

Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site

Motor cohete *Paradigma*

Traducido por José L. Sánchez

Introducción

Los trabajos para el desarrollo del motor cohete *Paradigma* de combustible sólido clase J comenzaron en noviembre de 2002. La motivación para desarrollar un motor de estas características era la necesidad de dotar de una planta de potencia al primer cohete de la serie *Frostfire*. El objetivo del *Frostfire* era de alcanzar un apogeo máximo de más de una milla (1.5 kilómetros.). El diseño del *Paradigma* era fundamentalmente diferente a todos los motores anteriores. Aprovechando los atributos únicos del [RNX](#), propulsor a base de composite epoxi, se decidió emplear una configuración de grano de " Barra y Tubo ". Tal configuración consiste de un grano tubular con una barra de propelente concentrica separada del mismo. Esta configuración tiene varias ventajas sobre otras formas de grano mas convencionales:

- Área de quemado completamente neutra - el aumento de diámetro del corazón del grano de tubo es compensado por la reducción de diámetro de grano de barra durante la combustión.
- El grano de tubo, cuya superficie externa esta inhibida, actua como aislador termico durante toda la fase de combustión. Como tal, la cubierta del motor no está expuesta a la carga termica, y por consiguiente es factible utilizar tubo de aluminio de pared delgada con seguridad.
- Muy alta carga volumétrica del motor. Al principio el 85 % del volumen de la cámara está ocupado por el propulsor. En configuraciones BATES, por ejemplo, normalmente son del 75 u 80 %.

Hasta la fecha, se han realizado un total de cuatro pruebas con el motor *Paradigma*, consistiendo en dos pruebas estáticas y dos vuelos. La prueba estatica inaugural se realizó el 12 de enero de 2003 con éxito total. El motor fue modificado ligeramente para el lanzamiento de los dos vuelos del *Frostfire*. La modificación consistió en aumentar la longitud del tubo en dos centímetros. La intención era de aumentar el *Kn* original de 925 a 1020, para compensar la baja temperatura de la combustión.

Se emplearon dos formulaciones distintas en la fabricación del propelente para este motor, RNX-57 y RNX-71V. Debido a la temperatura de combustión relativamente baja de los propulsores RNX, es necesaria la utilización de una tobera de acero, cuya vida y reutilización es ilimitada. La tobera deberá ser limpiada después de su uso con agua caliente para eliminar los residuos de carbonato de potasio, seguido de un penetrante baño de ácido muriático para eliminar los depósitos de óxido de hierro.

El nombre " *Paradigma* " se refiere " al concepto de prototipo " de un diseño fundamentalmente diferente de motor, en referencia a la configuración del grano de Barra y Tubo.



Figura 1 – Motor cohete Paradigma original.

El motor de *Paradigma* es capaz de elevar un cohete de 4.5 kg. y 3 " (7.6 cm.) de diámetro a una altitud de aproximadamente 5000 pies (1500 m).



Figura 2 -- Izquierda: El motor *Paradigma* en prueba estática.
Derecha: Lanzamiento del *Frostfire* con un motor *Paradigma* en Febrero de 2004.

Descripción básica

El motor cohete *Paradigma* tiene unas dimensiones básicas de 2.5" (63.5 mm) de diámetro exterior y una longitud total de 13.25" (337 mm). El motor está construido de tubo de aleación de aluminio y componentes de acero, se le ha adaptado una tobera estándar de perfil cónico supersónico. El grano propulsor de Barra y Tubo se encaja con precisión dentro de la cubierta de motor, inhibiéndose la superficie externa, así como ambos extremos del mismo. De tal modo que, el área de la superficie de quemado permanece teóricamente constante en todo momento, proporcionando así un perfil Kn completamente neutro ($Kn = 925$). La masa nominal del propulsor para este motor es de 930 gramos (2.05 libras) y el tiempo nominal de combustión es 2.5 segundos. Tanto el RNX-57 o el RNX-71V, propulsores de nitrato de potasio/epoxi, se pueden usar con este motor. La masa en vacío del motor es de 570 gramos (1.26 libras). La Figura 3 muestra un dibujo del ensamblaje del motor *Paradigma*

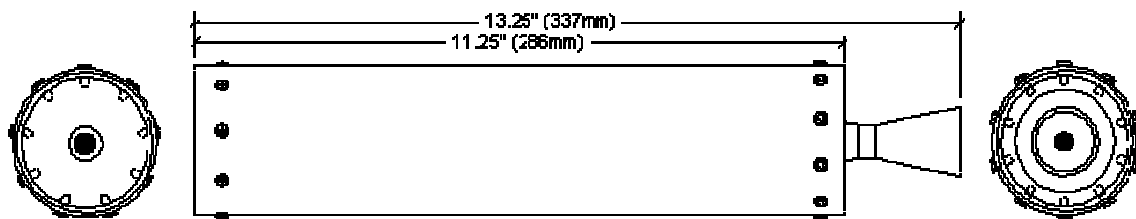


Figura 3. Ensamblaje del motor

En la Figura 4 puede verse una vista en sección del motor.

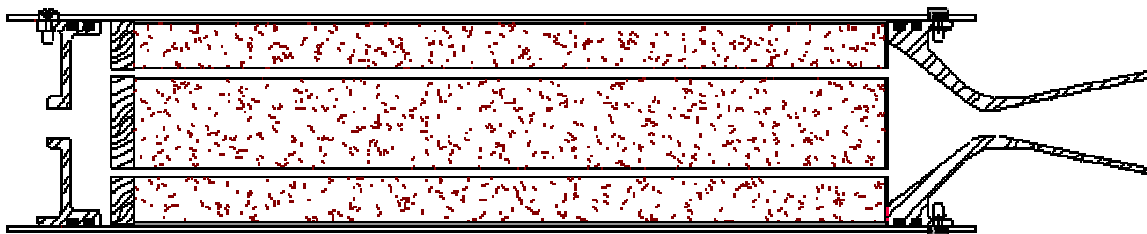


Figura 4 – Vista en sección

La Figura 5 muestra una vista transversal del motor donde se aprecia la configuración del grano

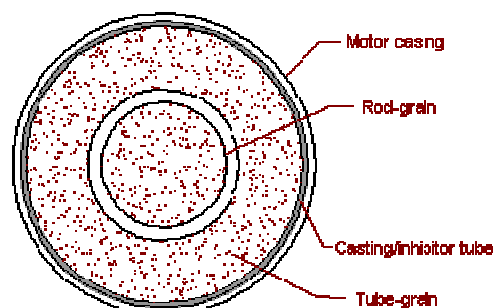


Figura. 5 - Vista de corte transversal que ilustra el grano de barra y tubo.

Tobera

La tobera de Laval es de perfil cónico, tipo supersónico, mecanizada con acero bajo en carbón (SAE 1018), destacando sus medios ángulos de 38° convergentes y 12° divergentes. El ratio de expansión es 12:1, y la presión típica de funcionamiento está entre 900 y 1000 psi (6.2 MPa y 6.9 MPa). La tobera se fija al cuerpo del motor con diez tornillos de acero cabeza avellanada de 6-32 x 1/4 ". Se usan tornillos de aleación de acero debido a su alta resistencia al guillotinado 95 kip/in² (655 MPa). Para proporcionar un sellado de presión eficaz y redundante, se utilizan dos juntas tóricas impregnadas en grasa de silicona. Las juntas tóricas del tipo estandar se han usado durante las pruebas estaticas con buenos resultados.

Para un funcionamiento óptimo, es importante que la entrada a la garganta de la tobera esté bien redondeada para mejorar la aceleracion gradual de los productos de combustión. Esto reduce la pérdida de efectividad asociada al retraso de la velocidad del flujo de dos fases (ver la sección Teoría [SRM](#) para mas detalles).

La tobera *del Paradigma* se ilustra en la Figura 6.

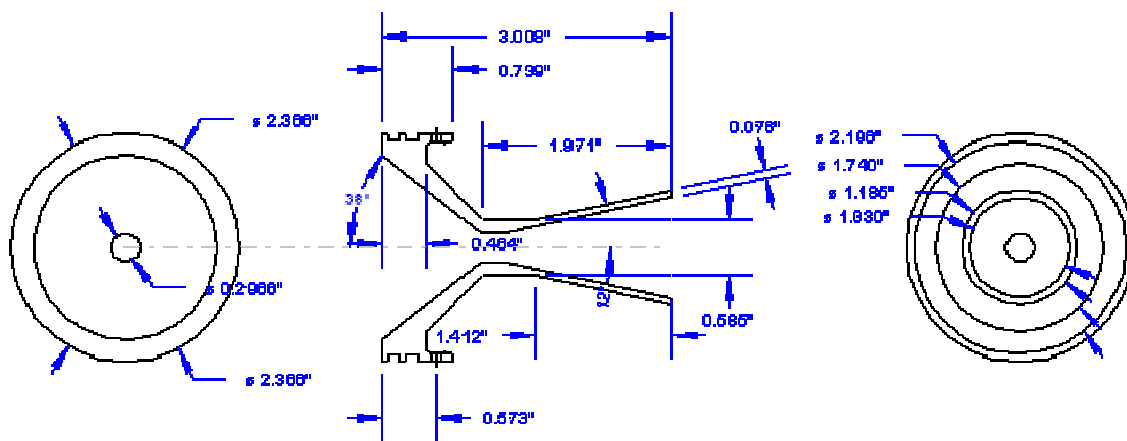


Figura 6 – Tobera del motor *Paradigma*

Cierre superior.

El tapón de cierre superior esta mecanizado en aluminio de aleación 6061-T6 y fijado mediante nueve tornillos de acero inoxidable 6-32 x 1/4 " (M5 x 7). Estos actúan como " tornillos de seguridad " dispuestos de tal forma que, en caso de una situación anómala de sobrepresión, el tapón deberá desprenderse antes de que se produzca la ruptura de la cubierta. Para asegurar la estanqueidad el tapón lleva dos alojamientos para sendas juntas tóricas que deberan montarse con la correspondiente grasa de silicona.

En el tapón de cierre superior, tal como se muestra en el dibujo, se ha previsto un taladro roscado para instalar un sistema de media de presión en cámara o bien un dispositivo de retardo de eyección del paracaídas. En el caso de que no dese usarse se puede cerrar mediante un tornillo o con el propio dispositivo de anclaje de la cuerda de choque.

El tapón de cierre se muestra en la figura 7 .

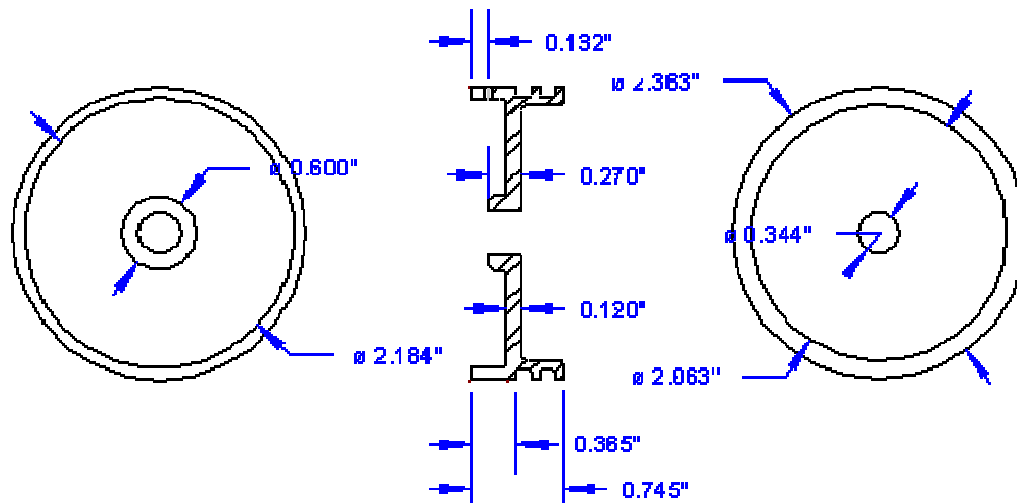


Figura 7 – Tapón de cierre del Paradigma

Cubierta

La cubierta del motor esta fabricada con tubo de aluminio de aleación 6061-T6. El grosor de la pared del tubo es de (1.7 mm), lo que le confiere un gran ligereza.. Para un MEOP de 1000 psi, el factor de seguridad de diseño está en 2.4, basado en una presión de explosión del tubo de 2400 psi. La cubierta está termicamente aislada por el grano tubular durante la mayor parte del proceso de combustión. Hacia el final de la combustión, el tubo de inhibidor de cartulina garantiza el aislamiento termal. Se ha verificado durante las pruebas estáticas, que después del funcionamiento del motor, la cubierta del mismo está verdaderamente fria al tacto.

Tubo bastidor/inhibidor

El tubo *bastidor/inhibidor* sirve para varios objetivos importantes. Se usa como molde para el grano tubular. Inmediatamente antes de introducir en él el propulsor RNX, se dará una capa de pegamento epoxi a las paredes interiores del mismo, con el fin de asegurar la maxima adherencia entre el propulsor y el tubo bastidor/inhibidor. El tubo, como su propio nombre indica, sirve también sirve como *inhibidor* para prevenir la combustión sobre la superficie externa del grano. Un tubo de papel adicional al bastidor/inhibidor servirá para aislar termicamente y proteger la cubierta de motor durante los momentos finales de la combustión del calor residual después de la misma .

El tubo de bastidor/inhibidor está fabricado de hoja de cartulina conformada tubularmente mediante el uso de un rodillo o similar . El grosor de la cartulina es de 0.018" (0.5mm). El diámetro del rodillo deberá se tal que dos capas de cartulina (mas una pequeña superposición) conformen el diámetro interno de la cubierta del motor de forma que este pueda deslizarse fácilmente en su interior. La zona de superposición de la cartulina, deberá ser pegada mediante un adhesivo adecuado que nos proporcione un tubo resistente. Un pegamento sorprendentemente bueno para este uso, es la cola blanca en barra generalmente usada para pegar productos de papel.

Para hacer el tubo bastidor/inhibidor, la cartulina deberá cortarse a un tamaño adecuado, la longitud será aproximadamente un centímetro mas larga que la cubierta del motor . Esta longitud suplementaria tiene por objeto fijar con cinta adhesiva el tubo bastidor a la cubierta del

motor, que en este caso sirve de molde. Esto es esencial para impedir el desplazamiento del tubo bastidor durante el proceso de llenado.

Inhibidor del grano final

Para alcanzar Kn teóricamente neutro en todas las zonas de combustión del grano, los finales del mismo, tanto la barra como el tubo, deberán ser inhibidos. Estos inhibidores se realizarán con cartulina de 0.025" (0.6 mm) espesor. Y deberán ser incorporados en el molde del grano formando parte del procedimiento de empaquetado. Antes de la instalación de estos inhibidores en el molde, se les aplicará una fina capa de epoxi para asegurar una unión efectiva al propulsor.

El inhibidor final superior tanto para el Grano de barra como para el Grano de tubo consiste en un disco de 1/4 " de madera dura (de 6 mm). El objetivo prioritario de este disco es servir de tope al Grano de barra, sin embargo, una función secundaria es la de inhibidor. El disco de apoyo es pegado con epoxi a los dos granos después de que estos hayan sido retirados del molde y cortados a la longitud adecuada. El disco de apoyo dispone de una serie de pequeños taladros de ventilación realizados en la zona del hueco existente entre la posición del Grano de barra y el Grano de tubo. Estos agujeros de ventilación tienen la misión de igualar la presión en todo el contorno del grano durante el arranque de motor. Esto previene de una posible carga estructural del grano debido a la presurización de motor.

El disco soporte es ilustrado en la Figura 8.



Figura 8 – Disco soporte instalado en el extremo anterior del contenedor del grano.

Molde para el propelente

El molde para hacer el grano tubular y el grano de barra consta de cuatro elementos principales (Figura 9), que serán montados formando una sola unidad. El molde para el grano de barra sirve también como molde para el taladro central del grano tubular. Para impedir la adherencia del propulsor al molde del taladro central, este debe ser envuelto con una hoja de papel y una cinta no vinculante al RNX devanada en forma de espiral.

La cubierta de motor sirve como el molde hembra para el grano tubular. El tubo del bastidor/inhibidor es introducido dentro de este molde, y fijado con tiras de cinta adhesiva en el extremo superior. El molde del grano de barra es encajado mediante un espaciador interno para reducir el diámetro interior a 1.04" (26.4mm). El espaciador se realiza con cartulina para formar un tubo apropiado ajustado concéntricamente dentro del molde. Un mandril de medidas adecuadas ayudará a realizar el espaciador, pero no es esencial.

Para evitar que el propelente se adhiera al espaciador, deberá forrarse éste, con una capa fina de tela de poliéster o redcilla de nilón antes de darle forma tubular. La tela de paracaídas trabaja bien. No sólo evita que propelente se pegue a la tela, si no que también al ser retirada del molde, el grano de barra tiene una textura superficial bien acabada que facilita su ignición. La tela, al ser porosa, también impide que burbujas de aire queden atrapadas y causen imperfecciones superficiales.

La preparación del grano y los de los moldes se detalla en la página Web [RNX Composite Propellant -- Grain Mould](#)

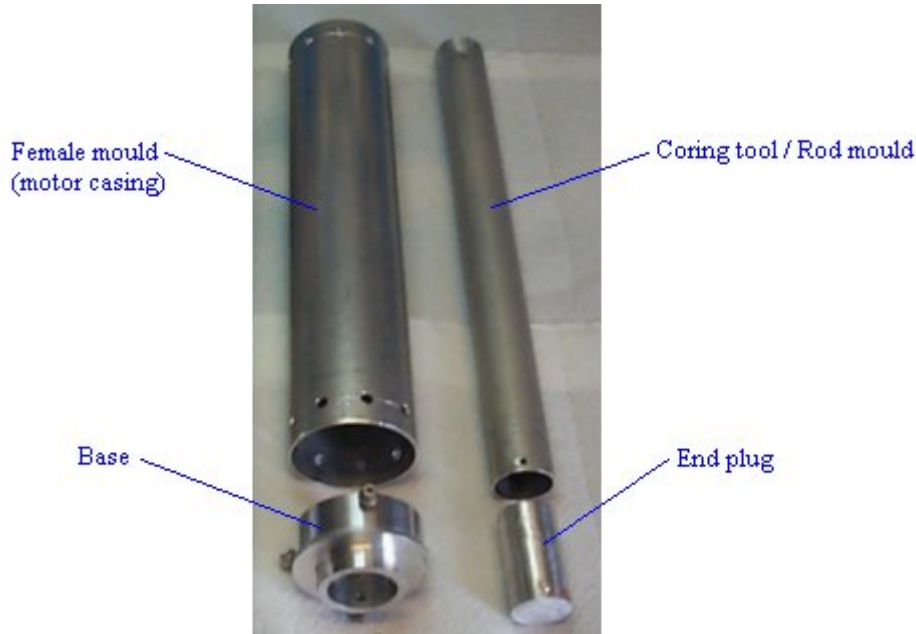


Figura 9 –Moldes para el grano del motor Paradigma
(No son visibles el tubo de moldeo espaciadores e inhibidores)

Grano de propelente

Una vez que el molde ha sido completamente montado (incluyendo la instalación de los inhibidores de final), ha de tenerse preparado suficiente propulsor para llenar el molde del grano de barra. Debido al limitado tiempo de curado del RNX, el grano de barra y el grano de tubo es preferible realizarlos de forma separada. Para introducir el propulsor en el molde se deberá usar una barra para apisonarlo en el interior del molde (tiene una consistencia parecida a masilla). Una vez realizada esta operación se deberá preparar suficiente propulsor para el grano tubular. El llenado deberá realizarse mediante el empleo de una herramienta adecuada. Hay que tener especial cuidado durante el llenado del molde para impedir que queden burbujas de aire atrapadas en su interior. El propelente deberá formar una masa sólida, si esta presentara un aspecto esponjoso, será un signo inequívoco de que contiene aire en su interior.

Este proceso de llenado de combustible se detalla en la página web [RNX Composite Propellant -- Propellant Packing and Curing](#).

Se deberán preparar muestras tanto del combustible usado para el grano tubular como para el grano de barra, con el fin de realizar las oportunas pruebas control de calidad y ratio de quemado.

Una vez que el grano de barra y el grano tubular ha curado totalmente, ambos son retirados de sus moldes respectivos, inspeccionados, cortados a la longitud adecuada, pesados y medidos. Se realizará la comprobación de la densidad obtenida comparandola con la densidad ideal. Si la densidad real obtenida es aceptablemente alta, los granos podran ser montados. Esto implica primeramente realizar un taladro en el final delantero del grano de barra para introducir un pivote de madera. El pivote es pegado con epoxi en el taladro. Al mismo tiempo, una generosa capa de epoxi se aplicará al final delantero del grano de barra y por todas partes del disco de apoyo (incluyendo el agujero central). El grano de barra, el grano de tubo y el disco de apoyo se montaran y deberan ser colocados aparte para dejar curar. Para garantizar que el grano de barra se mantiene absolutamente concéntrico con el grano de tubo durante la curación, el conjunto deberá asegurarse con unos trozos de cinta adhesiva.

Cuando el conjunto ensamblado del grano es instalado en el motor, es importante que el final del grano tubular asiente firmemente sobre la tobera. Antes de la instalación, se deberá aplicar una capa generosa de silicona RTV tanto sobre el inhibidor de final como sobre la tobera de tal manera que el grano quede perfectamente sellado a la tobera. El objetivo de este sellado es impedir que los gases calientes de la combustión puedan filtrarse entre la pared de la cubierta del motor y el tubo inhibidor del grano

El propelente ensamblado se muestra en la Figura 10.



Figura 10 - Paradigma propelente de Barra & Tubo.

Ignición del Motor

Para la ignición fiable del propulsor RNX, debe usarse un ignitor de encendido caliente. Dos de los ignitores que se han usados con éxito son el encendedor *Feroz*, y el encendedor *Cascarrabias*. El diseño y la fabricación de estos se detallan en la página Web [Encendedores y Sistemas de Ignición](#). El artículo [Encendedores a base de nitrato para propulsor compuesto](#) en PDF también describe un número de ignitores que funcionarán bien con el propulsor RNX.

El ignitor debe tener forma de disco delgado de tal manera que pueda ser introducido en el hueco entre el grano tubular y el grano de barra, hasta la parte superior del grano. Normalmente se han montado dos ignitores redundantes durante la instalación del grano en el motor. Por motivos de seguridad, el recubrimiento aislante en los extremos de los cables debiera ser eliminado y luego reteorcidos entre si para evitar cualquier posibilidad de encendido accidental.

Los ignitores de disco se ilustran en la Figura 11.



Figure 11 - Spitfire ignitores de disco para el motor *Paradigma*

Funcionamiento del motor

El motor de *Paradigma* fue diseñado con la ayuda de una hoja de cálculo *Excel* creada para el grano de Barra y Tubo usando datos de caracterización para los propulsores RNX (Ver imagen). Un impulso de total de 1030 N.seg. hace del *Paradigma* un motor de la clase "de J" del 61 %. El impulso específico entregado es de 113 segundos. La presión en cámara es de 1000 psi (6.9 MPa) un $Kn = 927$.

Se han obtenido datos de funcionamiento reales del motor *Paradigma* en pruebas estaticas utilizando un sistema de prueba y adquisición de datos electrónico *S.s 5000*. Se registraron tanto el empuje del motor como la presión de la cámara. El empuje fue medido mediante el empleo de una célula de carga de 200 libras. (900 N.) y la presión mediante un sensor transductor de presión de 0-5000 psig Omega PX300 La célula de carga fue hecha a medida con la instalación de un puente de cuatro resistencias 2 activas y dos pasivas. Ambos fueron conectados a un amplificador de instrumentación basado en el circuito INA 122, y este a un convertidor analógico digital de varios canales DATAQ 154RS. Los datos fueron almacenados en una computadora portátil. El transductor de presión fue termicamente protegido de los gases de combustión calientes con un colector llenado de grasa

Las curvas de las medidas de empuje y de presión se presentan en la Figura 12, junto con los valores previstos en la fase de diseño.

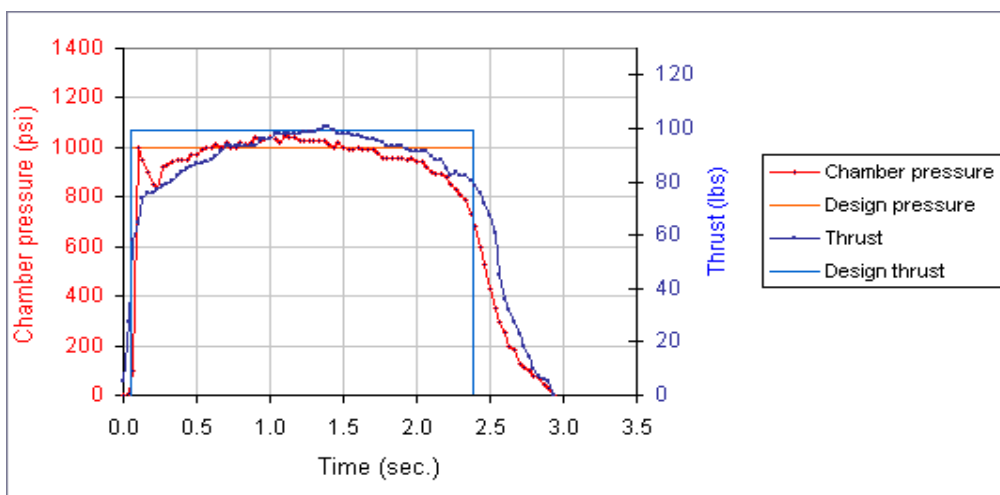


Figura 12 – Comparación de los valores previstos y obtenidos del empuje y de la presión en la cámara de combustión.

El coeficiente de empuje fue calculado usando la medida de la presión de cámara, el empuje y el diámetro de la garganta de la tobera. Los valores iniciales del coeficiente de empuje eran inferiores a los previstos en el diseño, pero al final de la combustión fueron aumentando y se situaron cerca de los valores previstos tal como se ilustra en la Figura 13.

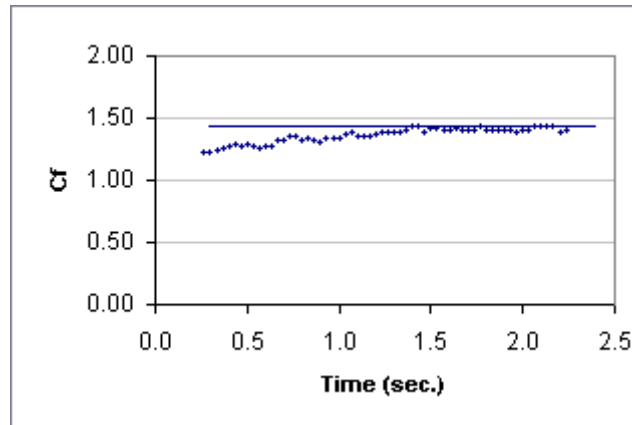


Figura 13 Coeficiente de empuje real y teórico