

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MOTOR MONOPROPELENTE UTILIZANDO ELEMENTOS DISCRETOS

Sanna, Alexis David.⁽²⁾
Micheloud, Pablo D.⁽²⁾
Salomone, Javier E.^{(1) (2) (*)}
Gonzalez, Gustavo J.^{(1) (3)}
Jazni, Jorge E.^{(1) (3)}

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

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

⁽³⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, CUDAR

^(*) Dirección Postal: Chubut 33 - B° Alberdi - C.P.: X5000LYA - Córdoba - Pcia. Córdoba - Argentina - E-mail: jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo un estudio del comportamiento térmico de distintos sectores de un motor monopropelente, empleando elementos discretos.

Básicamente se aplica la analogía térmico-eléctrica existente entre flujo de calor y flujo de corriente así como entre diferencias de temperatura y diferencias de potencial eléctrico. Este concepto conduce a obtener el equivalente eléctrico de cada fenómeno de transmisión de calor.

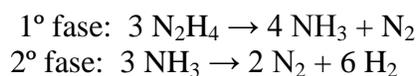
Si se conocen o estiman los parámetros térmicos y sus interacciones para cada elemento que integra el conjunto motor, éste podrá ser representado mediante su análogo eléctrico como un componente circuital, facilitándose así el análisis y la simulación de su comportamiento.

1.- INTRODUCCION

La corrección de actitud y órbitas de satélites se realiza en general de diversas maneras entre las que podemos citar: ruedas de reacción, ruedas de inercia, bobinas electromagnéticas, motores mono y bipropelentes, etc.

El presente trabajo se basa en el estudio de un motor monopropelente de 1,5N [3, 4], que utiliza como combustible hidracina.

El motor opera mediante los llamados pulsos o disparos, y basa su funcionamiento en el empuje que producen los gases que se originan al descomponerse catalíticamente la hidracina, mediante las siguientes reacciones:



El catalizador utilizado es Shell 405, dado que éste hace que la descomposición se realice de manera inmediata. Dicho catalizador incorpora iridio en un soporte de alúmina para proporcionar una buena superficie de contacto entre la hidracina y el catalizador. La reacción química que se produce en la primera fase es del tipo exotérmica, mientras que la segunda evoluciona de una manera endotérmica por lo que, ajustando el grado de descomposición de NH_3 , se logra optimizar el sistema con el objeto de lograr una adecuada expansión de los gases y producir niveles de empuje aceptables.

La combustión producida en la cámara, es la principal fuente de calor. Debido a las altas temperaturas que se generan en la misma y a la buena conductividad de los materiales, hay una

adecuada transmisión de calor entre los componentes evitándose así riesgos de colapsos mecánicos en los componentes.

El combustible debe ingresar al lecho catalítico a una temperatura preestablecida para evitar los arranques en frío, habida cuenta que estos son perjudiciales para la vida útil del catalizador. Es importante conocer de la mejor forma posible las temperaturas que se desarrollan en distintas partes del motor, para estudiar su influencia en el combustible.

Mediante la analogía termoeléctrica se mostrará una metodología alternativa para determinar los niveles de temperaturas en los componentes.

Así se plantean una serie de pasos para poder representar una parte del conjunto mediante sus análogos eléctricos.

2.- METODOLOGIA

2.1 Formas de transmisión de calor

El calor es una forma de energía, que se puede transferir de un cuerpo a otro. Esta transferencia se puede realizar mediante convección, radiación, y conducción[1].

Para el caso de conducción, se da en sólidos o en fluidos en reposo a nivel macroscópico, generándose el fenómeno por diferencias de temperatura.

La ley de Fourier para el caso más general, enuncia que

$$q = -k\nabla T \quad (1)$$

El flujo de calor q es proporcional al gradiente de temperaturas ∇T , mediante la constante de conductividad térmica k.

Luego, si se trata de un medio lineal donde el calor específico y la conductividad son independientes de la temperatura y la posición, es decir son constantes, se obtiene la Ecuación General de la Conducción

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

La convección es un modo de transferencia de energía entre una superficie de contacto y un fluido adyacente en movimiento. Existen dos tipos de convección: la natural y la forzada y a su vez esta última puede ser externa y/o interna.

La ecuación de la convección o ley de enfriamiento de Newton es

$$q = h \times A_c (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Donde, h: coeficiente de convección $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

A_c : área de contacto m^2

T_s : temperatura de la superficie en $^\circ K$

T_∞ : temperatura en una zona alejada en $^\circ K$

Radiación térmica, es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, originada por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Este tipo de transmisión es la emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Presenta la característica de que no necesita de un medio para transmitirse, es la forma más rápida de transmisión de calor, y todos los cuerpos que tienen una temperatura por encima del cero absoluto emiten radiación térmica.

El calor por radiación emitido por cualquier cuerpo, se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann

$$Q_r = \varepsilon \times \sigma \times A \times T^4 \quad (4)$$

Donde,

A: área [m^2]

T: $^\circ K$

ε : emisividad ($0 < \varepsilon < 1$)

σ : Cte. Stefan-Boltzmann $5,669 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$

2.2 Hipótesis de simplificación

En el punto 2.1 se expusieron las generalidades de las formas de conducción de calor y sus ecuaciones fundamentales, aunque además, para el presente trabajo se le añadirán consideraciones particulares teniendo en cuenta el caso que se desea analizar.

Como se mencionó antes el motor opera por pulsos, pero como primera simplificación, se supondrá que el mismo trabaja de manera constante. El régimen es estacionario, en otras palabras, la temperatura, tanto de las partes y el medio, permanece constante a lo largo del tiempo. Las partes son uniformes e isotrópicas, con conductividad térmica constante y se evalúa a una temperatura de 20°C.

No hay fuentes internas (sumideros) de calor. Se considerará que el conjunto se encuentra en el vacío, por lo tanto no habrá transferencia de calor por convección. El contacto entre las partes es ideal, de esta forma no se contemplará el aire que podría quedar atrapado entre las imperfecciones superficiales de las mismas, ya que el aire tiene una resistencia térmica mayor y consecuentemente es un mal conductor. Se limitará a trabajar en el plano asumiéndose además que la transferencia de calor será unidireccional.

2.3 Analogía Termoeléctrica

La analogía termoeléctrica, establece la semejanza que hay entre las formas de circular del flujo de calor y la corriente eléctrica[1], permitiéndonos tratar problemas termodinámicos mediante conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos, por lo tanto:

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

$$\Delta T(^{\circ}K) \equiv \Delta V(v)$$

Resistencias térmicas \equiv Resistencias eléctricas

Inercia térmica \equiv Capacidad eléctrica

2.3.1 Cálculo y representación de los elementos circuitales

2.3.1.1. Resistencias en conducción

Las resistencias representan las partes del conjunto, cuyos valores dependen: de la geometría y de la conductividad térmica k

La transferencia de calor será unidireccional, por lo tanto considerando la transferencia de calor según una dirección que se denominará "x", la Ley de Fourier se reduce a

$$q = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Dónde: A: es el área en m^2

T: es el campo de temperaturas en $^{\circ}K$

k:conductividad térmica $\left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$

q: flujo de calor [W]

Una aplicación de la última consideración, es para el caso de transmisión de calor a través de una pared plana, cuando las superficies límites opuestas de la pared se encuentran a temperaturas distintas, tal como lo muestra la Figura.1. El calor fluye perpendicularmente de la superficie de mayor temperatura a la de menor, entonces:

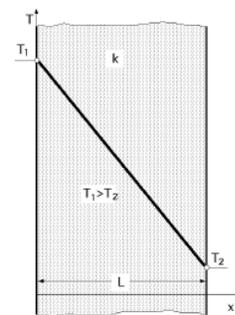


Figura 1. Paredes planas a distintas temperaturas

$$q = -\frac{k \times A}{L}(T_2 - T_1) = \frac{k \times A}{L}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k \times A}} \quad (6)$$

Dónde: L es el espesor de la pared

De acuerdo a la analogía termoeléctrica, el valor de la resistencia estará dado por la siguiente expresión

$$R = \frac{L}{k \times A} \quad (7)$$

Dependiendo de la disposición de los objetos, las resistencias adoptaran una u otra forma de conexión, la cual puede ser en serie, en paralelo o de forma combinada

2.3.1.2. Resistencias en radiación

Para obtener la expresión que nos permita calcular, la resistencia que representara la radiación de la pieza al medio, partimos de (4) y despejamos T, el valor obtenido se lo llamará T_s

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{Q_r}{\sigma \times A \times \varepsilon}} \quad (8)$$

Dado que $T(K)$ es equivalente a $V(v)$, podemos calcular R mediante la siguiente ecuación

$$R = \frac{\Delta V}{i} = \frac{T_s - T_{amb}}{i} \quad (9)$$

2.3.1.3. Fuentes

La analogía termoeléctrica diferencia dos tipos de fuentes, las de calor y las de temperatura, las cuales a su vez se pueden subdividir en independientes o dependientes.

La fuente de calor es aquella que proporciona un flujo de energía. Las fuentes de temperatura, generan una diferencia de temperatura entre sus terminales. El equivalente eléctrico para cada caso será una fuente de corriente y una de tensión respectivamente.



Figura 2. Elementos representativos de fuentes de calor (izquierda) y fuentes de temperatura (derecha)

3.- DESARROLLO

3.1 Identificación de las fuentes

Como se mencionó antes, la principal fuente de calor del conjunto, es la generada en la combustión de la hidracina. El flujo de calor

principal se dará desde el lecho catalítico hacia las demás partes del conjunto.

Dado que el calor generado en la combustión es independiente, porque no depende de la diferencia de temperatura, se la representará mediante el componente correspondiente y se la designará con el nombre fuente **a**.

El conjunto dispone de dos calefactores eléctricos, uno ubicado en el lecho catalítico y el otro en la válvula proximal. La función de los mismos es mantener una temperatura inicial prefijada constante.

Ambas son independientes porque no dependen de las diferencias de temperatura.

Las mismas serán representadas por fuente de corriente, siendo designadas con los nombres fuente **b** y fuente **c**.

La temperatura ambiente, representará una fuente de temperatura, la consideraremos constante y será la temperatura de referencia.

Estará representada mediante una fuente de tensión, designada como T_{amb}

3.2 Trayectoria del calor

En este modelo simplificado, se considerará el caso en el cual no se contempla la parte de calor cedido hacia el ambiente en la tobera. Dicho de otra forma, se supondrá que el calor generado en la combustión de la hidracina, en su totalidad, se transmitirá al conjunto mediante conducción; y a medida que va avanzando, parte del mismo se ira cediendo al ambiente mediante radiación.

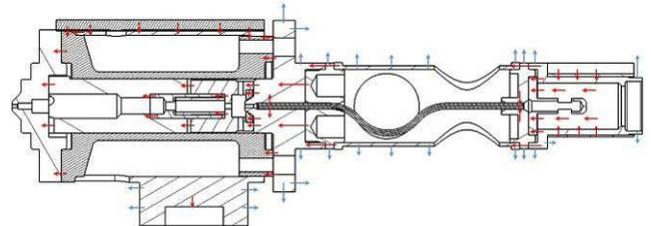


Figura 3. Trayectoria realizada por el calor desde la cámara de combustión

En la Figura 3. no se representó el tornillo que fija el motor al resto del conjunto. Sí se lo hace en la Figura 4., donde se muestra en detalle cómo se transmite el flujo de calor.

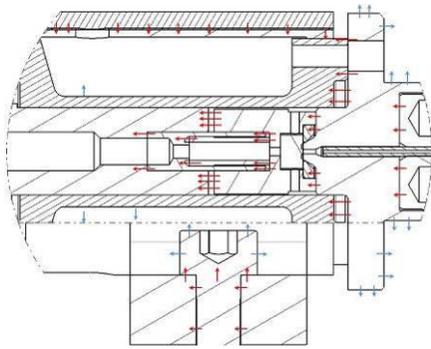


Figura 4. Detalle de la trayectoria del calor hacia la zona del tornillo de fijación

Por simplicidad, no se considerará la radiación emitida por el tubo de alimentación, debido a que parte de ésta también será absorbida por la pieza que la rodea (*thermal insulator*) a lo que se suma su pequeña área de radiación. El mismo criterio se utilizó para las piezas *engine spacer* y *tube adapter*.

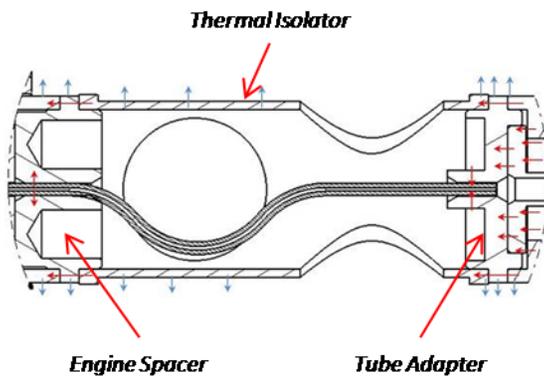


Figura 5. Detalle del flujo de calor considerado

3.3 Notación de las partes

La notación de las partes se realizó numerándolas de forma correlativa, por lo tanto el número representará a la parte en el circuito, de manera que cualquier componente que tenga el mismo número hace referencia a la misma parte lo que puede verse en la Figura 6. La Figura 7 se muestra en detalle la notación del tornillo.

El subíndice “r” hace referencia a que la resistencia es a la radiación.

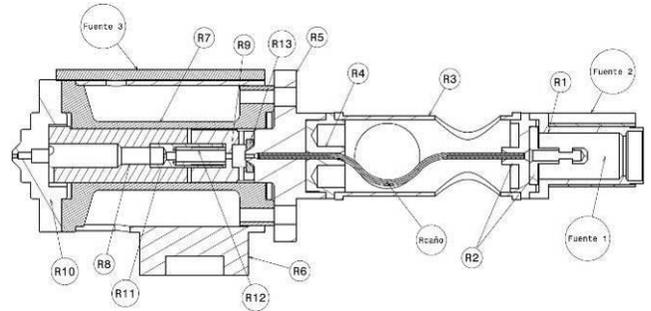


Figura 6. Notación de las partes del conjunto

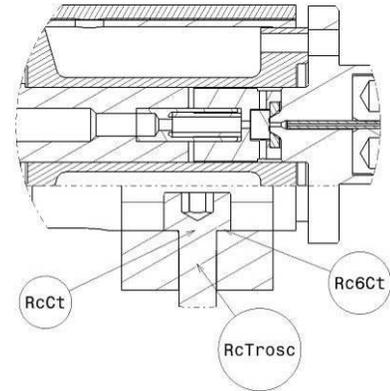


Figura 7. Detalle de la notación del tornillo

3.4 Cálculo de los componentes

3.4.1. Resistencias

Para calcular las resistencias, debemos conocer:

- Superficie de contacto $A [m^2]$
- Conductividad térmica $k \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$
- Espesor o longitud $L [m]$

A continuación explicaremos con algunos ejemplos el cálculo de las resistencias

Calculo de R_4 (*engine spacer*) Figura 8.

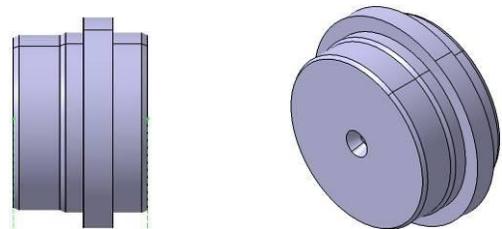


Figura 8. Engine Spacer

La superficie de transferencia se detalla en la Figura 9.

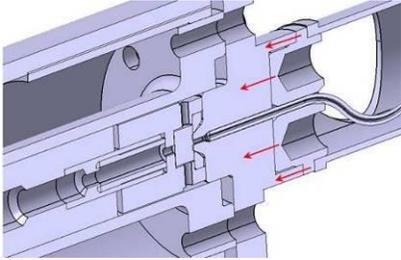


Figura 9. Detalle de la superficie considerada

Los valores a utilizar son:

$$Area_{R_4} = 1,11 \times 10^{-4} [m^2]$$

$$longitud = 4,26 \times 10^{-3} [m]$$

$$k = 14,9 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Finalmente reemplazando en la ec. (6) obtenemos R_4

$$R_4 = \frac{4,26 \times 10^{-3}}{14,9 \times (1,11 \times 10^{-4})} = 2,57 \approx 2,6 \Omega$$

Para el caso de las resistencias por radiación, la metodología seguida fue:

- Calcular la temperatura mediante (8), considerando que el valor de Q_r , estará en función de calor remanente, (parte no irradiada al medio) que ingresa a la pieza y el valor de resistencia a la conducción de la misma.
- Utilizamos el valor obtenido de temperatura, y lo reemplazamos en (9), considerando que el valor de $i = 81,9A$, dado que se asume constante al calor transmitido por conducción.

Siguiendo con el ejemplo de R_4 . La superficie considerada para todos los casos será la que no esté en contacto con otra pieza, para este caso es la que se puede observar en la Figura. 10, y tiene un valor de:

$$Area = 4,9 \times 10^{-5} m^2$$

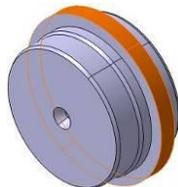


Figura 10. Detalle de la superficie considerada

El material de la pieza es Inconel 600, la emisividad ϵ del mismo, para este caso, es

$$\epsilon = 0,9 ; Q_r = 13,57 \times 2,6 = 35,28W$$

Utilizando estos valores en (8) se obtiene T_s

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{35,28}{(5,669 \times 10^{-8}) \times (4,9 \times 10^{-5}) \times 0,9}}$$

$$T_s = 1938,21^\circ K \Rightarrow \Delta V = 1938,21V$$

Reemplazando en (9) el valor de T_s

$$R_{4r} = \frac{\Delta V}{i} = \frac{1938,21 - 293}{81,9} = 20 \Omega$$

$$R_{4r} = 20 \Omega$$

Resistencia que representará la parte calor que se transmite al medio ambiente, por radiación, a través de R_{4r} .

En la Tabla 1 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.

Parte	Superficie	Espesor	k	ϵ	Valor
R1	$8,46 \times 10^{-5}$	0,01665	14,9		13,1
R1_r	$5,10 \times 10^{-4}$			0,9	29,5
R2	$3,36 \times 10^{-5}$	0,00975	14,9		19,4
R2_r	$4,9 \times 10^{-5}$			0,9	46,4
R_{tubo}	$5,05 \times 10^{-7}$	0,0412	31		2631,2
R3	$7,28 \times 10^{-6}$	0,0272	14,9		250,6
R3_r	$7,36 \times 10^{-4}$			0,9	27,5
R4	$1,11 \times 10^{-4}$	0,00425	14,9		2,6
R4_r	$4,9 \times 10^{-5}$			0,9	20
R5	$4,42 \times 10^{-4}$	0,0075	14,9		1,5
R5_r	$1,2 \times 10^{-3}$			0,9	7,2
R6	$2,1 \times 10^{-5}$	0,0277	24,9		53
R6_r	$2,04 \times 10^{-3}$			0,95	12,7
R7	3×10^{-4}	0,031	24,9		4,1
R8	$3,67 \times 10^{-5}$	0,02075	24,9		22,7
R9	$3,69 \times 10^{-5}$	0,0092	16		15,5
R10	4×10^{-4}	0,02075	15		1
R11	$4,66 \times 10^{-6}$	0,01065	23,3		98
R12	$4,16 \times 10^{-6}$	0,0076	27,4		57,6
R13	$1,28 \times 10^{-5}$	0,001	15		5,2
R_{cTrosce}	$1,21 \times 10^{-5}$	0,004	58		0,56
R_{c6Ct}	$2,32 \times 10^{-5}$	0,004	58		3
R_{cCt}	$1,52 \times 10^{-5}$	0,01	58		7,14
R_{rCabT}	$1,46 \times 10^{-4}$			0,8	30,6

Tabla 1 – Valores de resistencias

3.4.2. Fuentes de temperatura

La analogía termoeléctrica establece que

$$1^{\circ}K \rightarrow 1V$$

La temperatura ambiente se considera a $25^{\circ}C$, por lo tanto, la fuente de tensión que representa la temperatura ambiente T_{amb} , tendrá un valor de

$$T_{amb} = 273 + 25 = 298^{\circ}K$$

3.4.3. Fuentes de calor

Fuente **a**, Por la experiencia que se tiene de este tipo de propulsores, las paredes de la cámara de reacción alcanza en régimen estacionario una temperatura cercana a $800^{\circ}C$. Adoptando como valor $T = 800^{\circ}C$. procedemos al cálculo de la misma

$$T = 800 + 273 = 1073^{\circ}K \Rightarrow \Delta V = 1073V$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{ter}} \equiv i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \frac{1073V}{13,1\Omega} = 81,9A$$

$$f_a = 81,9A$$

Fuente **b**, cumple la función de mantener una temperatura de $90^{\circ}C$ constante, por lo tanto el elemento que la representará en el circuito tendrá una magnitud igual a:

$$T = 273 + 90 = 363^{\circ}K \Rightarrow \Delta V = 363V$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{ter}} \equiv i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \frac{363v}{13,1\Omega} = 27,7A$$

$$f_b = 27,7A$$

Fuente **c**, utilizada para mantener una temperatura constante de $60^{\circ}C$, la magnitud del elemento circuital será

$$T = 273 + 60 = 333^{\circ}K \Rightarrow \Delta V = 333v$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{ter}} \equiv i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \frac{333v}{53\Omega} = 6,3A$$

$$f_c = 6,3A$$

3.5. Ensamblaje del modelo para simulación

Con los valores de todos los análogos circuitales conocidos, se puede representar de forma simplificada el conjunto, asumiendo el modelo de paredes planas, para facilitar el armado del circuito como puede verse en Figura 11.

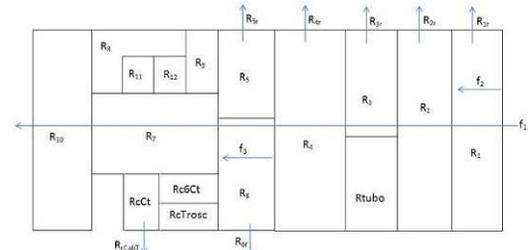


Figura 11. Representación simplificada del conjunto mediante paredes planas

Finalmente, se realizó el modelo eléctrico del circuito, siguiendo la disposición del modelo mecánico simplificado.

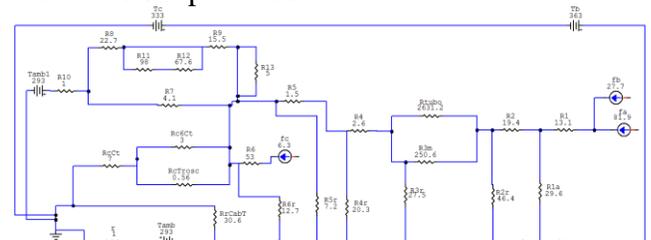


Figura 12. Circuito

Al simular el circuito de la Figura 12, los valores de las temperaturas pueden obtenerse mediante un voltímetro, con la única consideración de que las lecturas en volts equivalen a 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.

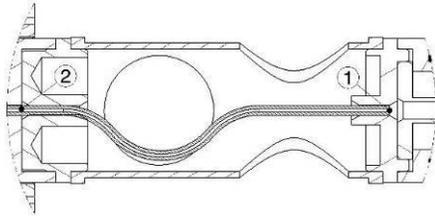


Figura 13. Detalle de la zona física del conjunto, que hace referencia a los puntos de interés 1 y 2

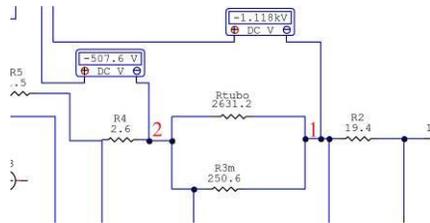


Figura 14. Zona ampliada que muestra la implementación circuital de los puntos interés 1 y 2

Las medidas registradas en los puntos 1 y 2, serán

$$\begin{aligned} \text{Punto1} &= 1118 - 273 = 845^{\circ}\text{C} \\ \text{Punto2} &= 507,6 - 273 = 234,6^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

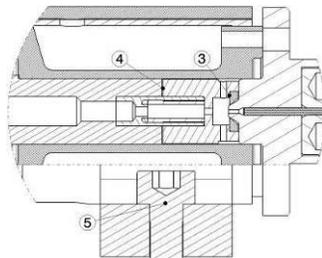


Figura 15. Detalle del conjunto, que hace referencia a los puntos 3, 4 y 5

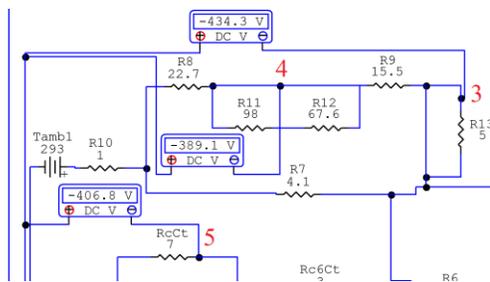


Figura 16. Zona ampliada que muestra la implementación circuital de los puntos de interés 3, 4 y 5

Las medidas registradas en los puntos 3, 4 y 5, serán

$$\begin{aligned} \text{Punto3} &= 434,3 - 273 = 161,3^{\circ}\text{C} \\ \text{Punto4} &= 389,1 - 273 = 116,1^{\circ}\text{C} \\ \text{Punto5} &= 406,8 - 273 = 133,8^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

Comparando los valores de las simulaciones obtenidas mediante la analogía termoelectrica, con otros métodos e incluso con ensayos realizados, se observa que, con las consideraciones realizadas, es posible medir valores en forma muy aproximada de manera conservadora. Los valores que se obtuvieron fueron, en general, los esperados. Por lo tanto se puede concluir que es un método relativamente sencillo y valido, para obtener valores aproximados. 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 realizar simulaciones mas exactas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue desarrollada en el marco del proyecto de investigación "Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente" UTN-FRC. Los autores agradecen a esta institución el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] YUNUS A. ÇENGEL. (2004). **Transferencia de Calor**. McGraw-Hill. 2004. Segunda Edición
- [2] **Hydrazine Handbook**. Rocket Research Company. Redmond, USA
- [3] 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**
- [4] CAGLIOLO, C. M. - SALOMONE, J. E. JAZNI, J. E. - LAGIER, S. (2007) **Análisis del comportamiento térmico del conducto de alimentación de combustible en motores monopropelente de bajo empuje - AATE 2007**