small>                                                                                       |                                  | PM = 50%<br>PF = Final                                      |
| <b>Rotors</b>                                            |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
| C<br>F<br>G<br>L<br>M<br>N<br>R<br>T<br>X<br>W<br>Y<br>Z |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
| <small>(See note 1)</small>                              |          | <small>(See note 2)</small>                                                                                                                                             |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   | <b>Value</b>                                          | <b>Tolerance</b>                                                           |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   | 101 = 100 Ω<br>223 = 22 K<br>504 = 500 K<br>505 = 5 M | 0505 = ± 5%<br>0707 = ± 7%<br>1010 = ± 10%<br>2020 = ± 20%<br>3030 = ± 30% |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   | <small>(See note 3)</small>                           | <small>(See note 4)</small>                                                |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  | <b>Cut track</b>                                   |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  | PCI = Initial<br>PCF= Final                        |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    | <b>Shaft/Thum.</b>                                               |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    | 01 – Fig. 1<br>:<br>28 – Fig. 28<br><small>(See note 10)</small> |                                                                                                                                       |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  | <b>Shaft/rotor colour</b>                                                                                                             |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  | RO=Red<br>NE=Black<br>VE=Green<br>AM=Yellow<br>AZ=Blue<br>MA=Brown<br>GR=Grey<br>NA=Orange<br>CR=Cream<br><small>(See note 7)</small> |                                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       | <b>Magazine</b>                  |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       | T<br><small>(See note 9)</small> |                                                             |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  | <b>Torque</b>                                               |
|                                                          |          |                                                                                                                                                                         |   |                                                       |                                                                            |                                                                   |  |                                                    |                                                                  |                                                                                                                                       |                                  | = Standard<br>L = Low torque<br><small>(See note 8)</small> |

- (1) "Z" adjustment only available on "H" versions. Standard colour for the "T" rotor: Orange.
- (2) Terminal styles: "P" are crimped terminals. V24 terminals material: brass. V=Vertical adjust; H=Horizontal Adjust
- (3) Value: Example: Code: 
 

|  |           |          |                                |  |              |       |           |           |                                          |
|--|-----------|----------|--------------------------------|--|--------------|-------|-----------|-----------|------------------------------------------|
|  | <u>10</u> | <u>1</u> | 100 Ω                          |  | Example: +7% | Code: | <u>07</u> | <u>05</u> |                                          |
|  | └─┬───┘   |          | Numb of zeros.                 |  | -5%          |       | └─┬───┘   |           |                                          |
|  |           |          | First two digits of the value. |  |              |       |           |           | negative tolerance<br>positive tolerance |
- (4) Non standard tolerance: check availability.
- (5) Life
  - Standard: 1K cycles.
  - Long life: 10K cycles.
  - Extra long life: 100K cycles (Only for low torque versions. To be studied case by case.)
- (6) Non flammable: housing, rotor and shaft. According to UL 94V-0
- (7) Colour shaft/rotor:
  - Potentiometer without shaft: only rotor
  - Potentiometer with shaft: only shaft
 Cream colour only available in standard plastic.
- (8) Low Torque: ≤1.5Ncm. *No detent option available for low torque models.*
- (9) Magazines (35 pcs/mag): available for VA (12.5), V (12.5), V (12.5P), V (15), V15 (P) and H models.  
For more information please contact your nearest Piher supplier.
- (10) If you wish to use your own custom plastic shaft/knob/actuator please contact Piher for advice about compatible materials.

**www.piher.net**

### C.5.2 DataSheet del MOSFET IRF520 (Timer)

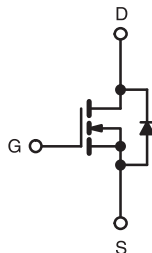
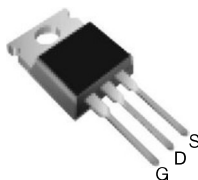


## Power MOSFET

## PRODUCT SUMMARY

|                           |                        |      |
|---------------------------|------------------------|------|
| $V_{DS}$ (V)              | 100                    |      |
| $R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ ) | $V_{GS} = 10\text{ V}$ | 0.27 |
| $Q_g$ (Max.) (nC)         | 16                     |      |
| $Q_{gs}$ (nC)             | 4.4                    |      |
| $Q_{gd}$ (nC)             | 7.7                    |      |
| Configuration             | Single                 |      |

TO-220AB



N-Channel MOSFET

## FEATURES

- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

RoHS\*  
COMPLIANT

## DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

## ORDERING INFORMATION

|                |                         |
|----------------|-------------------------|
| Package        | TO-220AB                |
| Lead (Pb)-free | IRF520PbF<br>SiHF520-E3 |
| SnPb           | IRF520<br>SiHF520       |

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_C = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise noted)

| PARAMETER                                        |                         |                         | SYMBOL                            | LIMIT            | UNIT     |
|--------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------|----------|
| Drain-Source Voltage                             |                         |                         | V <sub>DS</sub>                   | 100              | V        |
| Gate-Source Voltage                              |                         |                         | V <sub>GS</sub>                   | ± 20             |          |
| Continuous Drain Current                         | V <sub>GS</sub> at 10 V | T <sub>C</sub> = 25 °C  | I <sub>D</sub>                    | 9.2              | A        |
|                                                  |                         | T <sub>C</sub> = 100 °C |                                   | 6.5              |          |
| Pulsed Drain Current <sup>a</sup>                |                         |                         | I <sub>DM</sub>                   | 37               |          |
| Linear Derating Factor                           |                         |                         |                                   | 0.40             | W/°C     |
| Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>       |                         |                         | E <sub>AS</sub>                   | 200              | mJ       |
| Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>        |                         |                         | I <sub>AR</sub>                   | 9.2              | A        |
| Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>         |                         |                         | E <sub>AR</sub>                   | 6.0              | mJ       |
| Maximum Power Dissipation                        | T <sub>C</sub> = 25 °C  |                         | P <sub>D</sub>                    | 60               | W        |
| Peak Diode Recovery dV/dt <sup>c</sup>           |                         |                         | dV/dt                             | 5.5              | V/ns     |
| Operating Junction and Storage Temperature Range |                         |                         | T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub> | - 55 to + 175    | °C       |
| Soldering Recommendations (Peak Temperature)     | for 10 s                |                         |                                   | 300 <sup>d</sup> |          |
| Mounting Torque                                  | 6-32 or M3 screw        |                         |                                   | 10               | lbf · in |
|                                                  |                         |                         |                                   | 1.1              | N · m    |

## Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 25\text{ V}$ , starting  $T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $L = 3.5\text{ mH}$ ,  $R_g = 25\text{ }\Omega$ ,  $I_{AS} = 9.2\text{ A}$  (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 9.2\text{ A}$ ,  $dI/dt \leq 110\text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{DD} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- 1.6 mm from case.

\* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

# IRF520, SiHF520

Vishay Siliconix



## THERMAL RESISTANCE RATINGS

| PARAMETER                           | SYMBOL     | TYP. | MAX. | UNIT |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|
| Maximum Junction-to-Ambient         | $R_{thJA}$ | -    | 62   | °C/W |
| Case-to-Sink, Flat, Greased Surface | $R_{thCS}$ | 0.50 | -    |      |
| Maximum Junction-to-Case (Drain)    | $R_{thJC}$ | -    | 2.5  |      |

## SPECIFICATIONS ( $T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise noted)

| SPECIFICATIONS (T <sub>J</sub> = 25 °C, unless otherwise noted) |                                  |                                                                                                                            |                                                                                   |      |      |       |      |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|------|
| PARAMETER                                                       | SYMBOL                           | TEST CONDITIONS                                                                                                            |                                                                                   | MIN. | TYP. | MAX.  | UNIT |
| Static                                                          |                                  |                                                                                                                            |                                                                                   |      |      |       |      |
| Drain-Source Breakdown Voltage                                  | V <sub>DS</sub>                  | V <sub>GS</sub> = 0 V, I <sub>D</sub> = 250 μA                                                                             |                                                                                   | 100  | -    | -     | V    |
| V <sub>DS</sub> Temperature Coefficient                         | ΔV <sub>DS</sub> /T <sub>J</sub> | Reference to 25 °C, I <sub>D</sub> = 1 mA                                                                                  |                                                                                   | -    | 0.13 | -     | V/°C |
| Gate-Source Threshold Voltage                                   | V <sub>GS(th)</sub>              | V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250 μA                                                                |                                                                                   | 2.0  | -    | 4.0   | V    |
| Gate-Source Leakage                                             | I <sub>GSS</sub>                 | V <sub>GS</sub> = ± 20 V                                                                                                   |                                                                                   | -    | -    | ± 100 | nA   |
| Zero Gate Voltage Drain Current                                 | I <sub>DSS</sub>                 | V <sub>DS</sub> = 100 V, V <sub>GS</sub> = 0 V                                                                             |                                                                                   | -    | -    | 25    | μA   |
|                                                                 |                                  | V <sub>DS</sub> = 80 V, V <sub>GS</sub> = 0 V, T <sub>J</sub> = 150 °C                                                     |                                                                                   | -    | -    | 250   |      |
| Drain-Source On-State Resistance                                | R <sub>DS(on)</sub>              | V <sub>GS</sub> = 10 V                                                                                                     | I <sub>D</sub> = 5.5 A <sup>b</sup>                                               | -    | -    | 0.27  | Ω    |
| Forward Transconductance                                        | g <sub>fs</sub>                  | V <sub>DS</sub> = 50 V, I <sub>D</sub> = 5.5 A <sup>b</sup>                                                                |                                                                                   | 2.7  | -    | -     | S    |
| Dynamic                                                         |                                  |                                                                                                                            |                                                                                   |      |      |       |      |
| Input Capacitance                                               | C <sub>iss</sub>                 | V <sub>GS</sub> = 0 V,<br>V <sub>DS</sub> = 25 V,<br>f = 1.0 MHz, see fig. 5                                               |                                                                                   | -    | 360  | -     | pF   |
| Output Capacitance                                              | C <sub>oss</sub>                 |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 150  | -     |      |
| Reverse Transfer Capacitance                                    | C <sub>rss</sub>                 |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 34   | -     |      |
| Total Gate Charge                                               | Q <sub>g</sub>                   | V <sub>GS</sub> = 10 V                                                                                                     | I <sub>D</sub> = 9.2 A, V <sub>DS</sub> = 80 V,<br>see fig. 6 and 13 <sup>b</sup> | -    | -    | 16    | nC   |
| Gate-Source Charge                                              | Q <sub>gs</sub>                  |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | -    | 4.4   |      |
| Gate-Drain Charge                                               | Q <sub>gd</sub>                  |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | -    | 7.7   |      |
| Turn-On Delay Time                                              | t <sub>d(on)</sub>               | V <sub>DD</sub> = 50 V, I <sub>D</sub> = 9.2 A,<br>R <sub>g</sub> = 18 Ω, R <sub>D</sub> = 5.2 Ω, see fig. 10 <sup>b</sup> |                                                                                   | -    | 8.8  | -     | ns   |
| Rise Time                                                       | t <sub>r</sub>                   |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 30   | -     |      |
| Turn-Off Delay Time                                             | t <sub>d(off)</sub>              |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 19   | -     |      |
| Fall Time                                                       | t <sub>f</sub>                   |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 20   | -     |      |
| Internal Drain Inductance                                       | L <sub>D</sub>                   | Between lead,<br>6 mm (0.25") from<br>package and center of<br>die contact                                                 |                                                                                   | -    | 4.5  | -     | nH   |
| Internal Source Inductance                                      | L <sub>S</sub>                   |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 7.5  | -     |      |
| Drain-Source Body Diode Characteristics                         |                                  |                                                                                                                            |                                                                                   |      |      |       |      |
| Continuous Source-Drain Diode Current                           | I <sub>S</sub>                   | MOSFET symbol<br>showing the<br>integral reverse<br>p - n junction diode                                                   |                                                                                   | -    | -    | 9.2   | A    |
| Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>                       | I <sub>SM</sub>                  |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | -    | 37    |      |
| Body Diode Voltage                                              | V <sub>SD</sub>                  | T <sub>J</sub> = 25 °C, I <sub>S</sub> = 9.2 A, V <sub>GS</sub> = 0 V <sup>b</sup>                                         |                                                                                   | -    | -    | 1.8   | V    |
| Body Diode Reverse Recovery Time                                | t <sub>rr</sub>                  | T <sub>J</sub> = 25 °C, I <sub>F</sub> = 9.2 A, dI/dt = 100 A/μs <sup>b</sup>                                              |                                                                                   | -    | 110  | 260   | ns   |
| Body Diode Reverse Recovery Charge                              | Q <sub>rr</sub>                  |                                                                                                                            |                                                                                   | -    | 0.53 | 1.3   | μC   |
| Forward Turn-On Time                                            | t <sub>on</sub>                  | Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L <sub>S</sub> and L <sub>D</sub> )                          |                                                                                   |      |      |       |      |

### Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- Pulse width  $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

### C.5.3 DataSheet del Circuito Integrado Temporizador NE555



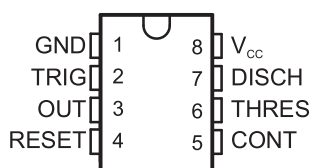
## PRECISION TIMERS

Check for Samples: [NA555](#), [NE555](#), [SA555](#), [SE555](#)

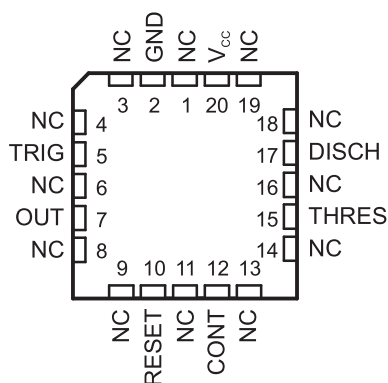
### FEATURES

- Timing From Microseconds to Hours
- Astable or Monostable Operation
- Adjustable Duty Cycle
- TTL-Compatible Output Can Sink or Source up to 200 mA

NA555...D OR P PACKAGE  
NE555...D, P, PS, OR PW PACKAGE  
SA555...D OR P PACKAGE  
SE555...D, JG, OR P PACKAGE  
(TOP VIEW)



SE555...FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

### DESCRIPTION/ORDERING INFORMATION

These devices are precision timing circuits capable of producing accurate time delays or oscillation. In the time-delay or monostable mode of operation, the timed interval is controlled by a single external resistor and capacitor network. In the astable mode of operation, the frequency and duty cycle can be controlled independently with two external resistors and a single external capacitor.

The threshold and trigger levels normally are two-thirds and one-third, respectively, of  $V_{CC}$ . These levels can be altered by use of the control-voltage terminal. When the trigger input falls below the trigger level, the flip-flop is set, and the output goes high. If the trigger input is above the trigger level and the threshold input is above the threshold level, the flip-flop is reset and the output is low. The reset (RESET) input can override all other inputs and can be used to initiate a new timing cycle. When RESET goes low, the flip-flop is reset, and the output goes low. When the output is low, a low-impedance path is provided between discharge (DISCH) and ground.

The output circuit is capable of sinking or sourcing current up to 200 mA. Operation is specified for supplies of 5 V to 15 V. With a 5-V supply, output levels are compatible with TTL inputs.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1973–2010, Texas Instruments Incorporated  
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

## Electrical Characteristics

 $V_{CC} = 5\text{ V to }15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                       | TEST CONDITIONS                                   |                                 | SE555 |      |      | NA555<br>NE555<br>SA555 |      |      | UNIT |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|-------|------|------|-------------------------|------|------|------|
|                                 |                                                   |                                 | MIN   | TYP  | MAX  | MIN                     | TYP  | MAX  |      |
| THRES voltage level             | V <sub>CC</sub> = 15 V                            |                                 | 9.4   | 10   | 10.6 | 8.8                     | 10   | 11.2 | V    |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V                             |                                 | 2.7   | 3.3  | 4    | 2.4                     | 3.3  | 4.2  |      |
| THRES current <sup>(1)</sup>    |                                                   |                                 |       | 30   | 250  |                         | 30   | 250  | nA   |
| TRIG voltage level              | V <sub>CC</sub> = 15 V                            |                                 | 4.8   | 5    | 5.2  | 4.5                     | 5    | 5.6  | V    |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C | 3     |      | 6    |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V                             |                                 | 1.45  | 1.67 | 1.9  | 1.1                     | 1.67 | 2.2  |      |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |       |      | 1.9  |                         |      |      |      |
| TRIG current                    | TRIG at 0 V                                       |                                 |       | 0.5  | 0.9  |                         | 0.5  | 2    | μA   |
| RESET voltage level             |                                                   |                                 | 0.3   | 0.7  | 1    | 0.3                     | 0.7  | 1    | V    |
|                                 | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C                   |                                 |       |      | 1.1  |                         |      |      |      |
| RESET current                   | RESET at V <sub>CC</sub>                          |                                 |       | 0.1  | 0.4  |                         | 0.1  | 0.4  | mA   |
|                                 | RESET at 0 V                                      |                                 |       | −0.4 | −1   |                         | −0.4 | −1.5 |      |
| DISCH switch off-state current  |                                                   |                                 |       | 20   | 100  |                         | 20   | 100  | nA   |
| CONT voltage<br>(open circuit)  | V <sub>CC</sub> = 15 V                            |                                 | 9.6   | 10   | 10.4 | 9                       | 10   | 11   | V    |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C | 9.6   |      | 10.4 |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V                             |                                 | 2.9   | 3.3  | 3.8  | 2.6                     | 3.3  | 4    |      |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C | 2.9   |      | 3.8  |                         |      |      |      |
| Low-level output voltage        | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OL</sub> = 10 mA   |                                 |       | 0.1  | 0.15 |                         | 0.1  | 0.25 | V    |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |       |      | 0.2  |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OL</sub> = 50 mA   |                                 |       | 0.4  | 0.5  |                         | 0.4  | 0.75 |      |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |       |      | 1    |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OL</sub> = 100 mA  |                                 |       | 2    | 2.2  |                         | 2    | 2.5  |      |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |       |      | 2.7  |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OL</sub> = 200 mA  |                                 |       | 2.5  |      |                         | 2.5  |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V, I <sub>OL</sub> = 3.5 mA   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |       |      | 0.35 |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V, I <sub>OL</sub> = 5 mA     |                                 |       | 0.1  | 0.2  |                         | 0.1  | 0.35 |      |
| T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |                                                   |                                 |       | 0.8  |      |                         |      |      |      |
| High-level output voltage       | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OL</sub> = −100 mA |                                 | 13    | 13.3 |      | 12.75                   | 13.3 | V    |      |
|                                 |                                                   | T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C | 12    |      |      |                         |      |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 15 V, I <sub>OH</sub> = −200 mA |                                 |       | 12.5 |      |                         | 12.5 |      |      |
|                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V, I <sub>OL</sub> = −100 mA  |                                 | 3     | 3.3  |      | 2.75                    | 3.3  |      |      |
| T <sub>A</sub> = −55°C to 125°C |                                                   | 2                               |       |      |      |                         |      |      |      |
| Supply current                  | Output low, No load                               | V <sub>CC</sub> = 15 V          |       | 10   | 12   |                         | 10   | 15   | mA   |
|                                 |                                                   | V <sub>CC</sub> = 5 V           |       | 3    | 5    |                         | 3    | 6    |      |
|                                 | Output high, No load                              | V <sub>CC</sub> = 15 V          |       | 9    | 10   |                         | 9    | 13   |      |
|                                 |                                                   | V <sub>CC</sub> = 5 V           |       | 2    | 4    |                         | 2    | 5    |      |

(1) This parameter influences the maximum value of the timing resistors  $R_A$  and  $R_B$  in the circuit of Figure 12. For example, when  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , the maximum value is  $R = R_A + R_B \approx 3.4\text{ M}\Omega$ , and for  $V_{CC} = 15\text{ V}$ , the maximum value is  $10\text{ M}\Omega$ .

## Operating Characteristics

 $V_{CC} = 5\text{ V}$  to  $15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                                       |                                       | TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>                     | SE555 |                    |     | NA555<br>NE555<br>SA555 |     |     | UNIT       |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|--------------------|-----|-------------------------|-----|-----|------------|
|                                                 |                                       |                                                    | MIN   | TYP                | MAX | MIN                     | TYP | MAX |            |
| Initial error of timing interval <sup>(2)</sup> | Each timer, monostable <sup>(3)</sup> | $T_A = 25^\circ\text{C}$                           | 0.5   | 1.5 <sup>(4)</sup> |     | 1                       | 3   |     | %          |
|                                                 | Each timer, astable <sup>(5)</sup>    |                                                    | 1.5   |                    |     | 2.25                    |     |     |            |
| Temperature coefficient of timing interval      | Each timer, monostable <sup>(3)</sup> | $T_A = \text{MIN to MAX}$                          | 30    | 100 <sup>(4)</sup> |     | 50                      |     |     | ppm/<br>°C |
|                                                 | Each timer, astable <sup>(5)</sup>    |                                                    | 90    |                    |     | 150                     |     |     |            |
| Supply-voltage sensitivity of timing interval   | Each timer, monostable <sup>(3)</sup> | $T_A = 25^\circ\text{C}$                           | 0.05  | 0.2 <sup>(4)</sup> |     | 0.1                     | 0.5 |     | %/V        |
|                                                 | Each timer, astable <sup>(5)</sup>    |                                                    | 0.15  |                    |     | 0.3                     |     |     |            |
| Output-pulse rise time                          |                                       | $C_L = 15\text{ pF}$ ,<br>$T_A = 25^\circ\text{C}$ | 100   | 200 <sup>(4)</sup> |     | 100                     | 300 |     | ns         |
| Output-pulse fall time                          |                                       | $C_L = 15\text{ pF}$ ,<br>$T_A = 25^\circ\text{C}$ | 100   | 200 <sup>(4)</sup> |     | 100                     | 300 |     | ns         |

- (1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
- (2) Timing interval error is defined as the difference between the measured value and the average value of a random sample from each process run.
- (3) Values specified are for a device in a monostable circuit similar to [Figure 9](#), with the following component values:  $R_A = 2\text{ k}\Omega$  to  $100\text{ k}\Omega$ ,  $C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ .
- (4) On products compliant to MIL-PRF-38535, this parameter is not production tested.
- (5) Values specified are for a device in an astable circuit similar to [Figure 12](#), with the following component values:  $R_A = 1\text{ k}\Omega$  to  $100\text{ k}\Omega$ ,  $C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ .

#### C.5.4 DataSheet de Batería LIPO 8000 mAh

# Batería LIPO\_8000 mAh

Zeee 2S Lipo batería 7,4 V 100C 8000mAh Hardcase RC  
cargador de batería Deans enchufe para RC coche camión  
barco helicóptero FPV RACING

## Características:

1. Materias primas superiores de polímero de litio de Japón y Corea
2. Tecnología de apilamiento automático, mejor rendimiento
3. Progreso de coincidencia estricta, excelente consistencia
4. Densidad de energía de hasta 200Wh/kg y larga vida útil.
- 5 certificado: CE ROHS MSDS... UN38.3 UL

## Especificación:

Marca: Zeee

Química de la batería: polímero de litio

Voltaje: 7,4 V

Capacidad: 8000mAh

Tasa de descarga (C): 100C

Configuración: 2S2P

Tipo de conector: enchufe Deans

Conector de equilibrador tipo: JST-XH

Longitud: 138mm/5,43 pulgadas

Ancho: 47mm/1,85 pulgadas

Altura: 25mm/0,98 pulgadas

Peso de la batería (dev.10g): 320g/11,3 onzas/unid

## Aplicación:

Zeee 7,4 V 100C batería de 8000mAh Lipo diseñado especialmente para 1/8 y 1/10 RC modelo de coche como Losi... Traxxas Slash automodelismo Strada XB 1/10 RTR eléctrico Buggy equipo asociado ElectrixRC... Emaxx... Bandit, versión Rustler, etc.-también se puede utilizar para Avión RC, helicóptero RC, barco RC, iDrone FPV! -Para la batería RC, solo si el voltaje, la dimensión y el enchufe coinciden, entonces encajará.

## Las notas de seguridad:

1. Para garantizar la seguridad, comprueba y confirma que la superficie y el voltaje de la batería lipo son normales antes de usarla.
2. Si la nueva batería lipo no tiene una carga completa o pierde la carga muy rápidamente en poco tiempo, utiliza un cargador de batería lipo profesional para cargar y reciclar varias veces primero. Para la mayoría de las baterías lipo, la tasa de carga más segura es 1C.

3. nunca carga o descarga de la batería lipo. Nunca cargue por encima de 4,2 V por celda y descargue por debajo de 3,0 V por celda. (El voltaje Normal de la celda es entre 3,7 V ~ 4,2 V)

4. Nunca cargue la batería de polímero de litio sin supervisión.

5. Si la batería lipo tiene algún problema, no dude en contactarnos a través de Aliexpress Mensaje la primera vez, Le ofreceremos la solución adecuada.

**Crisol de grafito mini horno de oro de la antorcha de fusión del metal:**

1 funda dura de batería Zeee 7,4 V 100C 2S 8000mAh RC LiPo con enchufe Deans





#### C.5.5 DataSheet de E15-USB-T2



**成都亿佰特电子科技有限公司**  
Chengdu Ebyte Electronic Technology Co.,Ltd.

## E15-USB-T2 Datasheet v1.0

### 1.Introduction

### E15-USB-T2

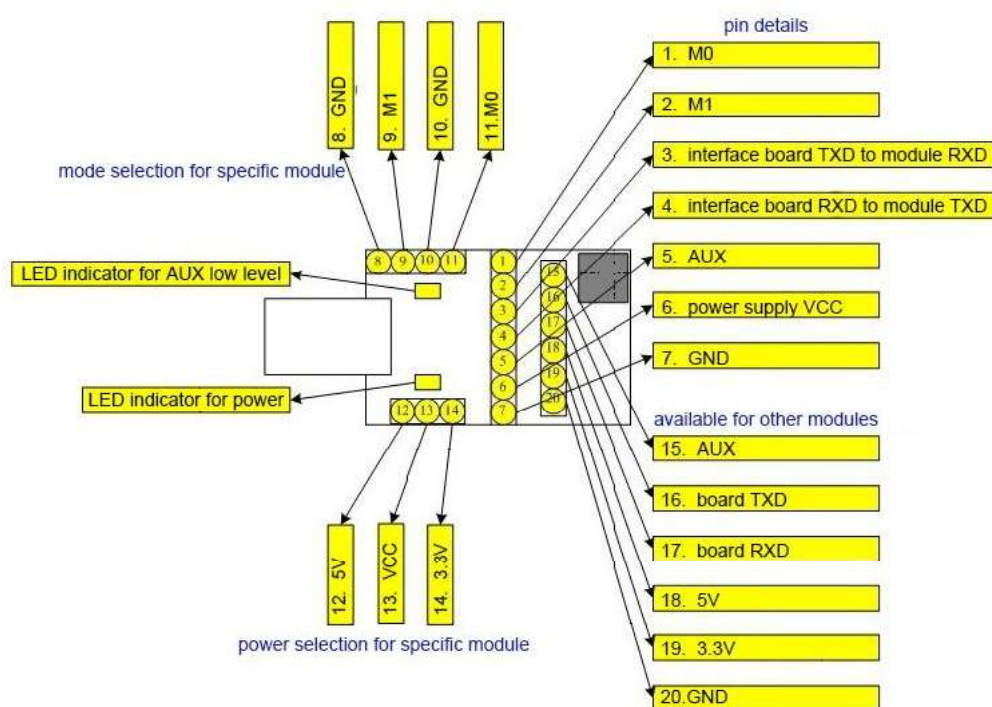


E30~E70 wireless module developed and produced by Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd. is suitable for embedded application. Users usually connect it with MCU. The module has UART (TTL level) interface with its transparent transmission that makes it much easier for users to operate. To better simplify operation, the company has developed a USB to UART convert module E15-USB-T2.

1. It can directly detect wireless UART communication from PC via COM debugging assistant.
2. It is very easy to set software parameters via parameter setting software.

### 2. Pin definition

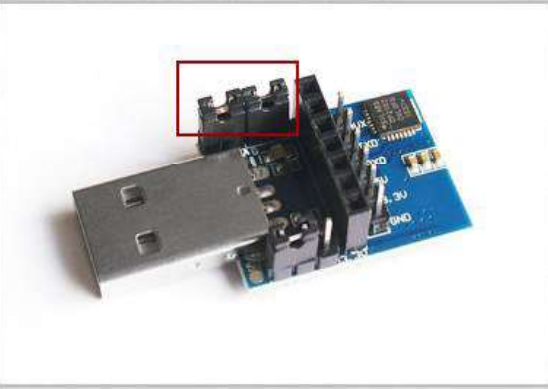
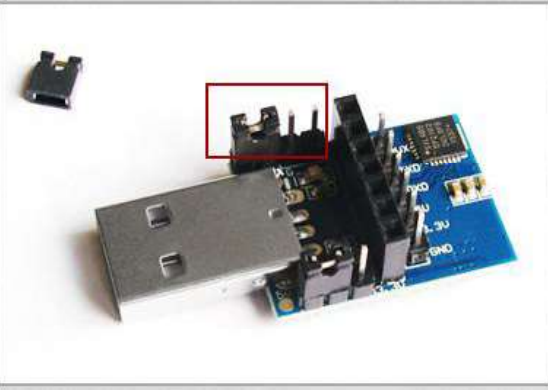
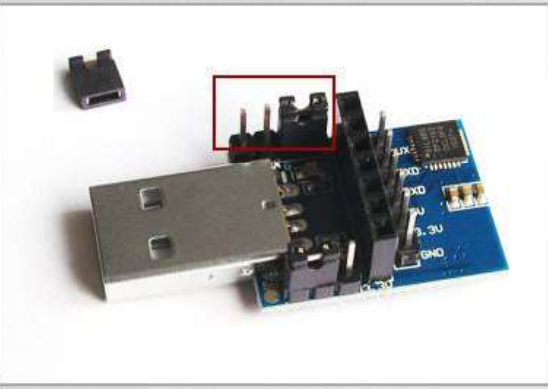
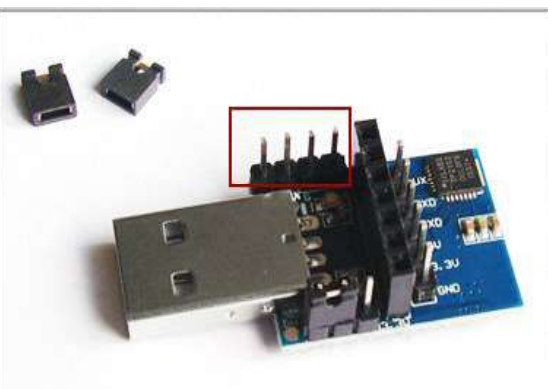
### E15-USB-T2

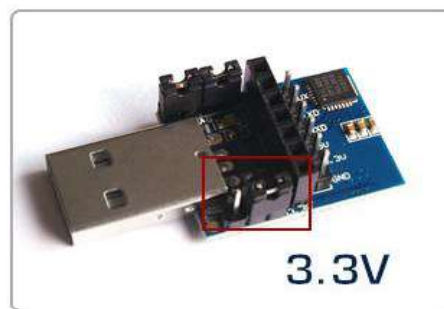


### 3. Operating mode

### E15-USB-T2

There are four operating modes of the module which can be controlled via setting Pin M0 and M1. Details are shown in the table below:

|                                                                                     |                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>M0 Normal mode</b><br><br>For transparent transmission                                    |
|   | <b>M1 Wake-up mode</b><br><br>Add wake-up signal before transmitting data to wake up RXD end |
|  | <b>M2 Power-saving mode</b><br><br>Close RXD, WOR enabled                                    |
|  | <b>M3 Sleep mode</b><br><br>For altering parameters                                          |

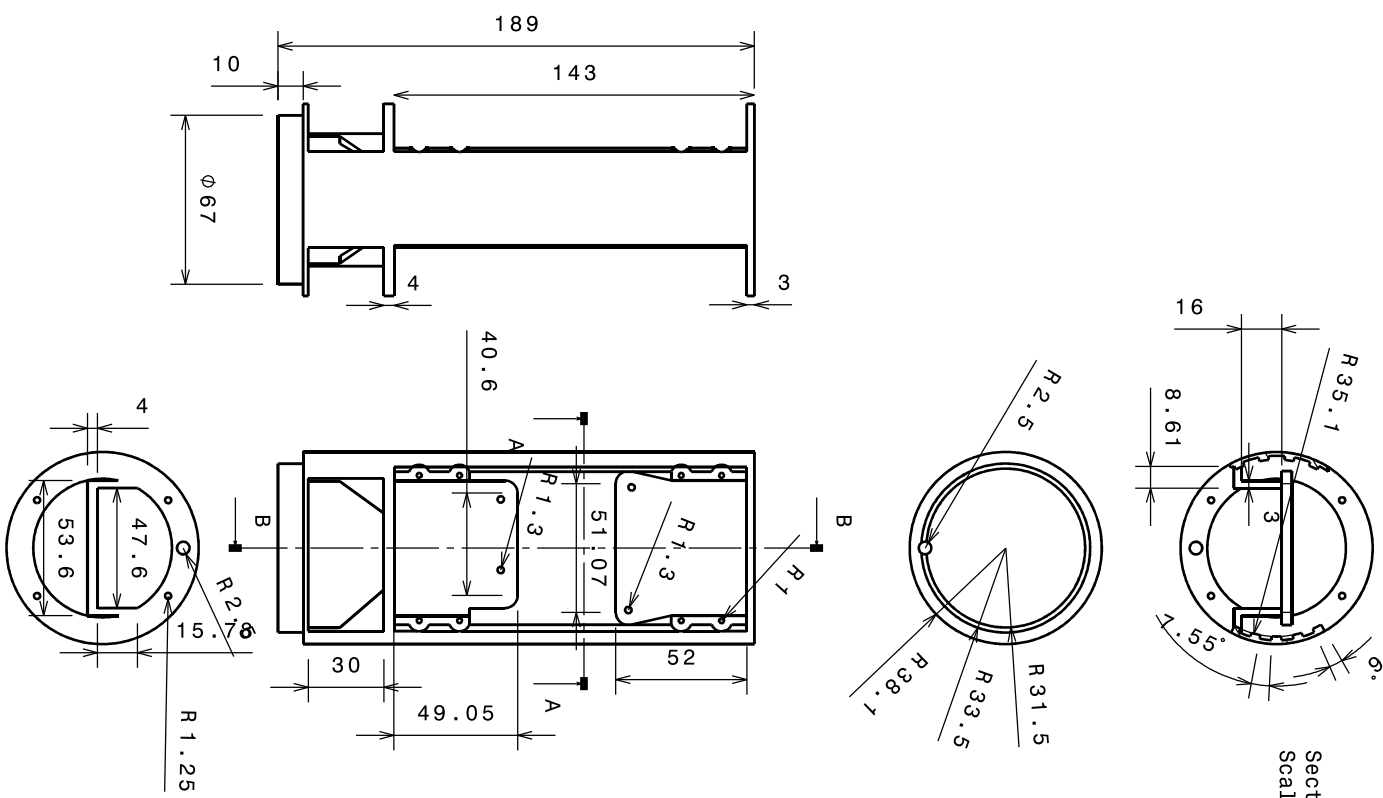
**4. Voltage selection****E15-USB-T2****5. Parameter setting****E15-USB-T2**

| Step | Operation           | Description                                                                                                                                           |
|------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Install driver      | Please install USB convert board driver (CP2102) in installation data packet.                                                                         |
| 2    | Pull out jumpers    | Pull out jumpers of M0 and M1 on the USB convert board, as shown below, 3.3V and 5V are selectable for power jumpers.                                 |
| 3    | Connect to module   | Plug module in Pin 7 on the convert board and plug convert board in USB of computer.                                                                  |
| 4    | Open Port           | Open parameter setting software, choose relevant port and click "OpenPort";                                                                           |
| 5    | Enter interface     | Click "GetParam" , the interface is shown below;<br>If it fails to read, please check if the module is in M3 or if convert board driver is installed. |
| 6    | Write in parameters | Change relevant setting according to requirement, change parameters and click button "SetParam" and write in new parameters.                          |
| 7    | Complete operation  | Follow Step 5 to reset, click "ClosePort" when setting is completed and pull out the module.                                                          |
| 8    | Instruction setting | Instruction can be used for MCU to set module parameter. See details in "Instruction Format-Parameter setting instruction" .                          |

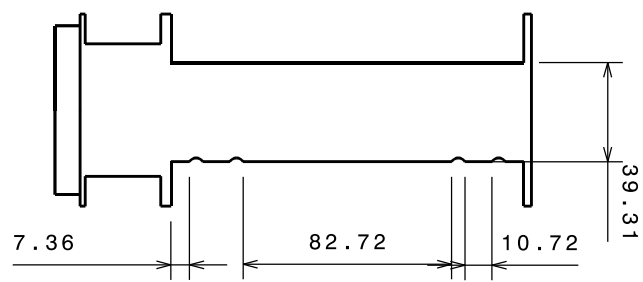


## **C.6 Croquis del diseño de las cápsulas de electrónica**

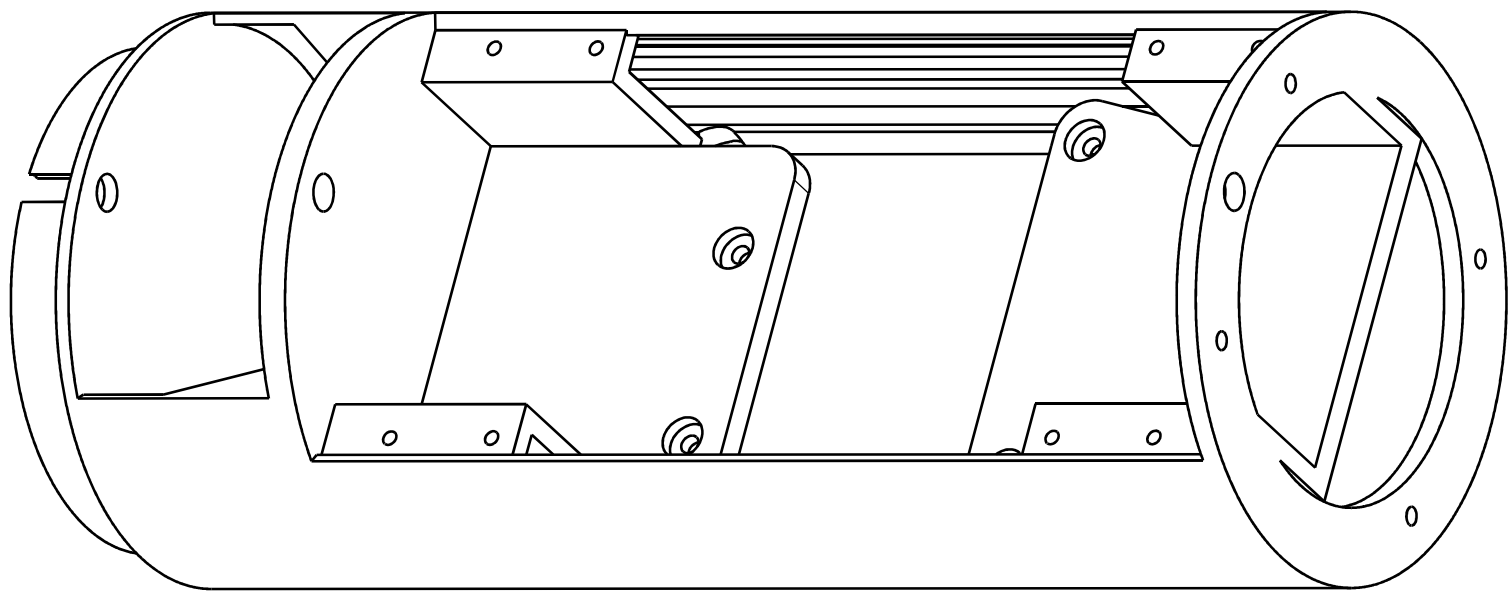
### **C.6.1 Croquis de cápsula de Batería y Subsistema de Medidas Inerciales**



Section view A-A  
Scale: 1:3

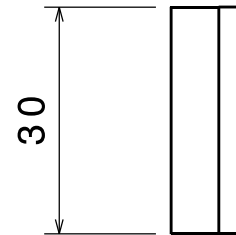
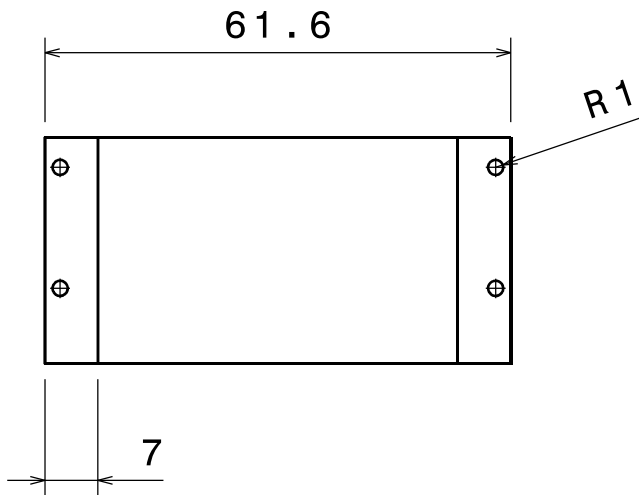
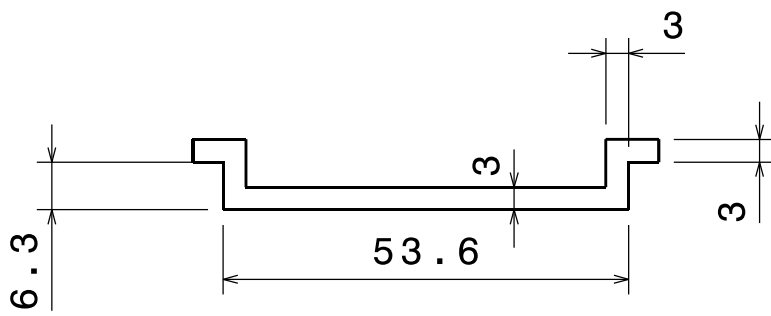
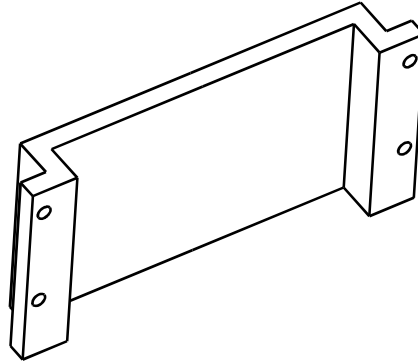


Section view B-B  
Scale: 1:3

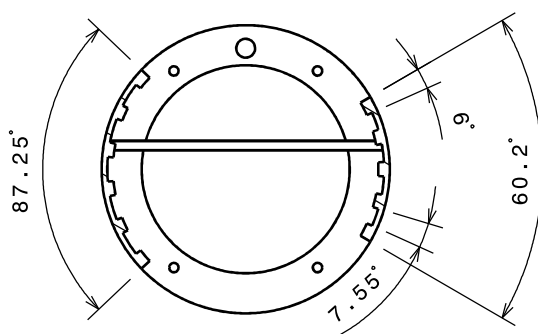
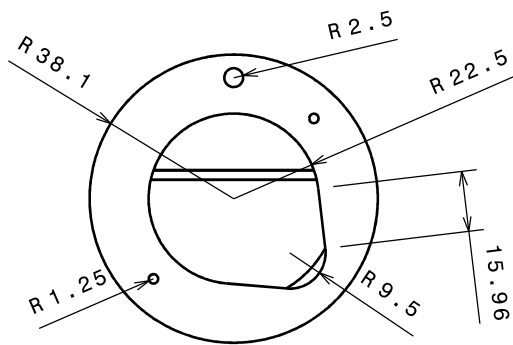
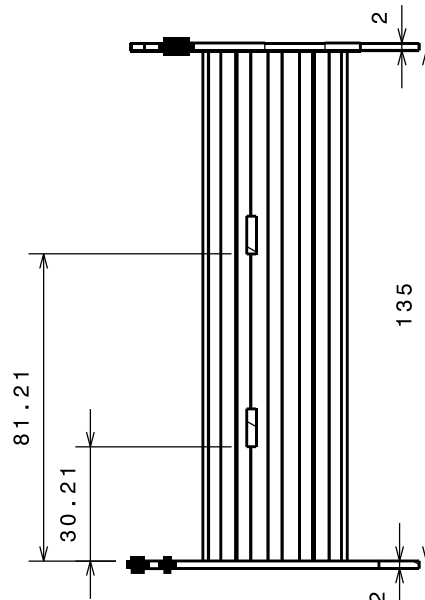
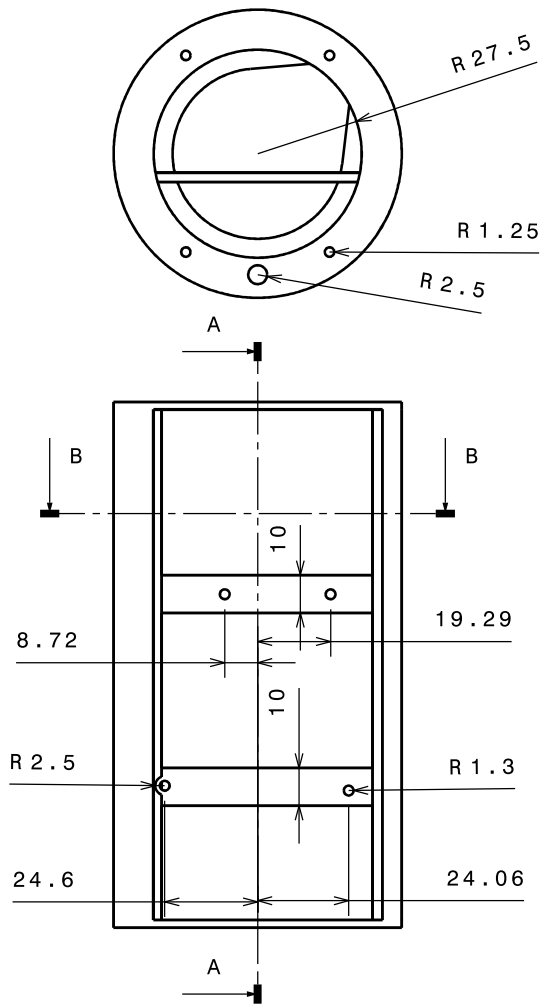




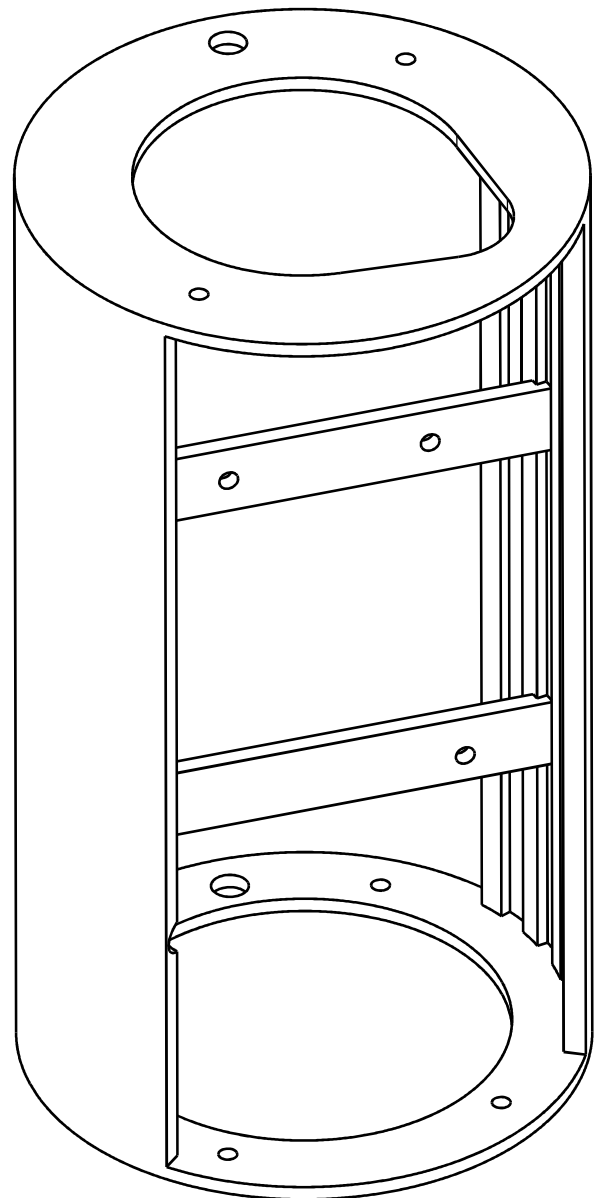
### C.6.2 Croquis de las tapas de fijación de la batería



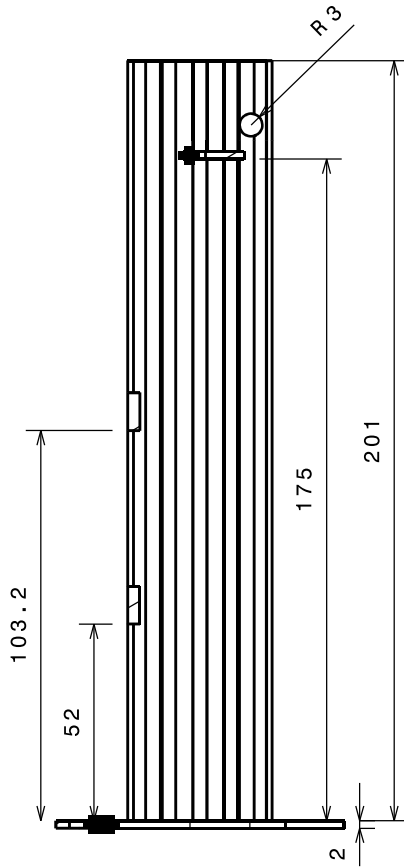
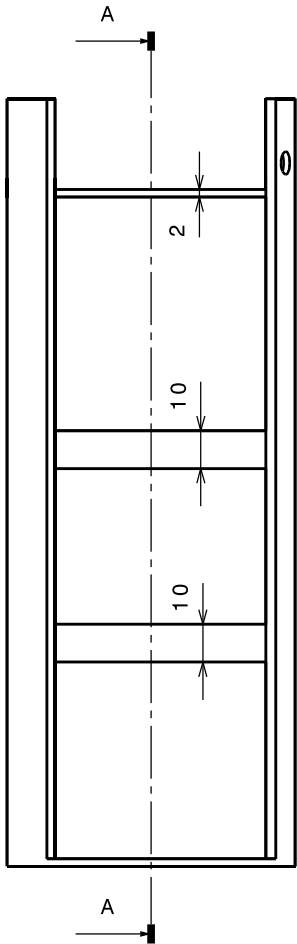
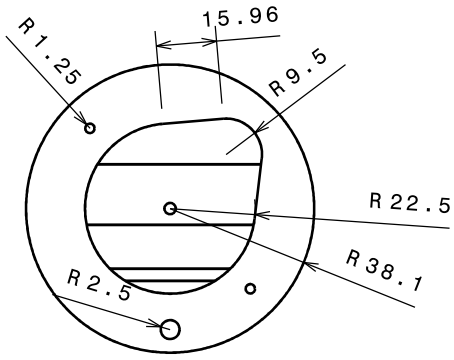
### C.6.3 Croquis de cápsula de Subsistema de Rastreo y Telemetría



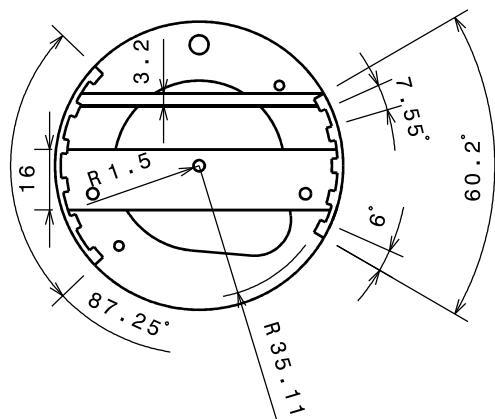
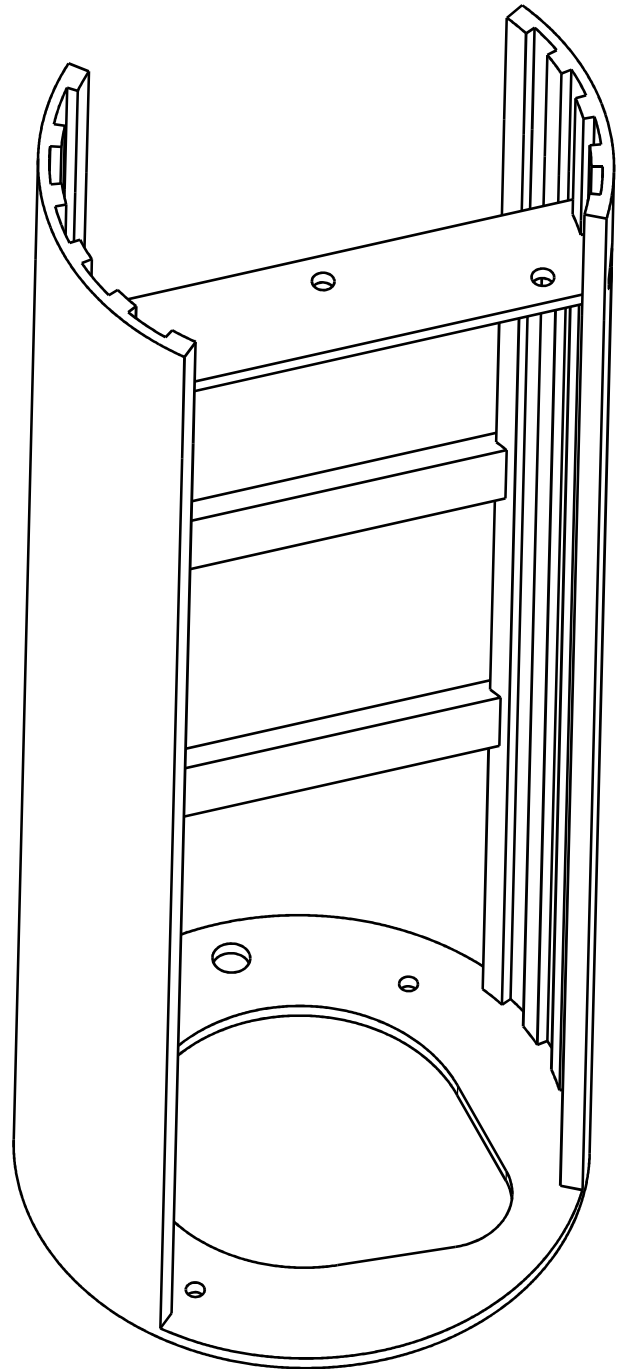
Section view B-B  
Scale: 1:2



#### C.6.4 Croquis de cápsula de Antena y Timer

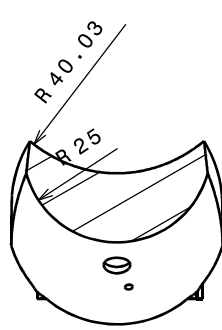
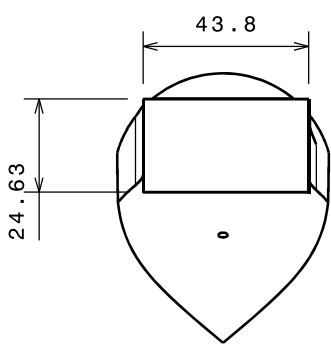


Section view A-A  
Scale: 1:2

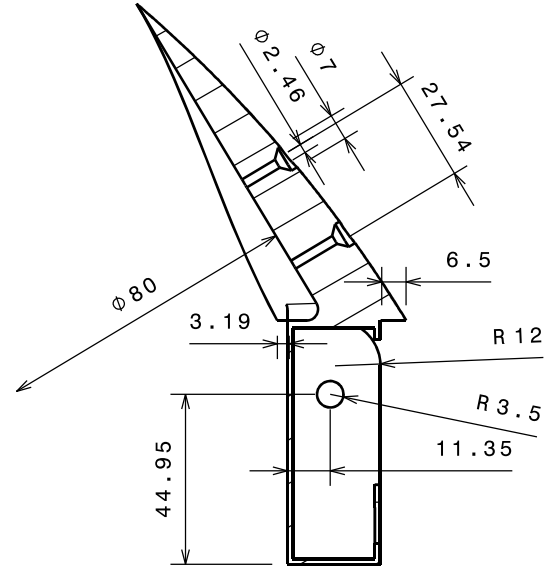
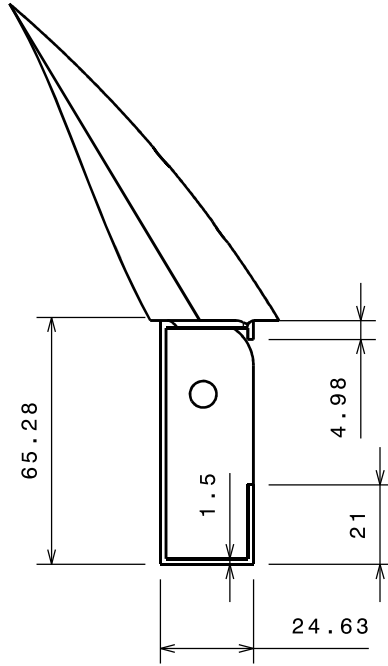
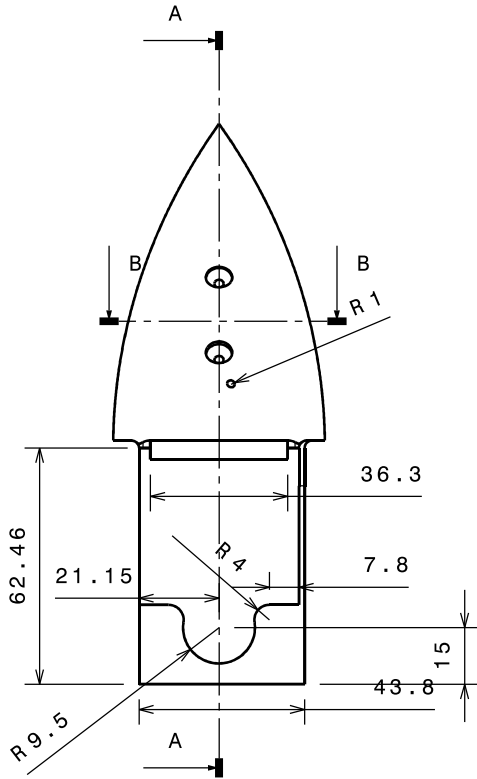




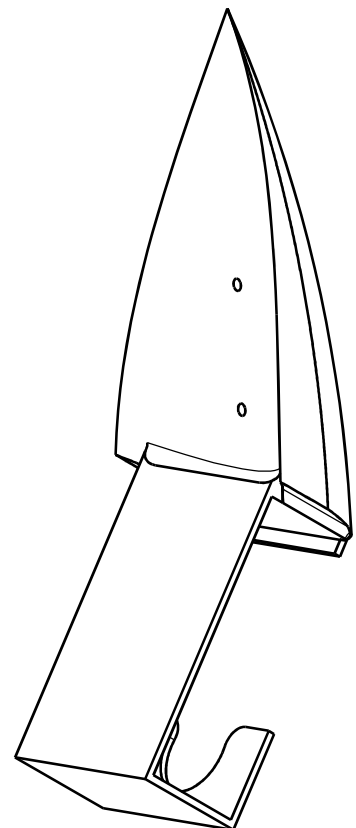
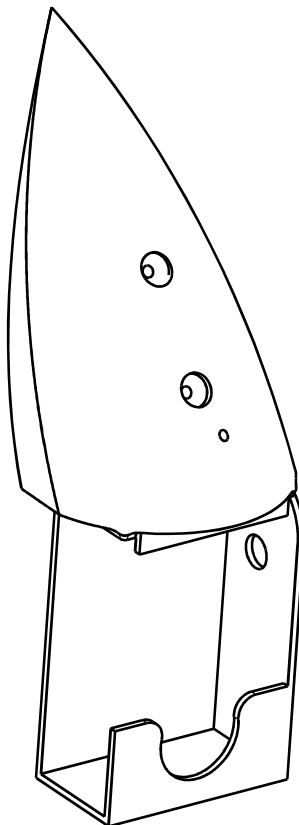
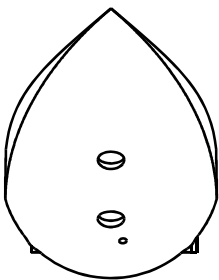
**C.6.5 Croquis del alojamiento de la YI Cam (cámara de a bordo)**



Section view B-B  
Scale: 1:2



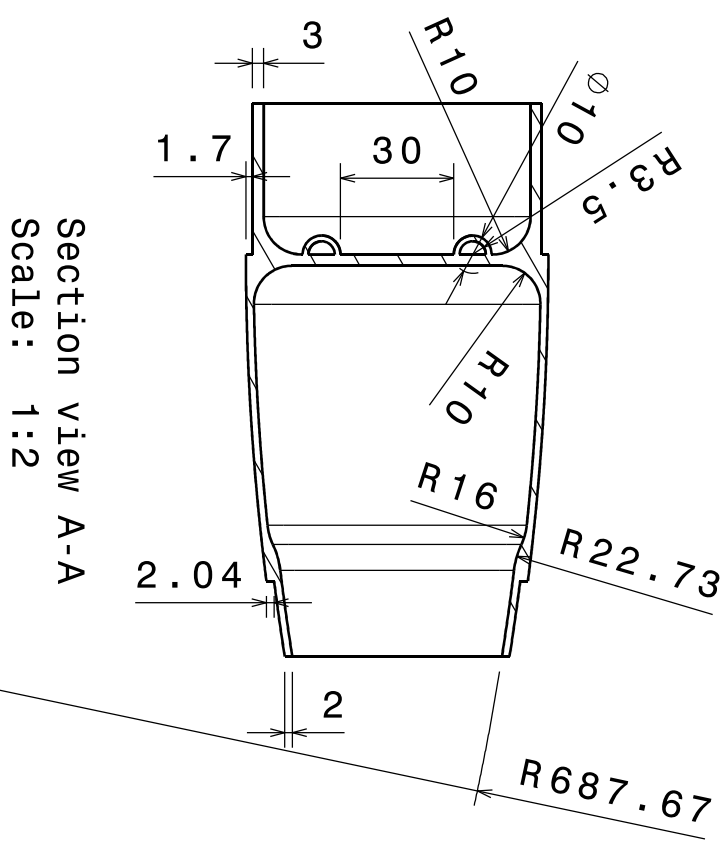
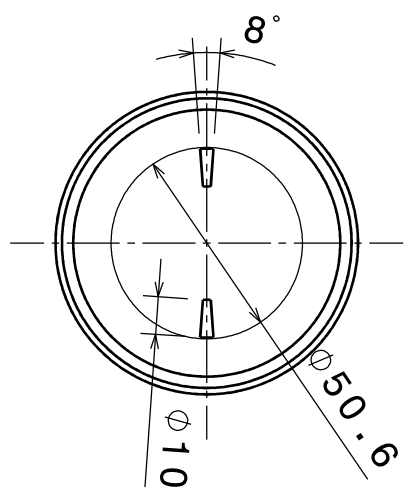
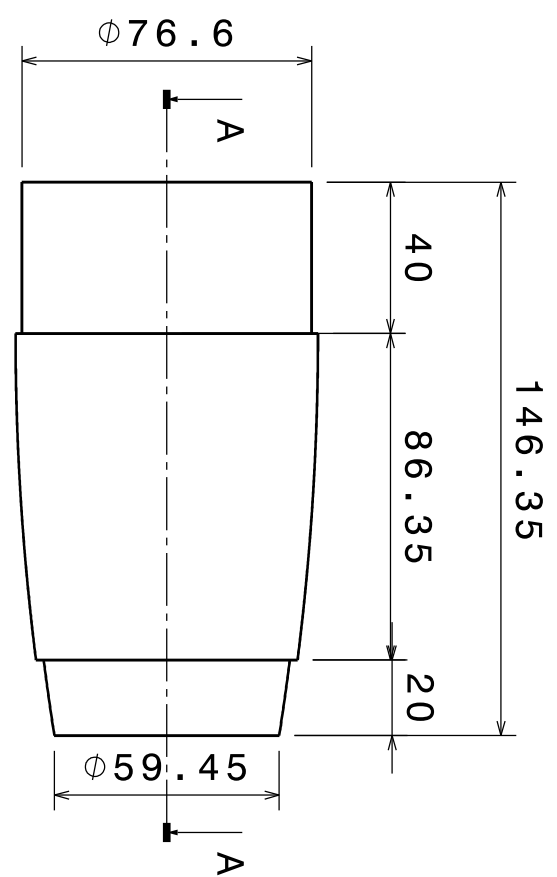
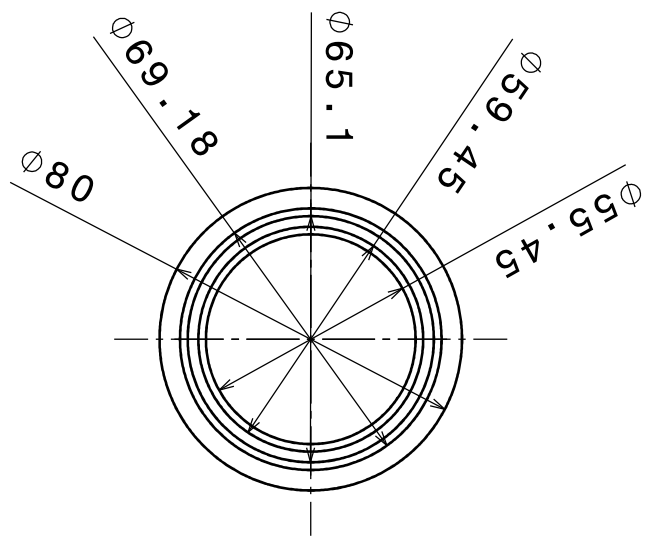
Section view A-A  
Scale: 1:2



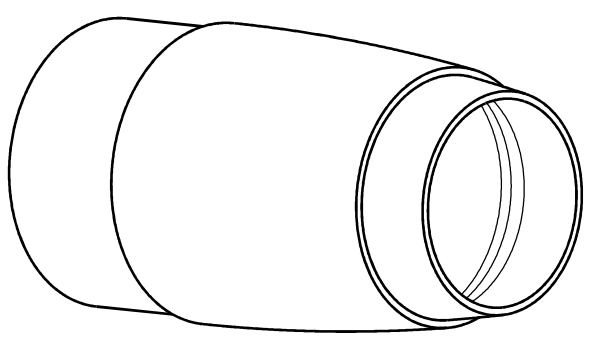
## **C.7 Sistema de Liberación y Recuperación**

## **C.8 Croquis del diseño de la aerodinámica y estabilidad**

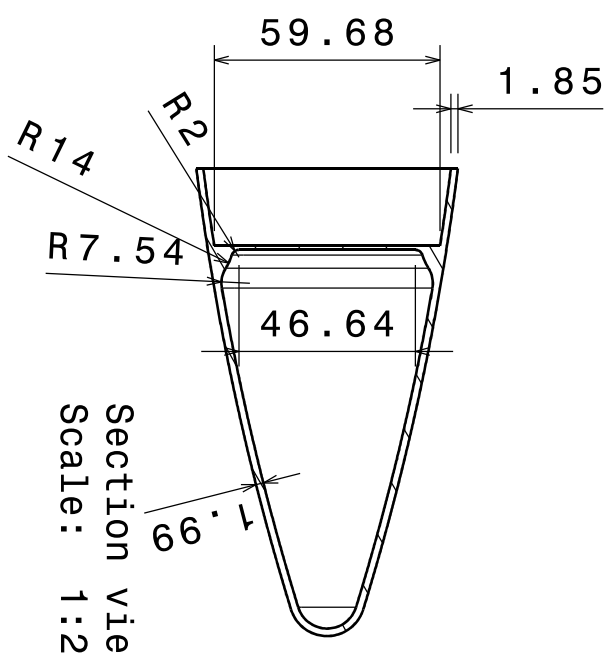
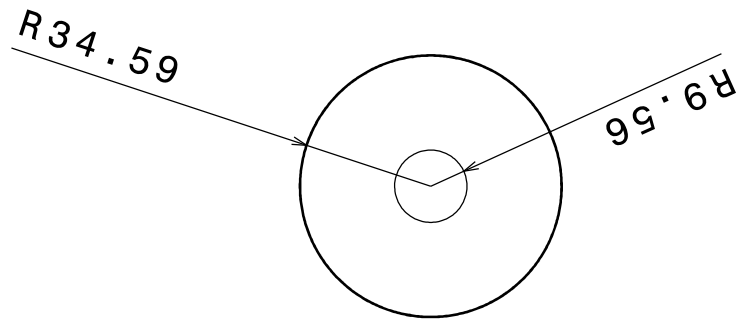
### **C.8.1 Croquis Ojiva Parte inferior**



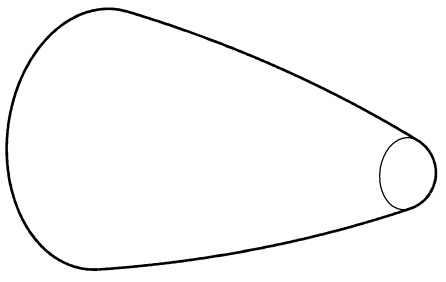
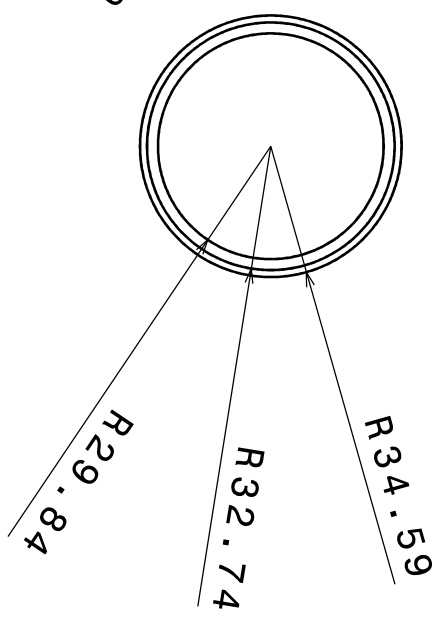
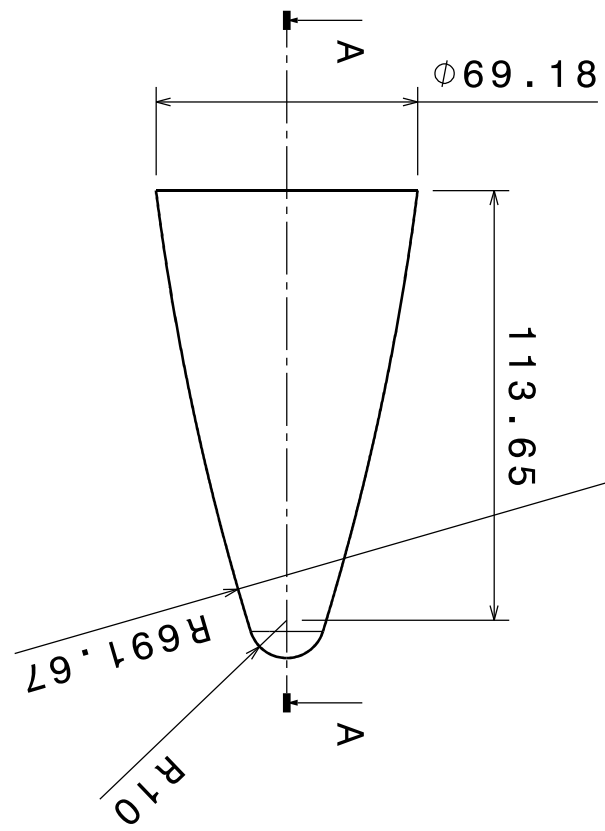
Section view A-A  
Scale: 1:2



### C.8.2 Croquis Ojiva Parte superior

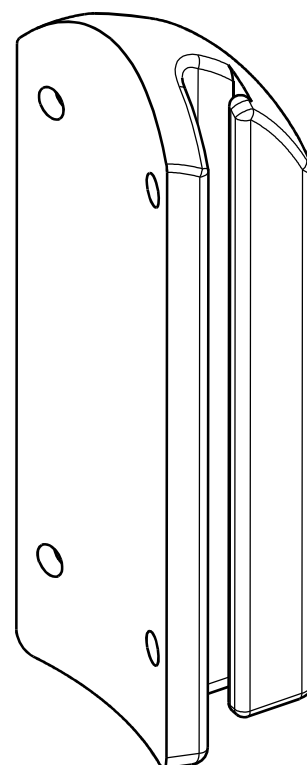
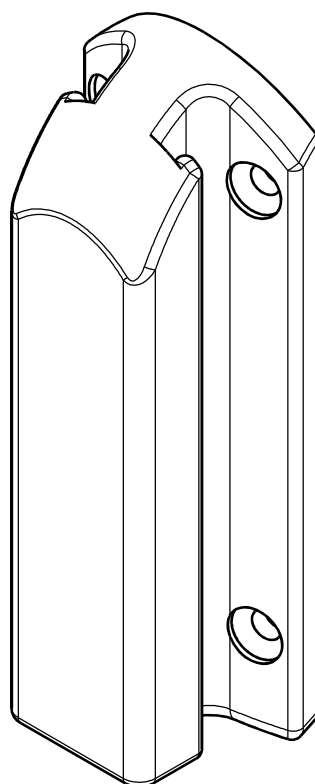
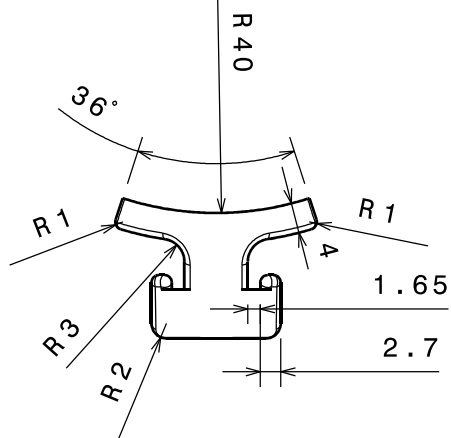
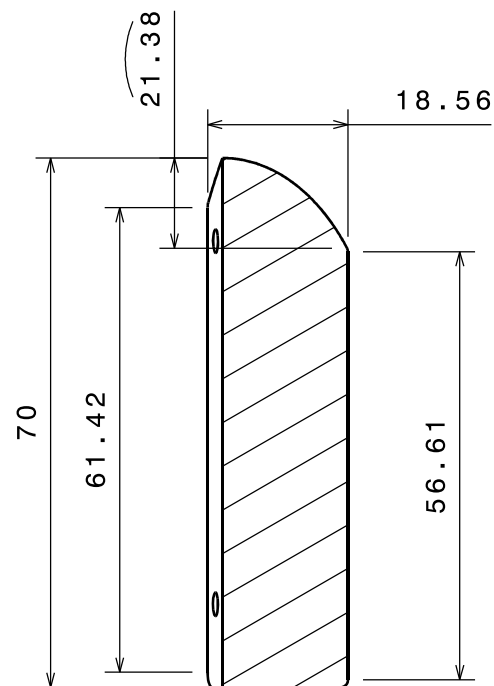
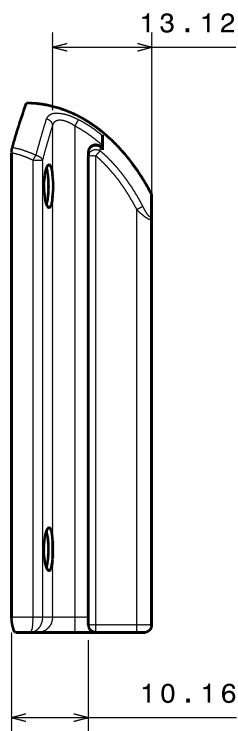
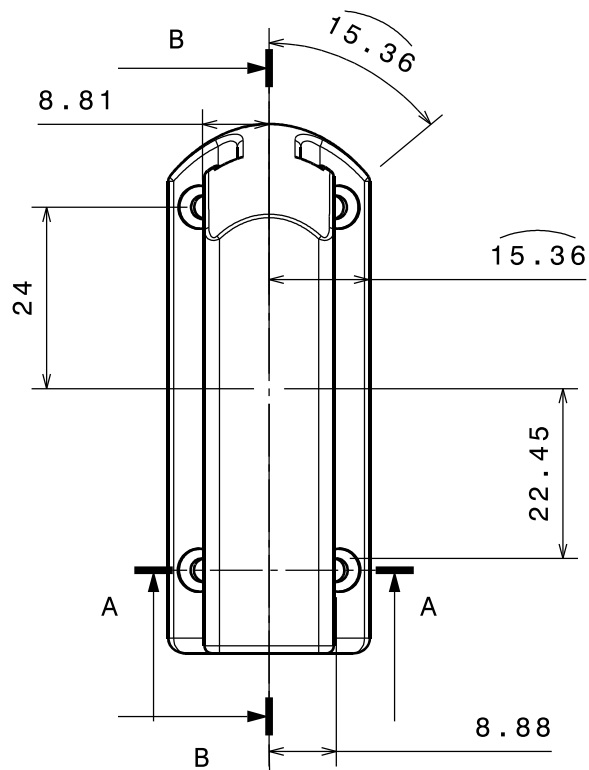
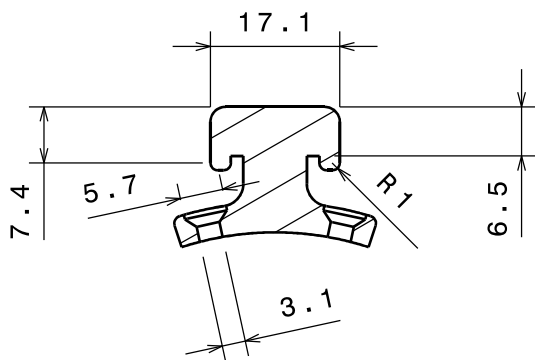


Section view A-A  
Scale: 1:2

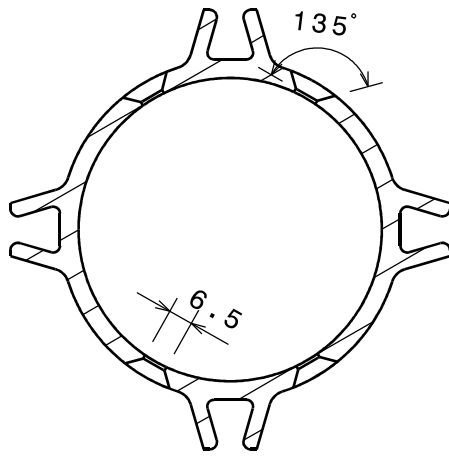
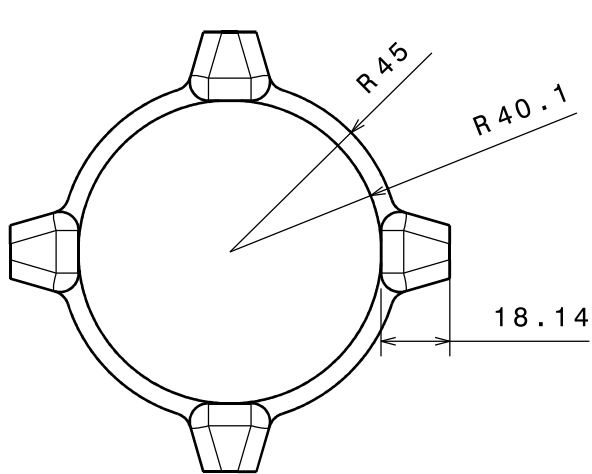




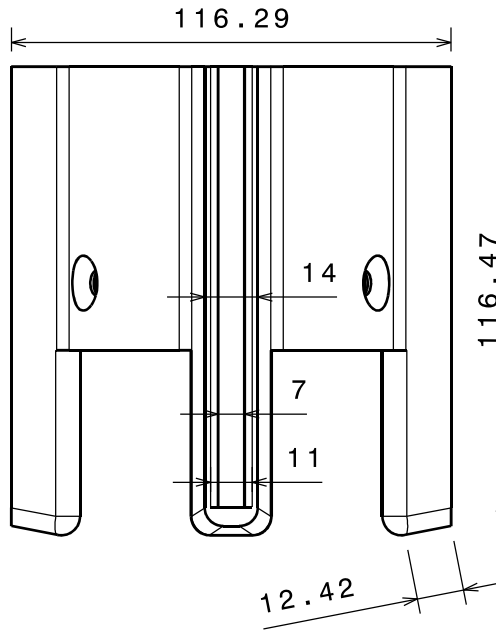
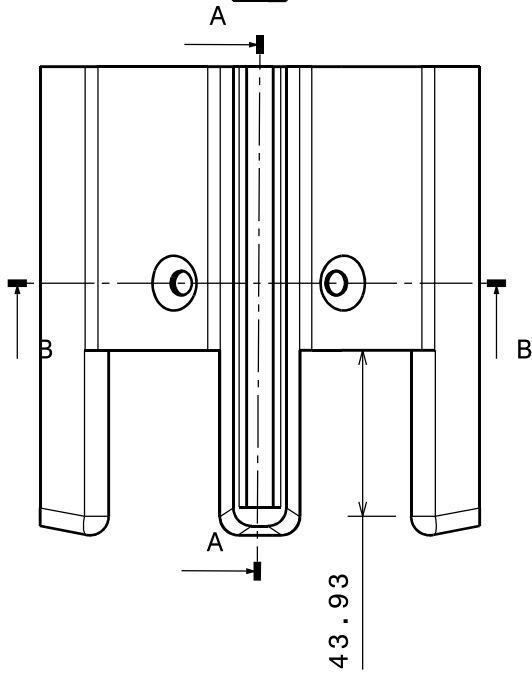
### C.8.3 Croquis Guías Cohete para Plataforma de Lanzamiento



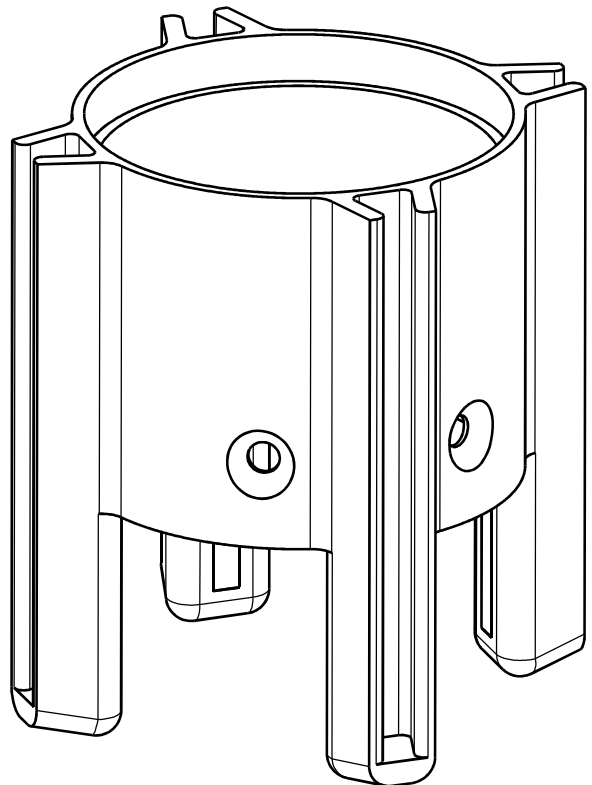
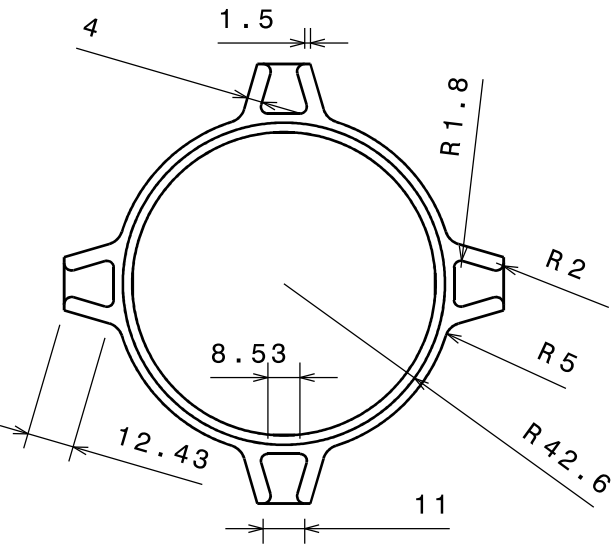
#### C.8.4 Croquis Anillo de Aletas Inferior



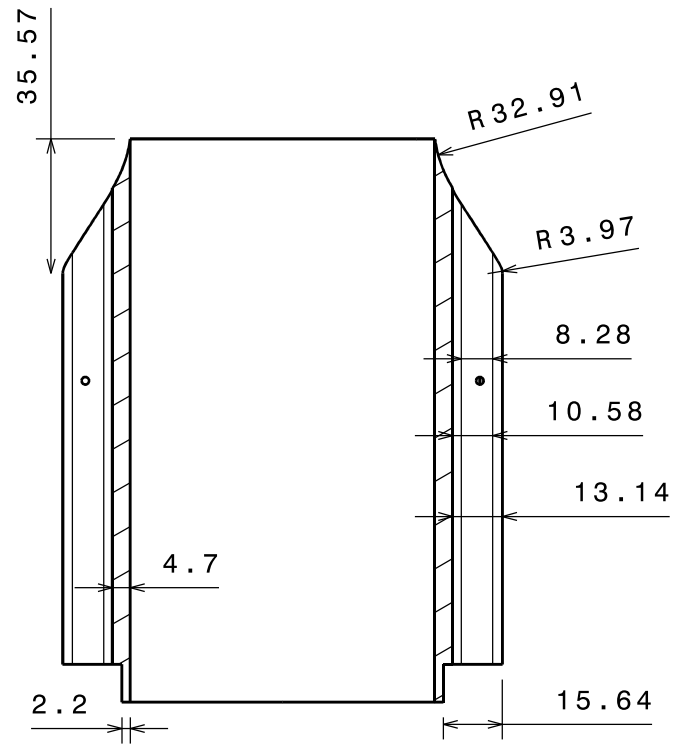
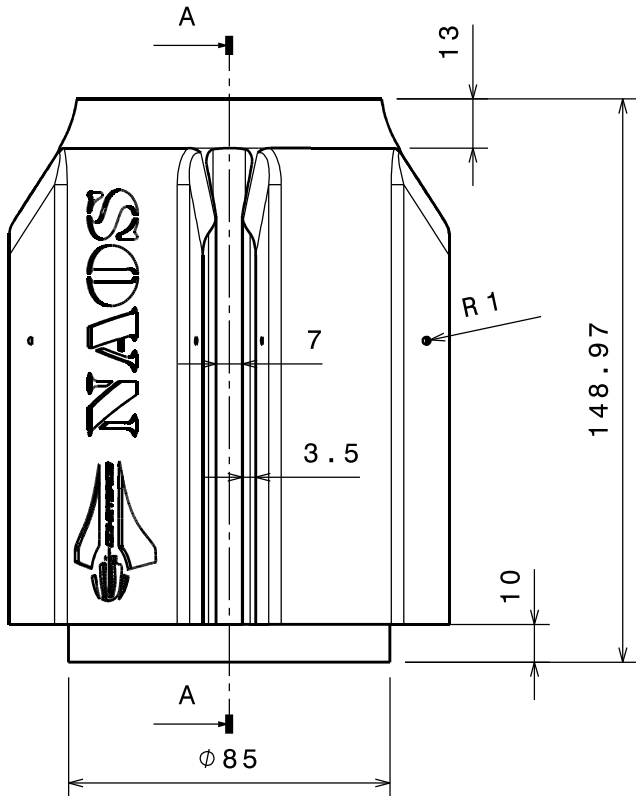
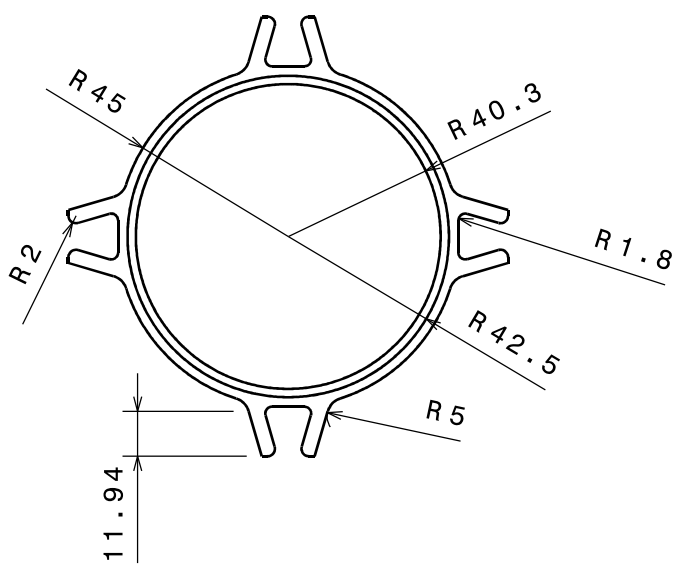
Section view B-B  
Scale: 1:2



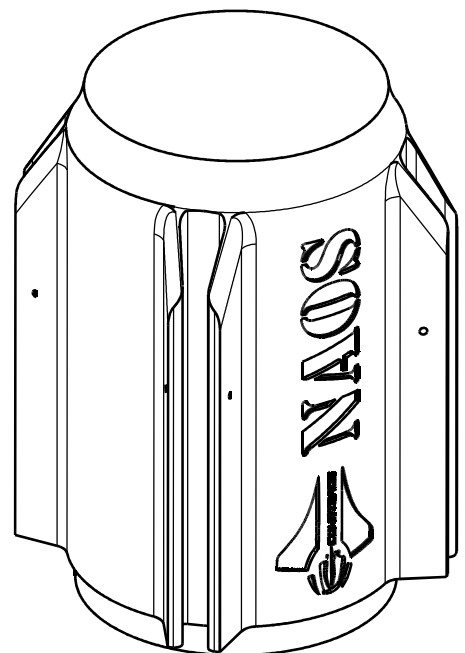
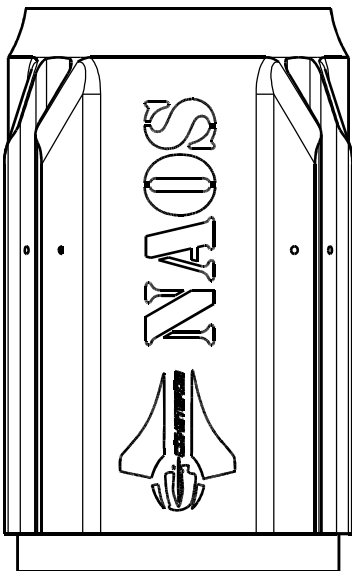
Section view A-A  
Scale: 1:2



#### C.8.5 Croquis Anillo de Aletas Superior

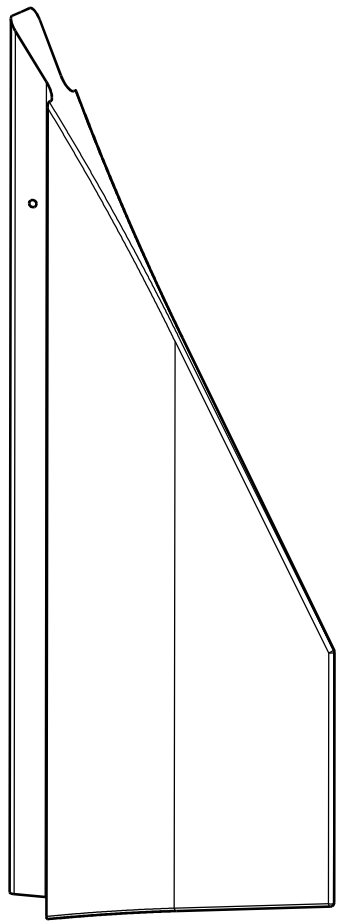
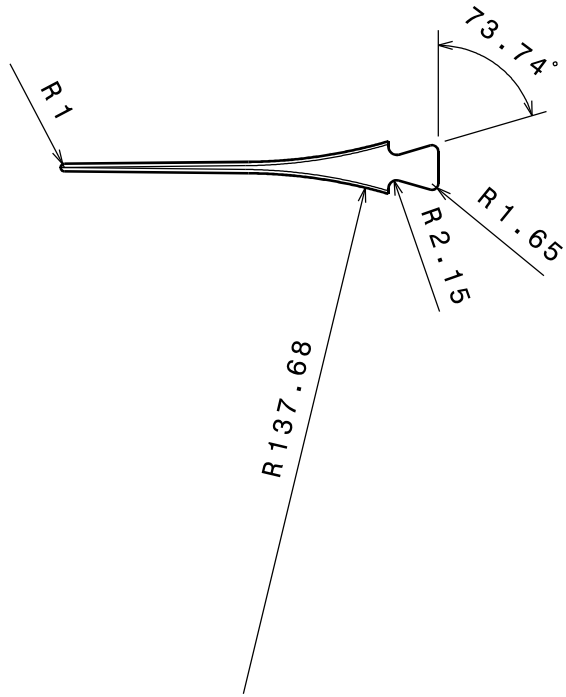
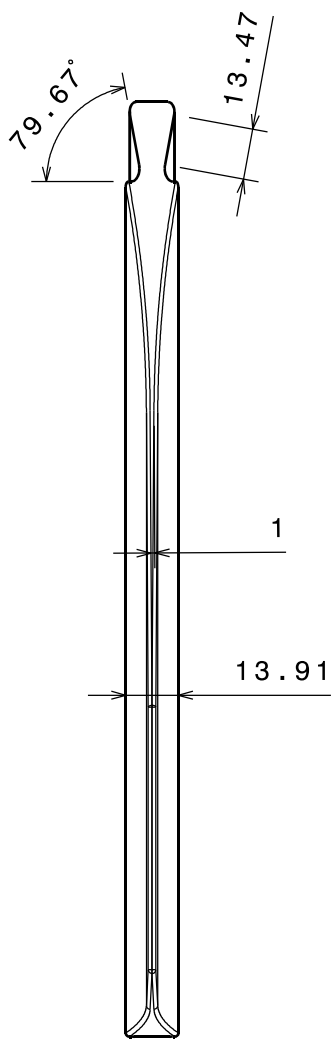
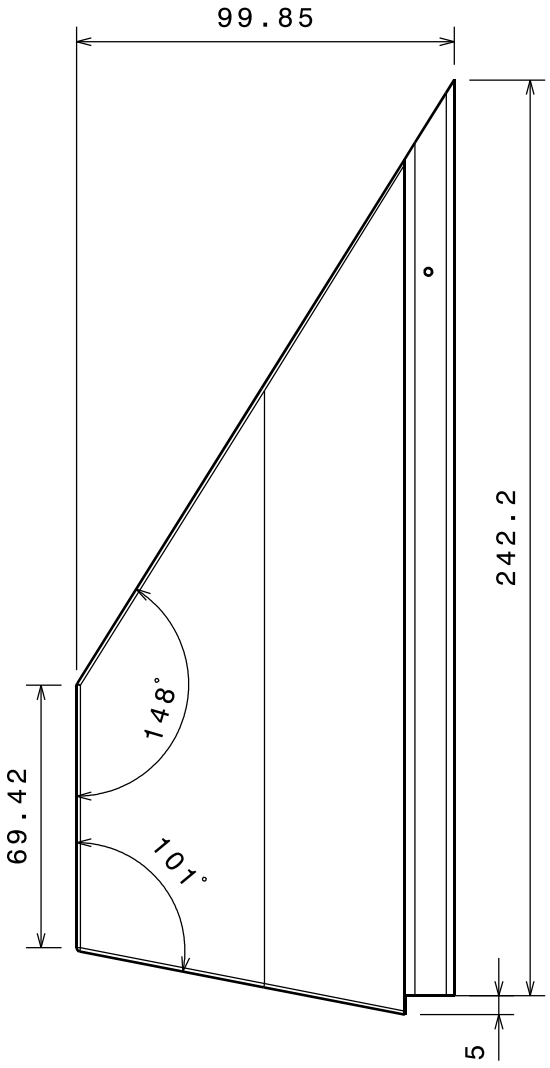


Section view A-A  
Scale: 1:2



#### C.8.6 Croquis Aletas NAOS

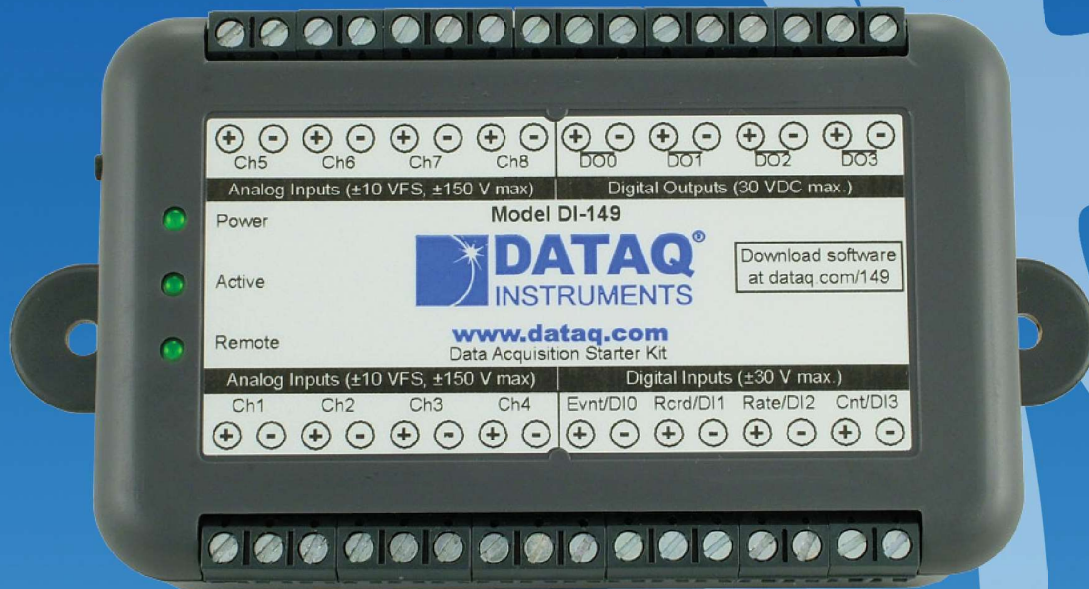




## **C.9 Diseño de otros elementos esenciales**

### **C.9.1 DataSheet del DI-149 USB Data Acquisition Starter Kit**

# DI-149 USB Data Acquisition Starter Kit



- ✓ Low-cost, Compact USB Data Acquisition Starter Kit
- ✓ Eight  $\pm 10$  V Differential Analog Inputs
- ✓ Analog Inputs Protected to  $\pm 150$  V
- ✓ 10-bit Resolution
- ✓ Up to 10 kHz Sample Rate
- ✓ 4 Digital Inputs incl. 2 Counter/Timers
- ✓ Provided with WinDAQ/Lite Software
- ✓ Optional WinDAQ/HS Software for turnkey high speed sampling



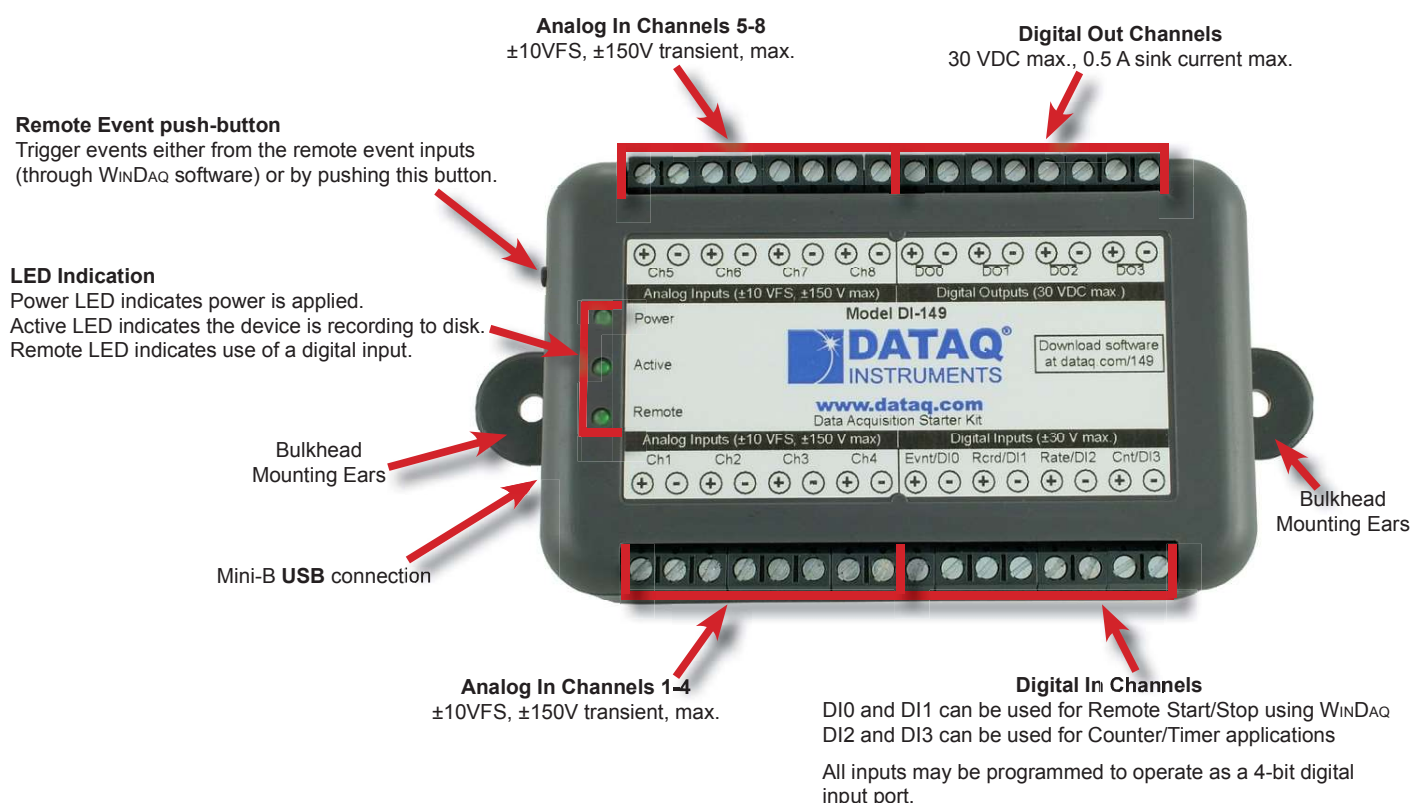
## DI-149 Description

The DI-149 is a new product for general-purpose data acquisition applications in a long line of low-cost starter kits from DATAQ Instruments. Suitable for measuring preamplified analog signals, the DI-149 in tandem with the included WINDAQ software allows real time data acquisition, playback, and analysis performance equal to or better than other products that cost ten times or more than its low price. Predecessors of this instrument have been sold to thousands of hobbyists and professionals for countless data acquisition applications around the world. The DI-149 continues this legacy with noise-cancelling differential analog inputs that are transient-protected to  $\pm 150$  VDC or peak AC. This tough and tolerant starter kit is an eight-channel version of the popular DI-145, with some enhanced capability.

The DI-149 offers eight analog inputs and four each discrete (digital) input and output channels. Two of the digital inputs (bits D2 and D3) can be used to measure rate up to 10 kHz and counts up to 16,383. The analog inputs offer a fixed measurement range of  $\pm 10$  VFS at 10 bits of resolution. Sample rates as slow as 11.44 Hz (0.3052 Hz when using WINDAQ software) and as fast as 10 kHz (divided by the number of enabled channels) are supported. Included WINDAQ software allows a real time display of any combination of analog, digital, or counter/timer channels, and the ability to stream acquired data to disk in recorder-like fashion. Two digital inputs may be used for remote stop/start and remote event operations using WINDAQ software. WINDAQ also includes software to review recorded data files, including waveform analysis and data file export to Microsoft Excel and other applications.

The DI-149 is supplied with WINDAQ/Lite software, which limits total sample throughput to 240 Hz or lower. Optional WINDAQ/HS allows the DI-149 to operate at the full 10 kHz rate. No throughput restrictions exist at the programming level.

## DI-149 Close-up



## DI-149 Features

### Eight Analog Input Channels

Connect the DI-149 to any preamplified signal in the typical range of  $\pm 5$  to  $\pm 10$  VFS.

### 10-bit ADC resolution

Provides 19.5 mV resolution across the entire DI-149 measurement range.

### Ruggedized Inputs

All eight DI-149 analog inputs transient-protected to  $\pm 150$  VDC or peak AC and four discrete inputs protected to  $\pm 30$  VDC or peak AC. Accidents that happen are quickly forgiven.

### Noise-cancelling Analog Input Configuration

The noise-immunity of differential inputs minimizes the effects of common mode noise so often encountered in industrial measurements.

### Built-in USB interface

The DI-149 is provided with a built-in USB interface. Connect and run it with any laptop or desktop PC. The USB interface provides power to the DI-149, eliminating clumsy external power supplies.

### Four Digital Inputs

Four discrete inputs allow remote event and stop/start operations with WINDAQ software. Two double as counter/timer inputs for rate and totalize operations.

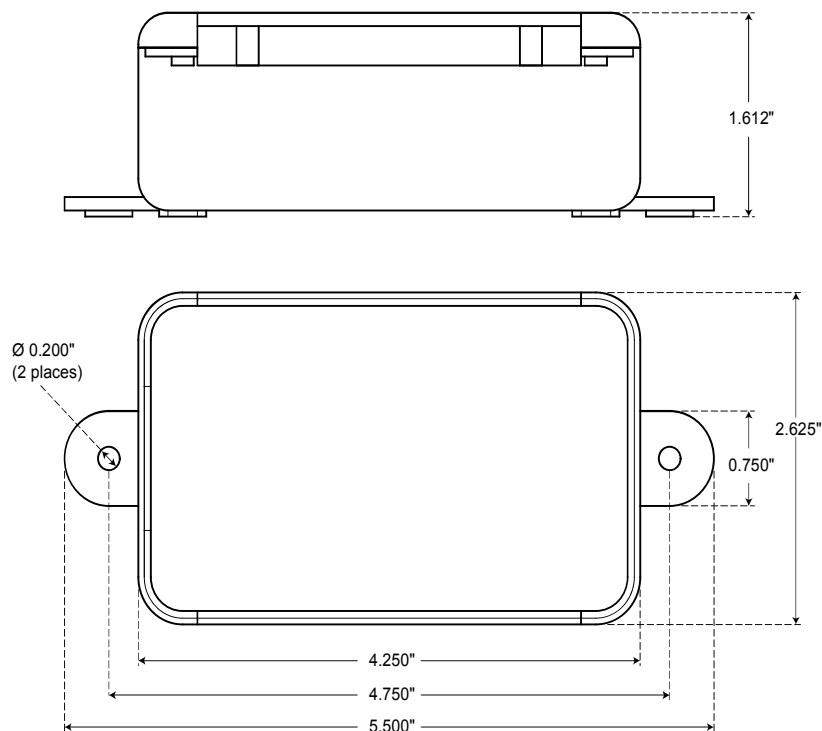
### Wide OS support

Signed drivers are provided with the DI-149 that allow trouble-free installation for Windows XP and both 32- and 64-bit versions of Windows Vista and Windows 7.

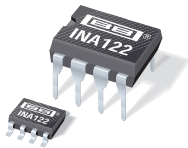
### Included WINDAQ/Lite software

Our WINDAQ/Lite data acquisition software offers real time display and disk streaming for the Windows environment up to 240 Hz. The real time display can operate in a smooth scroll or triggered sweep mode of operation, and can be scaled into any unit of measure. Event markers with comments allow you to annotate your data acquisition session with descriptive information as you're recording to disk. Raise your productivity to new heights with WINDAQ's unique multitasking feature. Record waveform data to disk in the background while running any combination of programs in the foreground — even WINDAQ Playback software to review and analyze the waveform data as it's being stored! Playback supports waveform analysis (Statistics, X-Y plots, frequency analysis) and the ability to export data to Microsoft Excel. WINDAQ/Lite recording and playback software is provided free with every DI-149 purchase. See the [WINDAQ Multimedia Tutorial](#) for more information. Optional WINDAQ/HS unlocks the 240 Hz real time recording restriction to allow sample rates to the full 10 kHz capability of the hardware.

## DI-149 Dimensional Drawing



### C.9.2 DataSheet del INA122



# INA122

## Single Supply, *MicroPower* INSTRUMENTATION AMPLIFIER

### FEATURES

- LOW QUIESCENT CURRENT: 60 $\mu$ A
- WIDE POWER SUPPLY RANGE  
Single Supply: 2.2V to 36V  
Dual Supply: -0.9/+1.3V to  $\pm$ 18V
- COMMON-MODE RANGE TO (V-)-0.1V
- RAIL-TO-RAIL OUTPUT SWING
- LOW OFFSET VOLTAGE: 250 $\mu$ V max
- LOW OFFSET DRIFT: 3 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW NOISE: 60nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 25nA max
- 8-PIN DIP AND SO-8 SURFACE-MOUNT

### APPLICATIONS

- PORTABLE, BATTERY OPERATED SYSTEMS
- INDUSTRIAL SENSOR AMPLIFIER:  
Bridge, RTD, Thermocouple
- PHYSIOLOGICAL AMPLIFIER:  
ECG, EEG, EMG
- MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION

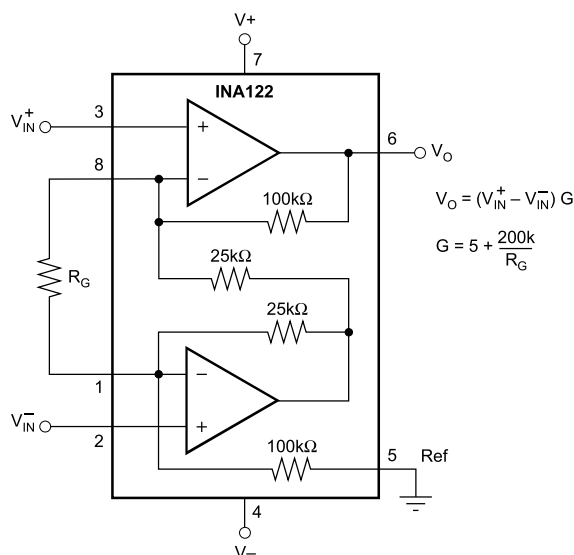
### DESCRIPTION

The INA122 is a precision instrumentation amplifier for accurate, low noise differential signal acquisition. Its two-op-amp design provides excellent performance with very low quiescent current, and is ideal for portable instrumentation and data acquisition systems.

The INA122 can be operated with single power supplies from 2.2V to 36V and quiescent current is a mere 60 $\mu$ A. It can also be operated from dual supplies. By utilizing an input level-shift network, input common-mode range extends to 0.1V below negative rail (single supply ground).

A single external resistor sets gain from 5V/V to 10000V/V. Laser trimming provides very low offset voltage (250 $\mu$ V max), offset voltage drift (3 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max) and excellent common-mode rejection.

Package options include 8-pin plastic DIP and SO-8 surface-mount packages. Both are specified for the -40 $^{\circ}$ C to +85 $^{\circ}$ C extended industrial temperature range.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111  
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132



# SPECIFICATIONS

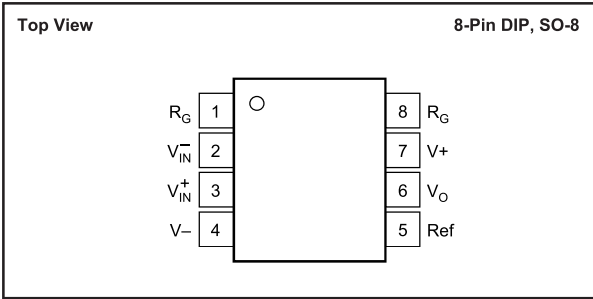
At  $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_S = +5\text{V}$ ,  $R_L = 20\text{k}\Omega$  connected to  $V_S/2$ , unless otherwise noted.

| PARAMETER                            | CONDITIONS                                        | INA122P, U |                                 |             | INA122PA, UA |           |             | UNITS                          |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|------------|---------------------------------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------------------------|
|                                      |                                                   | MIN        | TYP                             | MAX         | MIN          | TYP       | MAX         |                                |
| <b>INPUT</b>                         |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Offset Voltage, RTI                  | $V_S = +2.2\text{V to } +36\text{V}$              |            | $\pm 100$                       | $\pm 250$   |              | $\pm 150$ | $\pm 500$   | $\mu\text{V}$                  |
| vs Temperature                       |                                                   |            | $\pm 1$                         | $\pm 3$     |              | *         | $\pm 5$     | $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| vs Power Supply (PSRR)               |                                                   |            | 10                              | 30          |              | *         | 100         | $\mu\text{V/V}$                |
| Input Impedance                      |                                                   |            | $10^{10} \parallel 3$           |             |              | *         |             | $\Omega \parallel \text{pF}$   |
| Safe Input Voltage                   | $R_S = 0$                                         | (V-)–0.3   |                                 | (V+)+0.3    | *            |           | *           | V                              |
|                                      | $R_S = 10\text{k}\Omega$                          | (V-)–40    |                                 | (V+)+40     | *            |           | *           | V                              |
| Common-Mode Voltage Range            |                                                   | 0          |                                 | 3.4         | *            |           | *           | V                              |
| Common-Mode Rejection                | $V_{CM} = 0\text{V to } 3.4\text{V}$              | 83         | 96                              |             | 76           | 90        |             | dB                             |
| <b>INPUT BIAS CURRENT</b>            |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| vs Temperature                       |                                                   |            | –10                             | –25         |              | *         | –50         | nA                             |
| Offset Current                       |                                                   |            | $\pm 40$                        |             |              | *         |             | $\text{pA}/^{\circ}\text{C}$   |
| vs Temperature                       |                                                   |            | $\pm 1$                         | $\pm 2$     |              | *         | $\pm 5$     | nA                             |
|                                      |                                                   |            | $\pm 40$                        |             |              | *         |             | $\text{pA}/^{\circ}\text{C}$   |
| <b>GAIN</b>                          |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Gain Equation                        |                                                   |            | $G = 5 \text{ to } 10\text{k}$  |             |              | *         |             | V/V                            |
| Gain Error                           |                                                   |            | $G = 5 + 200\text{k}\Omega/R_G$ |             |              | *         |             | V/V                            |
| vs Temperature                       | $G = 5$                                           |            | $\pm 0.05$                      | $\pm 0.1$   |              | *         | $\pm 0.15$  | %                              |
| Gain Error                           | $G = 5$                                           |            | 5                               | 10          |              | *         | *           | $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  |
| vs Temperature                       | $G = 100$                                         |            | $\pm 0.3$                       | $\pm 0.5$   |              | *         | $\pm 1$     | %                              |
| Gain Error                           | $G = 100$                                         |            | $\pm 25$                        | $\pm 100$   |              | *         | *           | $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  |
| Nonlinearity                         | $G = 100, V_O = -14.85\text{V to } +14.9\text{V}$ |            | $\pm 0.005$                     | $\pm 0.012$ |              | *         | $\pm 0.024$ | %                              |
| <b>NOISE (RTI)</b>                   |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Voltage Noise, $f = 1\text{kHz}$     |                                                   |            | 60                              |             |              | *         |             | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$   |
| $f = 100\text{Hz}$                   |                                                   |            | 100                             |             |              | *         |             | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$   |
| $f = 10\text{Hz}$                    |                                                   |            | 110                             |             |              | *         |             | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$   |
| $f_B = 0.1\text{Hz to } 10\text{Hz}$ |                                                   |            | 2                               |             |              | *         |             | $\mu\text{Vp-p}$               |
| Current Noise, $f = 1\text{kHz}$     |                                                   |            | 80                              |             |              | *         |             | $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$   |
| $f_B = 0.1\text{Hz to } 10\text{Hz}$ |                                                   |            | 2                               |             |              | *         |             | $\text{pAp-p}$                 |
| <b>OUTPUT</b>                        |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Voltage, Positive                    | $V_S = \pm 15\text{V}$                            | (V+)–0.1   | (V+)–0.05                       |             | *            | *         |             | V                              |
| Negative                             | $V_S = \pm 15\text{V}$                            | (V-)–0.15  | (V-)–0.1                        |             | *            | *         |             | V                              |
| Short-Circuit Current                | Short-Circuit to Ground                           |            | +3/–30                          |             |              | *         |             | mA                             |
| Capacitive Load Drive                |                                                   |            | 1                               |             |              | *         |             | nF                             |
| <b>FREQUENCY RESPONSE</b>            |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Bandwidth, –3dB                      | $G = 5$                                           |            | 120                             |             |              | *         |             | kHz                            |
|                                      | $G = 100$                                         |            | 5                               |             |              | *         |             | kHz                            |
|                                      | $G = 500$                                         |            | 0.9                             |             |              | *         |             | kHz                            |
| Slew Rate                            |                                                   |            | +0.08/–0.16                     |             |              | *         |             | V/ $\mu\text{s}$               |
| Settling Time, 0.01%                 | $G = 5$                                           |            | 350                             |             |              | *         |             | $\mu\text{s}$                  |
|                                      | $G = 100$                                         |            | 450                             |             |              | *         |             | $\mu\text{s}$                  |
|                                      | $G = 500$                                         |            | 1.8                             |             |              | *         |             | ms                             |
| Overload Recovery                    | 50% Input Overload                                |            | 3                               |             |              | *         |             | $\mu\text{s}$                  |
| <b>POWER SUPPLY</b>                  |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Voltage Range, Single Supply         |                                                   | +2.2       | +5                              | +36         | *            | *         | *           | V                              |
| Dual Supplies                        |                                                   | –0.9/+1.3  |                                 | $\pm 18$    | *            | *         | *           | V                              |
| Current                              | $I_O = 0$                                         |            | 60                              | 85          |              | *         | *           | $\mu\text{A}$                  |
| <b>TEMPERATURE RANGE</b>             |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| Specification                        |                                                   | –40        |                                 | +85         | *            |           | *           | $^{\circ}\text{C}$             |
| Operation                            |                                                   | –55        |                                 | +85         | *            |           | *           | $^{\circ}\text{C}$             |
| Storage                              |                                                   | –55        |                                 | +125        | *            |           | *           | $^{\circ}\text{C}$             |
| Thermal Resistance, $\theta_{JA}$    |                                                   |            |                                 |             |              |           |             |                                |
| 8-Pin DIP                            |                                                   |            | 150                             |             |              | *         |             | $^{\circ}\text{C/W}$           |
| SO-8 Surface-Mount                   |                                                   |            | 150                             |             |              | *         |             | $^{\circ}\text{C/W}$           |

\* Specification same as INA122P, INA122U.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

# PIN CONFIGURATION



# ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

# ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>(1)</sup>

|                                                      |                        |
|------------------------------------------------------|------------------------|
| Supply Voltage, V+ to V- .....                       | 36V                    |
| Signal Input Terminals, Voltage <sup>(2)</sup> ..... | (V-)-0.3V to (V+)+0.3V |
| Current <sup>(2)</sup> .....                         | 5mA                    |
| Output Short Circuit .....                           | Continuous             |
| Operating Temperature .....                          | -40°C to +125°C        |
| Storage Temperature .....                            | -55°C to +125°C        |
| Lead Temperature (soldering, 10s) .....              | +300°C                 |

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage.  
(2) Input terminals are internally diode-clamped to the power supply rails. Input signals that can exceed the supply rails by more than 0.3V should be current-limited to 5mA or less.

# PACKAGE INFORMATION

| PRODUCT  | PACKAGE            | PACKAGE DRAWING NUMBER <sup>(1)</sup> |
|----------|--------------------|---------------------------------------|
| INA122PA | 8-Pin DIP          | 006                                   |
| INA122P  | 8-Pin DIP          | 006                                   |
| INA122UA | SO-8 Surface Mount | 182                                   |
| INA122U  | SO-8 Surface Mount | 182                                   |

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

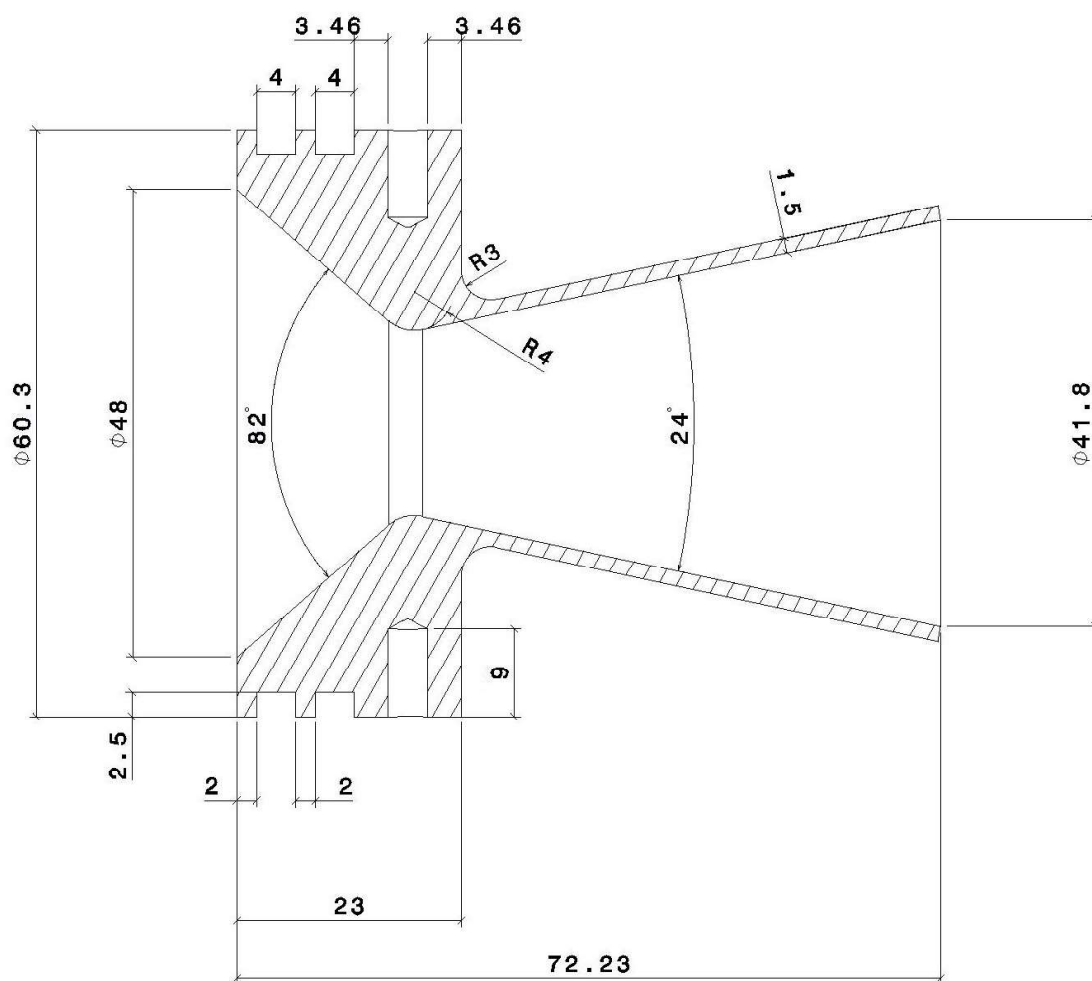
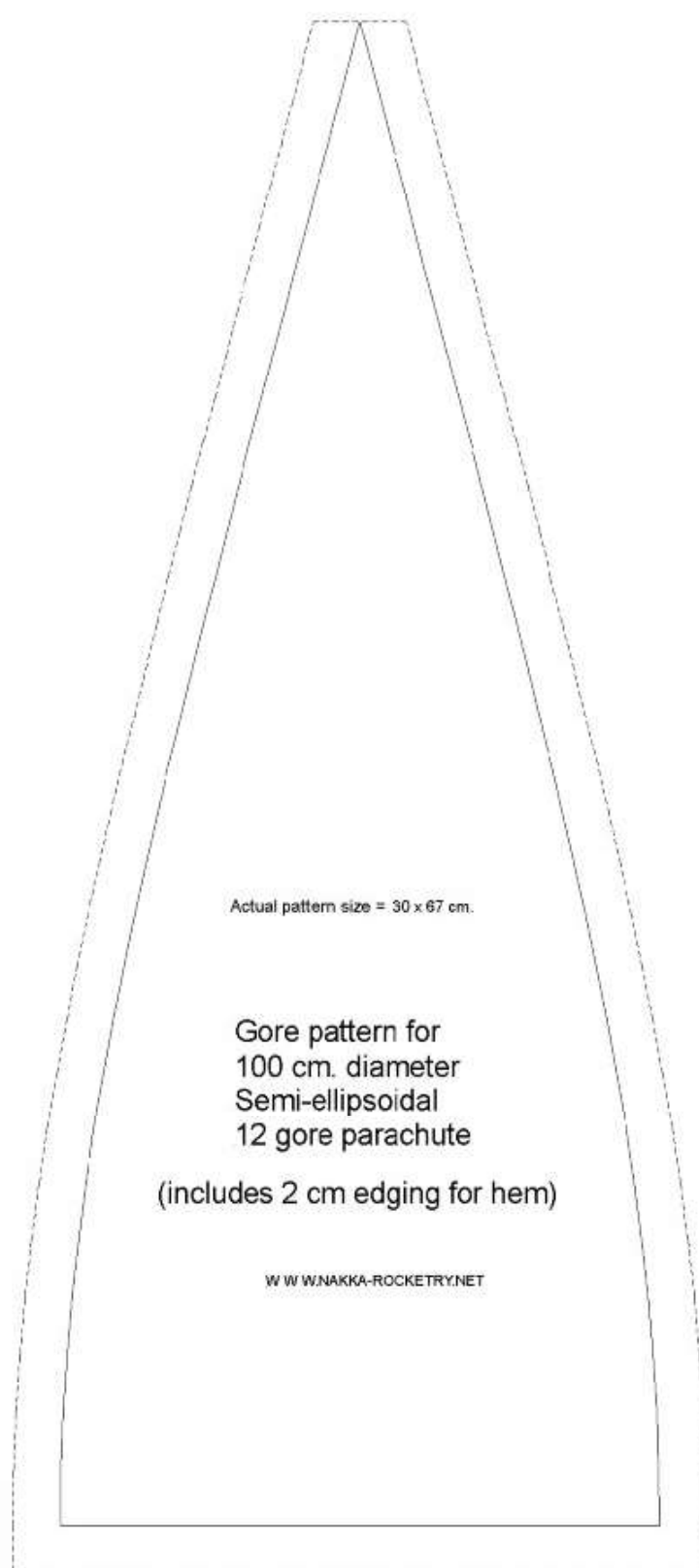


Figura C.7 Plano Tobera Adaptada de NAOS.



**Figura C.8** Patrón para recorte de piezas sueltas del paracaídas semielipsoidal.

## Apéndice D

# Documentación de apoyo para ensayos en banco y pruebas funcionales

---

D.0.1 Report CATO 13/12/2020



# TEST REPORT

## "M60-AC\_13-12-20"

## Table of content

|     |                                                                           |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Objective.....                                                            | 3  |
| 2   | Antecedents .....                                                         | 3  |
| 2.1 | Test Log .....                                                            | 3  |
| 2.2 | Engine.....                                                               | 3  |
| 2.3 | Propellant.....                                                           | 3  |
| 2.4 | Grain and ignitor position in the chamber.....                            | 4  |
| 2.5 | Grain inhibition .....                                                    | 4  |
| 2.6 | Ignitor.....                                                              | 4  |
| 2.7 | Manufacturing and assembly of the grains .....                            | 4  |
| 2.8 | Load cell .....                                                           | 4  |
| 3   | Results.....                                                              | 5  |
| 3.1 | Inspection.....                                                           | 5  |
| 3.2 | Test observation.....                                                     | 5  |
| 3.3 | Conclusions .....                                                         | 6  |
| 4   | Analysis .....                                                            | 6  |
| 4.1 | Rupture and deformation of the chamber .....                              | 7  |
| 4.2 | Failure modes and causes .....                                            | 12 |
| 4.3 | Corrective actions .....                                                  | 12 |
| 5   | Next actions .....                                                        | 13 |
|     | ANNEX I: CHAMBER PRESSURE EQUATIONS.....                                  | 14 |
|     | • CHAMBER PRESSURE EQUATIONS .....                                        | 14 |
|     | • INFLUENCE OF THE EROSIVE COMBUSTION PARAMETERS IN THE BURNING RATE..... | 14 |
|     | ANNEX II: DESIGN MECHANICAL STRENGTH CALCULATION .....                    | 15 |
|     | ANNEX III: TESTS SUMMARY TABLE .....                                      | 18 |
|     | ANNEX IV: ROCKET MOTOR D60-1 “AS BUILT” .....                             | 19 |
|     | ANNEX V: NOZZLE THEORY .....                                              | 20 |



## ***Table of illustrations***

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Grain 1.....                                                        | 3  |
| Figure 2: Grain 2.....                                                        | 3  |
| Figure 3: Test Thrust (kg) vs time (s) curve .....                            | 6  |
| Figure 4: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Cut.....                        | 6  |
| Figure 5: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Enlarged .....                  | 7  |
| Figure 6: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Enlarged .....                  | 7  |
| Figure 7: Chamber tube bulging.....                                           | 8  |
| Figure 8: Chamber length measuring.....                                       | 9  |
| Figure 9: Grain thickness (mm) burnt function of time (s) .....               | 9  |
| Figure 10: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests.....           | 10 |
| Figure 11: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests.....           | 10 |
| Figure 12: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests. Enlarged..... | 11 |
| Figure 13: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests.....           | 11 |
| Figure 14: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests. Enlarged..... | 12 |

# 1 Objective

Test the engine D60-1 (Inox. Steel. 60 mm diameter) with two long grains (131 y 156mm), equivalent to 4 short ones, 52% of the maximum propellant load to get the real data, compare them with the previous test and be able to calculate the time to open the parachute. It is also intended to compare the data with other tests to see the influence of the long grains, as well as verify the theoretical calculations and the apogee foreseen, as previous step to perform the initial launching, at low height, of NAOS rocket. With this initial launching is intended to test that all the systems work properly (parachute release system, Avionics, ...).

# 2 Antecedents

## 2.1 Test Log

See annex VI

## 2.2 Engine

D60-1 engine made of stainless steel. Detailed dimensions of the engine are shown in annex IV.

The four O-rings (two at the nozzle and two at the forward bulkhead) are greased.

Nozzle exit is covered with a membrane build with two paper layers (see membrane tests) to get an initial pressure peak, improve the grains ignition and the engine start up. The objective is to improve the efficiency of the engine through the improvement of the Trust vs t curve and the total impulse avoiding the initial propellant combustion without diving enough thrust to lift the rocket.

## 2.3 Propellant

KDX (65% KNO<sub>3</sub>-35% Dextrose)

The engine is loaded with 2 long grains, being at 52% of the maximum propellant load.

### 1. Grain 1: 07/12/20

Long: 147,75 mm

Diameter: 58,3 mm (see note 1)

Mass: 595,3 g (see note 1)

Inner Hole Diameter of the grain: 16 mm

Manufacturing date: 07/12/20



Figure 1: Grain 1

|                |           |
|----------------|-----------|
| Long media     | 147,37 mm |
| Long Total     | 294,75 mm |
| Diámetro medio | 58,50 mm  |
| Masa Total     | 1186,5 g  |

### 2. Grain 2: 08/12/20

Long: 147 mm

Diameter: 58,71 mm (see note 1)

Mass: 591,2 g (see note 1)

Inner Hole Diameter of the grain: 16 mm

Manufacturing date: 08/12/20



Figure 2: Grain 2

**Note 1:** Grain measures does not include the inhibitor

See annex VI for grains density calculation

Inner hole is not covered with black powder (made with alcohol).

## **2.4 Grain and ignitor position in the chamber**

The grains are positions close to the forward engine bulkhead.

Grain 1 (147,75 mm, 07/12/20) is placed close to the nozzle and grain 2 (147 mm, 08/12/20) close to the forward engine bulkhead.

The ignitor is placed at the end of the chamber, 4 cm (aprox.) up to the forward engine bulkhead.

## **2.5 Grain inhibition**

Outer surface of the grains are inhibited with 3 layers of board in the grain closer to the bulkhead, batch 08/12/20, and 3 layer of board plus 1 layer of paper in the grain closer to the nozzle, batch 07/12/20.

The core and ends surfaces are not inhibited.

It is not inserted additional liner made by plastic layer as did it in previous test.

Board thickness (inhibitor) = 0,22 mm.

Board weight = 5000 mm<sup>2</sup>/g (0,0002 g/mm<sup>2</sup>). Every layer of the board weights 4,9 g

## **2.6 Ignitor**

Electrical ignitor with Ni-Cr resistor and Amonium Perchlorate (AP) and Al powder.

It is used fuse paper (the one used in the handmade cigarettes), without cover of KNO<sub>3</sub>, instead of the previously used (muffins paper moulds) thicker that it was covered with dissolved KNO<sub>3</sub>. It is evidenced the new fuse paper disappear with the ignitor combustion and leave no pieces of paper that could block the nozzle.

## **2.7 Manufacturing and assembly of the grains**

The propellant, before “cooking” it, is mixed in the electrical mixer. It is not done manually.

The grain 1 (147,75 mm, 07/12/20, closer to the nozzle) is difficult to take it out of the mould and is hit it with a wood dowel. It is possible that have been broken or made internal cracks. The grain 2 (147 mm, 08/12/20, closer to the engine bulkhead) is also difficult to take it out of the mould, although not as much as the grain 1, and the engine bulkhead is used to take it out more gently and it is been extracted better than the previous grain.

The grain 1 (closer to the nozzle) is inhibited with an additional paper layer (compared with the grain 2) in order to adjust it better in the chamber.

Both grains go into the chamber very fit and have to be pushed slightly with the hand to place them.

It is not inserted a spacer from nozzle to the grain (closer to nozzle) end surface to reduce the risk of internal movement of the grains during combustion.

## **2.8 Load cell**

In the data acquisition system is used the load cell with a nominal force = 200 kg

The calibration is made for 67 kg with reference weight (see sheet "calibración célula de carga" and pictures in the folder).

With the engine on the load cell, it is done an offset to put the zero value. This, obviously, modify the initial values inserted, but not the calibration curve slope. Later it is checked that the load cell is measuring correctly with a reference weight of 19,1 kg getting a reading 6% lower than the real value.

The test bench is built with the usual PVC tube (grey, see videos).

### 3 Results

Engine explodes: **CATO** (CATastrOphic failure)

#### 3.1 Inspection

Inhibition boards, that initially were placed at the bottom (close to the forward engine bulkhead), are broken in pieces which are spread over the terrain. Most of the board pieces are from the grain 2 (closer to the bulkhead) and are in good condition observing the three board layers. There are found almost no inhibitor pieces from the grain 1 (closer to the nozzle) with the paper layer, so they have been burnt or broken in very small pieces due to the explosion.

The rupture of the engine is tensile and circumferential ( $45^\circ$ ) in the chamber tube, at 34 mm from the tube edge of the nozzle part. The rupture coincides with the machining recess in the nozzle part.

In the separated piece of the tube there is a part (equivalent to two screws) left and not found. The holes of the screws in the chamber tube are in good status, being no evidence of tear so the design is acceptable.

The chamber tube has a bulging area close to the forward bulkhead and the central zone (see pictures). The diameters are measured and shown in figure 7.

The forward bulkhead part of the tube is damaged due to the impact of the load cell and the supporting screw (M12) of the wood base. It maintains five screws and the other three have been tearing broken.

The nozzle screws are also tearing broken or extracted out of the thread drill, except one that is bended and is still screwed in the nozzle.

#### 3.2 Test observation

The engine does not work at the first time. It is identified a shortcut in one of the connector of the extended harness of the ignition system.

There is a failure in the 240 fps and 1080 video due to the expansive wave, and it is not recorded test video with the gopro camera. It is recorded video with the tablet and with the mobile camera.

An increase of the thrust (pressure) is seen either in the  $T$  vs  $t$  curve and in the video when ignitor cable is exhausted ( $T = 48$  kg,  $t = 0,18$  s). There is not observed over-pressure, due to the exhaust of the ignitor paper which was observed in previous test, so the new fuse paper is working properly.

The effect of the membrane closing initially the nozzle is very small, so it not going to be used anymore.

Looking at the shape of the gases jet, the nozzle is under expanded as it was expected (See annex V. Figure 3.g). This implies that  $P_e > P_a$ , being  $P_e$  the exit pressure at the nozzle.

### 3.3 Conclusions

The explosion is due to an overpressure caused by the high gradient of grain surface burnt, due probably to manufacturing of the grain, either cracks in the grain when de-moulded or when casting in the mould by creating bubbles. Another possible cause is a bad performance of the inhibition of the grain. See paragraph 4.2 for the failure analysis.

## 4 Analysis

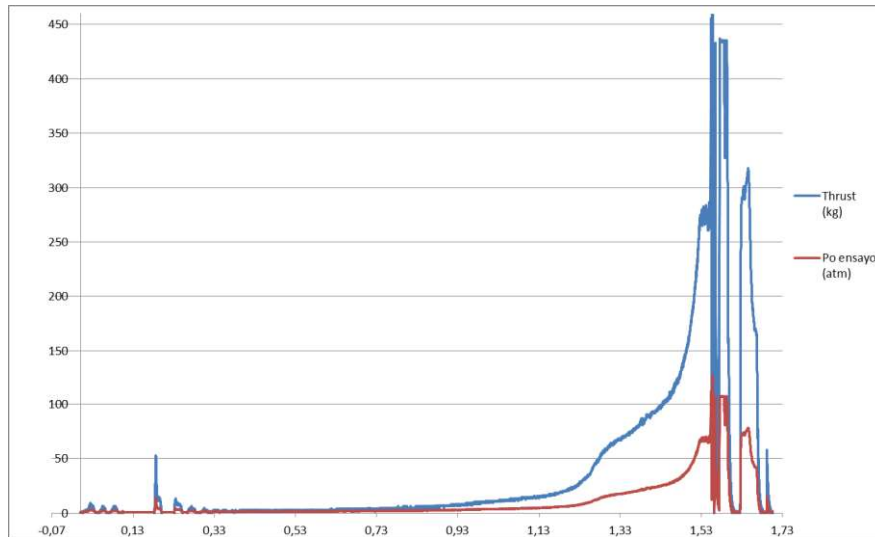


Figure 3: Test Thrust (kg) vs time (s) curve

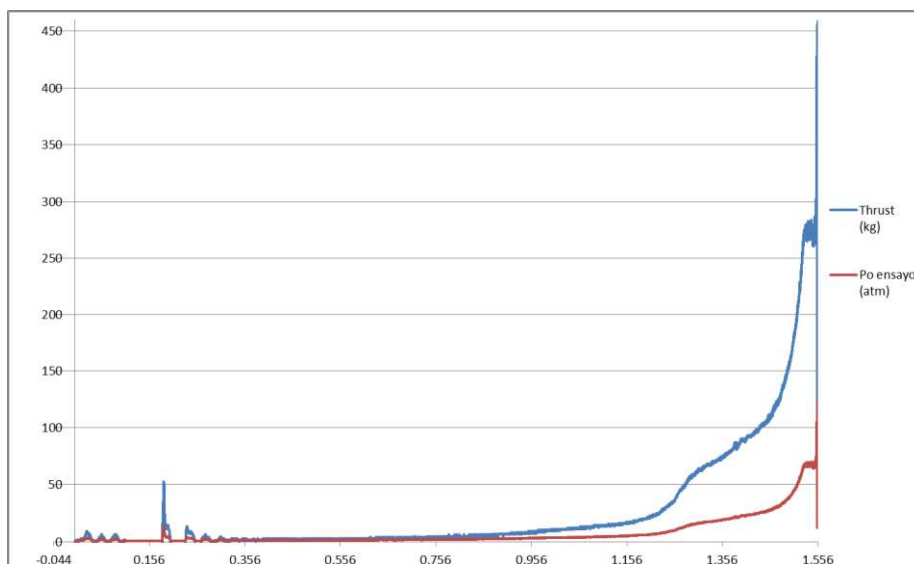


Figure 4: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Cut

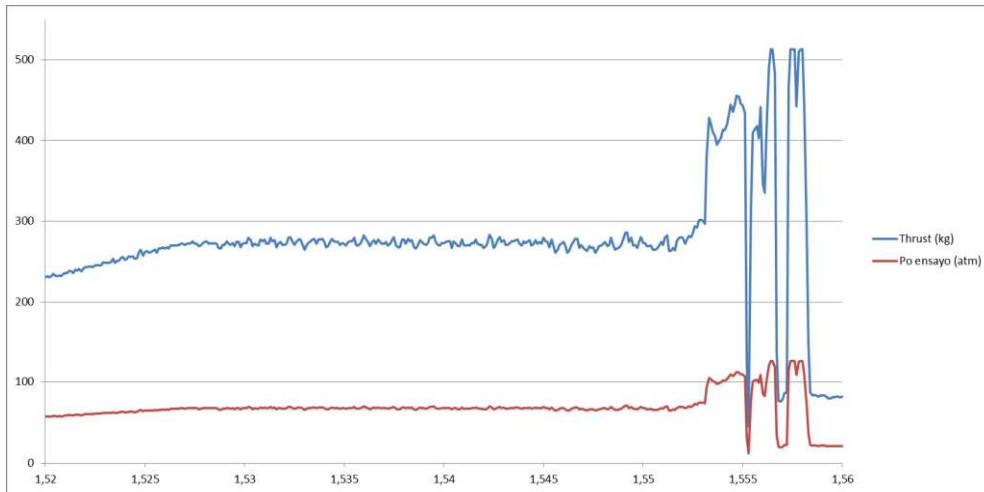


Figure 5: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Enlarged

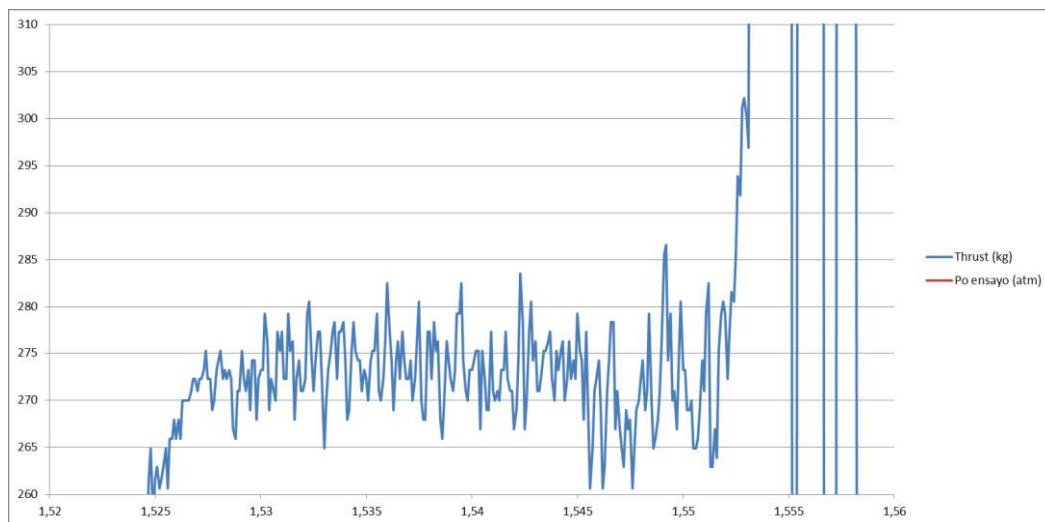


Figure 6: Test Thrust (kg) vs time (s) curve. Enlarged

## 4.1 Rupture and deformation of the chamber

### Design values:

#### 3. Combustion chamber

Material: Stainless steel AISI 304 (see properties in annex II)

#### **Circumferential strength CHAMBER CASE**

Max pressure at rupture ( $F_{tu}$ ) that bears the case: **239 atm**

Max pressure at deformation ( $F_{ty}$ ) that bears the case: **102 atm**

#### **Tensile axial strength CHAMBER CASE**

Max pressure at rupture ( $F_{tu}$ ) that bears the case: **426 atm**

Max pressure at deformation ( $F_{ty}$ ) that bears the case: **181 atm**

Note: chamber tube wall thickness: 1,34 mm

### Maximum thrust logged with the data acquisition equipment

Max. pressure at Tmax of **455,94 kg** (possibly before the cell load breakage) in  $t=1,5547$  s = **112 atm**

Max. pressure at Tmax of **400 kg** (breakage load according to load cell specifications) in  $t=1,5538$  s = **98 atm**

The tensile rupture of the tube is due to the mechanized recess made in the internal part of the tube from  $x=0$  a  $x=34$  mm. At  $x=34$  there is a little groove made with the cut tool when mechanized.

The tube deformation is shown in next figure 7.

There is a narrowing in the rupture zone and a bulging in the rest, although not uniform how it was expected.

Based in the design values, rupture shape and tube deformation, it can be deduced the **pressure** inside the chamber **has been over 102 atm** (tube circumferential deformation limit, equivalent to a thrust **415 kg**) and **below 239 atm** (circumferential rupture limit), because it was not circumferential rupture.

According to design calculations tensile rupture had not to be happened because it is much more higher than the circumferential rupture strength, even though having in mind the reduced thickness of the tube.

The circumferential rupture has occurred due to it was a groove line (where the tube has been ruptured) due to the mechanizing process of the internal recess of the tube.

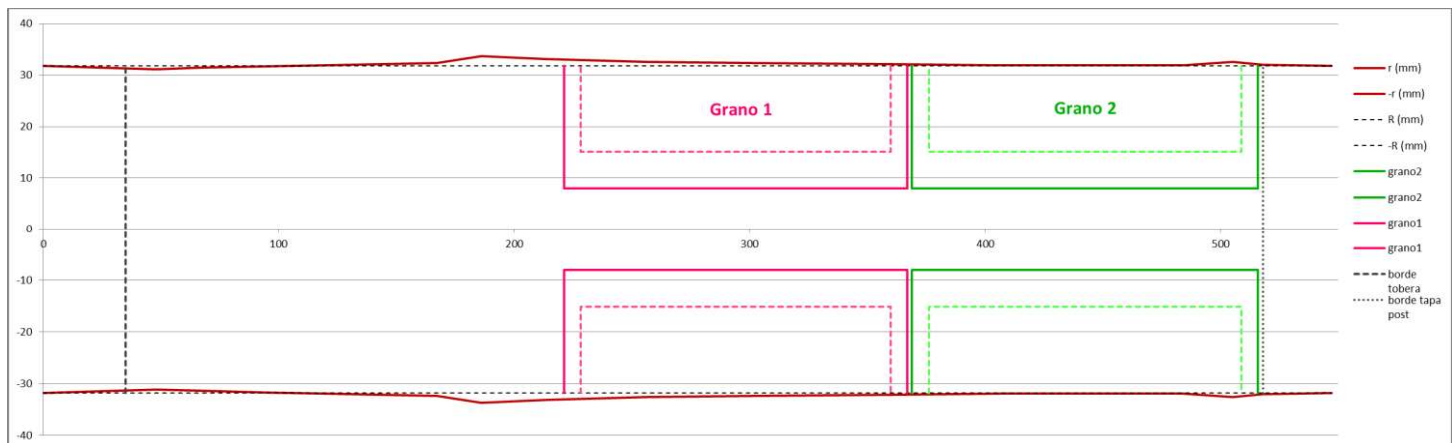


Figure 7: Chamber tube bulging

There is no explanation about why the bulging in  $x = 200$  mm is not uniform and continuous from  $x = 34$  mm to  $x = 200$  mm

From  $x= 200$  a  $550$  there is no bulging probably due to in that part of the tube was located the polyester sleeve and the PVC tube (PN10) of the test bench, giving an additional strength of more than 10 atm (possibly 15 atm).

Although the bulging is close to the grains ends, it is not believed that this has had any influence.



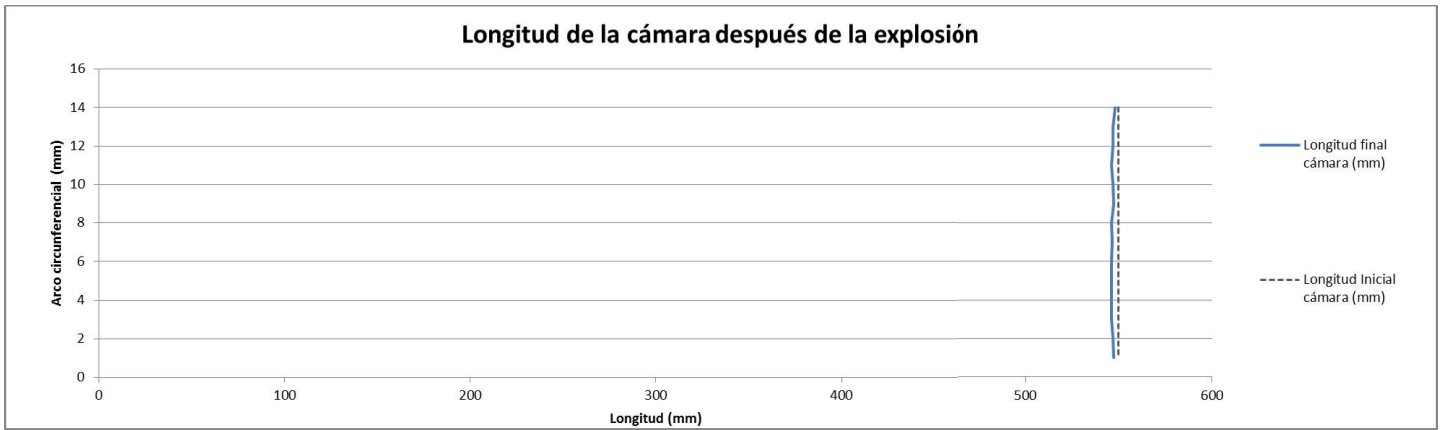


Figure 8: Chamber length measuring

Total length of the tube before CATO = 550 mm

Total mean length of the tube after CATO = 546,7 mm

Those values are not reasonable, as the length after explosion should be longer, so the measures taken before and after has not to be accurate enough.



Figure 9: Grain thickness (mm) burnt function of time (s)

Following up it is shown a comparative between the T vs t curves measures in several tests with different propellant grains configurations. Those configurations are identified with two digits XY, where:

X = no. of grains

Y = length of the grain (S = short grains. 75 mm length each grain, aprox. L = Long grain. 134 mm, aprox.)

Eg.: 7S = 7 short grains

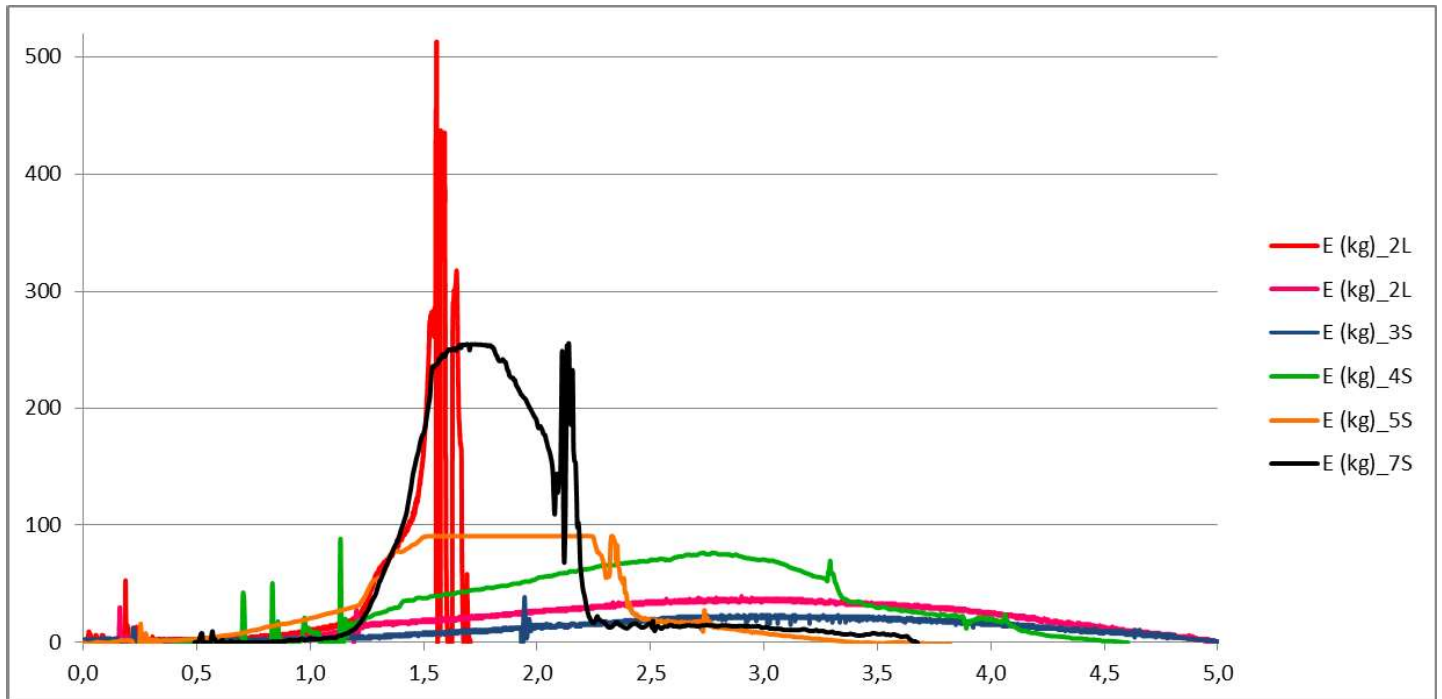


Figure 10: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests

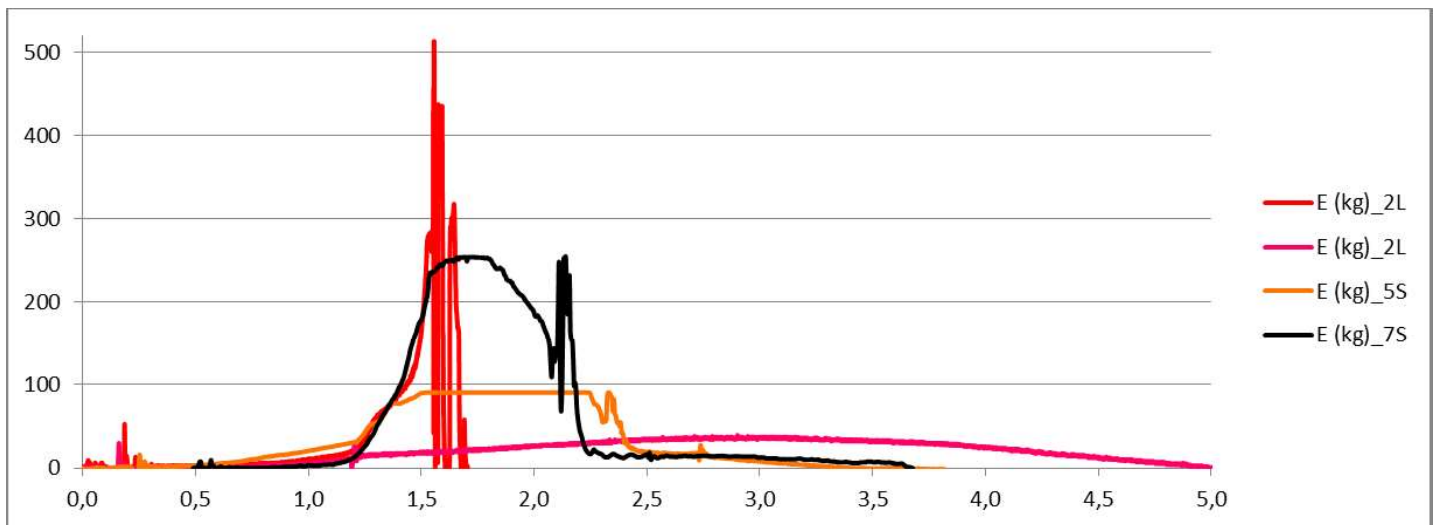


Figure 11: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests

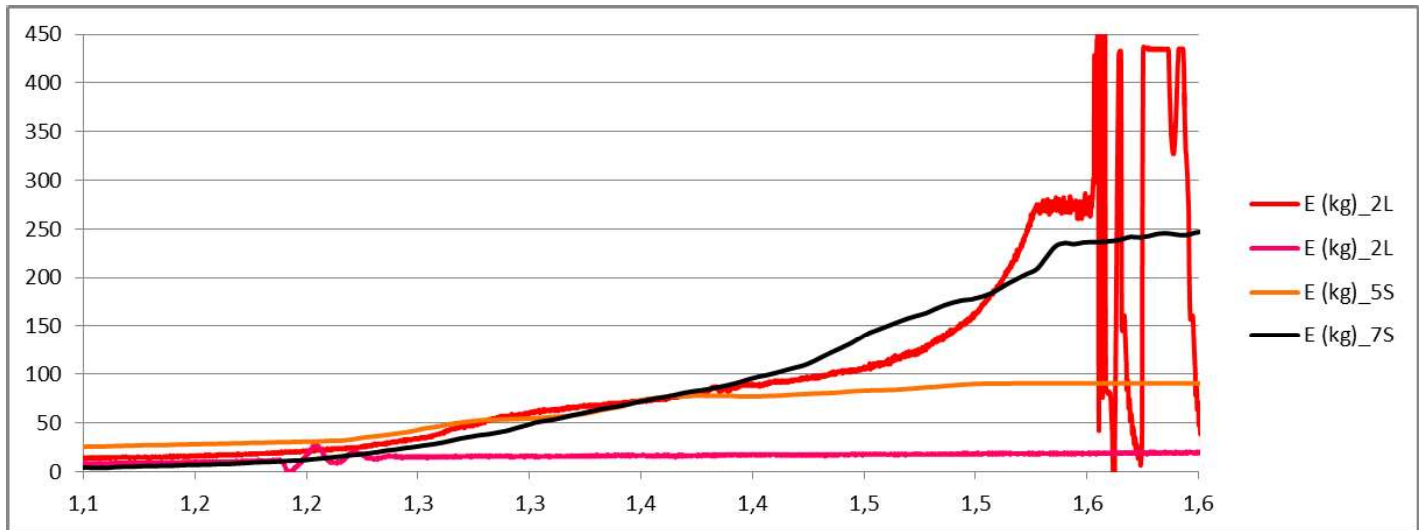


Figure 12: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests. Enlarged

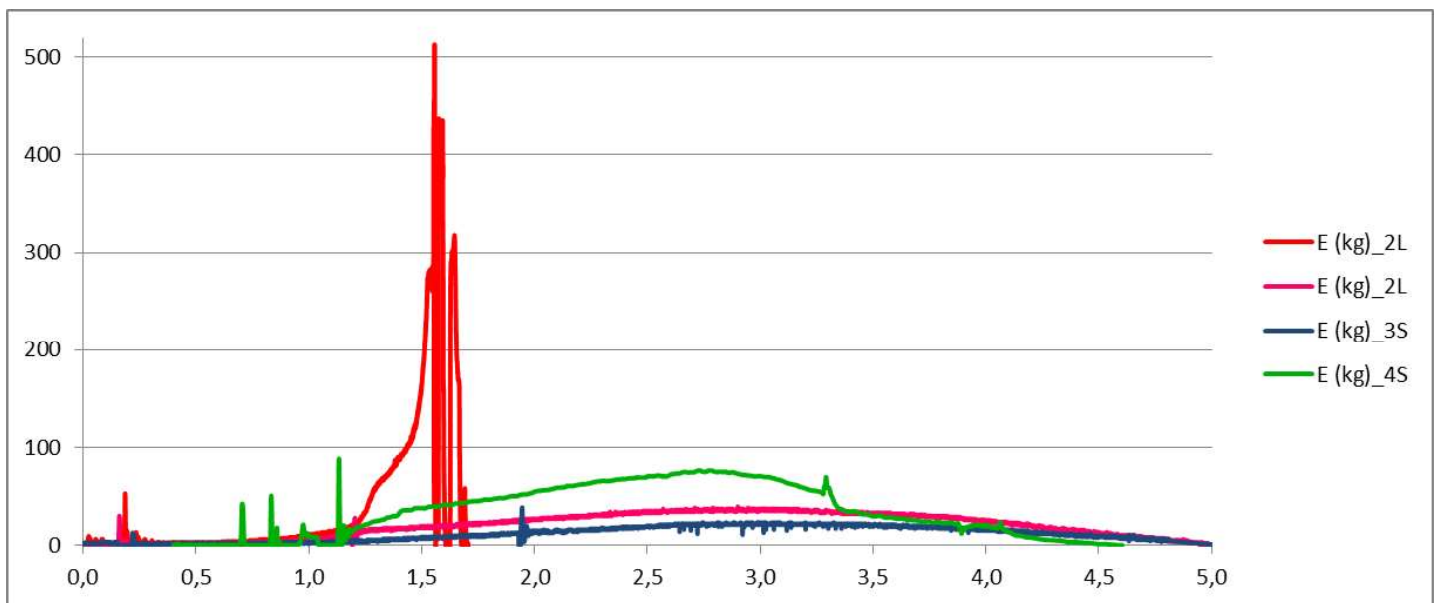


Figure 13: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests.

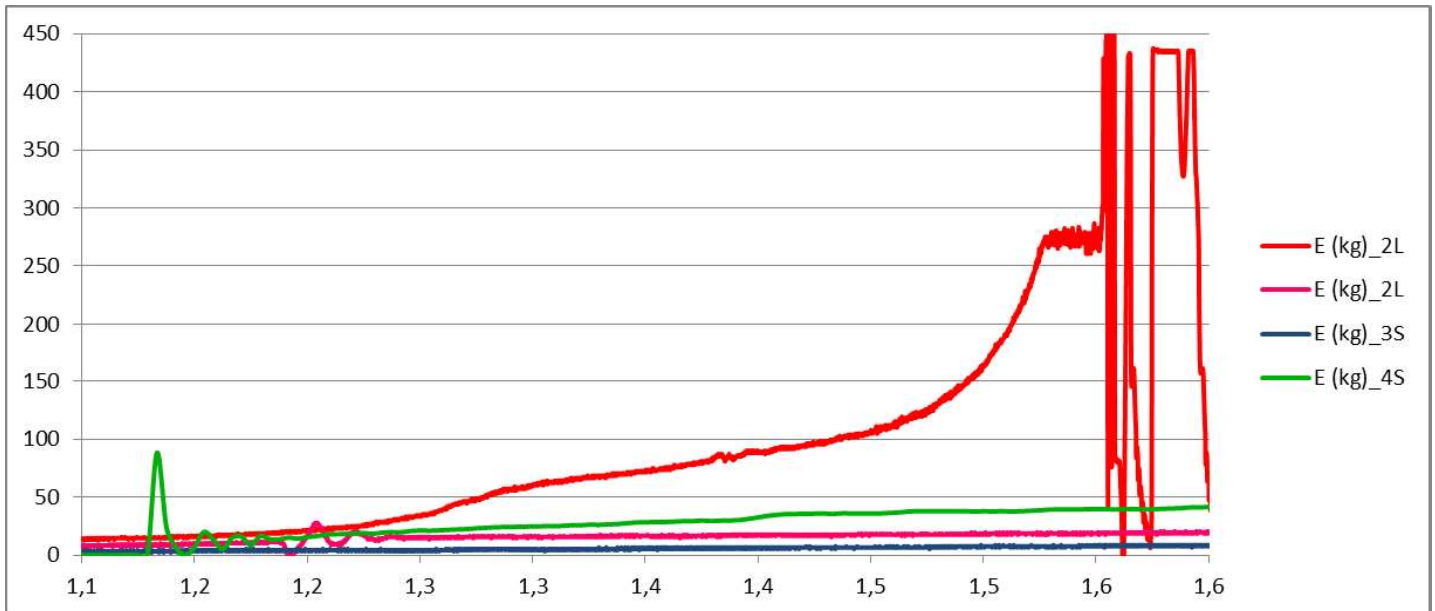


Figure 14: Thrust (kg) vs time (s) comparison of several tests. Enlarged

## 4.2 Failure modes and causes

According to the annex I equations, the possible failure modes are:

1.  $K_n$  increase out of the design values  $\rightarrow$  Increase of the grain burning surface  $A_b$  out of the design values
  - Possible causes:
    - Rupture or cracks in the grain during manufacturing
      - Cracks and bubbles in the grains in the casting process due to its long length
      - Rupture or cracks in the grain during the unmold process.
    - Rupture or cracks in the grain during combustion
      - Sudden displacement and rupture of the grains during combustion due to the chamber internal differences of pressures between the forward and rearward part.
    - Deficient inhibition of the grains
2. Propellant characteristics out of design values (a y n)  $\rightarrow$  Deficient propellant manufacturing.
  - Possible causes:
    - $KNO_3$  particles size too small during grinding process.
    - Deficient mixing of the propellant components ( $KNO_3$  y de la Dextrose) in the electrical mixer, which rotates with too much rpm and components get stuck on the container wall.
3. Erosive combustion out of the design values
  - Possible causes:
    - Grain initial drill diameter is smaller than the nozzle diameter.
4. Nozzle blockage.
  - Possible causes:
    - Blockage due to a partial or total exhaust of the inhibition board of the grains.

## 4.3 Corrective actions

- Modify the manufacturing process of the grains:
  - Change the length of the grain to short ones (75 mm, aprox.) instead the long ones (150 mm, aprox.).
  - Do not hit the grain when unmoulding.
    - Redesign the mould to be open longitudinally in to halves. Manufacture the mold with 3D printer and ABS filament. The mould could deform because of the ABS stands up to 104°

(glass transition temperature) without deformation, but the dextrose melting temperature is 146 °C. It is estimated that with two inhibition layers in the mould (one or two boards) the mould temperature will be under 100 °C.

Note:

|          | Glass transition temperature (°C) | Melting Temperature (°C) | Tensile strength Ft <sub>u</sub> (MPa) | Bending strength (MPa) | Bending elastic module (GPa) | Tensile elastic module (GPa) |
|----------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| PLA      | 60                                | 173                      | 37                                     | 55,3                   | 4                            | 3,3                          |
| ABS      | 104                               | N/A (Amorphous)          | 27                                     |                        | 2.1 a 7.6                    |                              |
| Dextrose |                                   | 146                      |                                        |                        |                              |                              |

- Improve the grains inhibition of the grains closer to the nozzle to avoid that the inhibitor blocks the nozzle when the burning surface arrive to the diametric edge of the grain and drag the board to the nozzle.
  - Two individual board layers per grain and a third one that jointly cover all the grains.
  - Stick the joint cover board with silicone or polyester resin. When it is in gel state (consistent but deformable) is put into the chamber to fill the holes due to the chamber tube is not completely circular (variation of the order of 1 mm).
  - Assess stick an outer aluminium foil layer to the external inhibition board.
  - Assess to use a plastic liner instead of the joint cover board with external aluminium foil layer.
- Increase the KNO<sub>3</sub> particles size to reduce the burning rate and the effect of the erosive combustion, even increase the oxidizer particles size of the grains closer to the nozzle.
  - Measure the time to grind the KNO<sub>3</sub>:
    - t = 20 s
    - t = 15 s in the grain closer to the nozzle
  - Do not grind the dextrose.
- Look for an electrical engine which hold a rotation of 30 rpm for the electrical mixer. While it is being found, mix the powder with current system and manually.
- Reduce the effect of the erosive combustion:
  - Increase the grain initial internal drill from 16 mm to 20 mm (≥ 19 mm, throat nozzle diameter)
- Insert into the chamber a stainless-steel expansion ring to fix the grains and avoid their movement during combustion. Unless initially.
- Add to all exposed surfaces of the grains a black powder layer to accelerate the initial combustion of all the surfaces and in a uniform way.
- Insert spacer between the grains to ease the ends initial combustion.

## 5 Next actions

- 1.- Manufacture a new motor. **✓ Done**
- 2.- Come back to the short grains trying to avoid the thrust peak before and after the maximum thrust.
- 3.- Perform test with short grains: initially 3 or 4.
- 4.- Keep on using fuse paper (handmade cigarette paper) in the ignitor and increase the ignitor length and black powder mass to reduce the motor starting time.

## ANNEX I: CHAMBER PRESSURE EQUATIONS

- CHAMBER PRESSURE EQUATIONS

$$P_c = \left( K_n \cdot \rho_p \cdot a \cdot c^* \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

$$K_n = \frac{A_b}{A_t}$$

$A_b$  = área que se quema

$A_t$  = área de la garganta de la tobera ( $A^*$ )

$\rho_p$  = densidad del propulsante

$a$  = coeficiente de la velocidad de quema (burning rate coefficient)

$n$  = exponente de la velocidad de quema (burning rate exponent)

$c^*$  = Velocidad característica

$$c^* = \sqrt{\frac{R' / M T_0}{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}$$

- INFLUENCE OF THE EROSIVE COMBUSTION PARAMETERS IN THE BURNING RATE

This paragraph is a summary of the formulas related to the erosive combustion effects integrated in the R. Nakka's (01\_SRM.xls) excel sheet for the solid rocket performances calculation.

$$r = (1 + k_v \cdot G) \cdot a \cdot P_0^n$$

$$Si \frac{A_{duct}}{A_t} \geq G^* \rightarrow G = 0$$

$$Si \frac{A_{duct}}{A_t} < G^* \rightarrow G = G^* - \frac{A_{duct}}{A_t}$$

$$\frac{A_{duct}}{A_t} = 0.709; \text{ para } A_t = 19 \text{ mm y } A_{duct} = 16 \text{ mm}$$

$G^*$  is the threshold from which if the pass area is under it (corresponding to the areas relation  $\frac{A_{duct}}{A_t}$ ),

there is erosive combustion.  $G^*$  is not only the threshold but as higher it is, higher will be the burning rate,

as well as it will be as higher is  $k_v$ . Typical values for  $k_v$  are 0,00 to 1.

# ANNEX II: DESIGN MECHANICAL STRENGH CALCULATION

| CIERRE POSTERIOR                                                                                                                     |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                                        |                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Resistencia corte de los tornillos CIERRE POSTERIOR                                                                                  |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                                        |                                                   |
| N (número tornillos)                                                                                                                 | paso rosca    | d tornillo mm                                      | As=Área resistente (mm2)   | Diámetro interior cámara, Dc (mm) | Tornillo Resistencia de rotura a tracción Ft <sub>u</sub> (MPa=N/mm2) | A tornillo mm2                  | Fmax tracc N tornillos           | Fmax cort N tornillos | Área cámara mm2    | Presión máx. que soportan los tornillos (atm) | Presión máx. elástica que soportan los tornillos (atm) | Presión máx. diseño (atm) con 1,25 coef seguridad |
| 8                                                                                                                                    | 0,5           | 5                                                  | 14,56                      | 63,5                              | 800                                                                   | 19,6                            | 93179                            | 55907                 | 3167               | 177                                           | 141                                                    | 141                                               |
| 8                                                                                                                                    | 0,5           | 5                                                  | 14,56                      | 63,5                              | 1000                                                                  | 19,6                            | 116473                           | 58237                 | 3167               | 184                                           | 166                                                    | 147                                               |
| Resistencia desgarre CIERRE POSTERIOR (corte longitudinal) agujeros de la carcasa para tornillos. Método LRFD del AISI sección J3.10 |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                                        |                                                   |
| N (número tornillos)                                                                                                                 | d tornillo mm | Distancia libre mínima al borde de la carcasa (mm) | espesor pared carcasa (mm) | Dc diámetro interior cámara mm    | Carcasa Resistencia a rotura Ft <sub>u</sub> MPa (N/mm2)              | resistencia máxima desgarro (N) | Resistencia máx. penetración (N) | resistencia (N)       | Presión máx. (atm) |                                               |                                                        |                                                   |
| 8                                                                                                                                    | 5             | 11                                                 | 1,9                        | 63,5                              | 505,0                                                                 | 101323,2                        | 121357,56                        | 101323,2              | 319,9              |                                               |                                                        |                                                   |

| CARCASA CÁMARA                              |                    |                                                                 |                |                                           |                                 |
|---------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Resistencia circunferencial CARCASA CÁMARA  |                    |                                                                 |                |                                           |                                 |
| Dc diámetro interior cámara mm              | espesor carcasa mm | Carcasa Resistencia a rotura Ft <sub>u</sub> MPa (N/mm2)        | coef seguridad | Presión máx. que soporta la carcasa (atm) | Presión de diseño carcasa (atm) |
| 63,5                                        | 1,5                | 505                                                             | 1,5            | 239                                       | 159                             |
| Dc diámetro interior cámara mm              | espesor carcasa mm | Carcasa Resistencia Limite elástico F <sub>ty</sub> MPa (N/mm2) | coef seguridad | Presión máx. que soporta la carcasa (atm) | Presión de diseño carcasa (atm) |
| 63,5                                        | 1,5                | 215                                                             | 1,5            | 102                                       | 68                              |
| Resistencia axial a tracción CARCASA CÁMARA |                    |                                                                 |                |                                           |                                 |
| Dc diámetro interior cámara mm              | espesor carcasa mm | Carcasa Resistencia a rotura Ft <sub>u</sub> MPa (N/mm2)        | coef seguridad | Presión máx. que soporta la carcasa (atm) | Presión de diseño carcasa (atm) |
| 63,5                                        | 1,34               | 505                                                             | 1,5            | 426                                       | 284                             |
| Dc diámetro interior cámara mm              | espesor carcasa mm | Carcasa Resistencia Limite elástico F <sub>ty</sub> MPa (N/mm2) | coef seguridad | Presión máx. que soporta la carcasa (atm) | Presión de diseño carcasa (atm) |
| 63,5                                        | 1,34               | 215                                                             | 1,5            | 181                                       | 121                             |

| TOBERA                                                                                                                     |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                               |                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Resistencia corte de los tornillos TOBERA                                                                                  |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                               |                                                   |
| N (número tornillos)                                                                                                       | paso rosca    | d tornillo mm                                      | As=Área resistente (mm2)   | Diámetro interior cámara, Dc (mm) | Tornillo Resistencia de rotura a tracción Ft <sub>u</sub> (MPa=N/mm2) | A tornillo mm2                  | Fmax tracc N tornillos           | Fmax cort N tornillos | Área cámara mm2    | Presión máx. que soportan los tornillos (atm) | Presión máx. que soportan los tornillos (atm) | Presión máx. diseño (atm) con 1,25 coef seguridad |
| 6                                                                                                                          | 0,5           | 5                                                  | 14,56                      | 63,5                              | 800                                                                   | 19,6                            | 69884                            | 41930                 | 3167               | 132                                           | 106                                           | 106                                               |
| 6                                                                                                                          | 0,5           | 5                                                  | 14,56                      | 63,5                              | 1000                                                                  | 19,6                            | 87355                            | 52413                 | 3167               | 166                                           | 149                                           | 132                                               |
| Resistencia desgarre TOBERA (corte longitudinal) agujeros de la carcasa para tornillos. Método LRFD del AISI sección J3.10 |               |                                                    |                            |                                   |                                                                       |                                 |                                  |                       |                    |                                               |                                               |                                                   |
| N (número tornillos)                                                                                                       | d tornillo mm | Distancia libre mínima al borde de la carcasa (mm) | espesor pared carcasa (mm) | Dc diámetro interior cámara mm    | Carcasa Resistencia a rotura Ft <sub>u</sub> MPa (N/mm2)              | resistencia máxima desgarro (N) | Resistencia máx. penetración (N) | resistencia (N)       | Presión máx. (atm) |                                               |                                               |                                                   |
| 6                                                                                                                          | 5             | 12                                                 | 1,9                        | 63,5                              | 505                                                                   | 82900,8                         | 91018,17                         | 82900,8               | 261,8              |                                               |                                               |                                                   |



### CHAMBER CASE CIRCUMFERENTIAL STRENGTH AS PER R. NAKKA

Chamber rupture pressure = **243 atm** (aprox) what validate the previous calculation where the result was **239 atm**

#### Design and Burst Pressures for Rocket Motor Casing

[ Input data in blue text, English or (SI) units]

##### Casing Dimensions and Design Factors

Do = **63.5** in. (mm) Diameter, outside  
t = **1.5** in. (mm) wall thickness  
So = **1** Design Safety factor

##### Material Properties

Fty = **215** ksi (MPa) Yield Strength  
Ftu = **505** ksi (MPa) Ultimate Strength  
E = **196000** Msi (MPa) Modulus of Elasticity  
ν = **0.29** Poisson Ratio  
β = 0.426 Fty/Ftu  
B = 2.394 Burst factor

##### Design and Burst Pressures

P<sub>D</sub> = **10157** psi (kPa) Design pressure  
P<sub>U</sub> = **24317** psi (kPa) Burst pressure  
S<sub>U</sub> = **2.39** Burst Safety Factor

##### Elastic Deformation under Pressure \*

ΔD = **0.00006** in. (m.) Change in casing diameter, at P<sub>D</sub>  
Δc = **0.00019** in. (m.) Change in casing circumference, at P<sub>D</sub>

| DILATACIÓN TÉRMICA CÁMARA           |         |         |         |                |         |         |         |  |  |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|--|--|
| Coef Dilat Lineal AISI 304 (m/m °C) |         |         |         | 1,80E-05       |         |         |         |  |  |
| Diámetro                            |         |         |         | Longitud axial |         |         |         |  |  |
| ΔT (°C)                             | Di (mm) | Df (mm) | ΔD (mm) | ΔT (°C)        | Li (mm) | Lf (mm) | ΔD (mm) |  |  |
| 200                                 | 63,5    | 63,73   | 0,23    | 200            | 550     | 551,98  | 1,98    |  |  |
| 400                                 | 63,5    | 63,96   | 0,46    | 400            | 550     | 553,96  | 3,96    |  |  |
| 600                                 | 63,5    | 64,19   | 0,69    | 600            | 550     | 555,94  | 5,94    |  |  |
| 800                                 | 63,5    | 64,41   | 0,91    | 800            | 550     | 557,92  | 7,92    |  |  |
| 1000                                | 63,5    | 64,64   | 1,14    | 1000           | 550     | 559,90  | 9,9     |  |  |
| Coef Dilat Lineal PVC (m/m °C)      |         |         |         | 9,00E-05       |         |         |         |  |  |
| Diámetro                            |         |         |         | Longitud axial |         |         |         |  |  |
| ΔT (°C)                             | Di (mm) | Df (mm) | ΔD (mm) | ΔT (°C)        | Li (mm) | Lf (mm) | ΔD (mm) |  |  |
| 200                                 | 63,5    | 64,64   | 1,14    | 200            | 550     | 559,90  | 9,9     |  |  |
| 400                                 | 63,5    | 65,79   | 2,29    | 400            | 550     | 569,80  | 19,8    |  |  |
| 600                                 | 63,5    | 66,93   | 3,43    | 600            | 550     | 579,70  | 29,7    |  |  |
| 800                                 | 63,5    | 68,07   | 4,57    | 800            | 550     | 589,60  | 39,6    |  |  |
| 1000                                | 63,5    | 69,22   | 5,72    | 1000           | 550     | 599,50  | 49,5    |  |  |

## CHAMBER STAINLESS STEEL MECHANICAL PROPERTIES AISI 304

| Component | Wt. %       | Component | Wt. %     |
|-----------|-------------|-----------|-----------|
| C         | Max 0.08    | Ni        | 8 - 10.5  |
| Cr        | 18 - 20     | P         | Max 0.045 |
| Fe        | 66.345 - 74 | S         | Max 0.03  |
| Mn        | Max 2       | Si        | Max 1     |

### Material Notes:

Austenitic Cr-Ni stainless steel. Better corrosion resistance than Type 302. High ductility, excellent drawing, forming, and spinning properties. Essentially non-magnetic, becomes slightly magnetic when cold worked. Low carbon content means less carbide precipitation in the heat-affected zone during welding and a lower susceptibility to intergranular corrosion.

**Applications:** beer kegs, bellows, chemical equipment, coal hopper linings, cooking equipment, cooling coils, cryogenic vessels, dairy equipment, evaporators, flatware utensils, feedwater tubing, flexible metal hose, food processing equipment, hospital surgical equipment, hypodermic needles, kitchen sinks, marine equipment and fasteners, nuclear vessels, oil well filter screens, refrigeration equipment, paper industry, pots and pans, pressure vessels, sanitary fittings, valves, shipping drums, spinning, still tubes, textile dyeing equipment, tubing.

**Corrosion Resistance:** resists most oxidizing acids and salt spray.

| Physical Properties              | Metric                 | English              | Comments                                   |
|----------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| Density                          | <u>8 g/cc</u>          | 0.289 lb/in³         |                                            |
| <b>Mechanical Properties</b>     |                        |                      |                                            |
| Hardness, Brinell                | 123                    | 123                  | Converted from Rockwell B hardness.        |
| Hardness, Knoop                  | 138                    | 138                  | Converted from Rockwell B hardness.        |
| Hardness, Rockwell B             | 70                     | 70                   |                                            |
| Hardness, Vickers                | 129                    | 129                  | Converted from Rockwell B hardness.        |
| Tensile Strength, Ultimate (Mpa) | <u>505</u>             | 73200 psi            |                                            |
| Tensile Strength, Yield (Mpa)    | <u>215</u>             | 31200 psi            | at 0.2% offset                             |
| Elongation at Break              | <u>70 %</u>            | 70 %                 | in 50 mm                                   |
| Modulus of Elasticity            | 193 - 200 GPa          | 28000 - 29000 ksi    |                                            |
| Poisson's Ratio                  | 0.29                   | 0.29                 |                                            |
| Charpy Impact                    | <u>325 J</u>           | 240 ft-lb            |                                            |
| Shear Modulus                    | <u>86 GPa</u>          | 12500 ksi            |                                            |
| <b>Electrical Properties</b>     |                        |                      |                                            |
| Electrical Resistivity           | <u>7.2e-005 ohm-cm</u> | 7.2e-005 ohm-cm      | at 20°C (68°F); 1.16E-04 at 650°C (1200°F) |
| Magnetic Permeability            | 1.008                  | 1.008                | at RT                                      |
| <b>Thermal Properties</b>        |                        |                      |                                            |
| CTE, linear 20°C                 | <u>17.3 µm/m-°C</u>    | 9.61 µin/in-°F       | from 0-100°C                               |
| CTE, linear 250°C                | <u>17.8 µm/m-°C</u>    | 9.89 µin/in-°F       | at 0-315°C (32-600°F)                      |
| CTE, linear 500°C                | <u>18.7 µm/m-°C</u>    | 10.4 µin/in-°F       | at 0-650°C                                 |
| Specific Heat Capacity           | <u>0.5 J/g-°C</u>      | 0.12 BTU/lb-°F       | from 0-100°C (32-212°F)                    |
| Thermal Conductivity             | <u>16.2 W/m-K</u>      | 112 BTU-in/hr-ft²-°F | at 0-100°C, 21.5 W/m°C at 500°C            |
| Melting Point                    | 1400 - 1455 °C         | 2550 - 2650 °F       |                                            |
| Solidus                          | <u>1400 °C</u>         | 2550 °F              |                                            |
| Liquidus                         | <u>1455 °C</u>         | 2650 °F              |                                            |

### Referencias

Most of the data in MatWeb has been supplied directly by the manufacturers. Other data has been taken from similar materials and known relationships by the MatWeb staff. For more information about this specific material, see the following source(s):

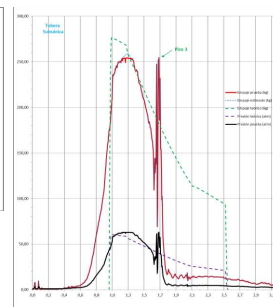
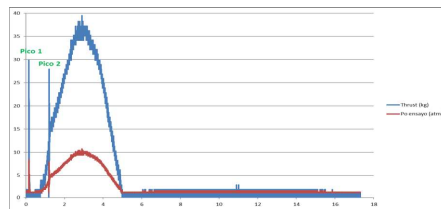
### ANNEX III: TESTS SUMMARY TABLE

| Motor | Configuration | Date       | BATES | Grain type | Grain mean diameter (mm) | Grain mean length (mm) | Grain mean weight (g) | Grain total length (mm) | Grain total weight (g) | Max propellant possible weight (g) | Motor load (%) | Burning time (s) | Max pressure (atm) | Max Thrust (kg)  | It (N-s)          | Isp (s) | Thrust Peaks types P/E | P (atm)/E (kg) Peaks                 | Comments              |
|-------|---------------|------------|-------|------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| D60-1 | 3S            | 27/05/2020 | 3     | Short      | 56,9                     | 71,7                   | 280,7                 | 215,2                   | 842,2                  | 1873,5                             | 45%            | 3,97             | 8,4                | 21,6             | 557               | 67      | 1,2                    | 2: 14,64/38,7                        |                       |
| D60-1 | 4S            | 25/12/2015 | 4     | Short      | 57,4                     | 73,1                   | 291,2                 | 292,4                   | 1164,6                 | 1873,5                             | 62%            | 3,1              | 19,8               | 76,6             | 1419              | 124     | 1,2,3                  | 1: 42 kg<br>2: 88,3 kg<br>3: 69,7 kg |                       |
| D60-1 | 4S            | 07/12/2015 | 4     | Short      | 58,5                     | 69,7                   | 287,6                 | 278,9                   | 1150,4                 | 1873,5                             | 61%            | 2,0              | 6,2 (saturated)    | 20,9 (saturated) | 387,5 (saturated) |         | 1                      | 1: 20,9 kg                           | Saturated cell        |
| D60-1 | 5S            | 07/02/2016 | 5     | Short      | 57,3                     | 72,5                   | 288,6                 | 362,4                   | 1443,0                 | 1873,5                             | 77%            | 1,5              | 40,1 (Estimated)   | 160 (Estimated)  | 1508 (Estimated)  | 107     | 1,3                    | 1: 16 kg<br>3: 91 kg                 | Saturated cell        |
| D60-1 | 7S            | 26/12/2018 | 7     | Short      | 57,4                     | 67,1                   | 267,6                 | 469,9                   | 1873,5                 | 1873,5                             | 100%           | 0,98             | 63,0               | 254,4            | 1882              | 102     | 1,3                    | 1: 3,4/9,5<br>3: 63/254,4            | Saturated cell        |
| D60-1 | 2L            | 20/09/2020 | 2     | Long       | 58,6                     | 143,5                  | 582,6                 | 287,0                   | 1165,1                 | 1873,5                             | 62%            | 3,95             | 10,7               | 39,5             | 1046              | 92      | 1,2                    | 1: 8,4/28,9<br>2: 7,9/27,9           |                       |
| D60-1 | 2L            | 13/12/2020 | 2     | Long       | 58,5                     | 147,4                  | 593,3                 | 294,8                   | 1186,5                 | 1873,5                             | 63%            | 0,32             | 68                 | 270              |                   |         | 1                      | 1: 14/52,93                          | CATO: 126 atm, 302 kg |

Peak 1 Ignitor cables exhaust

Peak 2 Peak in the increasing part of the curve before the maximum

Peak 3 Peak in the decreasing part of the curve after the maximum



# ANNEX IV: ROCKET MOTOR D60-1 "AS BUILT"

550



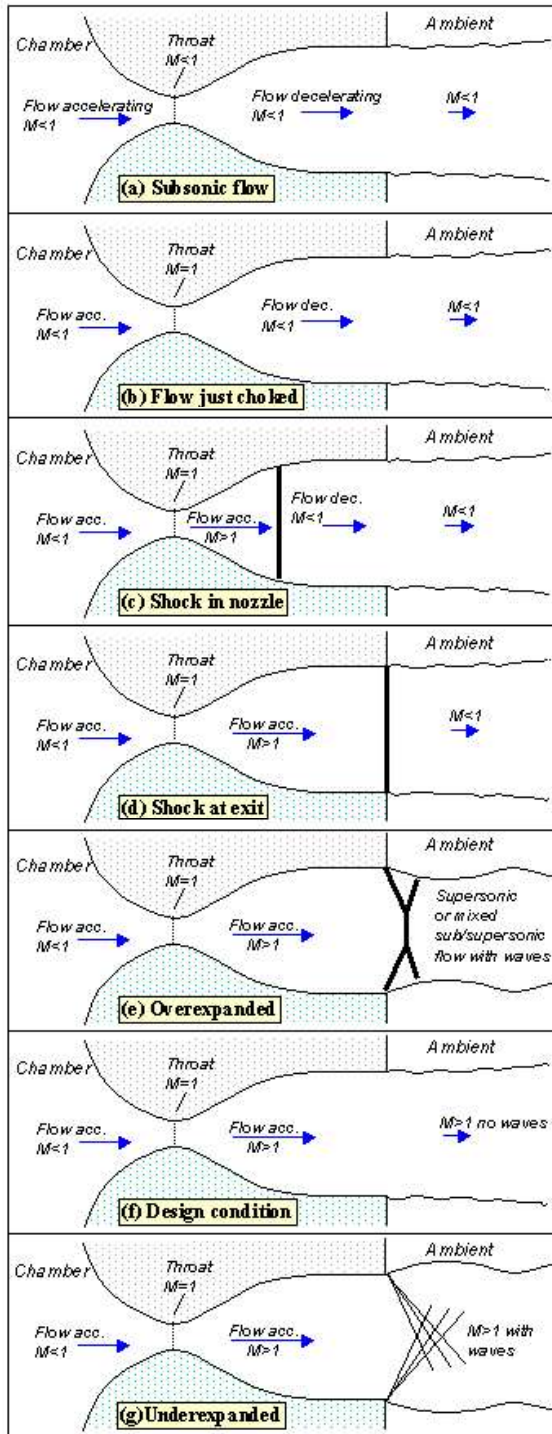


Figure 3. Flow patterns

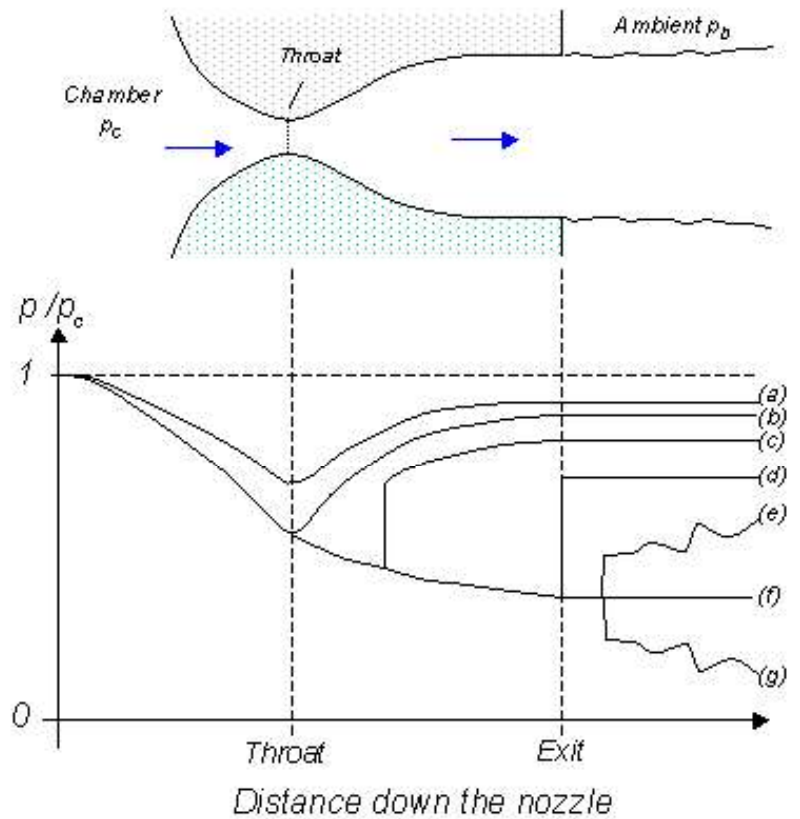


Figure 4 Pressure distribution along the nozzle. Labels refer to flow regimes in figure 3.

ANEXO VI: LOG DE LA PRUEBA

| Test                  | Propellant  | Outer grain diam. (mm) | Nozzle Diameter (mm) | Grain Length (mm) | Core hole Diam. (mm) | Density (g/dm3) | Rate (real/ideal) | Propellant batch      | motor wall thickness (mm) | Case internal Diam. (mm) | Propellant weight (g) | motor weight without propellant (g) | motor length (mm)                         | Grain inhibition | Motor case material | Ignition   | Grain location in the Chamber       | Ignitor location                                                            | Ignitor                                                                           |
|-----------------------|-------------|------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|---------------------|------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Motor test_1_AC-D60-1 | KDX (65-35) | 58,51                  | 19                   | 147,75+147        | 16                   | 1618,5          | 86,1%             | 07/12/20<br>;08/12/20 | 1,5                       | 60,5                     | 1186,5                | 1834,2                              | Total length: 550<br>Combust chamber: 483 | 3 board layers   | Stainless Steel     | Electrical | Close to the motor forward bulkhead | Close to the bottom of the chamber. At 4 cm from the motor forward bulkhead | Electrical with Ni-Cr resistance and with Ammonium Perchlorate Powder (AP) and Al |

Ideal Density  
(Kg/m3)

KNDX anhidrida 1.879

|         | Grain diameter (mm) | Length (mm) | Core Hole Diameter (mm) | Grain weight (gr) | volume (mm3) | Density (g/dm3) | Rate (real/ideal) |
|---------|---------------------|-------------|-------------------------|-------------------|--------------|-----------------|-------------------|
| Grain 1 | 58,30               | 147,75      | 16                      | 595,30            | 364.709      | 1632,3          | 86,9%             |
| Grain 2 | 58,71               | 147         | 16                      | 591,20            | 368.397      | 1604,8          | 85,4%             |

**D.0.2 Informe Respuesta Richard Nakka CATO 13/12/2020**



## D60-1 Motor Test Failure Analysis

R. Nakka

29 January 2021

Ref. test report M60-AC\_13-12-20 & photos/videos

### Discussion

I have reviewed the test report as well as photos and videos supplied by Álvaro Saez Zapata. I have concluded that the motor failure (overpressurization followed by catastrophic structural failure) was not likely caused by a single deficiency, rather, was a result of a combination of faults with the design details and manufacturing details of the motor and propellant.

The basic design of the motor was satisfactory. Nominally, the pressure vs time curve is shown in Fig.1 (Ref.1):

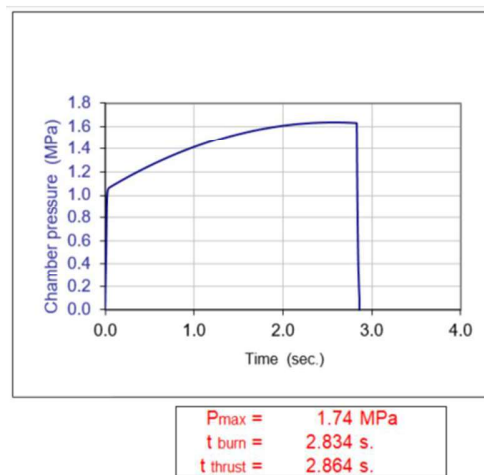


Figure 1

### Causal Factors

Factors that may have contributed to the test failure are as follows (not in any particular order of significance):

1. Grain core diameter less than nozzle throat diameter
2. Apparent lack of spacer between grain segments
3. Large empty void in chamber between grain and nozzle
4. Lack of thermal protection for chamber
5. Grain inhibitor deficiency
6. Grain tight fit in chamber
7. Possible cracked grain(s)
8. Poor propellant density

### Elaboration of Causal Factors

1. Core diameter should never be less than throat diameter. If the core diameter is less than, or equal to, throat diameter, flow through the core is sonic velocity. This is known to generate severe erosive burning which can result in an initial pressure spike with possible overpressurization of the motor. For sugar propellants, 'rule of thumb' based on experience, core diameter should be at least 1.5x throat diameter.

It is unlikely that this was a primary factor in the failure but may have had a secondary effect.

2. It appears that there was no spacing between grain segments and that the ends butted against one another. This could have resulted in delayed ignition of these propellant faces. The result of such can lead to anomalous burn profile and greater maximum chamber pressure than expected by design. For example, if all end faces were "inhibited", the pressure curve in Fig.2 would result for the D60-1 motor test (Ref.2):

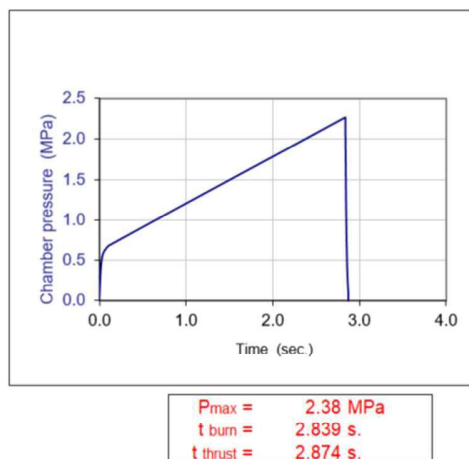


Figure 2

It is unlikely that this was a primary factor in the failure but may have had a secondary effect.

3. The two grain segments were placed at the forward end of the motor (aft of the bulkhead). This resulted in a large empty void in the combustion chamber between the burning grains and the nozzle. The flow of hot, high velocity combustion can result in severe heating of the casing walls with attendant loss of strength. This could result in motor casing failure at a lower pressure than design.

It is unlikely that this was a primary factor in the failure but likely had a secondary effect.

4. No thermal liner was used to protect the casing walls from heating due to hot combustion gases in the chamber. Use of a thermal liner helps ensure casing walls remain cool and retain structural strength.

It is unlikely that this was a primary factor in the failure but likely had a secondary effect.

5. The grain inhibitor consisted of 3 plies of untreated paper for a total thickness of  $3 \times 0.22 = 0.66\text{mm}$ . This inhibitor thickness is at the lower limit of effectiveness based on experience. In other words, if the motor had performed nominally, the inhibitor would likely have been effective, but would not have sufficient tolerance for off-nominal performance.

This was likely a significant factor in the test failure.

6. Based on the narrative in the test report, the grains had a snug fit in the chamber. Grains should have sufficient spacing between casing walls and grains to allow for rapid flow of gases into this space upon initial motor startup. This is to ensure pressure equalization around the grain segments. This is to avoid structural loading of the grain and possible cracking.

It is unlikely that this was a primary factor in the failure but may have had a secondary effect.

7. Based on the narrative in the test report, the grains (one in particular) were difficult to remove from the mould. To remove the grain, it was "hit with a wooden dowel". This may very well have cracked the grain, especially considering the grain was of poor density with attendant weak structural integrity. During combustion, and particularly if the grains were structurally loaded, the crack(s) could result in fracture of the grain into pieces, resulting in highly anomalous burning area with resultant overpressurization.

This was likely a significant factor in the test failure.

8. Propellant density ratio (actual to theoretical) was calculated as follows (Ref.3 & 4):

Grain 1      0.869

Grain 2      0.854

These density values are very low and suggest poor grain quality. There was likely either an abundance of bubbles present or one or more large voids. This has the consequence of greatly increased burning area relative to design value in combination with structural weakness. The fact that previous tests with low-density grains were successful can be attributed to nothing more than good luck (e.g. perhaps the low density was a result of multiple bubbles and not large voids).

This was likely a significant factor in the test failure.

#### Recommendations for Design and Process Improvements

1. Increase grain core diameter to 1.5x throat diameter. This will eliminate potential for initial pressure spike due to erosive burning
2. Grain segments should be separated by a suitably sized rubber o-ring. O-ring should have a thickness of 3 or 4mm. This provides sufficient space between grain segments to allow for gases to flow upon startup and quickly ignite the grain faces. O-rings perform another important function, preventing gas flow around the outside of the grain during the burn. This reduces thermal damage to the inhibitor. O-ring should be solely between grain segments, not at ends (to allow a path for initial gas flow) as shown in Figure 3. A cardboard spacer ring keeps the grain

segments in place.

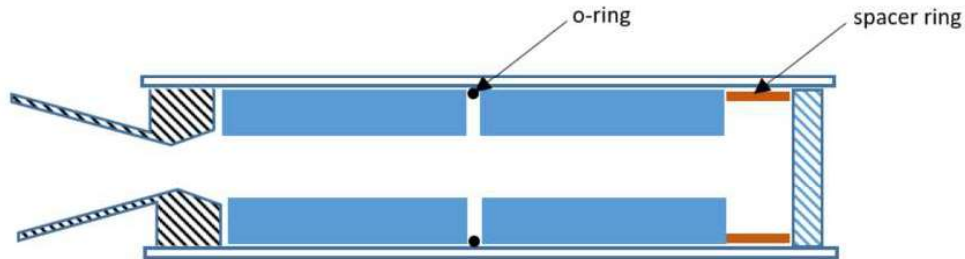


Figure 3

3. A motor should not have large empty space. Open volumes facilitate severe convective flow and attendant heat transfer to the casing walls. If a motor is loaded with less than capacity, grains should be placed at aft (nozzle) end. Empty volume should be suitably filled (e.g. with a wooden dowel).
4. Thermal protection for a motor chamber consists of a thin layer of insulation, usually consisting of a tube that slides into place. Cardboard (similar to inhibitor) is suitable, usually of similar total thickness as grain inhibitor. Thermal protection as such is mandatory for aluminum alloy casings, but is optional for steel (or stainless steel) casings if proper design practices are implemented. To better understand the loss of strength on metals at elevated temperature, see <https://www.nakka-rocketry.net/therm.html>
5. Grain inhibitor should be increased in thickness by adding at least one additional ply or using thicker material. For greatly enhanced thermal resistance, paper should impregnated with oil-based polyurethane varnish. This serves as an ablative material which provides thermal protection by absorption of thermal energy during ablation.
6. Grain diameter should be reduced slightly to allow grains to slide into chamber without undue force. The difference in outside diameter of the grains and inside diameter of the casing should be approximately 0.25mm. Ideally, the grains should not be loose fitting, but should slide in with slight effort.
7. The propellant moulding process needs to be improved to ensure removal of grains from mould without undue force. The use of paraffin coating on sliding components helps reduce friction, for example.
8. Propellant density ratio should be 0.92 minimum. For my own motors, I target 0.95 and typically get 0.96-0.97. Casting propellant is as much an art as a science. Bear in mind that experience usually leads to ever-increasing improvement in method and final product. Based on my many years of casting, I have described the casting process for KNSB on my website: <https://www.nakka-rocketry.net/sorb.html#Casting>

Of particular importance is preventing trapped air when loading the mould. This can be accomplished by incorporating the following:

- Pour/scoop the propellant carefully to avoid air pockets from developing
- After loading the mould with propellant, lift up the mould and repeatedly hit the bottom of the mould against a hard surface (e.g. floor). This causes air bubbles to rise to the surface and fills out any voids that may have formed
- Cure the propellant under pressure. Pressure should be between  $0.25\text{--}0.30\text{ N/mm}^2$ . A suitable spring serves as pressure regulator. An example of curing under pressure is shown in Fig.4



Figure 4

- Alternatively, use a surfactant to reduce the propellant viscosity to allow for casting with greatly reduced likelihood of air entrapment.

#### References:

1. SRM\_D60-1\_nominal.xls
2. SRM\_D60-1\_off-nominal.xls
3. D60-1 graindensity (1).xlsx
4. D60-1 graindensity (2).xlsx

## Annex I: Thrust/Pressure peaks observed in motor tests

There have been found to types of Thrust/pressure peaks:

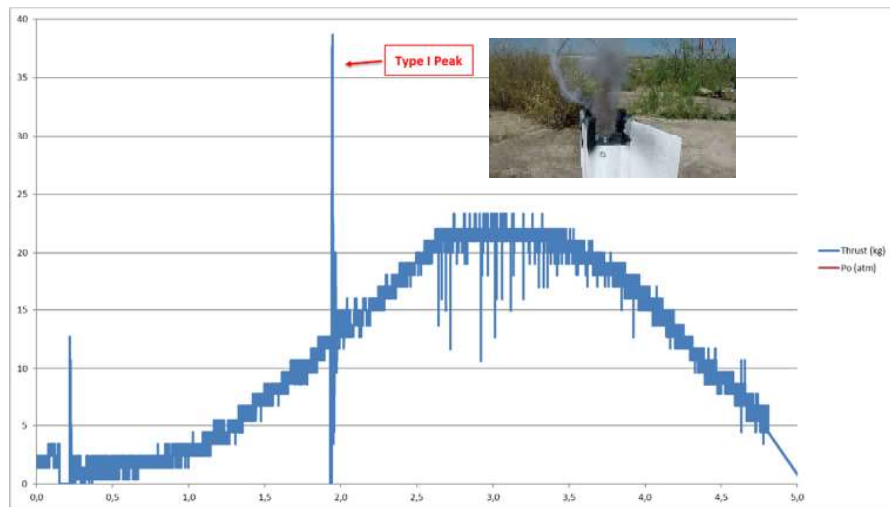
Type I: In the thrust increasing part of the curve, before the maximum. Observing the videos, It is considered to be due to nozzle blocking because ignitor paper exhaust.

Type II: In the thrust decreasing part of the curve, after the maximum. It is guessed it is due to inhibitor exhausting.

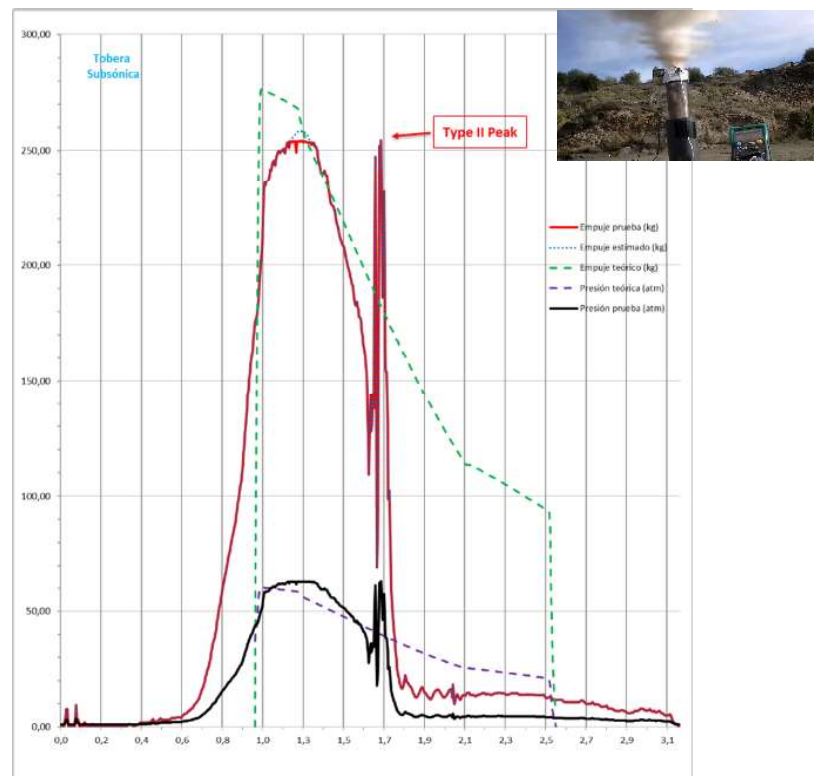
It is shown in the following table and pictures D60-1 failure report\_questions\_annex I several tests and peaks examples:

| Test               | Propellant  | Outer grain diam. (mm) | Nozzle Diameter (mm) | Grain Length (mm)                         | Core hole Diameter (mm) | Grain mean Density (g/dm <sup>3</sup> ) | Rate (real/ideal) | Propellant batch                                                          | motor wall thickness (mm) | Case internal Diameter (mm) | Propellant weight (g) | motor weight without propellant (g) | motor length (mm)                         | Grain inhibition                                                                                    | Motor case material | Ignition   |
|--------------------|-------------|------------------------|----------------------|-------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------|
| AC-D60_3S_27-05-20 | KDX (65-35) | 56,92                  | 19                   | 70,71+68,5+75,99                          | 16                      | 1671,1                                  | 88,9%             | 22/05/20;22/05/20;23/05/20                                                | 1,5                       | 60,5                        | 842,2                 | 2106,3                              | Total length: 550<br>Combust chamber: 483 | 3 board layers                                                                                      | Stainless Steel     | Electrical |
| AC-D60_7S_26-12-18 | KDX (65-35) | 57,37                  | 19                   | 66,21+67,30+69,54+64,72+72,71+66,09+63,31 | 16                      | 1672,1                                  | 89,0%             | 23/12/18;22/12/18;22/12/18;20/12/18;15/12/18;20/12/18;15/12/18            | 1,5                       | 60,5                        | 1873,5                | 2106,3                              | Total length: 550<br>Combust chamber: 483 |                                                                                                     | Stainless Steel     | Electrical |
| AC-D60_5S_07-02-16 | KDX (65-35) | 57,27                  | 19                   | 69,6+70,6+73+73,5+75,7                    | 16                      | 1675,6                                  | 89,2%             | 4/02/16_L1;<br>30/01/16_L1;<br>31/01/16_L1;<br>4/02/16_L1;<br>31/01/16_L1 | 1,5                       | 60,5                        | 1443,0                | 2106,3                              | Total length: 550<br>Combust chamber: 483 | 3 board layers plus liner (platic ply 0,3 mm) covering internal chamber and not glued to the grains | Stainless Steel     | Electrical |
| AC-D60_4S_25-12-15 | KDX (65-35) | 57,4                   | 19                   | 70,90+78,35+75,90+67,20                   | 16                      | 1671,4                                  | 89,0%             | 22/12/15_L1;<br>22/12/15_L1;<br>21/12/15_L1;<br>21/12/15_L1               | 1,5                       | 60,5                        | 1164,6                | 2106,3                              | Total length: 550<br>Combust chamber: 483 | 3 board layers plus liner (platic ply 0,3 mm) covering internal chamber and not glued to the grains | Stainless Steel     | Electrical |

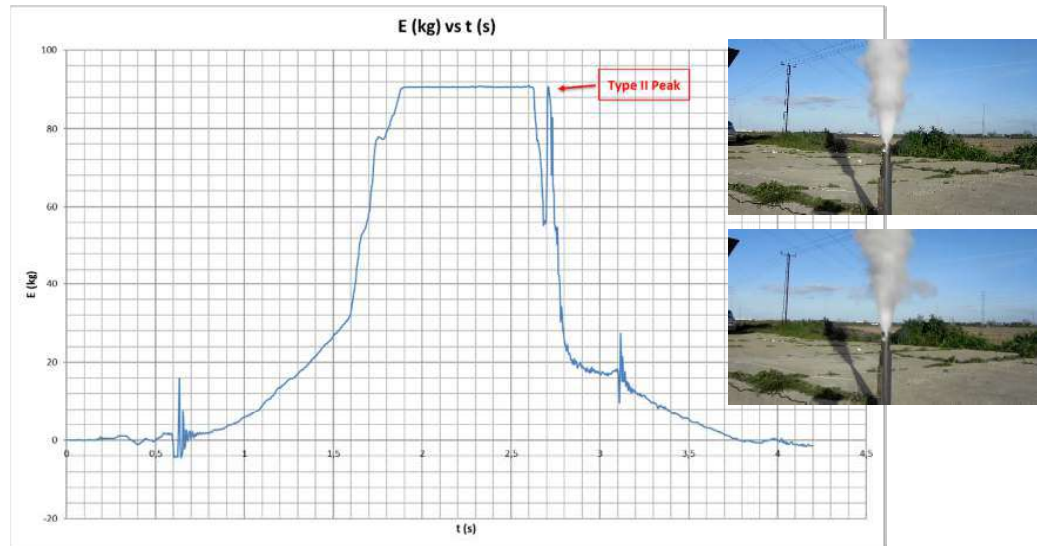
### Test\_3S\_27-05-20



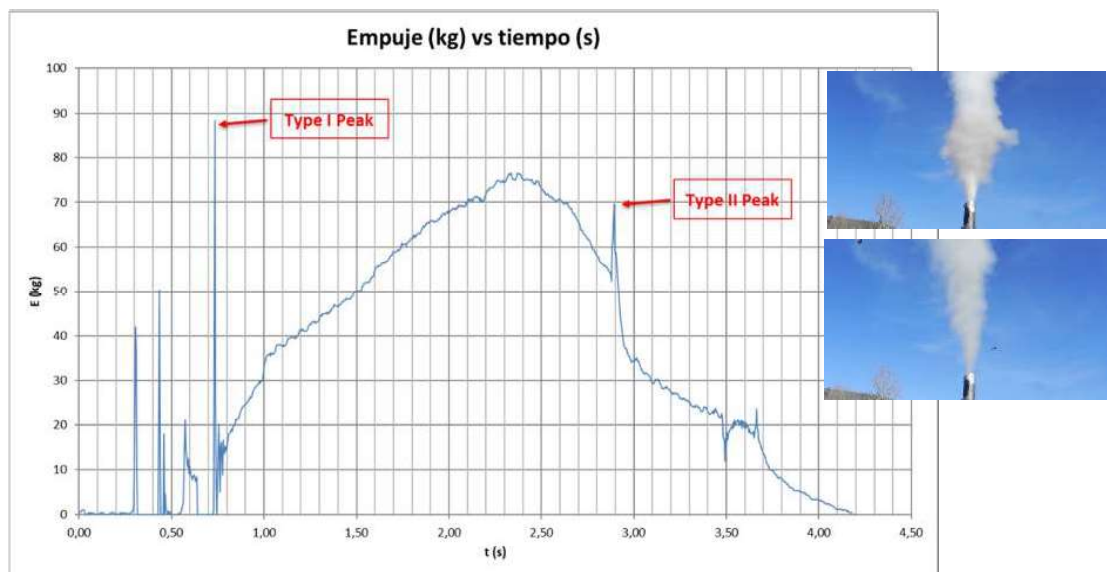
### Test\_7S\_26-12-18



Test\_5S\_07-02-16



Test\_4S\_25-12-15



In the second picture it can be seen the red colour cardboard inhibitor pieces flying around after type II peak



# Apéndice E

## Documentación de apoyo para el lanzamiento de NAOS

---

### E.0.1 Check List Preparación y Puesta a Punto

| Item | Check | Acción                                                                                                                        |
|------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |       | <b>Tiempo estimado: 2h 30 min</b>                                                                                             |
| 1    |       | <b>Cargar baterías</b>                                                                                                        |
| 2    |       | Batería EMBARCADA en el cohete LIPO 7,4V 8Ah                                                                                  |
| 3    |       | Batería sistema de IGNICIÓN Cohete 12V 18Ah                                                                                   |
| 4    |       | Baerías PORTÁTILES parra localizar por GPS                                                                                    |
| 5    |       | Batería cámara Xiaomi YI                                                                                                      |
| 6    |       | Batería cámara GOPRO                                                                                                          |
| 7    |       | Batería Dron                                                                                                                  |
| 8    |       | Móviles                                                                                                                       |
| 9    |       | Tablet                                                                                                                        |
| 10   |       | Ajustar y comprobar el tiempo del timer                                                                                       |
| 11   |       | Comprobar con polímetro que ignitor paraca funciona                                                                           |
| 12   |       | <b>Borrador de tarjetas de memoria</b>                                                                                        |
| 13   |       | Borrar la tarjeta micro SD del módulo electrónico del cohete                                                                  |
| 14   |       | Insertar la tarjeta micro SD en el módulo electrónico del cohete                                                              |
| 15   |       | Borrar la tarjeta micro SD de la cámara Xiaomi YI                                                                             |
| 16   |       | Insertar la tarjeta micro SD en la cámara Xiaomi YI                                                                           |
| 17   |       | <b>Ensamblaje motor</b>                                                                                                       |
| 18   |       | Cortar cilindro de madera a medida, si procede                                                                                |
| 19   |       | Recubrir granos con capa de pólvora negra                                                                                     |
| 20   |       | Cargar motor con granos, cilindro de madera                                                                                   |
| 21   |       | Engrasar juntas                                                                                                               |
| 22   |       | Cerrar motor                                                                                                                  |
| 23   |       | Fabricar ignitores x3                                                                                                         |
| 24   |       | <b>Ensamblaje cohete</b>                                                                                                      |
| 25   |       | <b>Sección electrónica</b>                                                                                                    |
| 26   |       | Reapretar los tornillos de la electrónica                                                                                     |
| 27   |       | Asegurar que el interruptor de la <b>BATERÍA de alimentación principal (LIPO 7,4V 8Ah)</b> está en <b>OFF</b>                 |
| 28   |       | Asegurar que los interruptores del timer están en posición.<br><b>BATTERY POWER: ON</b><br><b>IGNITOR ARMED: ON</b>           |
| 29   |       | Introducir cápsula electrónica. Atención a alineamiento                                                                       |
| 30   |       | Fijar cápsula a carcasa sección con tornillos                                                                                 |
| 31   |       | Fijar cámara YI                                                                                                               |
| 32   |       | Fijar conector trigger a carcasa sección                                                                                      |
| 33   |       | Fijar lug a carcasa sección                                                                                                   |
| 34   |       | Conectar conector trigger a timer                                                                                             |
| 35   |       | Conectar cables de ignitor a timer con clemas                                                                                 |
| 36   |       | Poner algodón ignífugo aislante entre ignitor y timer                                                                         |
| 37   |       | Poner algodón ignífugo aislante en el hueco debajo de la batería LIPO 7,4V 8Ah                                                |
| 38   |       | <b>Sección paracaídas</b>                                                                                                     |
| 39   |       | Preparar hilo unido al cáncamo con ignitor                                                                                    |
| 40   |       | Montar hilo+ignitor al soporte                                                                                                |
| 41   |       | Tensar el muelle y anclar                                                                                                     |
| 42   |       | Recubrir soporte del hilo de nylon con cinta de aluminio adhesiva                                                             |
| 43   |       | Doblar paraca                                                                                                                 |
| 44   |       | Unir a línea de vida                                                                                                          |
| 45   |       | Unir ojiva a línea de vida                                                                                                    |
| 46   |       | <b>Sección motor</b>                                                                                                          |
| 47   |       | Pasar línea de vida por orificio                                                                                              |
| 48   |       | Introducir motor en la carcasa                                                                                                |
| 49   |       | Fijar motor, anillo aletas y carcasa con tornillos                                                                            |
| 50   |       | <b>Ensamblaje de secciones</b>                                                                                                |
| 51   |       | Unir línea de vida sección paraca+electrónica                                                                                 |
| 52   |       | Fijar secciones con tornillos                                                                                                 |
| 53   |       | Poner algodón ignífugo aislante entre sección electrónica y sección motor. Dejar hueco para que pase línea de vida            |
| 54   |       | Unir línea de vida sección electrónica+motor                                                                                  |
| 55   |       | Poner tornillos secciones                                                                                                     |
| 56   |       | Introducir aletas y fijar con tornillos. Esto se puede hacer el día del lanzamiento para evitar roturas durante el transporte |

## E.0.2 Check List Lanzamiento NAOS

| Item | Check | Acción                                                                                                                                                                          |
|------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |       | <b>Tiempo estimado: 1 h 10 min</b>                                                                                                                                              |
| 1    |       | <b>Reportaje audiovisual</b>                                                                                                                                                    |
| 2    |       | Comienzo de la grabación del reportaje                                                                                                                                          |
| 3    |       | <b>Rampa</b>                                                                                                                                                                    |
| 4    |       | Posicionar rampa                                                                                                                                                                |
| 5    |       | Montar guía de la rampa con tornillos. Revisar que está colocada la pieza de ajuste de plástico en el tubo de la rampa                                                          |
| 6    |       | Introducir tornillo de fijación guía en la parte baja de la rampa                                                                                                               |
| 7    |       | Introducir el cohete en la guía de la rampa                                                                                                                                     |
| 8    |       | <i>Foto de familia GOPRO/Drone</i>                                                                                                                                              |
| 9    |       | Anclar rampa al suelo con piquetas                                                                                                                                              |
| 10   |       | Alinear barra posterior de la rampa con cohete                                                                                                                                  |
| 11   |       | Fijar y anclar barra posterior de la guía de la rampa                                                                                                                           |
| 12   |       | Conectar <b>clavija del trigger</b> del timer                                                                                                                                   |
| 13   |       | Fijar cuerda del trigger a la rampa                                                                                                                                             |
| 14   |       | <b>Sistemas de vídeo y grabación</b>                                                                                                                                            |
| 15   |       | Posicionar la cámara fija orientada público                                                                                                                                     |
| 16   |       | Posicionar la cámara fija orientada botón lanzamiento                                                                                                                           |
| 17   |       | Posicionar la GOPRO                                                                                                                                                             |
| 18   |       | Posicionar la tablet                                                                                                                                                            |
| 19   |       | Posicionar cámaras adicionales                                                                                                                                                  |
| 20   |       | Preparar y posicionar el dron                                                                                                                                                   |
| 21   |       | <b>Sistema de ignición</b>                                                                                                                                                      |
| 22   |       | Desplegar cable sistema de ignición                                                                                                                                             |
| 23   |       | Conectar conector del sistema de ignición a la <b>caja con interruptor de ignición</b>                                                                                          |
| 24   |       | <b>Confirmar que el interruptor de armado de la caja de ignición está en OFF</b>                                                                                                |
| 25   |       | Conectar conector del sistema de ignición a la <b>caja del sistema de ignición de alimentación de la batería de ignición (LANZAMIENTO)</b> . NO CONECTAR LA BATERÍA DE IGNICIÓN |
| 26   |       | Encender cámara Xiaomi YI introduciendo un alambre a través del orificio del interruptor de encendido                                                                           |
| 27   |       | Activar bluetooth cámara Xiaomi YI introduciendo un alambre a través del orificio del interruptor del bluetooth                                                                 |
| 28   |       | Comprobar que la cámara Xiaomi YI de a bordo transmite imagen a través de la aplicación (SIN GRABAR)                                                                            |
| 29   |       | Pegar, si procede, pegatina para tapar orificios de la carcasa de encendido de la cámara                                                                                        |
| 30   |       | <b>Asegurar que la clavija del trigger del timer está conectada</b>                                                                                                             |
| 31   |       | Abrir en portátiles aplicación GPS                                                                                                                                              |
| 32   |       | <b>Asegurar que no hay nadie cerca del cohete para que no se desconecte accidentalmente el trigger</b>                                                                          |
| 33   |       | Interruptor de la <b>BATERÍA</b> de alimentación principal ( <b>LIPO 7,4V 8 Ah</b> ) está en <b>ON</b>                                                                          |
| 34   |       | Comprobar que se reciben datos de GPS en las estaciones de localización GPS                                                                                                     |
| 35   |       | Conectar cables de la caja del sistema de ignición al <b>ignitor</b>                                                                                                            |
| 36   |       | <b>Confirmar que la batería de ignición (12V 18Ah) (LANZAMIENTO) está apagada. Interruptor OFF</b>                                                                              |
| 37   |       | Conectar cables de la caja del sistema de ignición a la <b>batería de ignición (LANZAMIENTO) (12V 18Ah)</b>                                                                     |
| 38   |       | Encender, elevar y poner a grabar dron                                                                                                                                          |
| 39   |       | Poner a grabar GOPRO                                                                                                                                                            |
| 40   |       | Poner a grabar tablet                                                                                                                                                           |
| 41   |       | Poner a grabar la cámara fija orientada público                                                                                                                                 |
| 42   |       | Poner a grabar la cámara fija orientada botón lanzamiento                                                                                                                       |
| 43   |       | Poner a grabar resto de cámaras                                                                                                                                                 |
| 44   |       | <b>Poner a grabar cámara Xiaomi YI (resolución= 1080 , fps= 120 )</b>                                                                                                           |
| 45   |       | <b>Confirmar que todas las personas están en sitio seguro</b>                                                                                                                   |
| 46   |       | <b>Asegurar que el responsable de ignición tiene en la mano el interruptor de ignición</b>                                                                                      |
| 47   |       | Visto bueno del responsable de ignición                                                                                                                                         |
| 48   |       | <b>Avisar de que se va a encender las baterías</b>                                                                                                                              |
| 49   |       | <b>Activar el interruptor de la batería de Ignición (12V 18Ah) (LANZAMIENTO). Interruptor ON</b>                                                                                |
| 50   |       | Visto bueno del responsable de grabación                                                                                                                                        |
| 51   |       | Visto bueno de los responsables de las estaciones de localización GPS                                                                                                           |
| 52   |       | Visto bueno del responsable del personal                                                                                                                                        |
| 53   |       | <b>Cuenta atrás</b>                                                                                                                                                             |
| 54   |       | <b>DESPUÉS DE RECUPERAR EL COHETE</b>                                                                                                                                           |
| 55   |       | Apagar batería embarcada <b>LIPO 7,4V 8Ah</b>                                                                                                                                   |
| 56   |       | Apagar YI CAM                                                                                                                                                                   |

### E.0.3 Tríptico informativo del lanzamiento de NAOS

# Respetemos las medidas de seguridad para evitar daños

Pedimos amablemente que en todo momento se respeten las medidas de prevención dentro de la zona de lanzamiento, tanto las sanitarias (debido a la situación del COVID 19) como las medidas de seguridad que se indicarían, para evitar cualquier incidente. Recordemos que NAOs se trata de un cohete experimental con más de un kilo de pólvora en su interior, con capacidad de causar daños importantes si no se siguen los procedimientos de seguridad establecidos.

GRACIAS POR ASISTIR

# Lanzamiento de NAOS

Coheteros se trata de una humilde marca cuyo objetivo es difundir la pasión por esta fantástica afición que es la cohetaría experimental casera. El lanzamiento de NAOs se trata del proyecto más ambicioso llevado a cabo por Coheteros

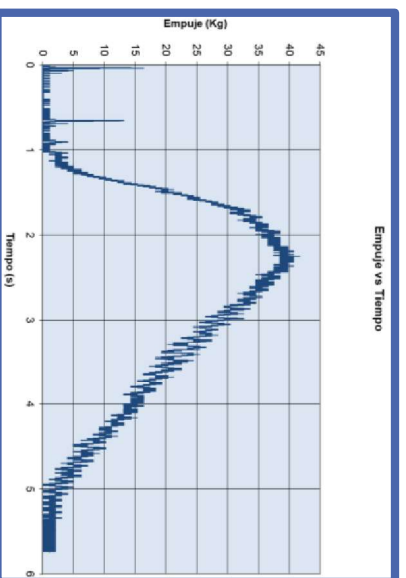




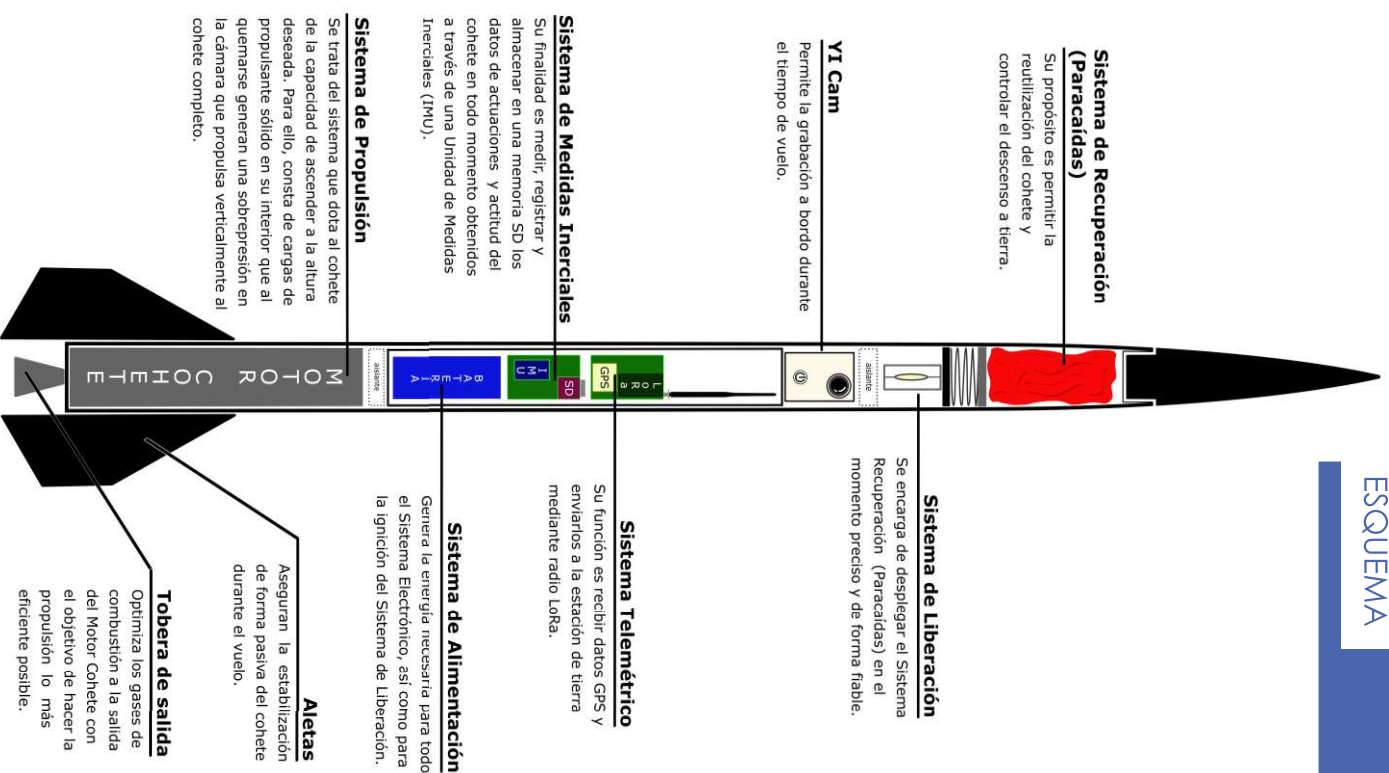
## MISIÓN

El objetivo de esta misión es testear en lanzamiento todos los sistemas y subsistemas de los que se compone NAOs. Se evaluarán los siguientes:

- Eficiencia del motor cohete en vuelo.
- Capacidad del Sistema Electrónico y Telemétrico de registrar y almacenar datos, así como de enviar posicionamiento GPS a estación de tierra, para su posterior rastreo.
- Fiabilidad y funcionamiento del Sistema de Liberación y Recuperación (Paracaídas).



## ESQUEMA



## CARACTERÍSTICAS DE NAOs

### Clase del motor: J222

TOW (Take Off Weight): 7,363 kg

Impulso Total: 843 N · s

Empuje Medio: 22,6 kg

Empuje Máximo: 41,7 kg

Apogeo: < 672 m

Tiempo hasta Apogeo: 14,1 s

Tiempo Total de Vuelo: 2 min 40 s

Velocidad Máxima: 356,4 km/h

Aceleración Máxima: 6 g/s

MaxQ (Máxima Carga Aerodinámica): 1,63 kg

Nivel de Carga de Propulsante: 60%

Tiempo de Combustión: 3,7 s

Presión Máxima en Cámara: 11,5 atm

## SPONSORS

Diego Díaz de la Serna

Manuel Sáez

Carlos Toledano







# Índice de Figuras

---

|      |                                                                                                   |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Ensayos en banco con motor de PVC                                                                 | 1  |
| 1.2  | Cohetes con motor de PVC                                                                          | 2  |
| 1.3  | Lanzamientos de cohetes con motor de PVC                                                          | 2  |
| 1.4  | Cohete Betelgeuse                                                                                 | 2  |
| 1.5  | Ensayos en banco de motor cohete de acero inoxidable D40 (Betelgeuse)                             | 3  |
| 1.6  | Lanzamientos exitosos de Betelgeuse                                                               | 3  |
| 1.7  | Logo de Coheteros                                                                                 | 4  |
| 1.8  | Ensayos en banco de motor cohete de acero inoxidable D60 (NAOS)                                   | 4  |
| 1.9  | Lanzamiento real de NAOS                                                                          | 4  |
| 1.10 | Simulación lanzamiento de NAOS                                                                    | 5  |
| 1.11 | Fotograma de cámara de videgrabación a bordo de NAOS                                              | 5  |
| 3.1  | Gráfica de $I_{sp}$ vs Porcentaje de $KNO_3$ [1]                                                  | 10 |
| 3.2  | Gráfica de $I_{sp}$ vs Presión en Cámara de Combustión [1]                                        | 11 |
| 3.3  | Gráfica de descomposición del Sorbitol y temperatura en función del tiempo [1]                    | 12 |
| 3.4  | Gráfica de Velocidad de Quemado frente a la presión en cámara [1]                                 | 13 |
| 3.5  | Gráfica de Presión en cámara frente al tiempo (teórica-azul, real-rosa) [1]                       | 13 |
| 3.6  | Gráfica de descomposición de la Dextrosa Monohidratada y su temperatura en función del tiempo [1] | 14 |
| 3.7  | Gráfica de Velocidad de Quemado frente a la presión en cámara [1]                                 | 15 |
| 3.8  | Gráfica de Presión en cámara frente al tiempo (teórica-azul, real-rosa) [1]                       | 15 |
| 3.9  | Gráficas Presión vs Tiempo para distintas cargas de ignición [1]                                  | 17 |
| 3.10 | Secciones transversales de quemado del alma [3]                                                   | 19 |
| 3.11 | Representación temporal de secciones de quemado para geometría de estrella del núcleo [1]         | 19 |
| 3.12 | Caracterización de la curva Presión vs Tiempo genérica [1]                                        | 20 |
| 3.13 | Esquema del motor cohete y su inhibición [4]                                                      | 23 |
| 3.14 | Gráfica del tiempo hasta combustión usando distintos materiales para la inhibición [1]            | 24 |
| 3.15 | Esquema de la tobera Convergente-Divergente                                                       | 25 |
| 3.16 | Esquema de tobera Subsónica                                                                       | 27 |
| 3.17 | Esquema de tobera Bloqueada                                                                       | 28 |
| 3.18 | Esquema de tobera con O.C.N. Intermedia                                                           | 28 |
| 3.19 | Esquema de Tobera muy Sobre-Expansionada (comportamiento teórico)                                 | 29 |
| 3.20 | Tobera de NAOS Sobre-Expansionada (comportamiento real, ensayo en banco de Coheteros)             | 29 |
| 3.21 | Esquema de tobera con O.C.N. a la Salida                                                          | 29 |
| 3.22 | Esquema de tobera Sobre-Expansionada (comportamiento teórico)                                     | 30 |
| 3.23 | Esquema de tobera con O.C.O. de ángulo $\beta$                                                    | 30 |

|      |                                                                                                              |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.24 | Esquema de tobera Adaptada (O.C.O de ángulo $\beta_{min}$ )                                                  | 31 |
| 3.25 | Esquema de tobera Adaptada (comportamiento teórico)                                                          | 31 |
| 3.26 | Tobera de NAOS Adaptada (comportamiento real, ensayo en banco de Coheteros)                                  | 31 |
| 3.27 | Esquema de tobera con Ondas de Expansión                                                                     | 32 |
| 3.28 | Esquema de tobera Sub-Expansionada (comportamiento teórico)                                                  | 32 |
| 3.29 | Tobera de NAOS Sobre-Expansionada (comportamiento real)                                                      | 32 |
| 3.30 | Perfil aerodinámico inmerso en un campo fluido                                                               | 33 |
| 3.31 | Campana de paracaídas inmerso en un campo fluido                                                             | 33 |
| 3.32 | Esquema Paracaídas desplegado                                                                                | 34 |
| 3.33 | Gráfica Fuerza vs Tiempo de despliegue del paracaídas (comportamiento para el modelo de "masa infinita") [6] | 35 |
| 3.34 | Paracaídas descendiendo con ángulo de ataque respecto a la corriente incidente [6]                           | 36 |
| 3.35 | <b>Situación estable:</b> El CG está situado por encima del CP                                               | 38 |
| 3.36 | <b>Situación inestable:</b> El CG está situado por debajo del CP                                             | 38 |
| 3.37 | Geometría típica de aletas de cohetes                                                                        | 39 |
| 4.1  | Esquema Completo de Sistemas de NAOS                                                                         | 42 |
| 4.2  | Representación gráfica de un impulso en un tiempo infinitesimal $\tau$                                       | 44 |
| 4.3  | Esquema de dimensiones del motor cohete y los granos de propulsante sólido                                   | 46 |
| 4.4  | Captura de pantalla del programa "SRM-CASTELLANO.xls", pestaña "Datos y Kn"                                  | 47 |
| 4.5  | Captura de pantalla del programa "SRM-CASTELLANO.xls", pestaña "Presiones"                                   | 48 |
| 4.6  | Captura de pantalla del programa "SRM-CASTELLANO.xls", pestaña "Performance"                                 | 48 |
| 4.7  | Calidad de los tornillos [8]                                                                                 | 49 |
| 4.8  | Estudio de Resistencia del Cierre Posterior (Ver 4.3)                                                        | 50 |
| 4.9  | Estudio de Resistencia de la Carcasa                                                                         | 51 |
| 4.10 | Estudio de Resistencia de la Tobera (Ver 4.3)                                                                | 51 |
| 4.11 | Estudio de termoelasticidad para temperaturas de combustión previstas para AISI 304 y PVC                    | 51 |
| 4.12 | Motor cohete de NAOS vista de ensamblaje                                                                     | 53 |
| 4.13 | Motor cohete de NAOS vista de ensamblaje completo                                                            | 54 |
| 4.14 | Esquemático del Módulo Timer                                                                                 | 56 |
| 4.15 | Simulación de funcionamiento del Timer en el programa "Livewire"                                             | 57 |
| 4.16 | Imagen de la geometría del conector del Trigger en la carcasa de NAOS                                        | 58 |
| 4.17 | Vista en 3D de ilustración del Timer                                                                         | 59 |
| 4.18 | Vista en 3D del Timer                                                                                        | 59 |
| 4.19 | Archivo Esquemático del módulo Timer                                                                         | 60 |
| 4.20 | Batería Lipo 7,4 V, 8000 mAh                                                                                 | 61 |
| 4.21 | Arduino UNO Rev 3                                                                                            | 61 |
| 4.22 | PinOut de Unidad de Medidas Inerciales GY-91                                                                 | 62 |
| 4.23 | Unidad de Medidas Inerciales GY-91                                                                           | 62 |
| 4.24 | PinOut del Lector de Tarjetas Micro SD                                                                       | 62 |
| 4.25 | Lector de Tarjetas Micro SD                                                                                  | 63 |
| 4.26 | PinOut del módulo GPS NEO-M8N y antena cerámica                                                              | 63 |
| 4.27 | PinOut del Módulo LoRa E32-433T30D                                                                           | 64 |
| 4.28 | Módulo LoRa E32-433T30D                                                                                      | 64 |
| 4.29 | Antena omnidireccional de emisión de 3 dBi                                                                   | 65 |
| 4.30 | Módulo E15-USB-T2                                                                                            | 65 |
| 4.31 | Antena direccional de recepción de 15 dBi                                                                    | 66 |
| 4.32 | Cámara de a bordo YI Cam (Xiaomi)                                                                            | 67 |
| 4.33 | Archivo Esquemático del Subsistema de Registro de Medidas Inerciales                                         | 67 |
| 4.34 | Vista en 3D de la ilustración del Subsistema de Registro de Medidas Inerciales                               | 68 |

|      |                                                                                                    |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.35 | Vista en 3D del Subsistema de Registro de Medidas Inerciales                                       | 68 |
| 4.36 | Archivo Esquemático del Subsistema de Registro de Medidas Inerciales                               | 69 |
| 4.37 | Vista en 3D de la ilustración del Subsistema de Rastreo y Telemetría                               | 69 |
| 4.38 | Vista en 3D del Subsistema de Rastreo y Telemetría                                                 | 70 |
| 4.39 | Cápsula de Batería y Subsistema de Medidas Inerciales. Vista 1                                     | 70 |
| 4.40 | Cápsula de Batería y Subsistema de Medidas Inerciales. Vista 2                                     | 71 |
| 4.41 | Cápsula de Subsistema de Rastreo y Telemetría                                                      | 71 |
| 4.42 | Cápsula de Antena y Timer                                                                          | 72 |
| 4.43 | Conjunto de cápsulas ensamblado. Vistas 1 y 2                                                      | 72 |
| 4.44 | Conjunto de cápsulas ensamblado. Vistas 3 y 4                                                      | 73 |
| 4.45 | Encapsulado de la cámara de a bordo YI Cam. Vistas 1 y 2                                           | 74 |
| 4.46 | Encapsulado de la cámara de a bordo YI Cam. Vistas 3 y 4                                           | 74 |
| 4.47 | Esquema del Diseño Conceptual del Sistema de Liberación y Recuperación                             | 75 |
| 4.48 | Tabla con relaciones entre diámetro del paracaídas y velocidad de descenso                         | 76 |
| 4.49 | Ojiva de NAOS por partes. Vistas 1 y 2                                                             | 78 |
| 4.50 | Ojiva de NAOS. Vistas 1 y 2                                                                        | 78 |
| 4.51 | Guía del cohete para rampa de lanzamiento. Vistas 1 y 2                                            | 79 |
| 4.52 | Guía del cohete para rampa de lanzamiento. Vistas 3 y 4                                            | 79 |
| 4.53 | Ventana NoseCone Aerolab                                                                           | 80 |
| 4.54 | Ventana Body Aerolab                                                                               | 80 |
| 4.55 | Ventana Fins Aerolab                                                                               | 81 |
| 4.56 | Ventana Launch Lugs Aerolab                                                                        | 81 |
| 4.57 | Ventana Conditions Aerolab                                                                         | 82 |
| 4.58 | Modelo generado en Aerolab                                                                         | 82 |
| 4.59 | Esquema de cotas y Centro de Presiones de Aerolab                                                  | 83 |
| 4.60 | Anillo de aletas inferior. Vistas 1 y 2                                                            | 83 |
| 4.61 | Anillo de aletas inferior. Vistas 3 y 4                                                            | 83 |
| 4.62 | Anillo de aletas superior. Vistas 1 y 2                                                            | 84 |
| 4.63 | Anillo de aletas superior. Vistas 3 y 4                                                            | 84 |
| 4.64 | Aletas de NAOS con cola de milano en el encastre. Vistas 1, 2 y 3.                                 | 84 |
| 4.65 | Ensamblaje del anillo de aletas con las aletas a través de las colas de milano                     | 85 |
| 4.66 | Anillo de aletas y aletas ensamblados. Vistas 1 y 2                                                | 85 |
| 4.67 | Anillo de aletas y aletas ensamblados. Vistas 3 y 4                                                | 85 |
| 4.68 | Esquema de Esfuerzos sobre la estructura de NAOS generados por la apertura del paracaídas          | 86 |
| 4.69 | Tabla de parámetros de esfuerzos sobre NAOS a la apertura del paracaídas                           | 87 |
| 4.70 | Esfuerzos sobre cada punto del cohete en función del momento en el que se despliegue el paracaídas | 88 |
| 4.71 | Equipo de Adquisición de Datos DATAQ DI-149                                                        | 89 |
| 4.72 | Célula de Carga YZC-516 de 200kg de carga máxima                                                   | 90 |
| 4.73 | Conexiones de la Célula de Carga                                                                   | 90 |
| 4.74 | Conector tipo DIN Macho de 4 Pines (Célula de Carga/ Amplificador)                                 | 91 |
| 4.75 | Pinado del conector tipo DIN de 4 Pines                                                            | 91 |
| 4.76 | Diseño del Circuito del Amplificador                                                               | 92 |
| 4.77 | Simulación del Circuito del Amplificador                                                           | 93 |
| 4.78 | Ventana de Engineering Units Settings para la calibración de la Célula de Carga                    | 94 |
| 4.79 | Sección de la barra guía del cohete NAOS                                                           | 94 |
| 4.80 | Esquema del sistema de ignición                                                                    | 95 |
| 4.81 | Esquema del sistema de ignición de cajas separadas                                                 | 95 |
| 4.82 | Diseño NAOS en vuelo. Imagen 1                                                                     | 96 |
| 4.83 | Diseño NAOS en vuelo. Imagen 2                                                                     | 97 |

|      |                                                                                        |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1  | Motor cohete de NAOS. Carcasa, cierre posterior y tobera sobre expansionada            | 99  |
| 5.2  | Motor cohete de NAOS por partes                                                        | 100 |
| 5.3  | Motor cohete de NAOS ensamblado y con manta térmica                                    | 101 |
| 5.4  | Tobera sobre expansionada con rebaje de peso (izquierda), tobera adaptada (derecha)    | 101 |
| 5.5  | Base del molde de propulsante. Vista al derecho (izquierda), vista del revés (derecha) | 102 |
| 5.6  | Vástago del molde de propulsante                                                       | 103 |
| 5.7  | Carcasa exterior del molde de propulsante                                              | 103 |
| 5.8  | Tapa móvil del molde de propulsante                                                    | 104 |
| 5.9  | Tapa móvil del molde de propulsante                                                    | 104 |
| 5.10 | Soporte de presión del molde de propulsante. Vistas 1 y 2                              | 104 |
| 5.11 | Láminas de plástico enrolladas para facilitar extracción del grano de propulsante      | 105 |
| 5.12 | Cartulinas dobles de inhibición para el grano de propulsante                           | 105 |
| 5.13 | Carcasa y base del molde ensamblados                                                   | 106 |
| 5.14 | Láminas de plástico acopladas a la carcasa del molde                                   | 106 |
| 5.15 | Cartulina de inhibición del grano integrada en el molde                                | 107 |
| 5.16 | Molinillo de café                                                                      | 108 |
| 5.17 | Nitrato Potásico en el interior del molinillo de café                                  | 108 |
| 5.18 | Recipiente para mezclado de componentes del propulsante                                | 109 |
| 5.19 | Proceso de cocinado, propulsante en polvo                                              | 109 |
| 5.20 | Proceso de cocinado, propulsante granulado (60°C)                                      | 109 |
| 5.21 | Proceso de cocinado, propulsante granulado compacto (70°C)                             | 110 |
| 5.22 | Proceso de cocinado, propulsante fundido (80-90°C)                                     | 110 |
| 5.23 | Proceso de cocinado, propulsante fundido al punto (110-115°C)                          | 110 |
| 5.24 | Vertido de propulsante en estado líquido en el molde                                   | 111 |
| 5.25 | Anclaje entre vástago y base del molde                                                 | 111 |
| 5.26 | Molde completo lleno y cerrado                                                         | 111 |
| 5.27 | Sargento apretando el conjunto del molde                                               | 112 |
| 5.28 | Grano de propulsante                                                                   | 112 |
| 5.29 | Conservación del grano de propulsante                                                  | 113 |
| 5.30 | Cables de ignición pelados pelados                                                     | 113 |
| 5.31 | Cable de ignición verde envuelto en Nicrom                                             | 114 |
| 5.32 | Espira de hilo de Nicrom a modo de resistencia eléctrica                               | 114 |
| 5.33 | Cables de ignición fijos al hilo de Nicrom                                             | 114 |
| 5.34 | Cables de ignición fijos al hilo de Nicrom                                             | 115 |
| 5.35 | Punto con pistola de pegamento en cables de ignición                                   | 115 |
| 5.36 | Papel fusible y Pólvora Negra                                                          | 116 |
| 5.37 | Ignitor sobre montón de Pólvora Negra y papel fusible                                  | 116 |
| 5.38 | Doblado del papel fusible                                                              | 117 |
| 5.39 | Ignitor del motor cohete completo                                                      | 117 |
| 5.40 | Hilo de nailon con cocas en los extremos                                               | 118 |
| 5.41 | Hilo de nailon con cocas en los extremos                                               | 118 |
| 5.42 | Papel fusible liado con hilo de nilon                                                  | 118 |
| 5.43 | Ignitor del Sistema de Liberación completado                                           | 119 |
| 5.44 | Software RF_Setting3.7 Ebyte                                                           | 127 |
| 5.45 | Ventana de configuración de AccessPort.exe                                             | 127 |
| 5.46 | Pantalla principal del AccessPort.exe recibiendo datos de telemetría                   | 128 |
| 5.47 | Archivo del Shield de Rastreo y Telemetría, fabricación capa superior                  | 128 |
| 5.48 | Archivo del Shield de Rastreo y Telemetría, fabricación capa inferior                  | 129 |
| 5.49 | PCB del Shield del Subsistema de Rastreo y Telemetría                                  | 129 |
| 5.50 | Subsistema de Rastreo y Telemetría completo                                            | 129 |

|       |                                                                                           |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.51  | Archivo del Shield de Registro de Medidas Inerciales, fabricación capa inferior           | 130 |
| 5.52  | Archivo del Shield de Registro de Medidas Inerciales, fabricación capa inferior           | 130 |
| 5.53  | PCB del Shield del Subsistema de Rastreo y Telemetría                                     | 130 |
| 5.54  | Subsistema de Rastreo y Telemetría completo                                               | 130 |
| 5.55  | Cápsula de electrónica desde arriba. Timer integrado                                      | 131 |
| 5.56  | Cápsula de electrónica completa                                                           | 132 |
| 5.57  | Alojamiento de la Yi CAM                                                                  | 133 |
| 5.58  | Sistema de Liberación y Recuperación fabricado y ensamblado                               | 134 |
| 5.59  | Sistema de Liberación y Recuperación (vista desde el extremo posterior)                   | 134 |
| 5.60  | Sistema de Liberación y Recuperación armado ON                                            | 135 |
| 5.61  | Sistema de Liberación y Recuperación armado ON, recubierto con cinta adhesiva de aluminio | 135 |
| 5.62  | Ubicación del dispositivo Timer en la cápsula de electrónica                              | 136 |
| 5.63  | Archivo del Shield del Timer, fabricación capa superior                                   | 136 |
| 5.64  | Archivo del Shield del Timer, fabricación capa inferior                                   | 136 |
| 5.65  | PCB del dispositivo Timer                                                                 | 136 |
| 5.66  | Dispositivo Timer acabado                                                                 | 137 |
| 5.67  | Pestaña "COORDINATES" archivo Excel para patrón del paracaídas [1]                        | 138 |
| 5.68  | Patrón del Paracaídas de NAOS sobre la tela                                               | 138 |
| 5.69  | Recortes de secciones del paracaídas                                                      | 138 |
| 5.70  | Alfileres de fijación entre pieza recortada en tela y patrón                              | 139 |
| 5.71  | Calcado de la silueta interior del patrón sobre la pieza recortada de tela                | 139 |
| 5.72  | Parámetros de la máquina de coser para puntada recta                                      | 139 |
| 5.73  | Pliegue de bordes con puntada recta                                                       | 140 |
| 5.74  | Parámetros de la máquina de coser para puntada en zigzag                                  | 140 |
| 5.75  | Unión de diferentes secciones mediante puntada en zigzag                                  | 140 |
| 5.76  | Unión entre secciones del paracaídas                                                      | 141 |
| 5.77  | Cinta de raso unida al paracaídas mediante puntada en zigzag                              | 141 |
| 5.78  | Paracaídas comparado con paraguas abierto                                                 | 142 |
| 5.79  | Paracaídas desplegado por completo                                                        | 142 |
| 5.80  | Impresión 3D de ojiva de NAOS                                                             | 144 |
| 5.81  | Impresión 3D por partes de ojiva de NAOS                                                  | 144 |
| 5.82  | Impresión 3D por partes de ojiva de NAOS                                                  | 145 |
| 5.83  | Impresión 3D de una aleta de NAOS                                                         | 146 |
| 5.84  | Impresión 3D del anillo superior de aletas                                                | 147 |
| 5.85  | Impresión 3D del anillo inferior de aletas                                                | 147 |
| 5.86  | Impresión 3D del conjunto de aletas y anillo                                              | 147 |
| 5.87  | Impresión 3D del anillo inferior de aletas                                                | 148 |
| 5.88  | Aletas de NAOS con capa de pintura                                                        | 148 |
| 5.89  | Mosquetón de unión con línea de vida                                                      | 149 |
| 5.90  | Sección del motor cohete de NAOS                                                          | 150 |
| 5.91  | Sección del electrónica de NAOS                                                           | 150 |
| 5.92  | Sección del paracaídas de NAOS                                                            | 150 |
| 5.93  | Cohete NAOS sin pintura                                                                   | 151 |
| 5.94  | Cohete NAOS (Vista 1)                                                                     | 151 |
| 5.95  | Cohete NAOS (Vistas 2 y 3)                                                                | 151 |
| 5.96  | Banco de ensayos vista en planta                                                          | 152 |
| 5.97  | Banco de ensayos                                                                          | 152 |
| 5.98  | Banco de con motor cohete de NAOS                                                         | 152 |
| 5.99  | Rampa de lanzamiento parte inferior sin pintar                                            | 153 |
| 5.100 | Banco de con motor cohete de NAOS                                                         | 154 |

|       |                                                                                                        |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.101 | Vista del anclaje de la barra oblicua rigidizadora de la rampa de lanzamiento                          | 154 |
| 5.102 | Rampa de lanzamiento pintada y con pegatinas promocionales                                             | 155 |
| 5.103 | Rampa de lanzamiento parte inferior sin pintar                                                         | 155 |
| 6.1   | Cronología de los ensayos en banco de NAOS                                                             | 158 |
| 6.2   | Fichero Excel "Po_v5.xlsm" (extensión de Macro)                                                        | 159 |
| 6.3   | Hoja "prueba propulsante" del excel del ensayo en banco                                                | 159 |
| 6.4   | Hoja "prueba propulsante" tabla de eficiencia del grano de propulsante                                 | 160 |
| 6.5   | Carga de 7 granos de propulsante para el ensayo en banco de Diciembre del 2018                         | 163 |
| 6.6   | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre de 2018                                           | 164 |
| 6.7   | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Diciembre 2018                           | 164 |
| 6.8   | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Diciembre 2018 (Zoom)                    | 165 |
| 6.9   | Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Diciembre 2018                                       | 165 |
| 6.10  | Comparativa del ensayo de Diciembre de 2018 con pruebas anteriores                                     | 165 |
| 6.11  | Fotograma del ensayo de Diciembre de 2018 (tobera sub expansionada, ondas de expansión)                | 167 |
| 6.12  | Ondas de choque producidas por el taponamiento de la tobera                                            | 167 |
| 6.13  | Decoloración de la superficie de acero inoxidable del motor cohete tras la prueba de Diciembre de 2018 | 168 |
| 6.14  | Tobera y cierre posterior tras la prueba en banco de Diciembre de 2018                                 | 168 |
| 6.15  | Restos de inhibición tras la prueba en banco de Diciembre de 2018                                      | 169 |
| 6.16  | Carga de 2 granos largos de propulsante para el ensayo en banco de Septiembre del 2020                 | 171 |
| 6.17  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Septiembre 2020                                             | 172 |
| 6.18  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Septiembre 2020 con picos ampliados                         | 172 |
| 6.19  | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Septiembre 2020                          | 173 |
| 6.20  | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Septiembre 2020 (Zoom)                   | 173 |
| 6.21  | Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Septiembre 2020                                      | 173 |
| 6.22  | Fotogramas del ensayo de Septiembre de 2020                                                            | 174 |
| 6.23  | Fotograma de eyección de ignitor del ensayo de Septiembre de 2020                                      | 175 |
| 6.24  | Restos de inhibición tras la prueba en banco de Septiembre de 2020                                     | 175 |
| 6.25  | Residuos en el cierre posterior tras la prueba en banco de Septiembre de 2020                          | 176 |
| 6.26  | Estado de la tobera tras la prueba en banco de Septiembre de 2020                                      | 176 |
| 6.27  | Membrana de papel en la tobera del motor cohete                                                        | 178 |
| 6.28  | Carga de 2 granos largos de propulsante para el ensayo en banco de Diciembre del 2020                  | 179 |
| 6.29  | Posición de los granos de propulsante en el ensayo en banco de Diciembre del 2020                      | 179 |
| 6.30  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre de 2020                                           | 180 |
| 6.31  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre 2020 (ampliado 1)                                 | 180 |
| 6.32  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Diciembre 2020 (ampliado 2)                                 | 181 |
| 6.33  | Fotograma del ensayo de Diciembre de 2020 en el instante de la explosión                               | 181 |
| 6.34  | Fotograma de eyección de ignitor del ensayo de Diciembre de 2020, previo a la explosión                | 182 |
| 6.35  | Restos de la inhibición tras el ensayo de Diciembre de 2020                                            | 182 |
| 6.36  | Aspecto de la tobera tras el ensayo de Diciembre de 2020                                               | 183 |
| 6.37  | Aspecto del borde de unión tobera y carcasa tras el ensayo de Diciembre de 2020                        | 183 |
| 6.38  | Aspecto del cierre posterior tras el ensayo de Diciembre de 2020                                       | 184 |
| 6.39  | Aspecto de la carcasa tras el ensayo de Diciembre de 2020                                              | 184 |
| 6.40  | Aspecto del banco de ensayos tras el ensayo de Diciembre de 2020                                       | 184 |
| 6.41  | Gráfica de las deformaciones plásticas localizadas en la carcasa del motor                             | 185 |
| 6.42  | Gráfica de las deformaciones plásticas en longitud localizadas en la carcasa del motor                 | 185 |
| 6.43  | Carga de 5 granos cortos de propulsante para el ensayo en banco de Abril de 2021                       | 188 |
| 6.44  | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Abril 2021                                                  | 189 |
| 6.45  | Curva Empuje-Tiempo real y teórica del ensayo en banco de Abril 2021                                   | 189 |

|      |                                                                                                                    |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.46 | Curva Empuje-Tiempo del ensayo en banco de Abril de 2021 con picos ampliados                                       | 189 |
| 6.47 | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Abril de 2021                                        | 190 |
| 6.48 | Trayectoria con apertura de paracaídas del ensayo en banco de Abril de 2021 (Zoom)                                 | 190 |
| 6.49 | Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Abril de 2021                                                    | 191 |
| 6.50 | Trayectoria en caída libre del ensayo en banco de Abril de 2021 (zoom)                                             | 191 |
| 6.51 | Comparativa del ensayo de Abril de 2021 con pruebas anteriores                                                     | 192 |
| 6.52 | Gráfica de histórico de ensayos en banco. Comparación de Masa de Propulsante y Apogeo alcanzado                    | 193 |
| 6.53 | Fotograma del ensayo de Abril de 2021 en el instante de eyección del ignitor                                       | 193 |
| 6.54 | Fotograma del ensayo de Abril de 2021 en el instante de Tobera Adaptada                                            | 193 |
| 6.55 | Fotografía aérea del ensayo en banco de Abril de 2021                                                              | 194 |
| 6.56 | Restos de la inhibición tras el ensayo de Abril de 2021                                                            | 194 |
| 6.57 | Restos de la inhibición tras el ensayo de Abril de 2021 (ampliados)                                                | 194 |
| 6.58 | Aspecto de la tobera tras el ensayo de Abril de 2021                                                               | 195 |
| 6.59 | Aspecto del cierre posterior tras el ensayo de Abril de 2021                                                       | 196 |
| 6.60 | Estado de las juntas tóricas de separación de granos de propulsante tras el ensayo de Abril de 2021                | 196 |
| 6.61 | Aspecto de la carcasa tras el ensayo de Abril de 2021                                                              | 196 |
| 6.62 | Estado del tocón de madera tras el ensayo de Abril de 2021                                                         | 196 |
| 6.63 | Prototipo de pruebas del dispositivo de rastreo y telemetría                                                       | 198 |
| 6.64 | Equipo de terrestre de recepción de datos                                                                          | 199 |
| 6.65 | Timer                                                                                                              | 200 |
| 6.66 | Pruebas de plegado del paracaídas                                                                                  | 201 |
| 6.67 | Pruebas de plegado del paracaídas                                                                                  | 201 |
| 6.68 | Pruebas de plegado del paracaídas                                                                                  | 202 |
| 6.69 | Pruebas de plegado del paracaídas                                                                                  | 202 |
| 6.70 | Carga de 5 granos cortos de propulsante (sin pintar con pólvora negra) para el Lanzamiento de NAOS de Mayo de 2021 | 204 |
| 6.71 | Anclaje de cohete NAOS a rampa de lanzamiento                                                                      | 204 |
| 6.72 | Charla informativa impartida por Álvaro Sáez Zapata                                                                | 205 |
| 6.73 | NAOS en rampa de lanzamiento. Imagen 1                                                                             | 205 |
| 6.74 | NAOS en rampa de lanzamiento. Imagen 2                                                                             | 206 |
| 6.75 | Foto familia junto a NAOS                                                                                          | 206 |
| 6.76 | Foto NAOS con sus creadores                                                                                        | 206 |
| 6.77 | Despegue de NAOS                                                                                                   | 207 |
| 6.78 | Vuelo de subida de NAOS                                                                                            | 208 |
| 6.79 | Apertura de paracaídas                                                                                             | 208 |
| 6.80 | Curvatura trayectoria vuelo NAOS                                                                                   | 209 |
| 6.81 | Rotura a cizalladura de la cuerda del paracaídas                                                                   | 209 |
| 6.82 | Ángulo de impacto contra el suelo                                                                                  | 210 |
| 6.83 | Modo de rotura del acoplamiento entre secciones                                                                    | 210 |
| 6.84 | Estado de NAOS tras el impacto con el suelo                                                                        | 211 |
| 6.85 | Efectividad de la inhibición del motor                                                                             | 211 |
| 6.86 | Ejes de referencia del IMU dentro de NAOS                                                                          | 212 |
| 6.87 | IMU: Aceleración vs Tiempo                                                                                         | 213 |
| 6.88 | IMU: Aceleración vs Tiempo (zoom)                                                                                  | 213 |
| 6.89 | Ensayo en banco: Aceleración vs Tiempo                                                                             | 214 |
| 6.90 | IMU: velocidad angular vs Tiempo                                                                                   | 215 |
| 6.91 | GPS: Velocidad vs Tiempo                                                                                           | 215 |
| 6.92 | Teórico: Velocidad vs Tiempo                                                                                       | 216 |

|      |                                                                     |     |
|------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.93 | IMU: Altura vs Tiempo                                               | 216 |
| 6.94 | GPS: Altura vs Tiempo                                               | 216 |
| 6.95 | Teórico: Altura vs Tiempo                                           | 217 |
| 6.96 | Datos característicos medidos por los diferentes dispositivos       | 217 |
| 6.97 | Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 1                              | 218 |
| 6.98 | Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 2                              | 218 |
| 6.99 | Trayectoria del vuelo de NAOS. Vista 3                              | 218 |
|      |                                                                     |     |
| C.1  | Tabla normalizada de tubos de PVC Pluvial                           | 235 |
| C.2  | Tabla normalizada de tubos de PVC                                   | 236 |
| C.3  | Tabla normalizada de tubos de Acero Inoxidable                      | 237 |
| C.4  | Propiedades Acero Inoxidable 304                                    | 237 |
| C.5  | Clase del motor cohete en función de su impulso total [1]           | 238 |
| C.6  | Planos de las secciones del motor cohete                            | 239 |
| C.7  | Plano Tobera Adaptada de NAOS                                       | 285 |
| C.8  | Patrón para recorte de piezas sueltas del paracaídas semielipsoidal | 286 |



# Índice de Tablas

---

|     |                                                                             |     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1 | Reactivos y productos de la reacción de oxidación                           | 9   |
| 3.3 | Muestras para experimento de materiales de inhibición                       | 24  |
| 3.5 | Características generales según el modo de descenso                         | 37  |
| 4.1 | Características muelle Vanel C.700.360.3200.A                               | 77  |
| 6.1 | Prestaciones simulación lanzamiento Diciembre 2018                          | 163 |
| 6.2 | Prestaciones simulación lanzamiento Septiembre 2020                         | 171 |
| 6.3 | Características del motor cohete en el ensayo en banco de Diciembre de 2020 | 180 |
| 6.4 | Prestaciones simulación lanzamiento Abril 2021                              | 188 |



# Bibliografía

---

Richard Nakka, *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site*, Julio 1997

George P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements* (Seventh Edition), [http://mae-nas.eng.usu.edu/MAE5540web/propulsion\\_systems/subpages/Rocket\\_propulsion\\_Elements.pdf](http://mae-nas.eng.usu.edu/MAE5540web/propulsion_systems/subpages/Rocket_propulsion_Elements.pdf)

Georgia Tech, *Solid Rocket Motors*,

[http://seitzman.gatech.edu/classes/ae6450/solid\\_motor\\_burning\\_rate.pdf](http://seitzman.gatech.edu/classes/ae6450/solid_motor_burning_rate.pdf)

India in Space World, *Types of Satellite Orbits*, <http://indiainspaceworld.blogspot.com/2012/>

Richard Nakka, *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site: Rocketry Software*, última actualización 14 de Mayo de 2021

T.W.Knacke, *Parachute Recovery Systems Design Manual*, Marzo 1991

José M. Goicolea Ruigómez, *Curso de Mecánica, Capítulo 10: Dinámica de Impulsiones*, Mayo de 2001, actualizado 8 dic 2010

Rayguardo, *Art Punto: Sobre la Resistencia Mecánica de los Tornillos de Acero (162464518)*, Servicio Nacional de Aprendizaje

Página Web Ingemecánica (Tutorial nº 32), *Diseño y Cálculo de las Uniones Atornilladas* <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.htmlseccion51>

Página Web Tesis en Red (Tesis Doctorals en Xarxa, TDX), *Tensiones en un cilindro debidas a la presión hidráulica* <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6739/12EAsm12de13.pdf?sequence=12>

Página Web PicManía by RedRaven, *ELECTRÓNICA BÁSICA: EL TIMER NE555 y sus Encantos* [http://picmania.garcia-cuervo.net/electronica\\_basica55.php](http://picmania.garcia-cuervo.net/electronica_basica55.php)

Jesús Manuel Recuenco Andrés, *MODELISMO ESPACIAL: Manual de Construcción de Modelos Espaciales* [http://www.hobbymodel.es/upload/ModelismoEspacial\\_R6octubre2008.pdf](http://www.hobbymodel.es/upload/ModelismoEspacial_R6octubre2008.pdf)