

ANALISIS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA DEL AISLADOR TERMICO OPTIMIZADO DE UN MOTOR MONOPROPELENTE

**Salomone, Javier E. (*) – Giusti, Sebastian M.
Sanna, Alexis D. - Decicco, Carlos D.**

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba,
GIDMA–Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecánica Aplicada.
Maestro Marcelo López y Cruz Roja Argentina – CP(5016) Córdoba – Argentina.
(*) Tel. 0351-5986010. Int 15 - e-mail: jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar*

Palabras Clave: Motor monopropelente, Simulación computacional, Transferencia térmica.

Resumen. Los motores monopropelentes basan su funcionamiento en la descomposición catalítica del combustible, la misma genera calor y lo gasifica. Los gases se conducen a través de una tobera con el fin de generar su apropiada expansión y su consecuente acción. El diseño de la interface entre la válvula de control de suministro de combustible y el lecho catalítico es de fundamental importancia, ya que de esto depende la duración de los sellos blandos y, por ende, la misión.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos del análisis del comportamiento térmico del motor, en estado transitorio, a los fines de establecer si el diseño de la interface entre la válvula y el lecho catalítico, tiene la capacidad de disipar tanto calor como recibe, y, en caso de no hacerlo, el tiempo estimado límite para el cual la acumulación de calor repercute en el correcto funcionamiento del motor. Por lo cual para abordar este problema, es vital conocer con exactitud el modo de operar de los fenómenos que gobiernan el comportamiento del sistema, la influencia de diversos parámetros y su interacción

Los avances en las técnicas computacionales y numéricas nos permiten simular el comportamiento de los elementos constituyentes geoméricamente complejos, tomando todas las consideraciones necesarias, para que las simulaciones representen de manera muy próxima, las condiciones reales de funcionamiento del motor. De esta manera se puede determinar la solución óptima, y así la conveniencia de utilizar una geometría u otra del componente en estudio.

Para las simulaciones se adoptaron distintas configuraciones del aislador térmico ubicado entre la válvula de control y el lecho catalítico, obtenidos de estudios previos, basados en la utilización de técnicas de análisis de sensibilidad topológica. De esta manera se establecen comparaciones de los resultados obtenidos para las distintas formas, en vista al aseguramiento del correcto funcionamiento, con la posibilidad de aprovechar de la mejor manera los recursos disponibles.

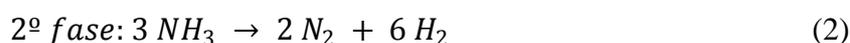
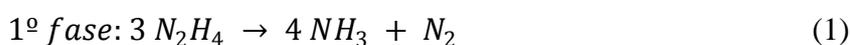
1 INTRODUCCIÓN.

Los motores monopropelentes de bajo empuje son usualmente utilizados como efectores para realizar correcciones de órbita y de actitud de satélites artificiales. En nuestro caso se trata de un satélite del tipo LEO. El presente trabajo representa una continuación del diseño de un motor monopropelente de 1.5 N de empuje presentados en [Salomone et al. 2007, 2011, 2013](#).

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. Ya en el interior de la cámara, se encuentra el inyector que distribuye el propelente 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:

La hidracina en presencia del catalizador se descompone en 2 fases [Cagliolo, et al. 2007](#):



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 siendo esta fase una reacción de tipo endotérmica. La liberación de energía neta durante la descomposición depende fundamentalmente del porcentaje de amoníaco disociado y la podemos calcular como:

$$\Delta H = 3484 - (1910 * X) \text{ J/g} \quad (3)$$

donde X es el porcentaje de amoníaco disociado. Según reportado en [Cagliolo, et al. 2007](#), la cantidad de amoníaco disociado alcanza al 40%, cantidad esta que depende de la longitud del lecho catalítico. Así se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta H = 3484 - (1910 * 0,4) = 2720 \text{ J/g} \quad (4)$$

El motor en estudio se alimenta con un caudal másico de combustible de 0,8 g/s, por lo que genera en el lecho catalítico la siguiente cantidad de energía por unidad de tiempo:

$$Q = \Delta H . m = 2720 \text{ J/g} * 0,8 \text{ g/s} = 2176 \text{ W} \quad (5)$$

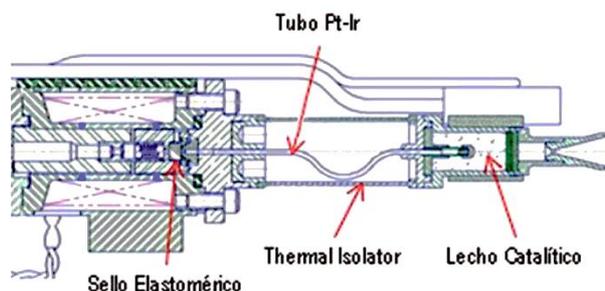


Figura 1. Motor monopropelente – Corte longitudinal.

La Figura 1 muestra un corte del motor, donde es posible visualizar los elementos componentes de la válvula proximal, elastómero, aislador térmico, tubo de Pt-Ir y lecho catalítico. El calor generado en el lecho catalítico es disipado mediante: (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 proximal que conforma el conjunto motor. Alojada en la misma se encuentra el sello elastomérico que es sensible a temperaturas elevadas y es el elemento que se pretende proteger realizando un diseño óptimo del aislador térmico.

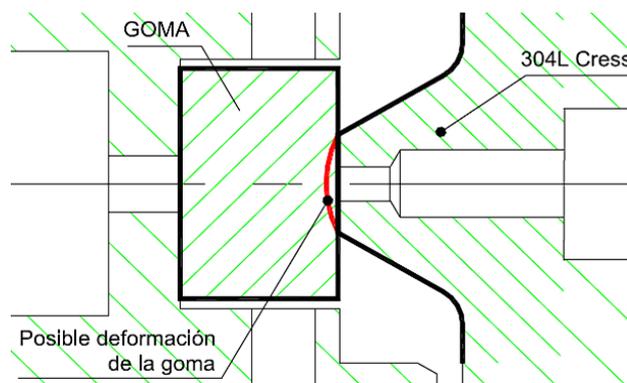


Figura 2. Detalle del cierre de la válvula.

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis térmico de la respuesta transitoria del motor en conjunto a través de la simulación computacional; y de esta manera conocer el comportamiento de los componentes como parte integral de un sistema y su desempeño bajo las solicitaciones establecidas. Así como también el de verificar la efectividad del aislador térmico en su función como disipador de la energía generada en la combustión, y protector de los sellos blandos.

Para tal fin se presentan cuatro configuraciones distintas del aislador, desarrolladas a partir de diversos estudios [Salomone et al. 2007, 2011, 2013](#). En primer lugar consideramos un cilindro hueco sin perturbaciones, luego dos aisladores con perforaciones en forma de círculos, en un primer caso; y en forma de triángulos después. El tamaño y la disposición de estas perforaciones fue dispuesto en sucesivos estudios. Por último se analiza la utilización de una geometría obtenida a través de un proceso de optimización.

La configuración del aislador térmico presentado en [Salomone et al. 2013](#) se obtuvo mediante el uso de una técnica de optimización topológica basada en los conceptos de derivada topológica [Sokolowski & Zochowski 1999](#). El algoritmo de optimización utilizado fue desarrollado en [Amstutz 2006](#) y su aplicación a los problemas de ingeniería, fue posible con el desarrollo de una interfaz computacional creada a tal fin en [Decicco & Giusti 2012](#).

La principal característica de la técnica utilizada es que permite establecer la sensibilidad al cambio de topología en cada punto del dominio de proyecto. 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.

En este sentido, la noción de un cambio topológico comentada anteriormente, puede ser extendida para estudiar cómo dos materiales diferentes interactúan entre sí, permitiendo establecer la sensibilidad a un cambio en las propiedades constitutivas del material subyacente en cada punto del dominio de proyecto.

2 METODOLOGÍA.

Para efectuar las simulaciones computacionales se utilizará un programa de resolución de problemas por el método de elementos finitos de propósito general. De esta manera podremos discretizar el dominio a los fines de resolver un problema del medio continuo. Así se dispondrá de un modelo simplificado, tratando siempre de asemejarse lo más posible a la

situación real. En una primera instancia se importará el diseño del conjunto, omitiendo algunas partes del motor, ya sea porque no afecta de gran manera al estudio en cuestión, o porque su función puede reemplazarse con la aplicación de condiciones de contorno (como las mantas calefactoras). Luego, se asignará las propiedades correspondientes a cada material, lo cual repercutirá en la respuesta del mismo ante las sollicitaciones. Entre ellas encontramos la densidad, el calor específico, entre otras. Para las cuales se considerará su variación en función de la temperatura.

En vistas a considerar la relación entre las partes constituyentes del modelo, así como también la que existe entre ellas y el medio; se utilizarán interacciones tales como contacto entre partes, condición de radiación, de capa superficial (para simular la convección).

Así mismo se dispondrán de las temperaturas previstas y una condición de carga térmica denominada “flujo de cuerpo”, para emular la reacción química de descomposición de la hidracina.

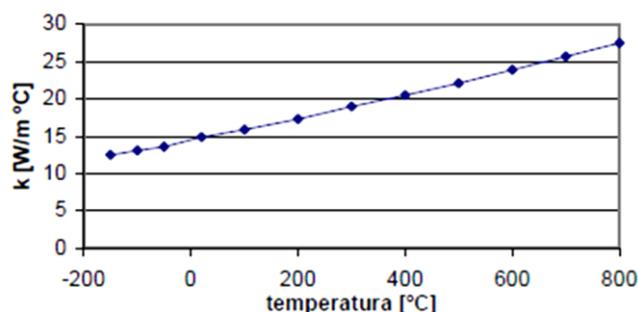
El funcionamiento de los motores de este tipo es por pulsos, por lo que la condición de carga será aplicada de esa manera. Para ello se dividirá el tiempo total de la simulación en partes, a los fines de considerar los intervalos en que se da la reacción, y aquellos en que no. De esta manera obtendremos resultados que nos muestren el comportamiento transitorio del motor y sus componentes en las secuencias normalizadas de actuación.

El material con que se construye el aislador térmico y las piezas en estudio es INCONEL 600. Tanto la emisividad como la conductividad térmica del material presentan una dependencia con la temperatura, ver Figura 3.

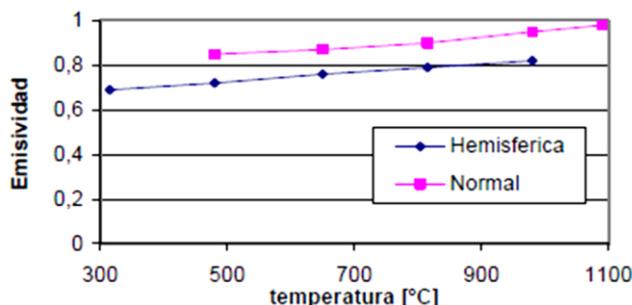
Se considerará como fuente térmica el calor generado por la reacción química. Para determinar la pérdida de calor con el medio, se asumen los siguientes valores de temperatura:

- $T_{amb} = 353K$, y
- $T_{vac} = 10K$.

La transferencia de calor por radiación se supondrá que se realiza solamente por la cara expuesta al espacio exterior de todos los componentes.



(a) Conductividad térmica.



(b) Emisividad.

Figura 3. Propiedades del INCONEL 600 en función de la temperatura.

La figura 4 muestra una tabla con los datos de las solicitaciones normalizadas en los ensayos, las cuales serán objeto de las sucesivas simulaciones a realizar. En la misma se puede observar el tiempo de apertura de la válvula (On Time), y el tiempo en el cual se encuentra cerrada (Off Time); así como también la cantidad de pulsos a efectuar. Para este estudio se considerarán las secuencias resaltadas en la figura, en virtud de que se desea captar el transitorio. Para su posterior referencia designamos como “A2” a la secuencia 0,1 On – 1,90 Off, y como “B1” a la secuencia 5 On – 0,125 Off.

Sequence	On Time (seconds)	Off Time (seconds)	Number of Pulses	Total Time (seconds)
Burn-In	10	As Required	1	Not Applicable
A	0,05	1,95	200	400
	0,1	1,90	200	400
	60	60	1	120
B	5	0,125	100	512
	15	0,125	1	15
	0,75	0,125	100	88
C	60	----	1	60

Figura 4. Detalle de las secuencias de actuación.

Siendo que parte del motor se encuentra expuesto al espacio exterior, es necesaria la utilización de dos mantas calefactoras (indicadas en la figura); éstas se encuentran ubicadas:

- En el lecho catalítico, para evitar los arranques en frío, prolongando así la vida útil del catalizador que se encuentra en su interior. La misma se fija en 60°C (333K)
- En la válvula posterior, para evitar el congelamiento del mecanismo, esta se fija en 40°C (313K).

Para el modelo computacional, serán consideradas como fuentes de temperatura constante.

En el caso de la manta colocada en el lecho, se espera que la temperatura del mismo ascienda por encima de los 60°C, se considerará que actúa solo en una primera instancia, luego en el proceso de la simulación no será tenida en cuenta. De esta manera podremos contemplar que la descomposición catalítica comienza con una temperatura mínima de 60°C, no siendo así para el caso de la otra manta que permanecerá activada a lo largo de toda la simulación.

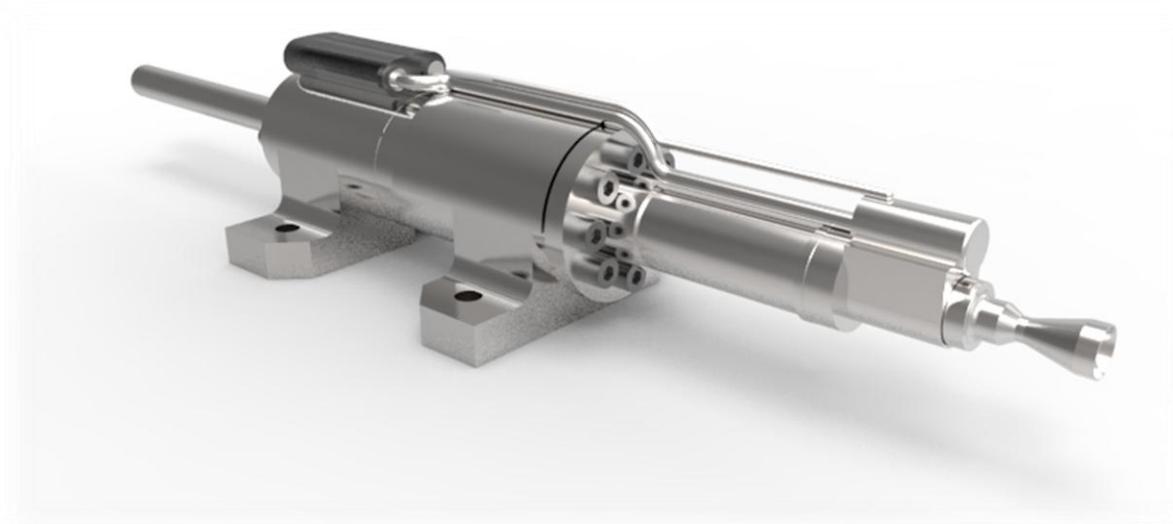


Figura 5. Motor monopropelente.

3 DESARROLLO.

3.1 Modelo computacional.

Para la simulación fue necesario realizar una simplificación del conjunto real y de su funcionamiento, y de esta forma disminuir los recursos computacionales necesarios. Esta consideración fue aplicada tratando siempre de utilizar condiciones próximas a las reales.

En la figura siguiente se puede apreciar el modelo computacional simplificado.

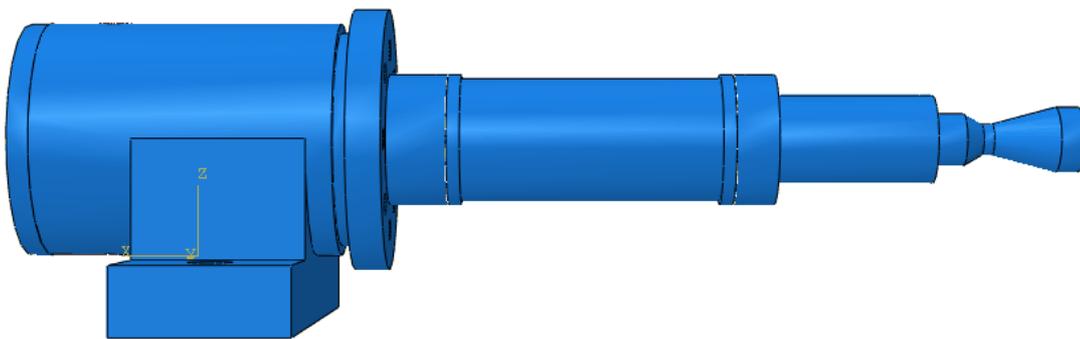


Figura 6. Modelo simplificado del motor.

La figura 7 muestra la malla de elementos finitos a utilizar en la simulación. Se utilizarán tetraedros con diez nodos y funciones de forma cuadráticas. El número de elementos variará para cada modelo debido a las diferentes geometrías de los aisladores a estudiar, pero oscilan entre los 55700 y los 58400 elementos dependiendo el caso. La distribución de los elementos es proporcional al tamaño de las partes, y en forma conveniente al foco de análisis.

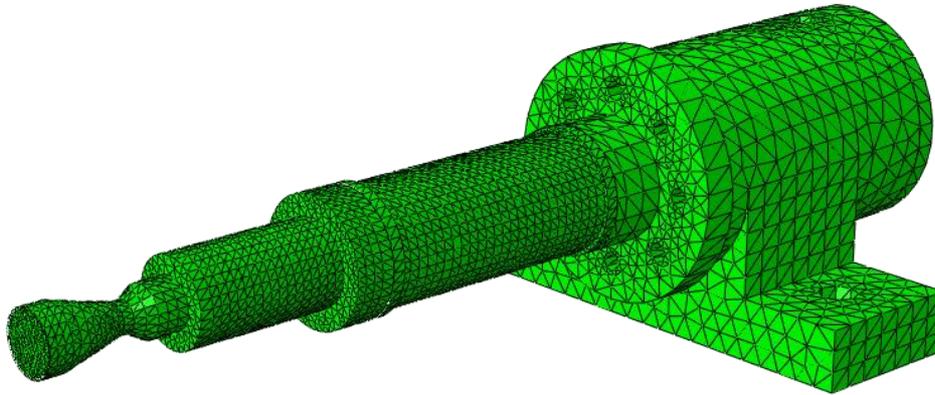


Figura 7. Mallado

Siendo que el interior del lecho catalítico se encuentra ocupado por una masa porosa de alúmina que sirve como soporte del catalizador, se representa la misma mediante un sólido de características térmicas similares. Es a esta masa a la cual se le aplica el flujo térmico por unidad de volumen (*body flux*) generado por la descomposición de la hidracina. En la siguiente figura se distingue la masa representativa de la alúmina.

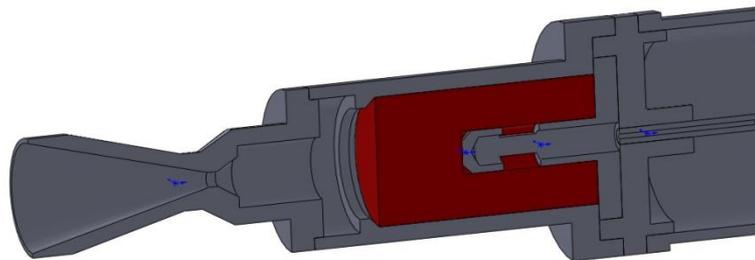


Figura 8. Masa representativa dentro del lecho catalítico.

Debido a que un alto porcentaje del calor generado en la descomposición es evacuado a través de los gases expulsados por la tobera, es preciso disponer de una masa con características térmicas similares a los mismos, a través de la cual se disipa dicha energía térmica al exterior.

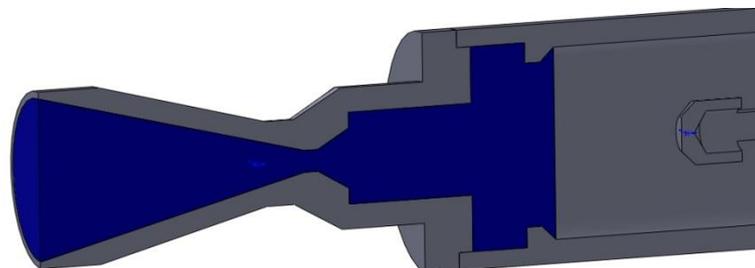


Figura 9. Masa representativa de los gases de escape.

Para simular la transferencia de calor dada por la convección de los gases a las superficies en contacto con los mismos, se utiliza una condición de interacción denominada *surface film condition*. Así mismo, se coloca una interacción de contacto entre la geometría representativa de la alúmina y la de los gases.

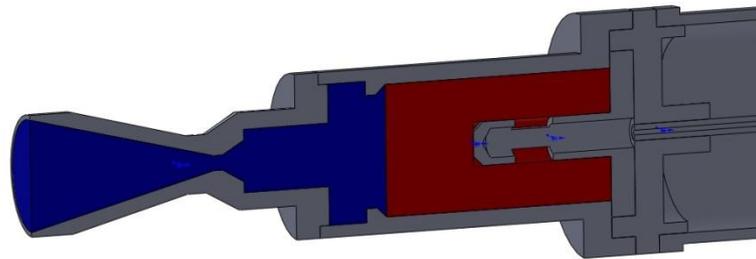


Figura 10. Interacción entre las masas representativas y el medio.

En el modelo computacional propuesto para las simulaciones se establecieron las condiciones de contorno presentadas en la figura 10. Se hace uso de software comercial de resolución de problemas mediante el método de elementos finitos, explotando técnicas computacionales y numéricas, las cuales nos permiten simular el comportamiento de los elementos constituyentes geoméricamente complejos, tomando todas las consideraciones necesarias, para que las simulaciones representen de manera muy próxima, las condiciones reales de funcionamiento del motor.

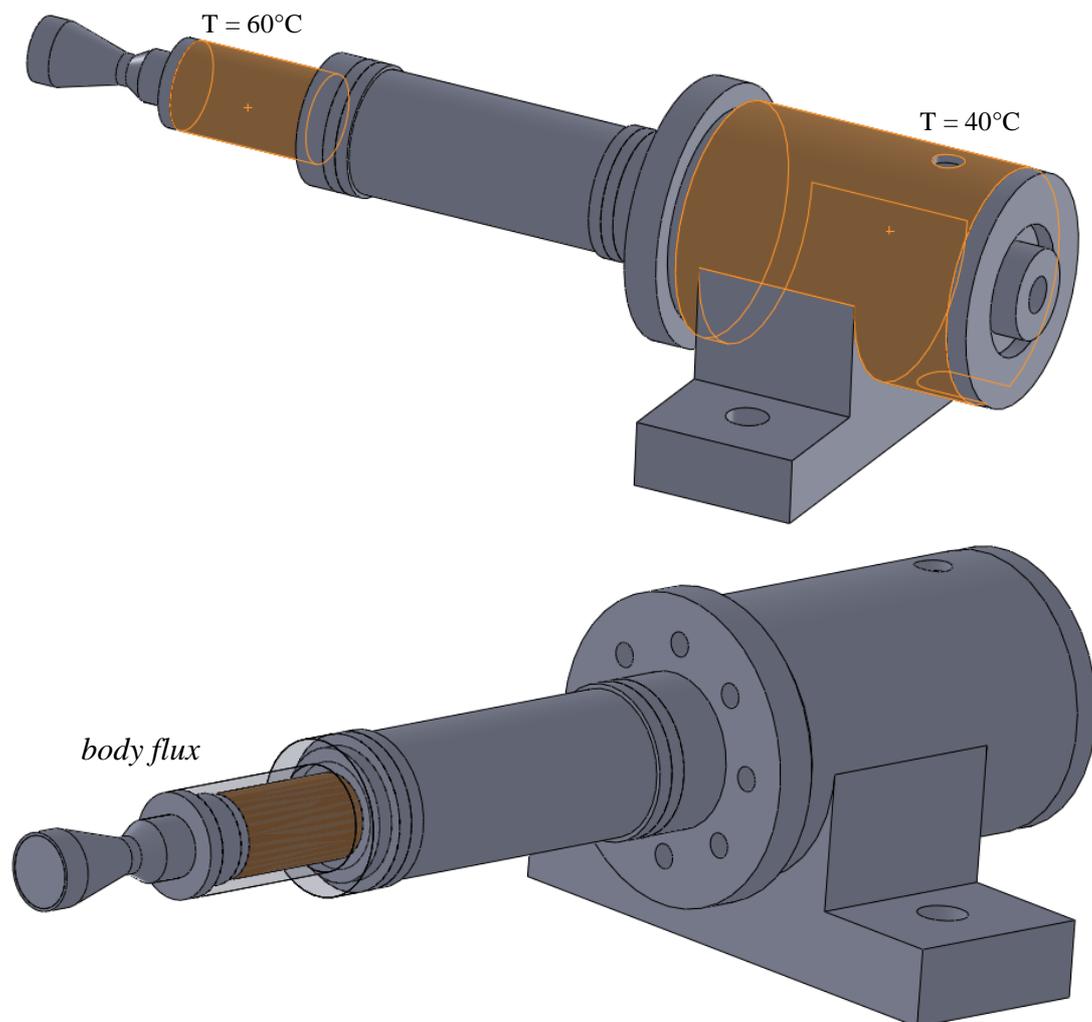


Figura 11. Condiciones de contorno.

Las condiciones de borde impuestas serán:

- i) 40°C en la parte exterior de la válvula;
- ii) 60°C en la superficie exterior del lecho catalítico;
- iii) se establece una temperatura exterior de -263°C;
- iv) dado que la operación de este tipo de motores es por pulsos, se adoptará un flujo de cuerpo aplicado al volumen dentro del lecho catalítico, como se explicó previamente.

Es conocido que existe un retardo en el inicio de la reacción, lo cual afecta la curva de carga del flujo de calor. Dada la complejidad de los fenómenos físicos intervinientes, tanto en la reacción, como en la apertura y cierre de válvula y en la circulación de la hidracina hasta su ingreso al lecho, no se contemplará este efecto y la aplicación de la carga será de manera instantánea.

Conociendo que se trata de un estudio transitorio, es de suma importancia la correcta selección de los incrementos (divisiones del tiempo a considerar para cada pulso) y de la cantidad de iteraciones para cada caso particular. Los mismos serán dispuestos convenientemente según la secuencia de la cual se trate.

Por defecto, el software comienza los análisis con una temperatura de 0 K, por lo que se establece un tiempo anterior al comienzo de las simulaciones al cual denominamos “estabilización de temperatura”. El objetivo de este tiempo es aproximar las condiciones de borde del modelo al entorno espacial al inicio de las secuencias a simular, así como también llevar a la temperatura correspondiente las zonas precalentadas por las mantas ya explicadas.

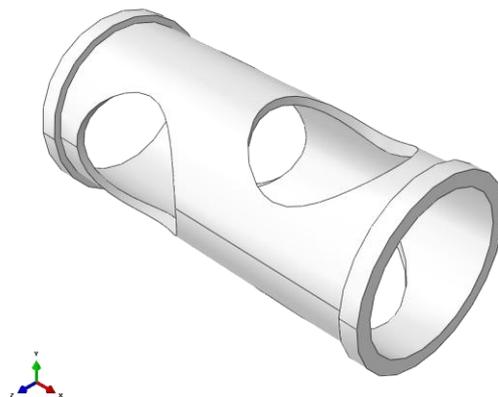
Las secuencias en estudio serán simuladas para cuatro configuraciones de aisladores obtenidas durante el desarrollo del motor. En primer lugar, para un cilindro hueco, sin alteraciones (figura 11.a). Luego para los diseños mostrados en las figuras 11.b,c y d. De la combinación de las secuencias y los aisladores obtendremos los resultados presentados en el siguiente apartado.

a)



Volumen = 562,09 mm³

b)



Volumen = 394,3 mm³

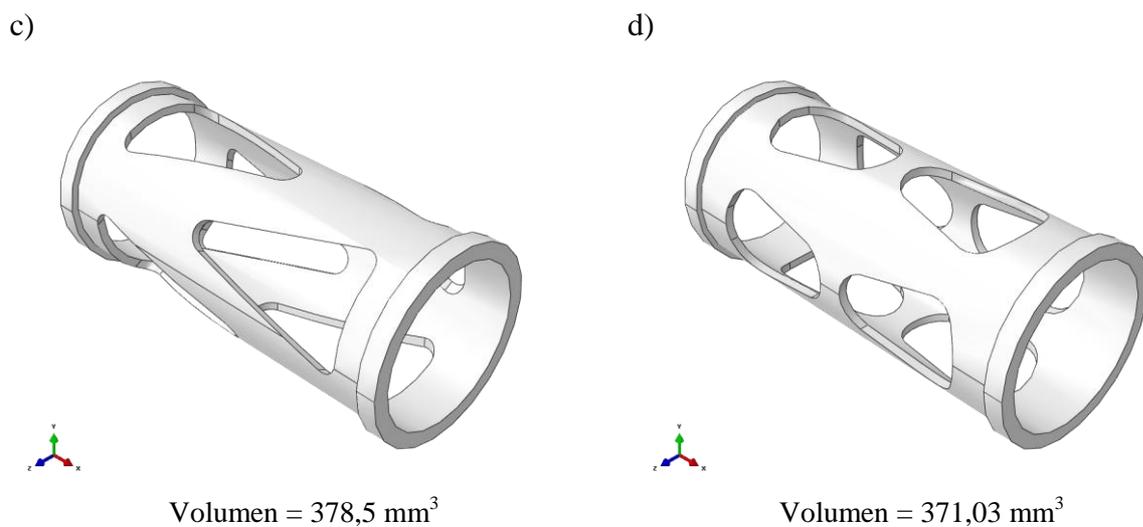


Figura 12. Aisladores térmicos a simular.

El aislador térmico de la figura 12.d) es el resultado de un proceso de optimización utilizando análisis de sensibilidad topológica, como se mencionó en la Sección 1. Para llegar a tal configuración se dispuso del aislador lleno (Figura 12.a), con condiciones de contorno preestablecidas en un software de resolución de problemas por el método de elementos finitos. En virtud de que el proceso de optimización se logra mediante un código de programación, se creó una interfaz computacional a los fines de vincular el algoritmo con el modelo plasmado en la interfaz gráfica del software.

Esta interfaz trabaja manipulando los archivos de datos generados, extrayendo datos de la resolución del problema, y reescribiendo los archivos de entrada, en un proceso iterativo hasta llegar a la distribución óptima del material en el dominio, en base a parámetros establecidos en el código.

Obtenido el modelo optimizado, se ve necesario interpretar dichos resultados para generar una geometría del aislador a estudiar. La figura 13 muestra la configuración arrojada por el algoritmo de optimización (el color celeste se interpreta como vacíos y el gris como material), y el aislador diseñado en base a éste modelo.

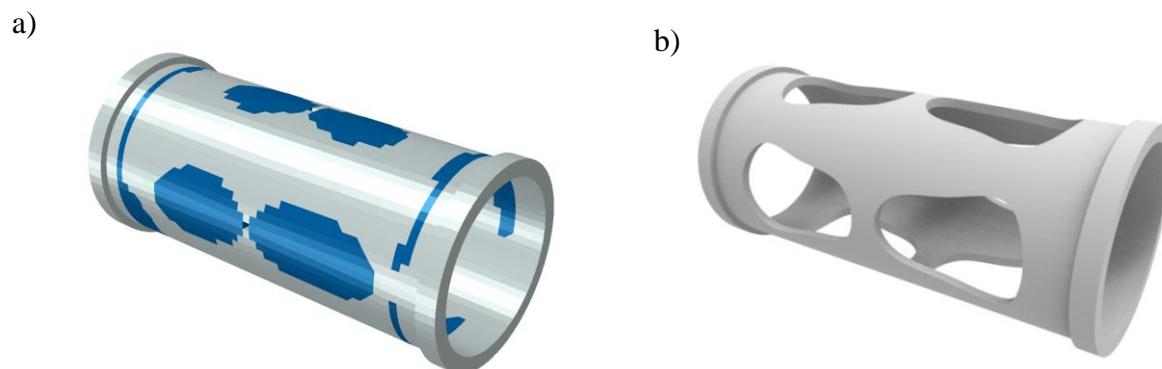


Figura 13. a) Configuración óptima (Volumen final = 80% del volumen inicial). b) Geometría diseñada (Volumen final = 65% del volumen inicial).

3.2 Análisis de los resultados.

En este apartado se muestran los efectos de cada secuencia de pulsos sobre los distintos aisladores a los fines de comparar su comportamiento frente a una misma sollicitación. Así como también curvas que reflejan la temperatura en función del tiempo y de la posición en el motor.

En primer lugar se estudian los resultados obtenidos para la secuencia A2. En ella el tiempo en que la válvula se encuentra abierta (On time) es de 0,1 segundos, y el tiempo en que se encuentra cerrada (Off time), de 1,90 segundos. Con un total de 200 pulsos a simular.

En la figura 14 observamos la temperatura en función del tiempo tomada para dos elementos: uno cercano al asiento de válvula, y otro sobre el lecho catalítico. Las diferentes curvas corresponden a las 4 configuraciones de aisladores en estudio, para su entendimiento pueden consultarse las referencias del gráfico. En la 13, por su parte, se distinguen los elementos seleccionados para la extracción de tales curvas

En la misma figura se muestra una ampliación de las mismas en la cual se distingue el incremento de temperatura en el pulso de actuación, y el decremento en el tiempo en que la válvula se encuentra cerrada. Además se observa el final del tiempo de estabilización de temperatura, y el inicio de la secuencia en estudio.

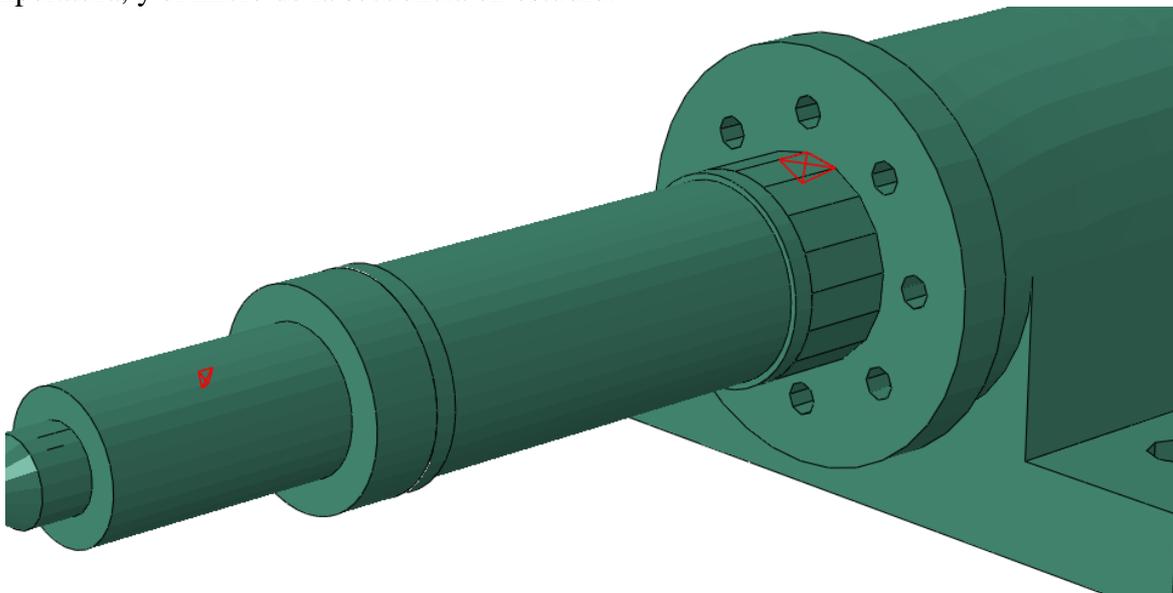


Figura 13. Elementos seleccionados para la construcción de las curvas.

Si bien se observa un comportamiento similar de en cuanto a la evolución de la temperatura, se observa que para el caso del cilindro lleno, la curva de temperatura del lecho catalítico se estabiliza a un valor menor que el resto; en tanto que para el elemento cercano a la válvula la temperatura es mayor. Se deduce de esto, que esta configuración es la que más calor conduce hacia la zona de la válvula.

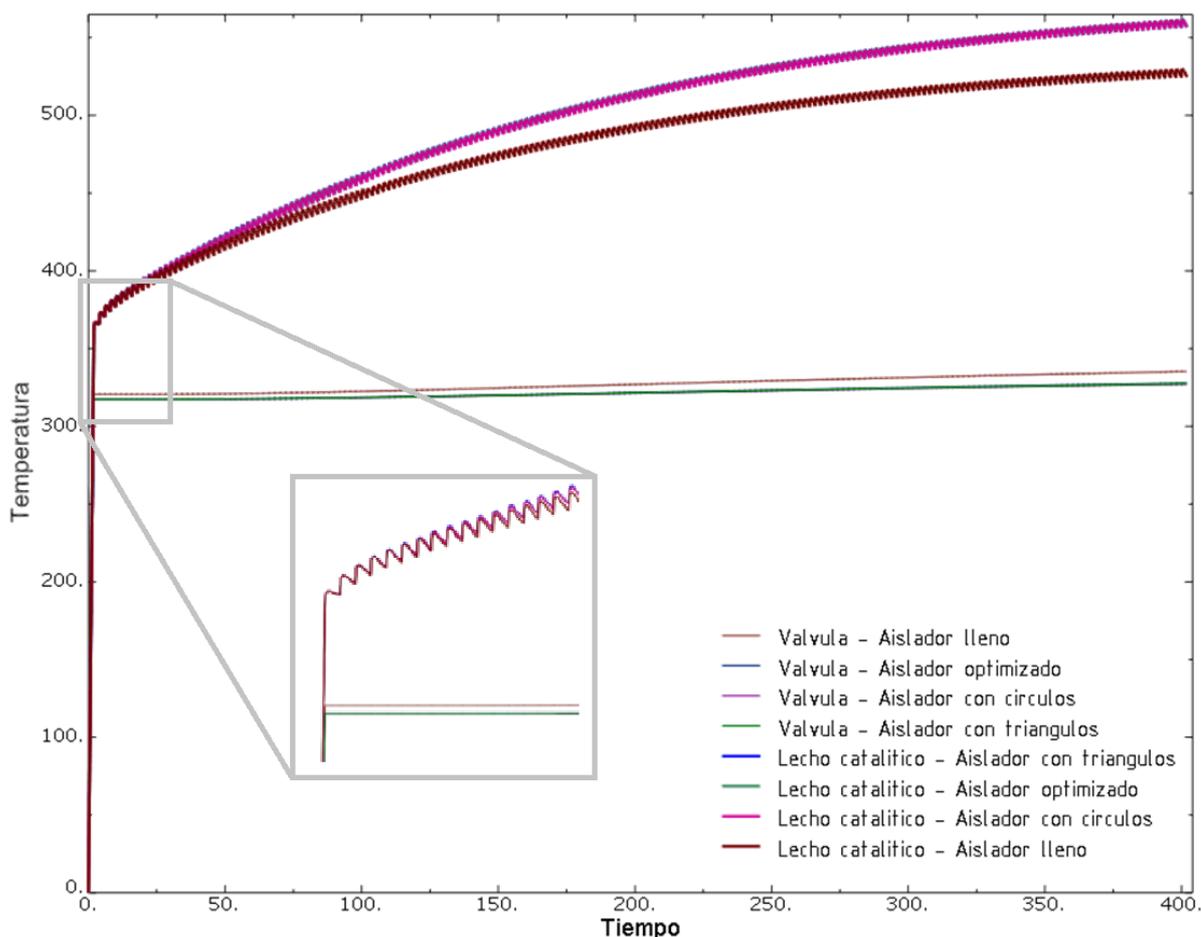


Figura 14. $T = f(t)$ – Secuencia A2. Ampliación de la curva y punto de comienzo de la secuencia.

En la figura 15 se indica la temperatura al final de la secuencia simulada, para cada aislador en análisis. Se distingue lo mencionado anteriormente sobre la mayor temperatura en la cercanía de la válvula para el caso del cilindro lleno, en comparación con el resto.

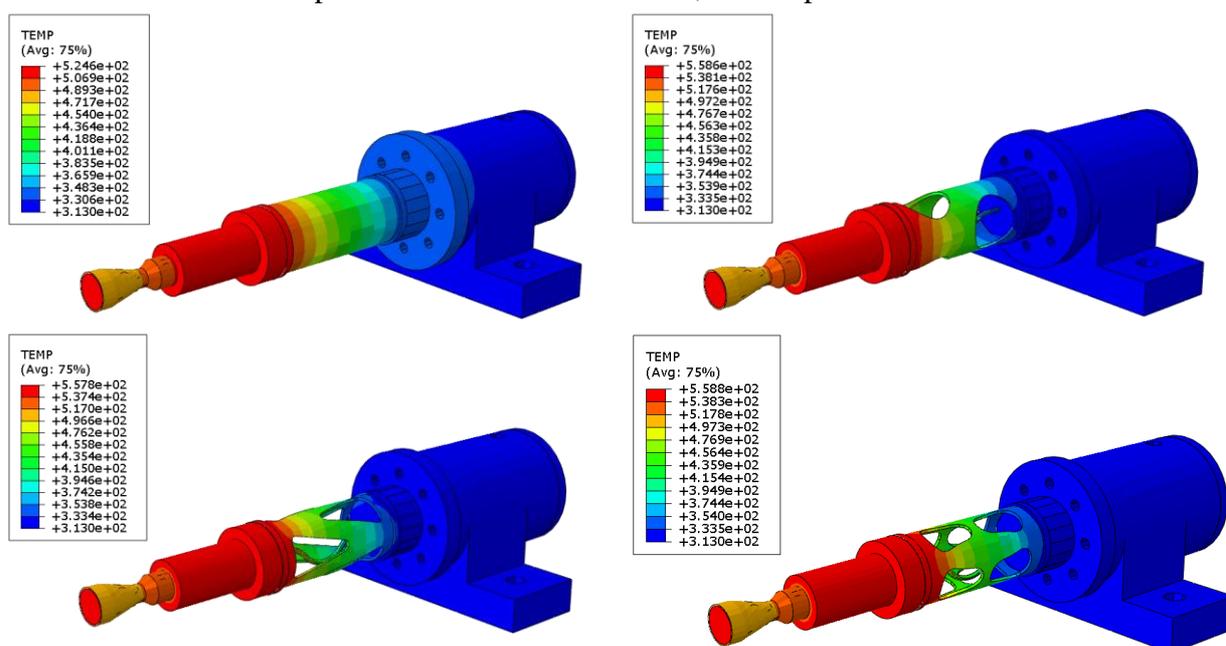


Figura 15. Resultado de las simulaciones. Temperatura.

En virtud de comparar el desempeño de cada geometría propuesta para el aislador, se presenta la siguiente curva (Figura 16). La misma representa la temperatura en función de la posición del punto seleccionado en la longitud del motor, comenzando por la tobera y hasta la zona próxima a la válvula.

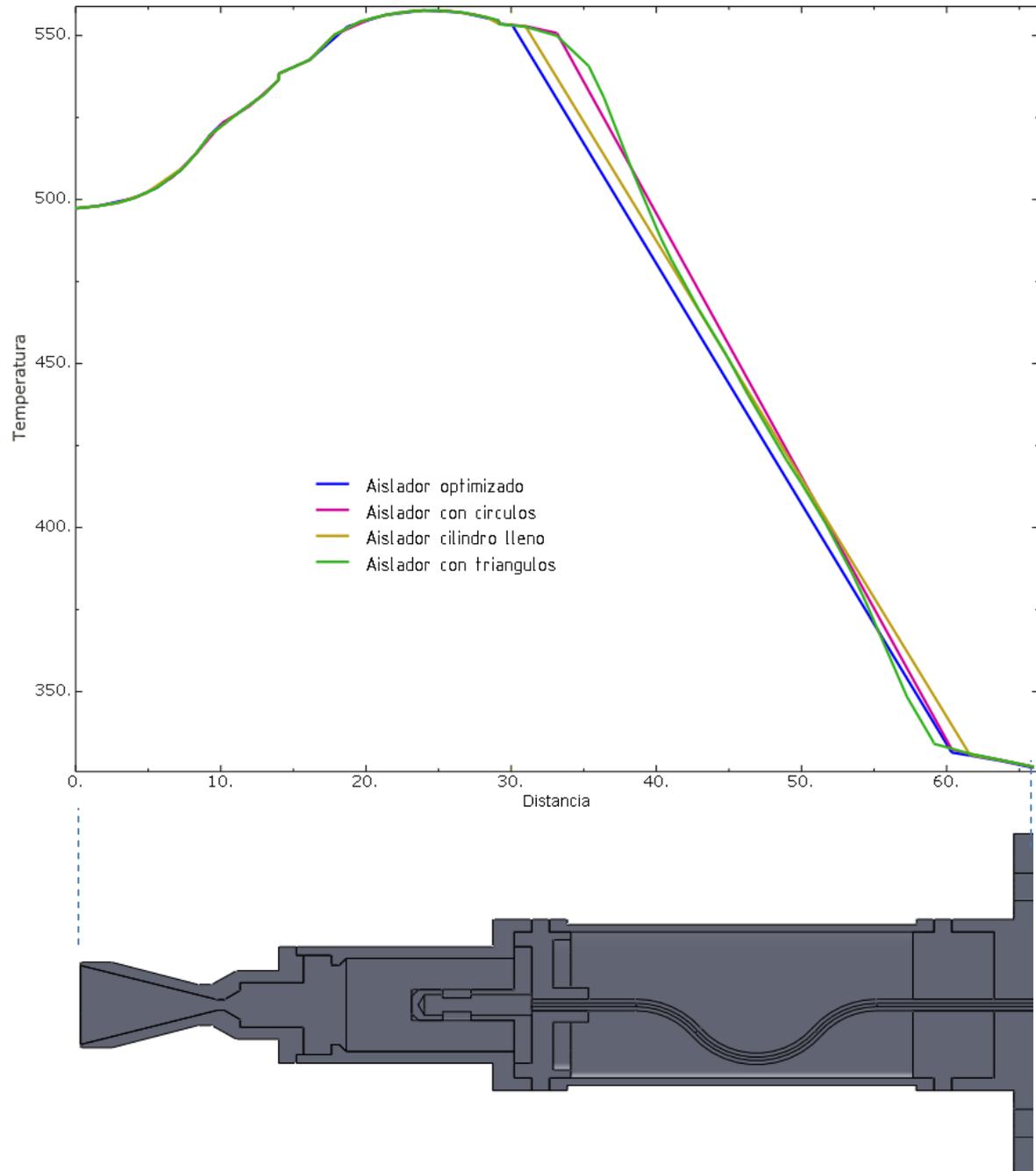


Figura 16. Temperatura en función de la posición – Secuencia A2.

A continuación se analizan los resultados de las simulaciones para la secuencia de pulsos B1. En la misma el tiempo en que la válvula se encuentra abierta (On time) es de 5 segundos, y el tiempo en que se encuentra cerrada (Off time), de 0,125 segundos. Con un total de 100 pulsos a simular.

Análogamente al caso anterior, en la siguiente figura se visualiza la temperatura al final de la secuencia de pulsos, considerando nuevamente las cuatro geometrías en cuestión.

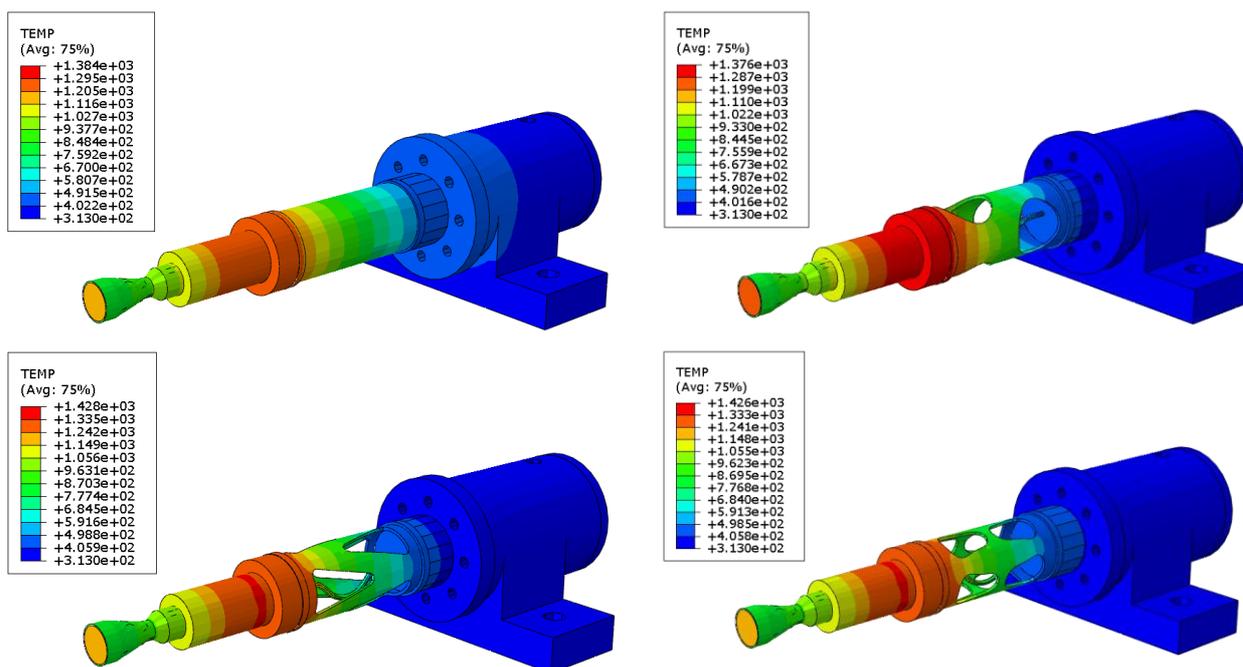


Figura 17. Resultado de las simulaciones. Temperatura.

Las siguientes figuras (19-22) muestran la respuesta de los distintos aisladores ante esta sollicitación térmica, mostrando la temperatura en función del tiempo transcurrido para tres elementos seleccionados. Los mismos se distinguen en la figura 18.

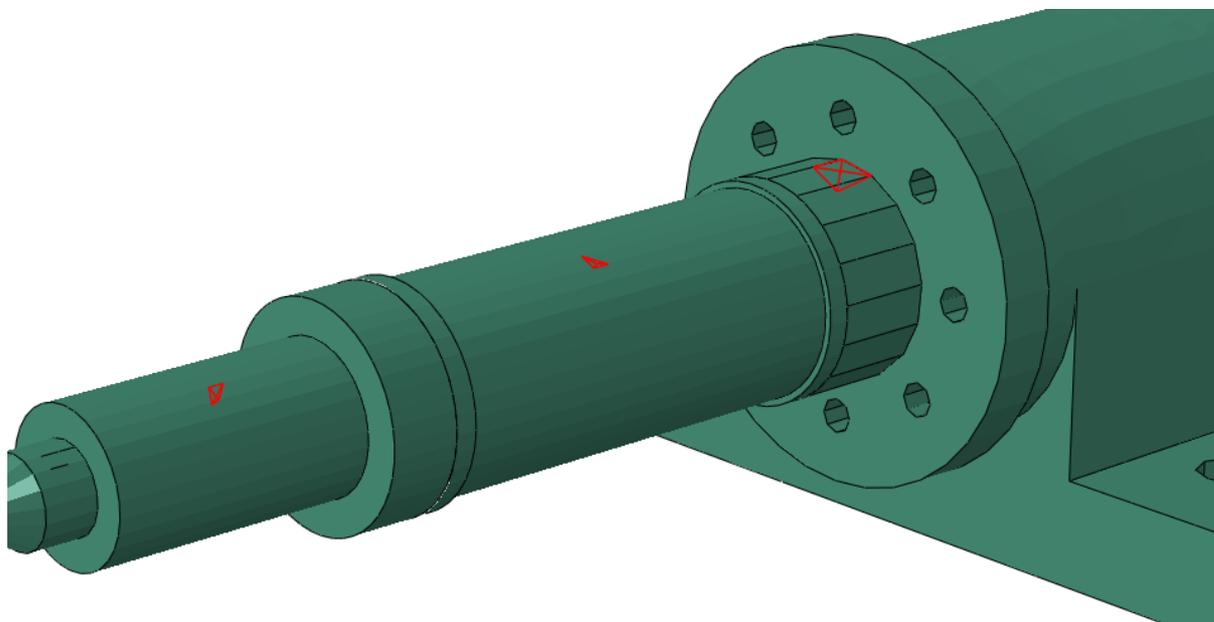


Figura 18. Elementos seleccionados para la construcción de las curvas.

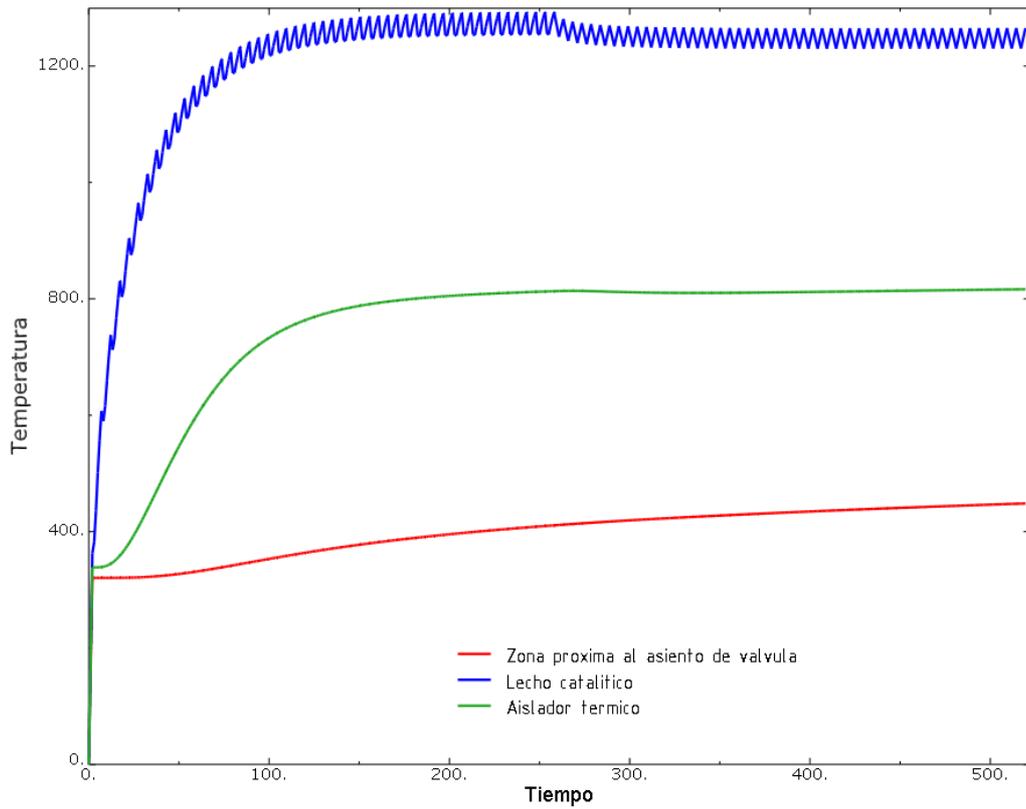


Figura 19. Temperatura en función del tiempo – Aislador de cilindro lleno.

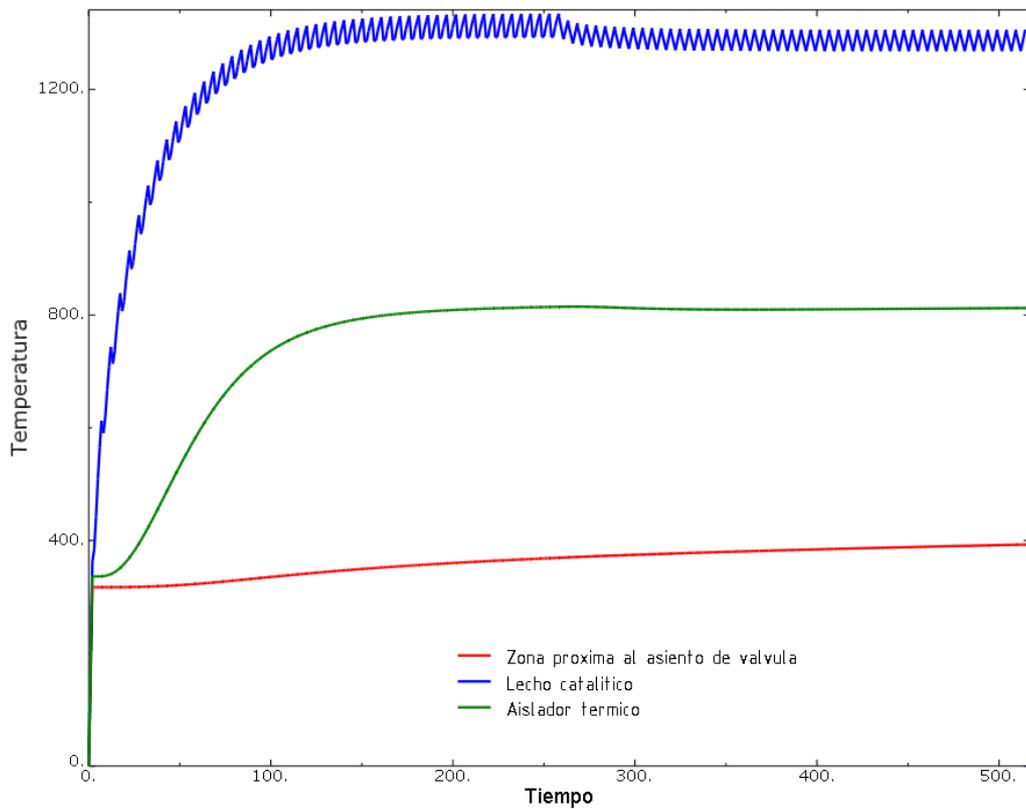


Figura 20. Temperatura en función del tiempo – Aislador con círculos.

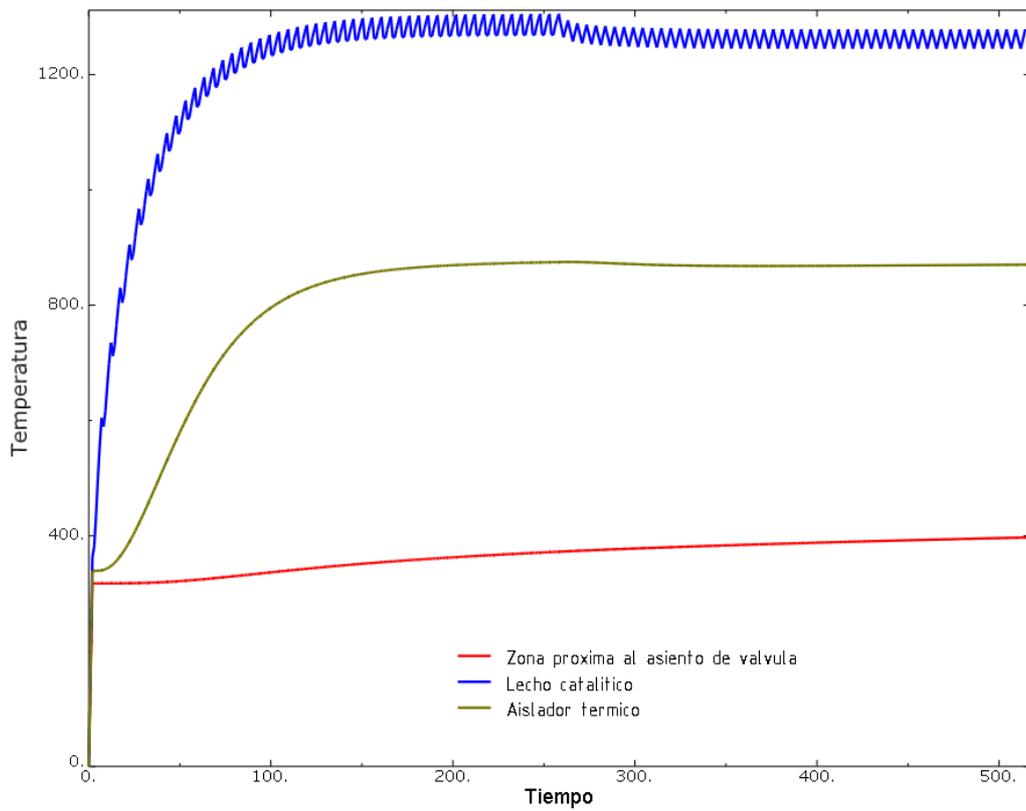


Figura 21. Temperatura en función del tiempo – Aislador con triángulos.

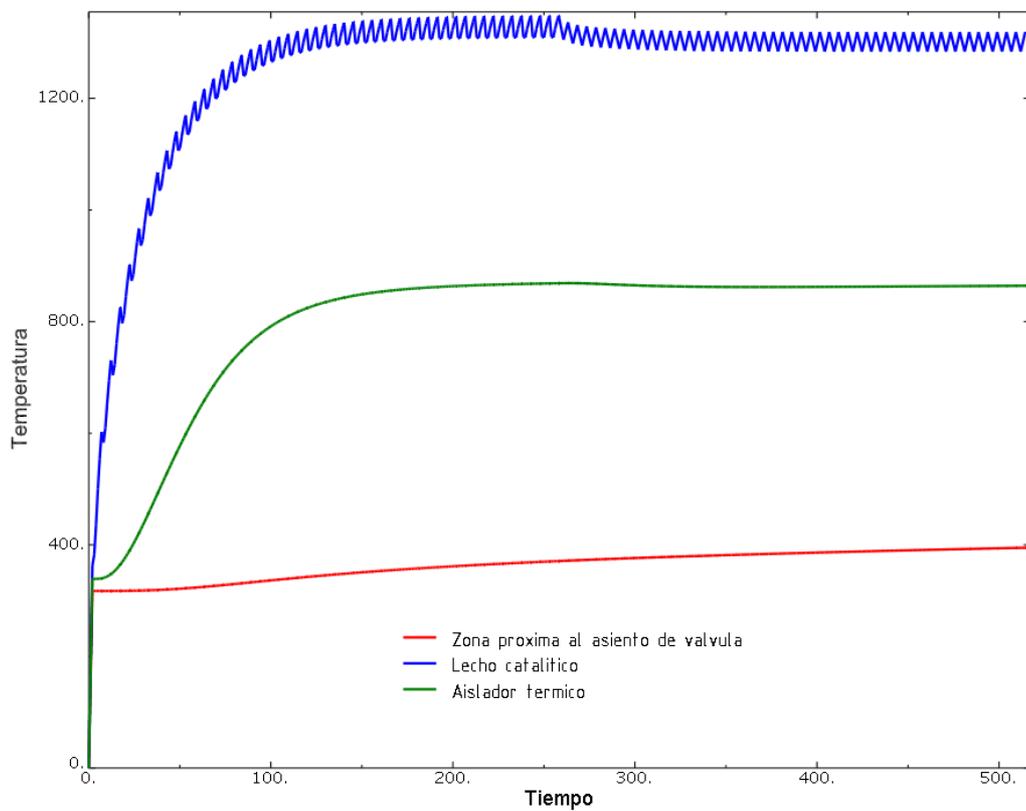


Figura 22. Temperatura en función del tiempo – Aislador optimizado.

La curva de la figura 23 muestra la temperatura en función de la posición del punto seleccionado en la longitud del motor, comenzando por la tobera y hasta la zona próxima a la válvula. El objeto de esta gráfica es mostrar el descenso de temperatura producido en la zona del aislador térmico y comparar las geometrías planteadas.

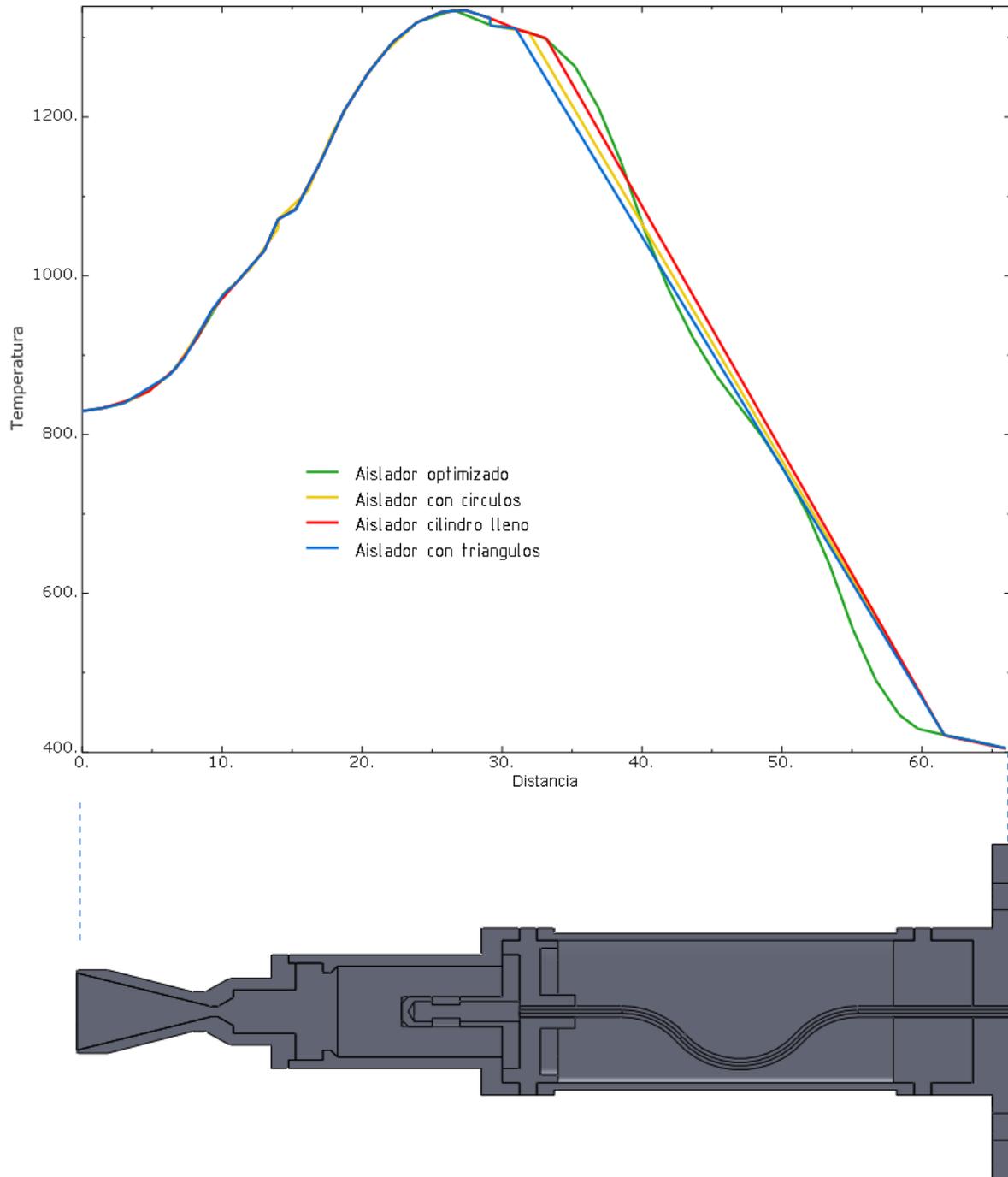


Figura 23. Temperatura en función de la posición – Secuencia B1.

4 CONCLUSIONES.

En el presente trabajo fue presentado el estudio de la respuesta térmica transitoria de un motor monopropelente de uso espacial. Se plantearon diversas hipótesis a los fines de acercarlo lo más posible las circunstancias de análisis a las situaciones de funcionamiento real.

Estableciendo condiciones de contorno y de interacción entre los componentes y el ambiente que ayuden a obtener una solución precisa. Se programó la utilización de distintos aisladores térmicos desarrollados en estudios precedentes.

Para ambas secuencias de pulsos simuladas se observó que la utilización del aislador de cilindro lleno determina una temperatura mayor en la zona de la válvula, y una temperatura menor en la zona del lecho, lo cual es razonable debido a que tiene mayor área de conducción.

Esto se ve claramente en las curvas de temperatura en función del tiempo para la secuencia A1. Las curvas correspondientes al aislador lleno se encuentran, por debajo del resto la del elemento cercano al lecho; y por encima del resto, la del elemento cercano a la válvula.

Esto implica que la utilización de las geometrías con perforaciones de distintas formas, si bien presentan un comportamiento similar, logran aislar la energía producida en la reacción utilizando menos material. Si bien el comportamiento comparativamente entre estos es bastante similar, el aislador térmico desarrollado en Salomone *et al.* 2013, es el que menor volumen posee, lo cual indica la utilidad de la técnica de optimización implementada.

En las curvas de temperatura en función del tiempo para la secuencia B1, se observa la entrada en régimen con un comportamiento similar para los diferentes aisladores. En ellas se distingue los pulsos On (temperatura creciente), de los Off (temperatura decreciente).

Este análisis sirvió como complemento de los desarrollos ya realizados sobre el mismo motor, de tal modo que podamos tener una idea un tanto más completa de su modo de trabajo y la respuesta del mismo a las solicitaciones estipuladas.

Se encuentra en estudio la posibilidad de llevar este análisis a condiciones más semejantes a la realidad, así como también la de desarrollar nuevas geometrías en base a los resultados de la optimización; lo cual será motivo de futuros trabajos de investigación y desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue desarrollada en el marco de los proyectos de investigación "**Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente**" y N° 1420: "**Optimización estructural de componentes termomecánicos usando análisis de sensibilidad topológica**" de la UTN-FRC y apoyada financieramente por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba en el marco del programa GRF-2010 (**Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente**). Se contó además con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Los autores agradecen a estas instituciones el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Amstutz S. Sensitivity analysis with respect to a local perturbation of the material property. *Asymptotic Analysis*. 49 (1–2): 87–108, 2006.
- 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*. Congreso Argentino de Tecnología Espacial, 2007.
- Decicco, C.D. & Giusti, S.M. *Desarrollo de una interfaz computacional "Abaqus-Matlab" y su aplicación en problemas de optimización estructural*. Congreso Argentino de Mecánica Computacional, 2012.

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*-Congreso Argentino de Tecnología Espacial, 2007.

Salomone, J.E., Giusti, S.M., Sanna, D.A., Gonzalez G.J. & Cova W.J.D. *Modelado y optimización termoestructural de un motor monopropelente para uso espacial*. Congreso Argentino de Tecnología Espacial, 2011.

Salomone, J.E., Giusti, S.M., Sanna & Decicco, C. D. *Diseño óptimo de componente estructural de motor monopropelente de bajo empuje*. Congreso Argentino de Tecnología Espacial, 2013.

Sokołowski, J. & Żochowski, A. On the topological derivatives in shape optimization. *SIAM Journal on Control and Optimization*. 37(4): 1251–1272, 1999.