

Modelado, Optimización Termoestructural y Ensayos Funcionales de un Motor Monopropelente de 1.5N para Uso Espacial

Salomone, Javier E. (1) (2) (*),

Giusti, Sebastián M. (3),

Manavella, Luciano (2),

Sanna, Alexis David (2),

Micheloud, Pablo D.(2),

Gonzalez, Gustavo J. (1) (4),

Jazni, Jorge E. (1) (4),

Cova, Walter J. D. (1) (5)

⁽¹⁾ Instituto Universitario Aeronáutico, Centro de Investigaciones Aplicadas, Departam. Sistemas Electromecánicos

⁽²⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento Mecánica

⁽³⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento Ing. Civil - CONICET

⁽⁴⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, CUDAR

⁽⁵⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja, Departamento Ing. Electrónica

^(*) e-mail: jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar

Resumen – El diseño de un motor de hidracina de bajo empuje para aplicaciones espaciales, se analiza en su comportamiento térmico, incluyéndose la optimización termoestructural de la interface entre la cámara de combustión y la válvula de control de flujo; los resultados obtenidos son corroborados sobre prototipos de ingeniería sometidos a una evaluación experimental (firing-test).

La primera parte aborda el estudio del comportamiento térmico del motor empleando una modelización discreta basada en la analogía flujo de calor – intensidad de corriente. Si bien tal modelización no alcanza la precisión que puede obtenerse aplicando elementos finitos, los resultados obtenidos brindan un excelente punto de partida para conocer la distribución de temperaturas en diferentes elementos del motor.

Aplicando técnicas avanzadas de simulación numérica puede predecirse el comportamiento estructural de elementos geoméricamente complejos y fuertemente comprometidos por sollicitaciones mecánicas. En la segunda parte, se presentan los resultados obtenidos mediante técnicas de Optimización Topológica aplicadas al diseño de la interface entre la cámara de combustión y la válvula de control de flujo. Esta interface resulta de importancia: de su capacidad de disipación depende la duración de los sellos blandos de la válvula de control y consecuentemente la vida útil del motor.

En la tercera parte, se presentan los ensayos funcionales de caracterización de la performance del prototipo, evaluando: nivel de empuje del motor, tiempo de respuesta, temperaturas del lecho catalítico, de salida de gases, del asiento de válvula de control de flujo, etc. Paralelamente se describen las facilidades especiales desarrolladas por la peligrosidad del combustible (hidracina), y los requerimientos de instrumentación de ensayo.

Finalmente, se presentan conclusiones y se realizan consideraciones sobre futuros desarrollos.

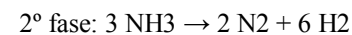
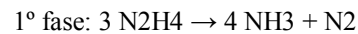
Palabras clave – Motor de reacción, modelado térmico, optimización topológica, hidracina.

1. INTRODUCCIÓN

Este tipo de motores es usualmente utilizado como efector para realizar correcciones de órbita y de actitud de satélites artificiales, para el caso se trata de un satélite de órbita baja (LEO). El presente trabajo se basa en los antecedentes del diseño de un motor monopropelente de 1.5 N de empuje expuesto por Salomone et al. en [1, 2].

El propelente, en este caso hidracina, es conducido mediante un tubo de alimentación de aleación platino-iridio que pasa al interior de la cámara de combustión del motor a través de un orificio practicado en la pared anterior de la misma. En la zona de ingreso el tubo está soldado a la pared de la cámara para su fijación y sellado de la interfaz. A continuación, ya en el interior de la cámara, se encuentra el inyector mediante el cual el propelente es distribuido en el seno del lecho catalítico.

Cuando el combustible entra en contacto con el catalizador, se produce el quiebre de las moléculas según la siguiente reacción [3]:



En la primera fase el combustible se disocia catalíticamente en amoníaco y nitrógeno, produciéndose una reacción exotérmica; mientras que en la segunda el amoníaco se disocia en nitrógeno e hidrógeno en una reacción de tipo endotérmica. La Fig. 1 muestra en corte los elementos componentes de la válvula, el sello elastomérico, el aislador térmico, el tubo de Pt-Ir y el lecho catalítico.

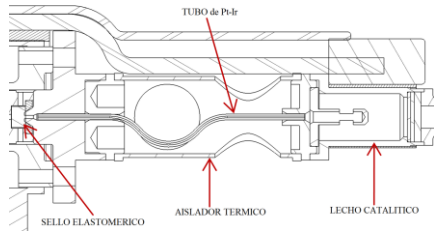


Figura 1: Motor monopropelente.

El calor generado en el lecho catalítico que es la principal fuente de calor, es disipado por: (a) radiación al espacio que rodea al lecho, (b) conducción hacia el vehículo a través del tubo de alimentación y por el aislador térmico hacia la válvula que conforma el conjunto motor. Alojado en ella se encuentra el sello elastomérico que es sensible a temperaturas elevadas y es el elemento que se pretende proteger. Por ello se necesita conocer de la mejor manera posible, las temperaturas desarrolladas en cada parte del conjunto, para estudiar su influencia y las medidas necesarias para la protección del sello.

2. USO DE LA ANALOGÍA TERMOELÉCTRICA PARA DETERMINAR TEMPERATURAS

La analogía termoeléctrica se basa en la semejanza que hay entre las formas de circular del flujo de calor y la corriente eléctrica, permitiendo tratar problemas termodinámicos mediante conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos [10]; vale entonces:

$$q(W) \equiv i(A)$$

$$\Delta T(K) \equiv \Delta V(v)$$

Resistencias térmicas \equiv Resistencias eléctricas

Inercia térmica \equiv Capacidad eléctrica

Para el abordaje apropiado del tema, dada su complejidad, se hace necesaria la aplicación de hipótesis simplificativas. Entre ellas, se destaca que, no serán consideradas las dependencias con la temperatura, tanto de la conductividad térmica como de la emisividad. Se supondrá que el calor generado, en su totalidad, se transmite al conjunto por conducción; y a medida que va avanzando, parte del mismo se irá cediendo al ambiente por radiación. Como el motor posee (prácticamente) simetría de rotación, el análisis se limitará a un plano transversal asumiéndose que la transferencia de calor es unidireccional.

Los elementos del conjunto, se modelizan mediante diferentes componentes circuitales. Entre las resistencias se diferencian dos tipos, las resistencias por conducción R y las resistencias por radiación R_r . Sus valores son calculados mediante diferentes expresiones, que son derivadas de las leyes de la transmisión del calor. Las fuentes de calor o temperatura, son representadas mediante fuentes eléctricas.

2.1. Trayectoria del calor

La trayectoria del calor supuesta, se observa en la Fig. 2. Por simplicidad, no se considerará la radiación emitida por el tubo de alimentación, debido a que parte

de ésta también será absorbida por las piezas que lo rodean.

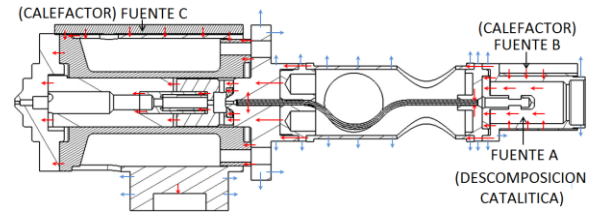


Figura 2. Flujo de calor desde el lecho catalítico

2.2 Valores de los análogos eléctricos

En la Tabla 1 se muestran los valores calculados para cada fuente utilizando la analogía termoeléctrica.

Tabla 1- Valores de las Fuentes

Fuente	Temperatura [°C]	Valor
A	800	81,9 A
B	90	27,7 A
C	60	6,3 A
T_{amb} (temp. de referencia)	25	298 V

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para cada resistencia. En la misma también se detallan las geometrías y los valores de conductividad y emisividad térmica utilizados.

Tabla 2: Valores de resistencias

Parte	Superficie	Espesor	K	ϵ	Valor
R_1	$8,46 \times 10^{-5}$	0,01665	14,9		13,1
R_{1r}	$5,10 \times 10^{-4}$			0,9	29,5
R_2	$3,36 \times 10^{-5}$	0,00975	14,9		19,4
R_{2r}	$4,9 \times 10^{-5}$			0,9	46,4
R_{tubo}	$5,05 \times 10^{-7}$	0,0412	31		2631
R_3	$7,28 \times 10^{-6}$	0,0272	14,9		250,6
R_{3r}	$7,36 \times 10^{-4}$			0,9	27,5
R_4	$1,11 \times 10^{-4}$	0,00425	14,9		2,6
R_{4r}	$4,9 \times 10^{-5}$			0,9	20
R_5	$4,42 \times 10^{-4}$	0,0075	14,9		1,5
R_{5r}	$1,2 \times 10^{-3}$			0,9	7,2
R_6	$2,1 \times 10^{-5}$	0,0277	24,9		53
R_{6r}	$2,04 \times 10^{-3}$			0,95	12,7
R_7	3×10^{-4}	0,031	24,9		4,1
R_8	$3,67 \times 10^{-5}$	0,02075	24,9		22,7
R_9	$3,69 \times 10^{-5}$	0,0092	16		15,5
R_{10}	4×10^{-4}	0,02075	15		1
R_{11}	$4,66 \times 10^{-6}$	0,01065	23,3		98
R_{12}	$4,16 \times 10^{-6}$	0,0076	27,4		57,6

2.3 Modelo eléctrico del circuito y resultados de la simulación

El modelo circuitual obtenido es el que se muestra en la Fig.3.

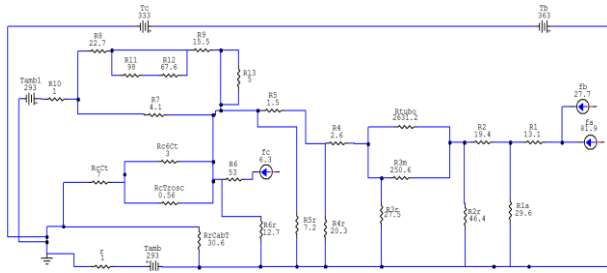


Figura 3: Circuito

Al simular el circuito de la Fig. 3, los valores de las temperaturas pueden obtenerse mediante un voltímetro, equivaliendo cada Volt a un grado de la escala Kelvin. Por lo tanto al valor medido se le deberá restar 273 para obtener la temperatura en la escala Celsius. A continuación se muestran los resultados de la simulación, en algunos puntos de interés del conjunto.

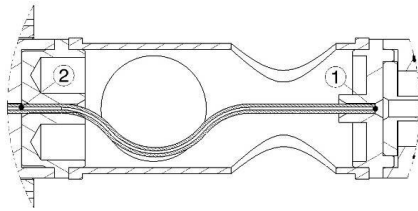


Figura 4: Detalle de la zona física del conjunto, que hace referencia a los puntos de interés 1 y 2

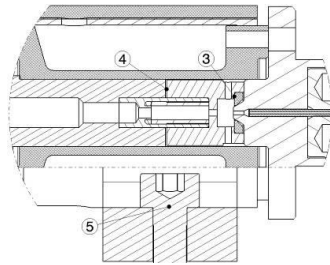


Figura 5: Detalle del conjunto, que hace referencia a los puntos 3, 4 y 5

Las medidas calculadas para los puntos de interés, fueron:

- Punto 1 = $1118 - 273 = 845 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto 1 = $507,6 - 273 = 234,6 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto 3 = $434,3 - 273 = 161,3 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto 4 = $389,1 - 273 = 116,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto 5 = $406,8 - 273 = 133,8 \text{ }^\circ\text{C}$

Aunque frutos de una discretización somera, los valores obtenidos destacan la importancia que reviste la disipación en el aislador térmico que separa la cámara de combustión de la válvula moduladora, Fig. 1.

3. OPTIMIZACIÓN DEL AISLADOR TÉRMICO

Optimizar el diseño del aislador, permite maximizar la disipación térmica por radiación y minimizar la conduc-

ción hacia el asiento de la válvula, manteniendo su peso dentro de valores aceptables.

Esta optimización será llevada a cabo mediante el uso de una técnica de optimización topológica basada en los conceptos de derivada topológica [8]. La técnica se basa en el concepto del análisis de sensibilidad topológica [8] y permite obtener una expansión asintótica topológica de un funcional de desempeño evaluado sobre la configuración original. De manera general, un cambio topológico es materializado con la introducción de un hueco en el punto donde la sensibilidad alcanza su máximo o mínimo valor, según sea el objetivo que se persigue con la optimización. Es de destacar que esta técnica ya ha sido aplicada satisfactoriamente en áreas tales como: problemas inversos [6], segmentación y mejoramiento de imágenes [7], optimización de estructuras y diseño de materiales.

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizará como función de desempeño el siguiente funcional:

$$\psi(\Omega) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} k \nabla \theta \cdot \nabla \theta d\Omega - \int_{\Omega} b \theta d\Omega + \int_{\Gamma_N} \bar{q} \theta d\Gamma_N + \lambda |\Omega| \quad (1)$$

Los primeros tres términos del funcional $\psi(\Omega)$ representan la energía potencial total asociada al problema de conducción estacionaria de calor y el último término representa el volumen de material a ser optimizado, el cual se encuentra penalizado por el parámetro λ . En la expresión anterior, k es la conductividad térmica del material, b una fuente interna de calor, q el flujo térmico actuante en el contorno de Neumann $\Gamma_N \in \partial\Omega$ y θ indica el campo de temperatura y es solución de la ecuación de estado asociada al dominio original (sin perturbación)

$$\begin{cases} -k\Delta\theta = b & \text{en } \Omega \\ -k \frac{\partial\theta}{\partial n} = \bar{q} & \text{sobre } \Gamma_N \\ \theta = \bar{\theta} & \text{sobre } \Gamma_N \end{cases} \quad (2)$$

Donde $\bar{\theta}$ es un valor de temperatura prescrito sobre el contorno de Dirichlet.

Como parámetro de perturbación se asumirá que el nuevo material a introducir posee una conductividad térmica diferente al actual, tal que

$$k_{nuevo} = \gamma k_{ant} \quad (3)$$

Donde γ es el cociente entre la conductividad térmica del material subyacente y el nuevo material.

La minimización del funcional $\psi(\Omega)$ propuesto anteriormente cumple con los objetivos propuestos en este trabajo, ya que: (i) la minimización de la energía potencial total definirá la topología óptima que menor cantidad de calor conduce y (ii) el problema de maximizar la disipación de calor en forma de radiación hacia el espacio es equivalente, bajo las hipótesis enunciadas anteriormente, a maximizar la superficie expuesta (representada por el término $\lambda |\Omega|$). Por lo tanto, entre estos dos

factores existe una competencia, donde la primera parte intentará *minimizar* la superficie de conducción y, a su vez, el último término intentará maximizar la superficie expuesta.

La derivada topológica para el funcional formulado anteriormente está dada por [4]:

$$D_r(\hat{x}) = -k \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \nabla \theta(\hat{x}) \cdot \nabla \theta(\hat{x}) + \lambda \quad (4)$$

Cabe destacar que la derivada topológica es un campo escalar que depende de la temperatura asociada al dominio original de proyecto (sin perturbación) y del parámetro γ que representa la magnitud de la perturbación que se desea introducir.

De los algoritmos disponibles en la literatura especializada, se empleará uno especialmente diseñado para ser utilizado conjuntamente con derivada topológica. Una descripción completa y detallada de este algoritmo puede ser encontrada en [5, 9].

3.1 Modelo computacional y optimización

El dominio original de proyecto, corresponde al del aislador térmico, Fig. 1, pero considerándolo como un cilindro de sección anular macizo. El material utilizado durante el procedimiento de optimización es el INCONEL 600. Las condiciones de contorno establecidas en régimen estacionario durante el tiempo de operación del motor son:

- Temperatura prescrita de $\bar{\theta} = 60^\circ\text{C}$ en la interface aislador térmico-válvula-proximal.
- Flujo térmico prescrito de $\bar{q} = 28\text{Watt/mm}^2$ en la zona del motor que está en contacto con el lecho catalítico.

Por razones económicas se desea minimizar el volumen de material, para la producción del motor; por lo tanto, para el procedimiento de optimización se considerará la introducción de vacíos ($\gamma = 0$) en vez de un nuevo material. El dominio del modelo computacional y sus condiciones de contorno son mostrados en la Fig. 6.

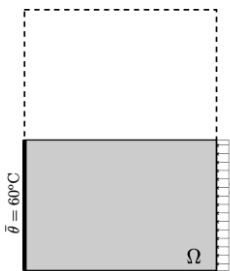


Figura 6. Modelo

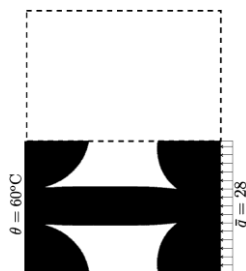


Figura 7. Resultado

La Fig. 7, muestra el resultado final obtenido luego de 73 iteraciones del algoritmo de optimización. La zona sombreada representa al material INCONEL 600, mientras que la parte blanca significa vacío. Este resultado muestra un volumen final reducido a un 70% respecto del volumen inicial.

3.2 Interpretación de resultados

El resultado mostrado en la Fig. 7, representa la topología óptima, bajo las hipótesis utilizadas, del aislador térmico desde el punto de vista de la transferencia estacionaria de calor, Ec. (2). Por lo tanto, la configuración obtenida corresponde a un mínimo local del funcional mostrado en Ec. (1). Se constata que la topología obtenida presenta una gran superficie expuesta (disipación de calor por radiación) y una región de menor tamaño (constituida por una barra de sección no uniforme) por donde se realiza la conducción del calor generado. En la Fig. 8 se muestra la configuración final del aislador térmico optimizado.

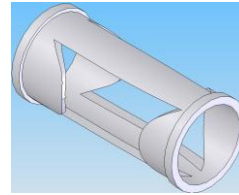


Figura 8. Solución teórica.

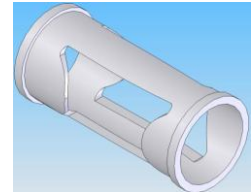


Figura 9. Solución de ingeniería.

3.3 Validación estructural del resultado

El resultado anterior corresponde a la topología óptima del aislador térmico bajo las condiciones de transferencia estacionaria de calor. Este análisis por sí mismo no es aplicable a un desarrollo tecnológico, ya que este tipo de componente debe cumplir con ciertos criterios de resistencia estructural. Por lo tanto, en esta sección, se procede a validar estructuralmente el componente optimizado.

Se propone una solución de ingeniería basada en la solución teórica. En la Fig. 9 se muestra la configuración adoptada. Durante el régimen de operación del vehículo, el aislador térmico debe soportar una carga estática equivalente de 14.7N a una distancia de 32 mm medida desde la interface con el lecho catalítico. El componente estructural optimizado fue ensayado computacionalmente bajo las condiciones antes mencionadas para dos posiciones diferentes del vector de cargas, (i) dirección vertical y (ii) dirección horizontal, el mismo resultó en que la tensión de von Mises es levemente superior a la del material. En las Figs. 10 y 11 se muestran los estados de tensión correspondientes a las cargas descritas previamente, obtenidos por elementos finitos.

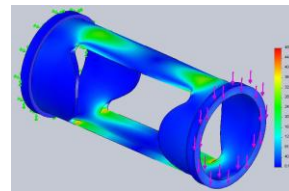


Figura 10. Tensión de Von Mises en MPa: max. 485.0 (rojo) – min. 0.1 (azul). Aplicación de la carga vertical.

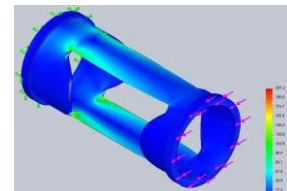


Figura 11. Tensiones en MPa: max. 207.0 (rojo) – min. 0.01 (azul). Aplicación de la carga horizontal.

4. ENSAYOS DE FIRING TEST

Para realizar los ensayos se utilizó un conjunto REA (*Reaction Engine Assembly*). Cada REA puede considerarse integrado por una válvula de control de empuje (*Thrust Control Valve*) y una cámara donde se genera el empuje (*Thruster Chamber*), Fig. 12.

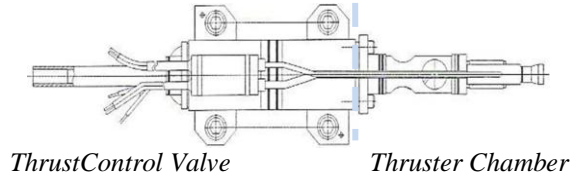


Figura 12: Configuración del REA

El motor de reacción (REA) ensayado fue desarrollado y construido por CIA-IUA bajo convenio con CONAE. Particularmente en los ensayos se utilizó la válvula de control N°3 y la cámara de empuje N°3, por lo que se designó al conjunto REA N°3.

4.1 Descripción de las facilidades para ensayos.

4.1.1. Banco de medición, de alimentación y sensores utilizados.

Este banco se utiliza para medir el empuje generado por el REA y las temperaturas de diversos puntos críticos elegidos convenientemente. El REA fue montado sobre un soporte desplazable en el plano horizontal, un grado de libertad, solidario a una celda de carga, Fig. 13.

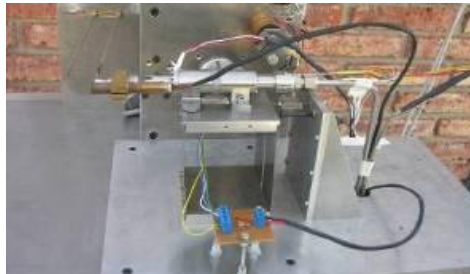


Figura 13: Montaje del REA

Todo el conjunto se apoyó y fijó a una estructura de tubos rectangulares, configurando de este modo el “banco de medición de empuje”.

También se dispuso del denominado “banco de alimentación”, el mismo se utiliza para suministrar hidracina al REA, filtrada y en condiciones adecuadas de presión. Su accionamiento es a distancia a través de una PC y requiere también de maniobras de tipo manual.

Los diferentes sensores utilizados en el ensayo se detallan en la Tabla 3

Tabla 3 – Sensores utilizados

SENSOR	MARCA	MODELO	RANGO	CANT
Celda de carga	Futek	LSB 200 (L2357)	2,5 N	1
Transductor de presión	Taber	2403 SAT	50 bar	1
Termocuplas	Novasen S.A.	Tipo “K”	1000 °C	3
Termo-	Novasen	PT 100	200 °C	2

resistencias	S.A.			
Caudalimetro	Rheonik	RHM015	10 gr/s	1

4.1.2. Datos registrados

Durante el ensayo se midieron y registraron los siguientes parámetros:

Tabla 4 – Parámetros medidos

DESCRIPCION	UNIDAD
Empuje (E)	Newton
Presión de ingreso de combustible (PIC)	Psi
Presión del presurizante, N2 (PP)	Psi
Caudal de combustible (CC)	gr/s
Temperatura del lecho catalítico (TLC)	Celsius
Temperatura de la tobera (TT)	Celsius
Temperatura de gases (TG)	Celsius
Temperatura de la válvula (TV)	Celsius
Temperatura de ingreso de combustible (TIC)	Celsius

4.2. Ejecución de los Ensayos

La ejecución y conducción de los ensayos fue realizada por personal especialmente entrenado. Se contó además con grupos de apoyo para la integración de los diversos componentes del sistema previos a las pruebas, manipulación de sustancias peligrosas, Higiene y Seguridad [11], operadores del sistema de adquisición, etc.

4.2.1 Protocolo y secuencia de ensayos

Todo el proceso, desde la preparación y puesta a punto hasta la limpieza final del REA, se lleva a cabo siguiendo un protocolo detallado para evitar cometer errores.

Finalizada la preparación y puesta a punto del equipamiento, se realizaron 5 disparos de precalentamiento, utilizando el modo automático del software “*Hidraccina.vi*”. A partir de aquí, se continuó el ensayo siguiendo las secuencias establecidas por el protocolo antes mencionado.

El tiempo total de funcionamiento del REA (suma de tiempos ON x N° de pulsos) durante el ensayo fue de **1050 segundos**. La masa total de hidracina que atravesó el lecho catalítico es el promedio del caudal observado (0,58 gr/s) por el tiempo de funcionamiento mencionado en el párrafo precedente, lo que arroja una masa de 609gr de hidracina.

4.2.3 Datos obtenidos

Los datos recolectados y luego analizados, fueron filtrados y procesados para obtener diferentes gráficos, siendo de interés para este trabajo, el que se muestra a continuación.

En la Fig. 14, se observa que la temperatura del lecho catalítico crece y se estabiliza alrededor de los 600 °C, alcanzando un valor máximo de 620 °C aproximadamente. Este valor es importante porque tiene efectos sobre la vida útil del catalizador. Por otro lado, se observa también que la temperatura de la válvula no superó el valor de 200 °C, asegurando que la integridad de los sellos blandos de la válvula no es puesta en riesgo. También, se visualiza el efecto refrigerante que produce

el combustible al fluir por el asiento de la válvula Downs denotado por el descenso de temperatura en contraposición con lo que ocurre en el lecho catalítico.

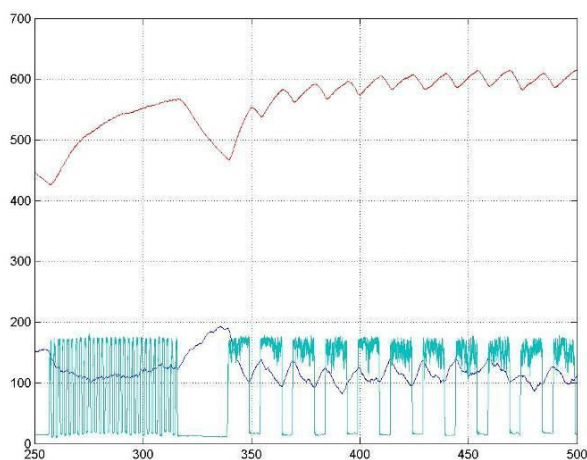


Figura 14: Empuje/temperatura del lecho catalítico / temperatura de la válvula vs. tiempo [$10^{-2}N/^{\circ}C/^{\circ}C$ vs. s]

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, fueron presentados los resultados de un análisis térmico-mecánico integral, desde la modelización mediante elementos discretos, la optimización de uno de sus elementos, y el posterior ensayo, lo que conduce a las siguientes conclusiones:

Se observa que los valores de las simulaciones obtenidas mediante la analogía termoeléctrica, son los esperados y que es posible predecir valores en forma muy aproximada de manera conservadora. Esto abre la posibilidad de realizar una modelización más detallada, haciendo consideraciones más aproximadas a las reales para profundizar en la utilización del método y producir simulaciones más exactas.

La función desempeño formulada en el proceso de optimización, entregó una topología que tiene un volumen del 70% del original y fue evaluada estructuralmente para cargas del régimen de operación, con resultados satisfactorios. Cabe aclarar, que durante la formulación del problema, sólo se consideró el aspecto térmico. Por ello no puede afirmarse que la configuración obtenida sea óptima desde el punto de vista mecánico. Esta situación está siendo estudiada y será motivo de futuros trabajos de investigación y desarrollo tecnológico.

Finalmente, haciendo una evaluación del ensayo se concluye que fue exitoso, ya que el REA no sufrió daños o roturas durante su ejecución y los parámetros medidos resultan muy próximos a los valores establecidos y calculados en el diseño.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue desarrollada en el marco del proyecto de investigación "Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente" UTN-FRC y apoyada financieramente por el

CONICET. Los autores agradecen a estas instituciones el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] Salomone, J. E. - Jazni, J. E.- Lagier, S.- Cova, W.J.D.- Gonzalez, G. J.- Yasielski, R. *Desarrollo de motor monopropelente de 1,5 N Para control de actitud y órbita de satélites* – AATE 2007
- [2] Cagliolo, C. M. - Salomone, J. E. Jazni, J. E. – Lagier, S. *Análisis del comportamiento térmico del conducto de alimentación de combustible en motores monopropelente de bajo empuje* – AATE 2007
- [3] *Hydrazine Handbook*. Rocket Research Company. Redmond, USA.
- [4] Amstutz S. *Sensitivity analysis with respect to a local perturbation of the material property*. *Asymptot. Anal.* 49 (1–2),87–108, 2006.
- [5] Amstutz S, Andra H. *A new algorithm for topology optimization using a level-set method*. *J. Comput. Phys.* 216(2),573– 588, 2006.
- [6] Feijóo G. *A new method in inverse scattering based on the topological derivative*. *Inverse Probl.* 20(6),1819–1840, 2004.
- [7] Larrabide I., Feijóo R.A., Novotny A.A., Taroco E. *Topological derivative: a tool for image processing*. *Comput Struct* 86(13– 14),1386–1403, 2008.
- [8] Sokółowski J., Zochowski A. *On the topological derivatives in shape optimization*. *SIAM J. Control Optim.* 37(4),1251–1272, 1999.
- [9] Allaire G., Gournay F., Jouve F., Toader A. *Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level-set method*. *Control Cybern.* 34(1),59–80, 2005.
- [10] Yunus A. Çengel. (2004). *Transferencia de Calor*. Segunda Edición, McGraw-Hill, 2004.
- [11] González, G. J.- Jazni, J.E.- Cova, W.J. D. Salomone, J.E.- Yasielski, R. *Manejo de hidracina – almacenamiento y transferencia a contenedores y vehículos*- AATE 2007.