

PREDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MOTOR COHETE DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Germán García Gómez-Sáenz
germangg@worldonline.es

Mª Carmen López Alcalá
mclawanadoo@wanadoo.es

Resumen

Este artículo pretende ser una síntesis del proyecto fin de carrera de los autores. El proyecto tuvo como objetivos primarios la realización del prediseño de un motor cohete de combustible líquido atendiendo a unas especificaciones de diseño y el estudio y simulación de sus actuaciones. Como aplicación práctica, se realizó el prediseño de dos motores cohete y la simulación de las actuaciones de uno de ellos con dos configuraciones distintas.

La filosofía y pretensión de los autores, no fue realizar la simulación de un motor concreto con objeto de disminuir los costes de ensayo real de tal motor, uso típico de las simulaciones. La intención fue construir los cimientos de unos módulos, modelizando de la manera más general posible todos los elementos que pueden constituir un motor de estas características. Combinarlos para realizar fácilmente el prediseño de cualquier motor cohete de combustible líquido y mediante la simulación de distintas configuraciones, poder conocer en el anteproyecto real, como se modifican sus actuaciones y control según la configuración. Como resultado podemos tener el prediseño de cada elemento constituyente del motor y una configuración adecuada, conocida y controlada de la configuración final.

Así mismo, estos cimientos son una buena partida para posibles simulaciones de ensayos reales de un motor concreto.

Palabras Clave: Diseño, simulación, cohete, combustible líquido.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la simulación del motor completo se ha basado en el estudio particular de cada elemento que lo compone y de la posterior unión de los mismos hasta completarlo.

El modelado individual de cada componente se compone de dos partes: el diseño geométrico (paramétrico) del componente y el estudio de sus actuaciones. De esta manera es posible realizar la simulación de cualquier motor cohete sin más que cambiar los requerimientos de diseño deseados, obteniendo tanto el cálculo geométrico de los componentes como las actuaciones de éstos individualmente y dentro del funcionamiento completo del motor.

2 APLICACIÓN DE LAS LIBRERÍAS DESARROLLADAS.

Se enfocó el proyecto del estudio de un motor cohete de combustible líquido desde el diseño y estudio de sus componentes y su posterior unión. No obstante, gracias al estudio por separado de cada elemento, se puede abordar el de otros motores sin más que emplear los componentes necesarios y unirlos de la manera correspondiente.

Se realizó la modelización de los siguientes elementos:

Tanque
Tubería
Inductor
Bomba
Reductor
Eje de inercia
Plato de inyectores
Cámara de combustión
Turbina
Tobera
Sistema de refrigeración

La explicación detallada de estos elementos se hace demasiado extensa para este artículo así que para la misma se remite al artículo original.

Como aplicación de las librerías desarrolladas se realizó el diseño de varios motores cohetes cambiando su punto nominal de funcionamiento.

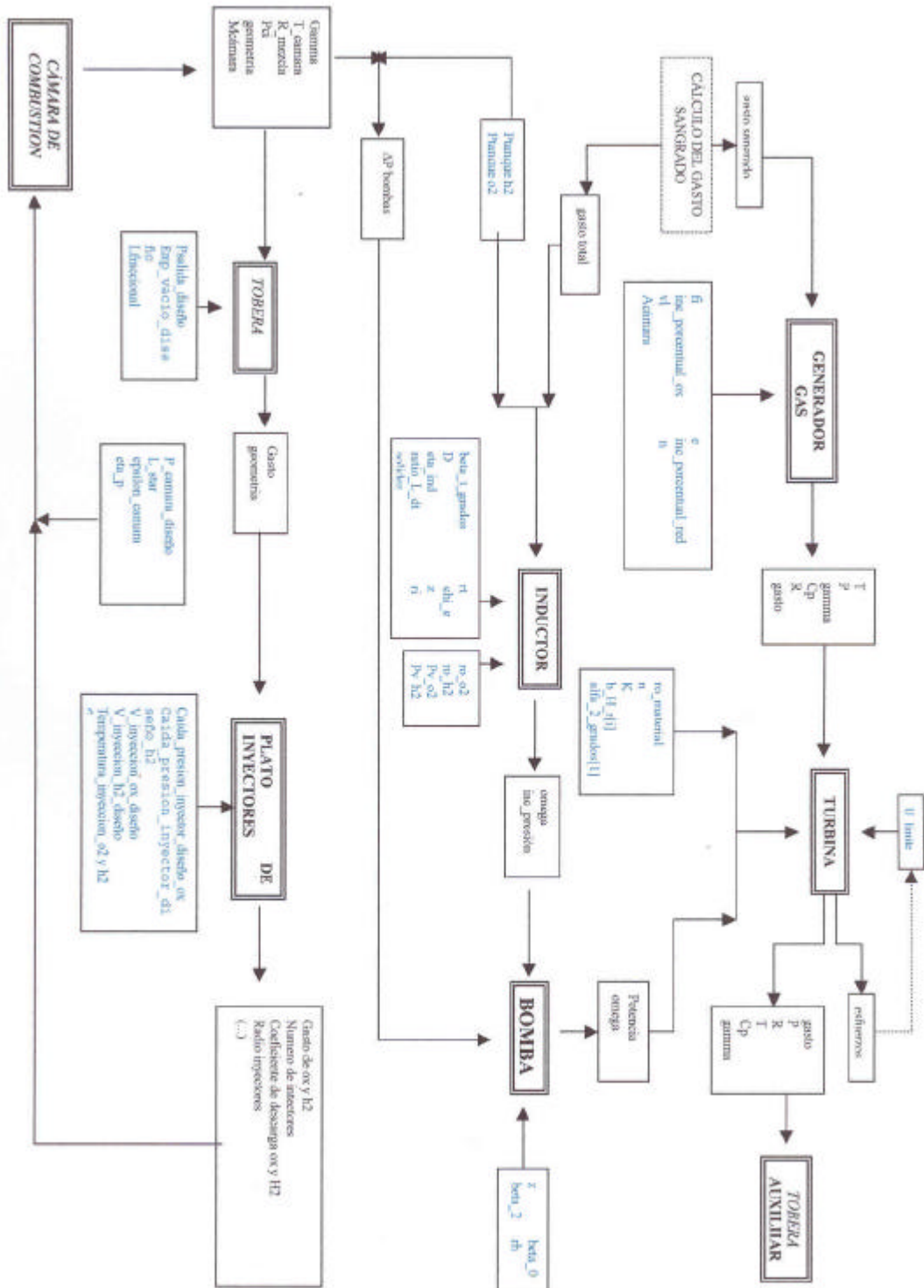


Figura 1.- esquema propiedades de diseño

También se realizaron estudios paramétricos en los distintos componentes así como se estudiaron varias configuraciones de un motor en particular.

Conceptualmente se diseñó un motor cohete de combustible líquido, con hidrógeno como reductor y oxígeno como oxidante. El motor tiene un sistema de presurización mecánico que se compone de dos turbobombas, una para cada fluido, y una turbina que arrastra a todo el conjunto mecánico. La bomba de hidrógeno es solidaria a la turbina, mientras que entre la turbobomba para el oxígeno y el eje turbina-turbobomba de hidrógeno, existe un reductor.

El sistema motor se ha elegido de ciclo abierto, con generador de gas.

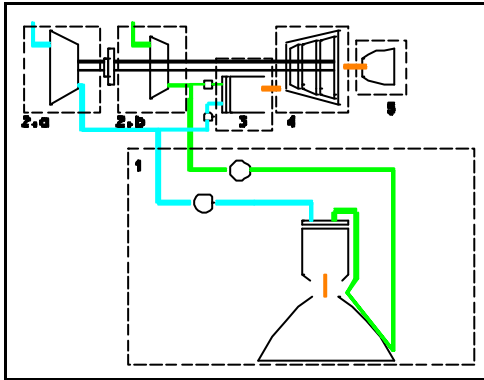


Figura 2- esquema del motor cohete simulado

El diseño completo del motor se enfocó desde el diseño de cinco componentes principales o grupos en los que se dividió. Para cada uno de éstos se utilizaron los elementos individuales convenientemente conectados.

Los cinco grandes bloques de diseño mencionados son:

- 1- Grupo propulsor: Tobera, cámara principal de combustión ,plato de inyectores de la cámara principal. Como resultado de este grupo se obtienen ciertos requerimientos para el grupo mecánico.
- 2-(2.a y 2.b) Grupo de compresión. Como resultado del diseño de este grupo se obtienen ciertos requerimientos para el grupo motriz.
- 3- Generador de gas. Da las condiciones de entrada para el grupo motriz.
- 4- Grupo motriz. Turbina.
- 5- Grupo auxiliar de gases de escape: Tobera auxiliar.

La exposición detallada del proceso de diseño sería demasiado extensa por lo que se resume en la figura 1. En ella se observan los distintos datos de diseño tomados fundamentalmente del estado del

arte actual y las relaciones entre los mencionados grupos.

Las condiciones de contorno del motor son las esperadas :

- presión de entrada en el sistema compresor de hidrógeno(Pa)
- temperatura de entrada en el sistema compresor de hidrógeno(K)
- potencia requerida en el eje de salida de la bomba de oxígeno(W). Aquí se le da la posibilidad de que se arrastre algún sistema auxiliar que requiera potencia
- presión de entrada en el sistema compresor de oxígeno(Pa)
- temperatura de entrada en el sistema compresor de oxígeno(K)
- potencia suministrada "extra" al eje de entrada de la turbina(W). Aquí se da la posibilidad de agregar cierta potencia motriz extra, mediante otro sistema motor.

Controles sobre el motor:

- señal que da control al usuario sobre el área de salida a la que quiere fijar la tobera
- señal que da control al usuario sobre el área efectiva de la válvula principal de hidrógeno
- señal que da control al usuario sobre el área efectiva de la válvula principal de oxígeno
- señal que da control al usuario sobre el área efectiva de la válvula de la línea sangrada hidrógeno
- señal que da control al usuario sobre el área efectiva de la válvula de la línea sangrada de oxígeno

2.1 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN MOTOR ANTE CAMBIOS EN LAS VARIABLES DE CONTROL

Con la unión de los componentes individuales en su forma para actuaciones se simularon las actuaciones del motor de la figura 2.

Se realizaron distintos experimentos con el objetivo de estudiar el control del motor mediante la variación de una única señal.

Cada experimento corresponde a un ensayo en el que todas las condiciones de contorno se mantienen constantes excepto una que tomamos como control:

- -control de válvula principal de hidrógeno.
- -control de válvula principal de oxígeno.
- -control de válvula sangrada de hidrógeno.
- -control de válvula sangrada de oxígeno.

- control del área de salida de la tobera principal.

Debido a lo extenso de la discusión de los experimentos sólo se incluyen las conclusiones finales a las que se llegó.

Con respecto al funcionamiento del motor se observó que el control del sistema estaba muy limitado. En general se observó que la apertura en exceso de las válvulas respecto a la nominal tiene muy poco efecto en el comportamiento motor, siendo siempre una acción “no peligrosa” y suave. En cambio el cierre de las válvulas tiene un efecto mayor pudiendo llegar a tener efectos destructivos sobre el motor.

La forma más efectiva y segura de controlar el empuje es mediante el control de la válvula de hidrógeno sangrada de manera que el impulso sigue manteniéndose casi constante.

Variando esta señal de control de la válvula de 70 a 140 (siendo 100 el valor nominal), se puede tener una variación de empuje del 10% menor al nominal cuando se abre y del 5% mayor cuando se cierra, teniendo un **rango de empuje de 1550 a 1850 KN en un rango de seguridad apropiado** de todas las variables.

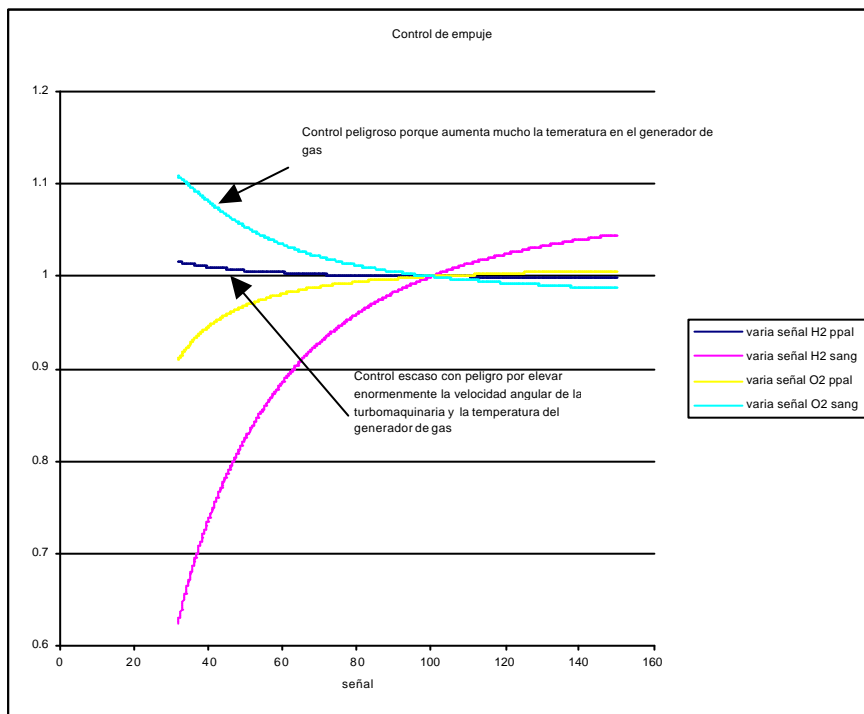


Figura 3.

2.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE UN MOTOR CON DISTINTO GENERADOR DE GAS

Además del estudio de las variaciones de las válvulas de control de combustible del motor, se realizó el estudio de un mismo motor con generador de gas rico en hidrógeno y rico en oxígeno.

Ese cambio llevó también al cambio del plato de inyectores del generador de gas y de las válvulas de las líneas sangradas en las que se modifican las áreas de paso y de inyección (manteniendo sus

características idénticas de descarga) para hacer posible el paso de los nuevos gastos sangrados.

Los cambios realizados son los reflejados en la tabla I y el punto nominal de funcionamiento se detalla en la tabla II

	rico_o2	rico_h2
Radio de inyección de H2 (mm)	2.78	3.19
Radio de inyección de O2 (mm)	2.53	2.33
Área efectiva de válvula de H2 (m ²)	5.791e-5	0.0019
Área efectiva de válvula de O2 (m ²)	0.0021062	0.001036

TABLA I

	rico_o2	rico_h2
Empuje(KN)	1750	1750
Presión de cámara(bar)	150	150.5
Temperatura de cámara(K)	3538.3	3504.7
Presión generador de gas(bar)	184.5	148.5
Temperatura generador de gas(K)	1200	1243

TABLA II

Con ensayos análogos a los mencionados anteriormente, en el motor con generador de gas rico en H₂ se llega a la conclusión de que la forma más efectiva y segura de controlar el empuje es mediante el control de las válvulas de oxígeno.

Se observa el hecho curioso de que el comportamiento del motor (referente al empuje) es idéntico cuando se varía cualquiera de las dos válvulas de oxígeno, aunque el impulso disminuye menos con el control mediante la válvula principal de oxígeno (esta diferencia de todas formas es muy leve).

Variando cualquiera de estas dos señales de control de 70-140 (siendo 100 el valor nominal), se puede tener una variación de empuje del 15% menos del nominal cuando se abre y del 8% más cuando se cierra. Teniendo un **rango de empuje de 1475-1900 KN en un rango de seguridad apropiado** de todas las variables.

Se observa que manteniendo "el mismo motor", es imposible que con el grupo propulsivo en las mismas condiciones y que con la misma turbomaquinaria y mismas características de descarga (coeficientes de descarga) de las válvulas de las líneas sangradas y de los inyectores, se logren condiciones idénticas en el generador de gas. Para ello se tendría que haber cambiado apropiadamente las características de descarga de dichos elementos.

El no lograr las mismas condiciones en el generador de gas tiene como consecuencia que el gasto sangrado deba ser globalmente mayor que en el caso original.

	M_1750_o2	M_1750_h2
Gasto critico principal(Kg/s)	389	388
Gasto critico sangrado(Kg/s)	50	68

TABLA III

Como conclusión sobre los resultados, se puede decir que para el mismo empuje con la misma arquitectura de motor utilizada, es más exigente el motor con generador de gas rico en hidrógeno que en oxígeno.

2.2.1 COMPARACIÓN DE LAS DOS VERSIONES SOBRE SUS CONTROLES

Con el estudio de los experimentos, se observa que el comportamiento de ambas versiones es diferente. En ambas existen acciones peligrosas (en todas ellas la variable peligrosa es la temperatura en el generador de gas que aumenta enormemente, y en algunas también la velocidad angular de la turbomaquinaria aumenta mucho).

Una característica curiosa es la coincidencia de varios controles en los efectos que tienen:

El efecto del control de la válvula principal de hidrógeno en la versión rica en reductor es el mismo que se tiene con el control de la válvula sangrada de hidrógeno en la versión rica en oxidante.

El efecto del control en la válvula sangrada de hidrógeno en la versión rica en reductor es la misma cuando se abre que en el caso de las dos válvulas anteriores.

El efecto del control en las dos válvulas de oxígeno en la versión del motor rica en reductor es el mismo.

Globalmente se puede decir que los controles en la versión rica en reductor tiene más efectos que en la versión original rica en oxidante.

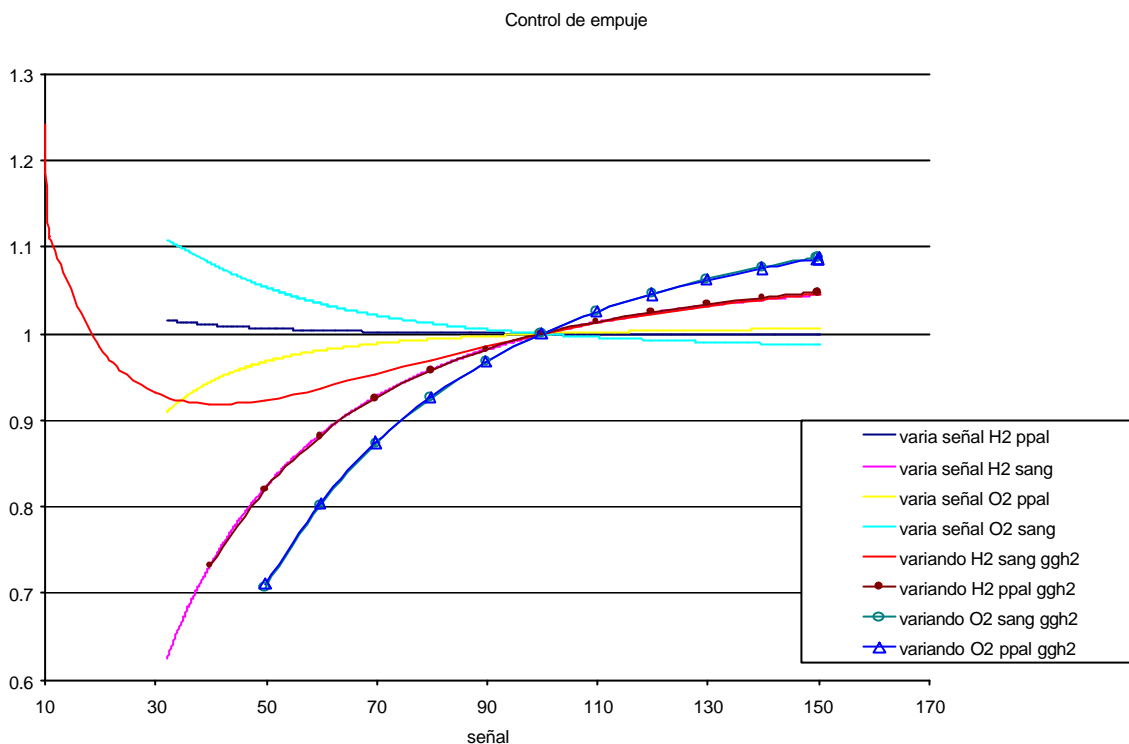


Figura 4.- control del empuje

3 COMENTARIOS FINALES

Sobre el proyecto escuetamente comentado en este artículo, nos gustaría destacar su carácter principalmente académico por lo que su mejora en cuanto a resultados cualitativos es y debería ser inmediata. No obstante, creemos haber desarrollado una herramienta para el pre-diseño y estudio inicial de motores cohete de combustible líquido, lo suficientemente potente y útil como para el guiado de las primeras etapas de estudio y proyecto de un sistema de estas características.

En el proyecto original se exponen con más claridad tanto el modelo como las simplificaciones en cada uno de los componentes modelizados así como las posibles mejoras al modelo. Igualmente se exponen las aplicaciones prácticas realizadas detallando los resultados y conclusiones derivadas.

Agradecimientos

A Ramón Pérez Varas por su inestimable ayuda y especial atención. A Juan José Salvá por su dirección y recomendaciones.

Referencias

- [1] Huzel, D. K., (1971) Design of Liquid Propellant Rocket Engines, NASA, Washington
- [2] Karassik, I.J., Krutzsch, W.C., Frasser, W.H., (1976) Pump Handbook, Mc-Graw Hill
- [3] Manual del usuario de Ecosimpro, Empresarios Agrupados
- [4] Nist, base de datos <http://webbook.nist.gov>
- [5] SP-8000 Series, NASA <http://techreport.lark.nasa.gov/cgi-bin/NTRS>
- [6] Sutton, G. P., (1992) Rocket Propulsion Elements, J. Wiley and Sons, USA
- [7] Vulcain, base de datos <http://www.snecma-moteurs.com>