

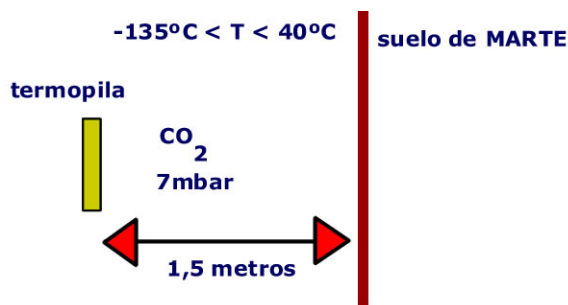
Técnicas de medida en ingeniería mecánica: Diseño del sistema experimental necesario para la calibración de una termopila, para medir la temperatura del suelo en MARTE

Objetivo

Diseñar un conjunto de pruebas de calibración, que nos permita testear el funcionamiento de una termopila (sensor IR, formado por la unión en serie de termopares), para medir la temperatura del suelo de Marte. Para realizar esto se van a diseñar y construir maquinas que nos permitan simular y poder controlar los factores ambientales de la superficie de MARTE

Estudio Teórico en Marte

Disponemos de una termopila comercial, formada por la unión en serie de 100 termopares, dentro de una cápsula T05 en un microcircuito de 1mm^2 de área, la termopila proporciona una señal de salida en voltaje en función de la energía incidente, para la longitud de onda comprendida entre 8 y $14\ \mu\text{m}$ que corresponde al espectro infrarrojo medio de la luz. La termopila en su diseño para Marte va ensamblada en una carcasa metálica, orientada hacia el suelo, y a una distancia de 1,5 metros del mismo.



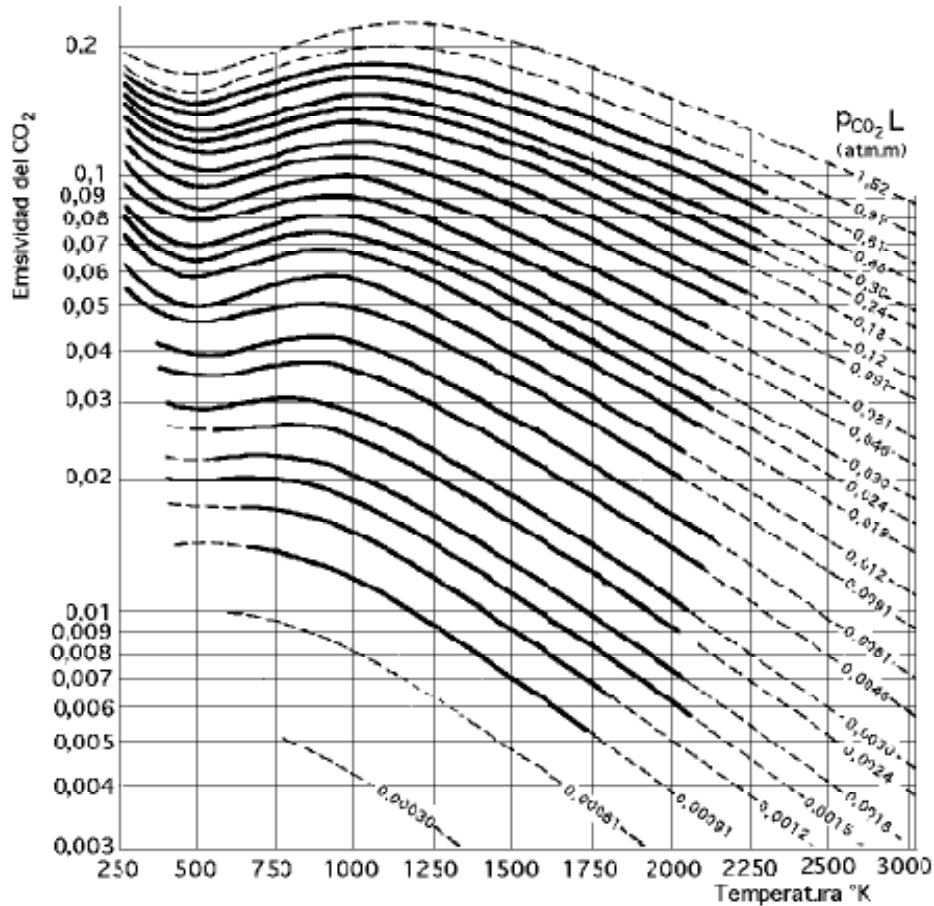
medida de la temperatura del suelo de MARTE (estudio teórico)

necesario efectuar modificaciones mecánicas al diseño de la termopila en sus pruebas en la Tierra, para ello se dispone de un sistema mecánico de anclaje, que pueda ser enfriado y calentado a voluntad en los mismos rangos de temperatura que en Marte, además de poder imitar la temperatura del suelo proveniente en este caso de un cuerpo negro.

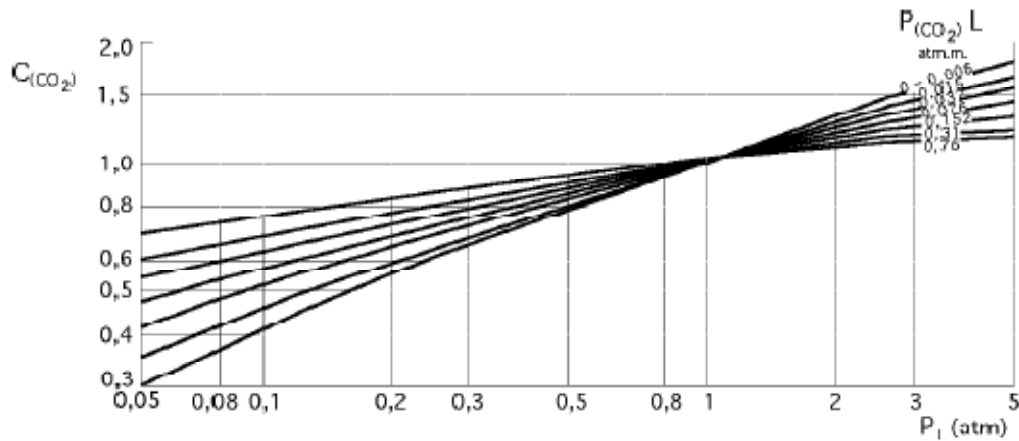
Para poder calibrar las medidas de la temperatura de Marte, es necesario probar el funcionamiento a los distintos rangos en los que se puede encontrar la termopila. Es decir, debemos probar a medir el suelo de Marte (cuerpo negro en el laboratorio) en rangos que van desde -135°C a 40°C (a presión y composición de gases igual a la de Marte). Para esto, es

Simulación teórica de los gradientes de temperaturas en Marte

En Marte la transferencia de calor desde el suelo Marciano, se realiza únicamente por radiación, ya que la atmosfera es muy tenue y está formada en su mayor parte por CO_2 a una presión de unos pocos milibares. El CO_2 es un mal conductor del calor (Los poderes emisivos y absorbentes en un gas son función de la temperatura, Las capas gruesas de un gas absorben más energía y transmiten menos que una capa delgada, por lo que además de especificar las propiedades que fijan el estado del gas, tales como la presión y la temperatura, hay que especificar una *longitud característica* L ($3.6 \times$ volumen del gas, dividido por el área) de la masa del gas antes de determinar sus propiedades radiativas, siendo el poder emisivo y el absorbente función de esta longitud L que debe recorrer la radiación en la masa. El poder emisivo es función de p y L y por lo tanto del producto, $p(\text{atm}) \cdot L$ (metros)), por lo que podemos despreciar fenómenos de conducción del calor, teniendo en cuenta también la distancia que existe entre el sensor de temperatura y el suelo.



La gráfica de arriba muestra la emisividad del CO₂ a 1 atmósfera de presión a distintas temperaturas. La gráfica de abajo, muestra el factor de corrección del CO₂ a distintas presiones



En nuestro caso (aproximación teórica), podemos considerar L (doble de la distancia de separación entre los planos, formados por la termopila y el suelo).

La energía transmitida en forma de calor se hace mediante ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz; la energía que abandona una superficie en forma de calor, por radiación, depende de su temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie aunque la emisión es independiente del medio exterior, la medida de la energía radiante requiere de una temperatura de referencia, como puede ser la de otro sistema que reciba la energía transferida, y así poder obtener a partir de esta referencia la transferencia neta de energía radiante.

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación a un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emiten una

fracción constante de la emisión correspondiente a un cuerpo negro, para cada longitud de onda, se denominan cuerpos grises (consideramos el suelo de Marte, como un cuerpo gris).

La energía radiante neta transferida a la temperatura T_1 a un cuerpo negro que lo rodea (medio exterior), a la temperatura T_2 es:

En la que el subíndice 1 se corresponde con el cuerpo gris, siendo ϵ_1 la emitancia del mismo, igual a la relación entre la emisión de la superficie gris y la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura. Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto, pero existe entre los mismos una determinada relación geométrica, la energía radiante neta transferida entre ellos viene dado por:

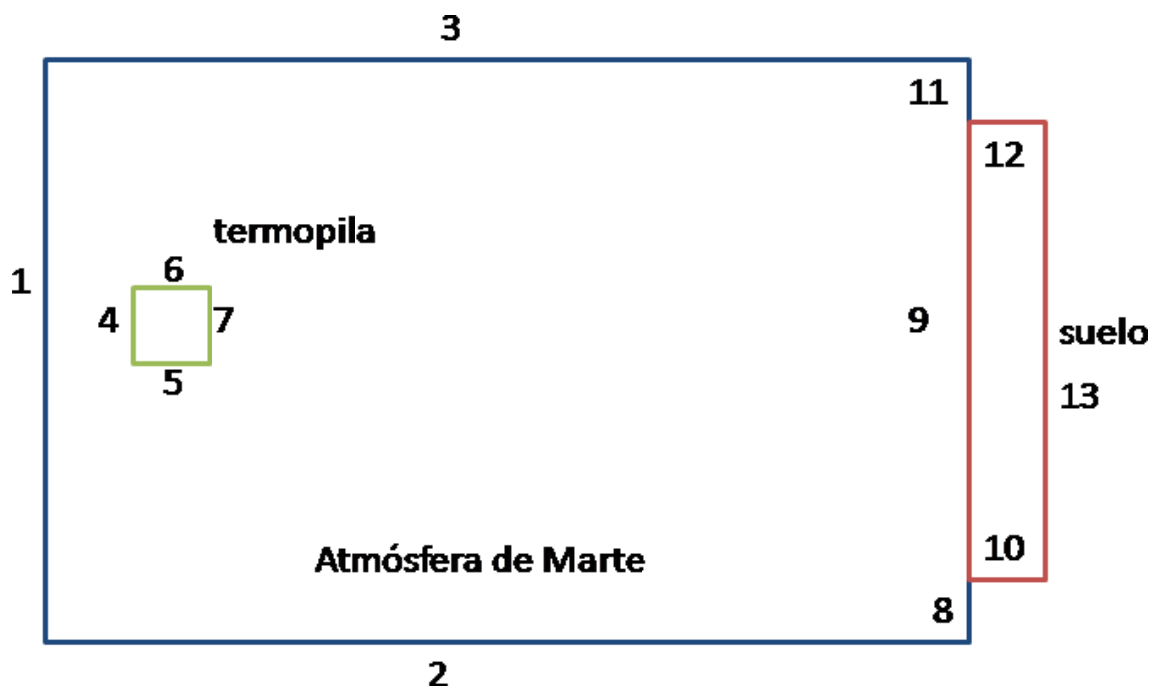
En la que F_{12}^* es un factor de forma complejo que depende de las emisividades y de las geometrías relativas de los cuerpos. En el caso de Marte, podemos considerar la superficie del suelo como un plano infinito, y la superficie del soporte de las termopilas como si se tratara de una superficie o plano de 1mm^2 . Tenemos en cuenta que de la superficie Marciana salen dos tipos de radiación, la emitida propiamente y la reflejada, por lo que debemos tener en cuenta la radiosidad J . (como la energía radiante que abandona la superficie gris, es decir, representa toda la radiación que sale de la superficie y es igual a la suma de la fracción de energía emitida por la superficie debida a su temperatura T y de la irradiación G reflejada por unidad de superficie).

Obteniendo de manera ideal, para el cuerpo gris, la siguiente ecuación:

Simulación Teórica de las condiciones en Marte

En el caso de Marte y debido a la singularidad de restricciones de peso y energía que hay en una misión espacial, es muy difícil, determinar la medida de la temperatura cuando no se puede realizar un contraste con una medida de referencia in situ. Por ello, debemos calibrar en el laboratorio, mediante simulaciones las condiciones que se esperan en la superficie de Marte.

Diseñamos mediante la aplicación COMSOL, un entorno en dos dimensiones, y resolvemos la ecuación diferencial del calor, teniendo en cuenta las siguientes condiciones de contorno:



	Condiciones de contorno	h	T _{inf}	T ₀	radiación	ε	T _{amb}	J ₀
1, 2, 3, 8, 11	Flujo de calor	50	160		Superficie a ambiente	0.01	160	εσT ⁴
4, 5, 6	Temperatura			166	Superficie a ambiente	0.01	160	εσT ⁴
7	Temperatura			166	Superficie a superficie	0.01	160	J
9	Temperatura			200	Superficie a superficie	0.1	160	J
10, 12, 13	Aislante							

h = coeficiente de transferencia de calor; W (m² °K)

T_{inf} = temperatura externa; °K

T₀ = temperatura; °K

ε = emisividad

T_{amb} = temperatura ambiente; °K

J₀ = radiosidad; W/m²

k = conductividad térmica; W (m °K)

ρ = densidad; Kg/m³

C_p = calor específico; J/(Kg °K)

	k	ρ	C _p	Transparente
Atmosfera	0.001	2.473	0.783	Si
Termopila	400	8700	385	No
Suelo	44.5	2600	850	No

Para las condiciones de contorno **1, 2, 3, 8, 11**, tenemos que resolver la siguiente ecuación:

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) + \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4)$$

Para las condiciones de contorno **9 y 7**, resolvemos las siguientes ecuaciones:

$$T = T_0$$

$$(1 - \varepsilon)G = J_0 - \varepsilon\sigma T^4$$

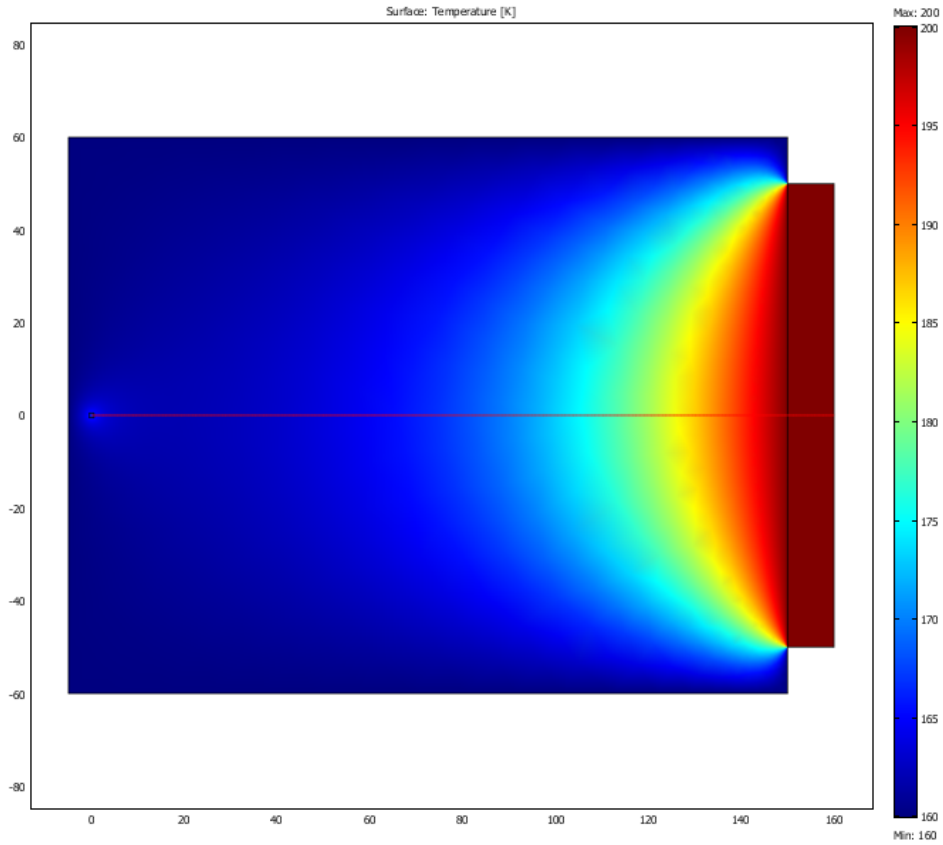
Para las condiciones de contorno **10, 12 y 13**, se resuelve la siguiente ecuación:

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = 0$$

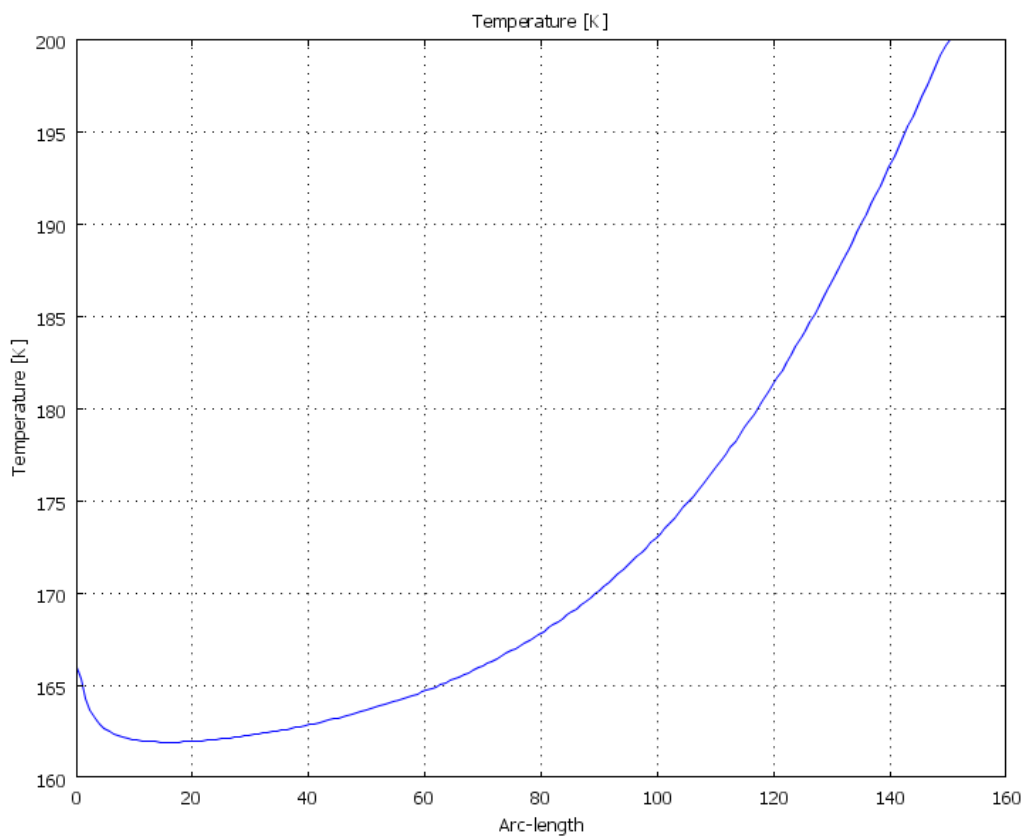
El caso más desfavorable en la superficie de Marte, se presenta cuando existe un gradiente de temperatura entre el suelo, y la termopila. Este gradiente de temperatura se produce cuando la cantidad de energía transmitida y reflejada por el suelo, es mayor que la que se produce en la superficie de la termopila. Es decir la temperatura del suelo es sensiblemente mayor que la del ambiente en Marte.

Este caso de ejemplo es muy difícil de reproducir en el laboratorio con medios experimentales, ya que habría que introducir el cuerpo negro dentro de una cámara de vacío y someterla a las condiciones de Marte.

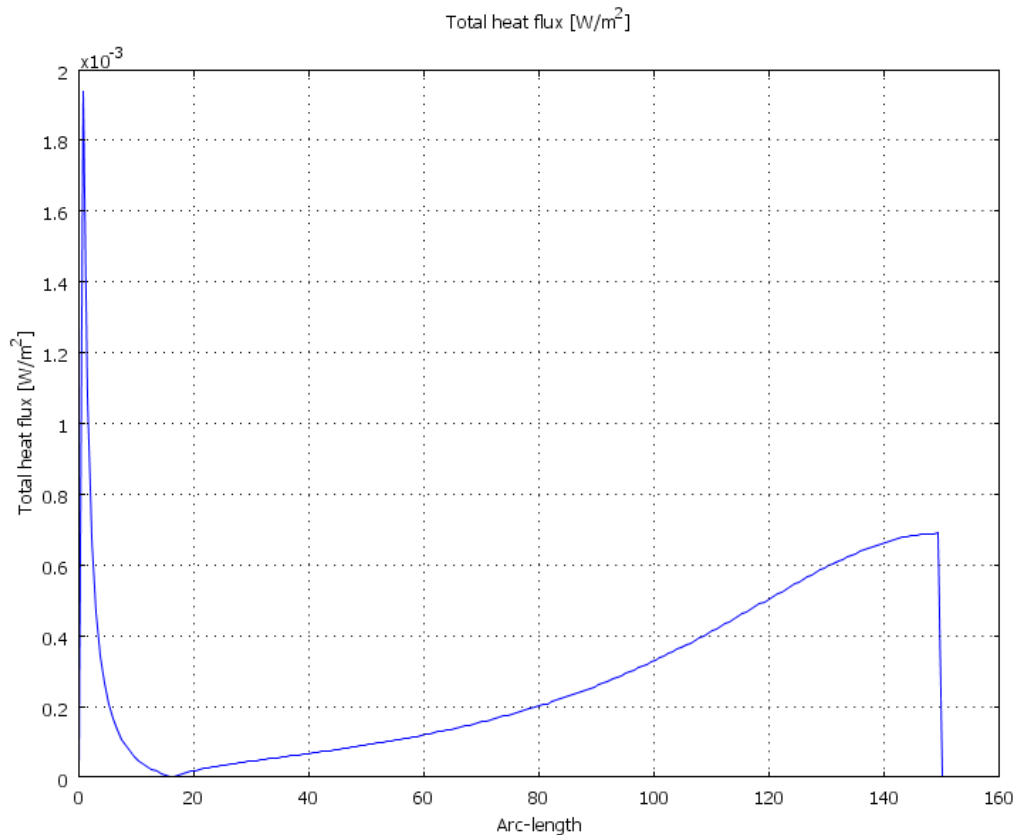
La simulación nos muestra un gradiente de temperaturas entre la termopila y el suelo, y su evolución exponencial. En el caso real las termopilas deberían de dar una lectura correcta de la superficie, ya que, debido a la distancia y ángulo que se encuentran con respecto al suelo, no debería afectar la tenue atmosfera de Marte, sabiendo además que la longitud de onda de la banda de absorción del CO₂, a esa presión y temperatura dista de la longitud de onda de la elección de nuestra termopila, es decir no afecta al infrarrojo.



En la figura de arriba, se muestra el gradiente de temperatura mediante colores entre el suelo y la termopila.



En la figura de arriba, se muestra la curva de temperatura, en función de la distancia (cm), y en la figura de abajo, el flujo de calor, en función de la distancia.

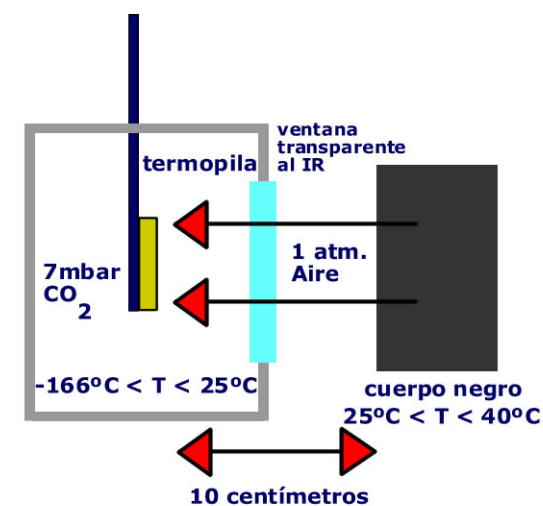


Experimentalmente, hemos de diseñar un sistema, que nos permita asemejarnos lo más posible a la situación en MARTE.

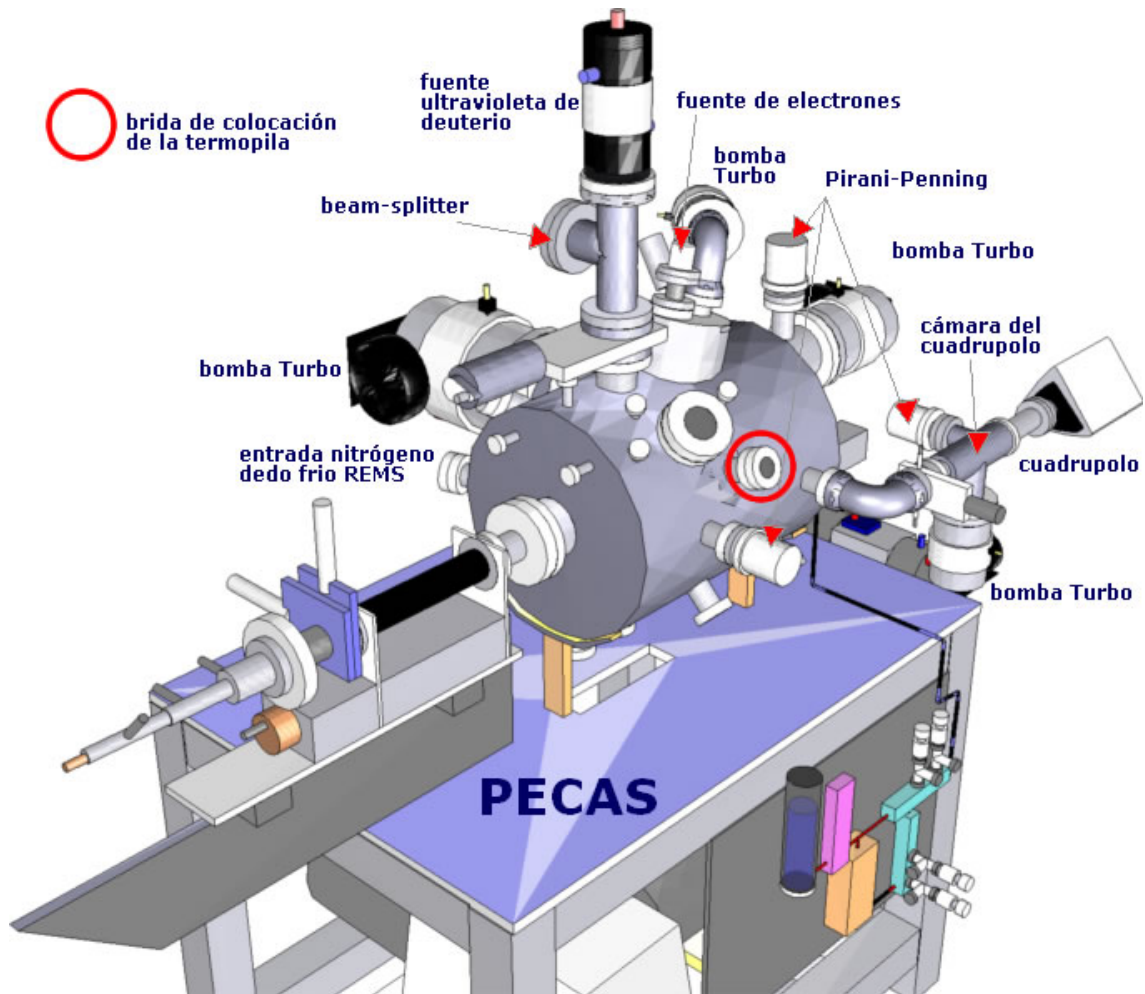
Nuestra primera prueba práctica la hemos realizado en la cámara PECAS del Centro de Astrobiología

Descripción experimental y Estudio teórico en el laboratorio

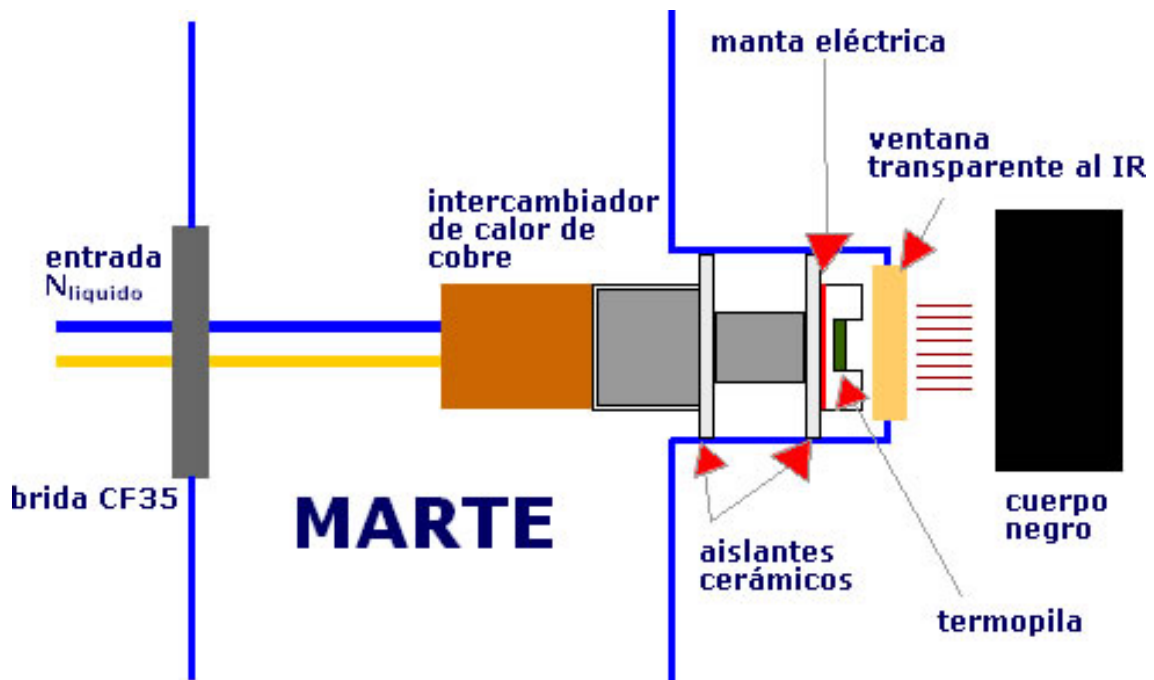
Para poder realizar la simulación se va a diseñar una cámara de vacío especial para MARTE, para la calibración de las termopilas, además de utilizar la cámara de simulación de ambientes planetarios PECAS (Planetary Environment Chamber for Astrobiology Simulation) (www.electronvoltio.com), que nos va a permitir optimizar el diseño de un “dedo frío”, para poder llegar a enfriar el conjunto en el cual reside la termopila.



medida de la temperatura del cuerpo negro (suelo Marciano)



La primera prueba que se realizó para ver si teníamos la tecnología adecuada para poder bajar la temperatura de la termopila a -135°C en ambiente de Marte, fue usando un dedo frío, e introducirlo dentro de la cámara PECAS.





Ensayo para bajar la temperatura por debajo de -135°C , en condiciones de atmósfera de Marte, usando el dedo frío

En este primer ensayo, hemos diseñado y construido un “dedo frío”, para conseguir bajar la temperatura a 77°K (-196°C). Este dedo frío, consta de tres elementos: El primero de un pasamuros sobre brida CF35, con dos tubos de acero de $\frac{1}{4}$ ". El segundo elemento, está formado por un serpentín o conducto flexible de $\frac{1}{4}$ ", y el último es un depósito de cobre, que sirve de intercambiador de calor entre el Nitrógeno líquido y la base metálica sobre la que se encuentra la termopila. Este depósito de cobre, está en contacto con la superficie externa del boom (nombre del conjunto que alberga el sensor de temperatura y el sensor de viento), haciendo que el calor se transmita por contacto térmico, llegando hasta los termopares, que se encuentran, en el extremo opuesto del boom, que sería la parte más próxima al suelo y a la atmósfera Marciana. Este primer ensayo se debe realizar en condiciones de Marte (presión total de 7mbar y composición de gases similar)

Con este ensayo, debemos poder mejorar nuestro sistema de fijación, con el fin de optimizar la temperatura en la zona de la termopila, y hacer que sea un proceso relativamente rápido, para poder facilitar la toma de datos.

Experimentalmente nos dimos cuenta de que **no** éramos capaces de conseguir nuestro objetivo, debido a los siguientes factores.

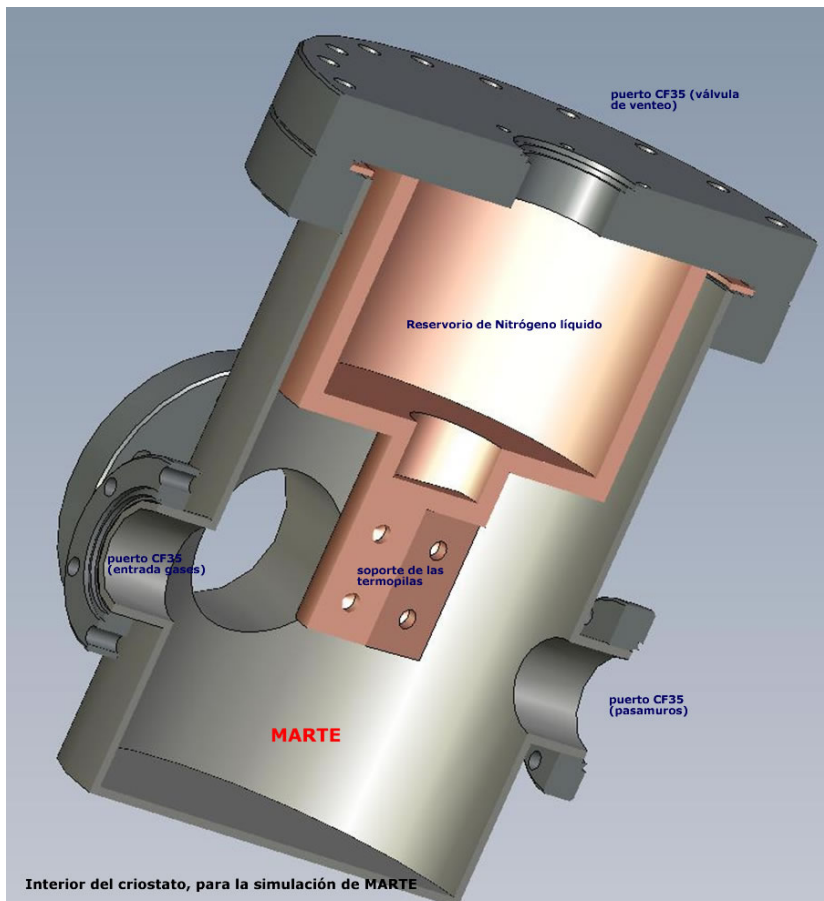
- La temperatura en el intercambiador de cobre dependía directamente del flujo y de la presión del dewar de nitrógeno líquido. Esto quiere decir que lo que conseguíamos introducir en nuestro intercambiador, era una mezcla de gas y líquido, que no le daba estabilidad térmica suficiente, además de no poder bajar la temperatura por debajo de -75°C .
- La prueba la realizamos para presiones del dewar de Nitrógeno desde 0.5bar hasta 15bar. El mejor resultado se obtuvo para una presión de 2bar, ya que el tiempo en bajar a la máxima temperatura fue de 25 minutos.
- La mala transmisión térmica que había entre el intercambiador de cobre y la base de la termopila. No existía posibilidad de modificación, ya que estábamos limitados por el diámetro interno de la brida de colocación. Debiendo quedar lo más cercano, pero sin contacto a la ventana transparente al IR.

Del resultado de esta prueba nos vimos obligados a diseñar una cámara de vacío criogénica específica para probar experimentalmente este tipo de dispositivos. Las principales características con las que debía contar son las siguientes:

- Muestra (en este caso, termopila) sometida a las condiciones atmosféricas de Marte, presión temperatura y composición de gases. La manera de poder mantener la muestra a una baja temperatura, es crear un sistema criogénico de Nitrógeno líquido, que mediante gravedad permita la máxima transferencia de calor del reservorio o deposito de nitrógeno, al portamuestras donde se coloca la termopila.
- Minimización del volumen destinado a crear la atmosfera de Marte (principalmente CO₂ a una presión de 7mbar)
- Ventana transparente al IR, con un diámetro efectivo de 35mm (para que el ángulo solido de visión de las termopilas pueda ver el cuerpo negro sin interferencias). Al otro lado de la ventana se coloca nuestro cuerpo negro
- Control de la temperatura en la base del portamuestras mediante un diodo de silicio, dotado de un calefactor de 50 Ohmios, que nos permita regular la temperatura del portamuestras desde 66°K hasta 300°K.
- Monitorización simultanea de la temperatura del cuerpo negro, de la temperatura del portamuestras donde se aloja la termopila y de la lectura del voltaje de la termopila.

Simulación teórica de los gradientes de temperaturas en el laboratorio Interior del criostato en condiciones de vacío, presión del orden de 1E-7mbar.

En este caso tenemos las siguientes condiciones de contorno:



1. Cámara de vacío, en condiciones de ultra alto vacío (1E-7mbar)

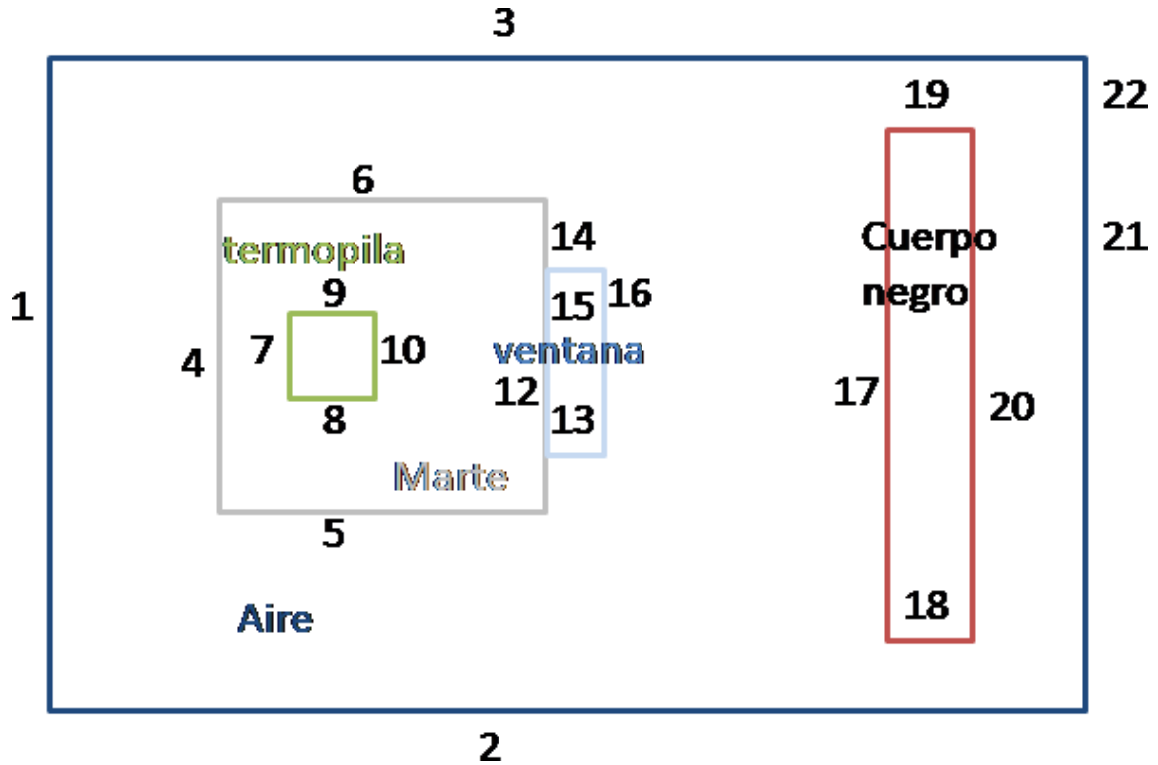
2. Termopila en el interior de la cámara de vacío, situada en el centro geométrico de la cámara, enfrente de una ventana de vidrio transparente a la radiación infrarroja, a una temperatura constante de 166°K

3. Cuerpo negro a una temperatura constante de 313°K

4. Ambiente que rodea nuestro sistema experimental, se trata de aire a 300°K y 1 atmosfera de presión.

Consideramos que la superficie de las termopilas, así como la superficie del cuerpo negro tienen una emisividad conocida, que hace que consideremos que la transmisión del calor se realice mediante

conducción y radiación. Según esto tenemos que resolver la ecuación diferencial del calor, con los siguientes parámetros.



	Condiciones de contorno	h	T_{inf}	T_0	radiación		T_{amb}	J_0
1, 2, 3, 21, 22	Temperatura			300				
4, 5, 6, 11, 13, 14, 15	Continuidad							
7, 8, 9	Temperatura			166	Superficie ambiente	a	0.01	166
10	Temperatura			166	Superficie superficie	a	0.01	J
12	Temperatura	25	280		Superficie ambiente	a	0.01	166
16	Fuente de calor	25	300		Superficie ambiente	a	0.01	300
17	Temperatura			313	Superficie superficie	a	0.1	300
18, 19, 20	Temperatura			313				

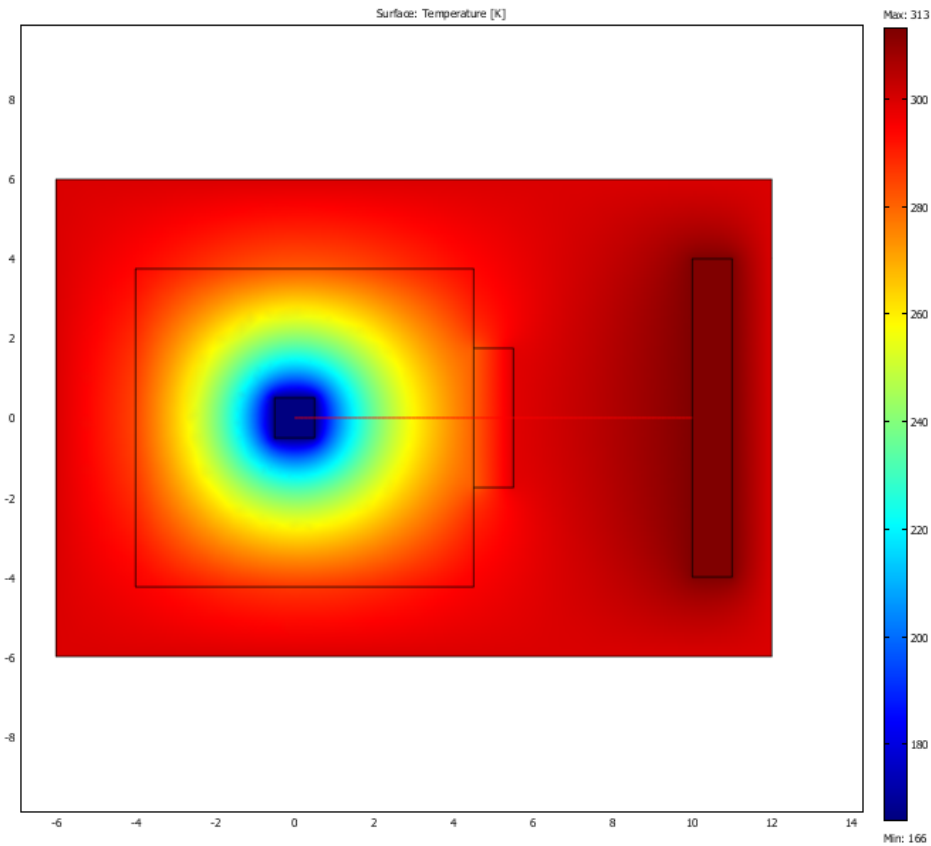
	k		C_p	Transparente
Marte (vacío)	0.01	1E-9	0.783	Si
Termopila	400	8700	385	No
Cuerpo negro	44.5	7850	475	No
Aire	0.002	1.1774	1.006	Si
Ventana	1.38	2203	703	Si

Para las condiciones de contorno **12** y **16**, tenemos que resolver la siguiente ecuación:

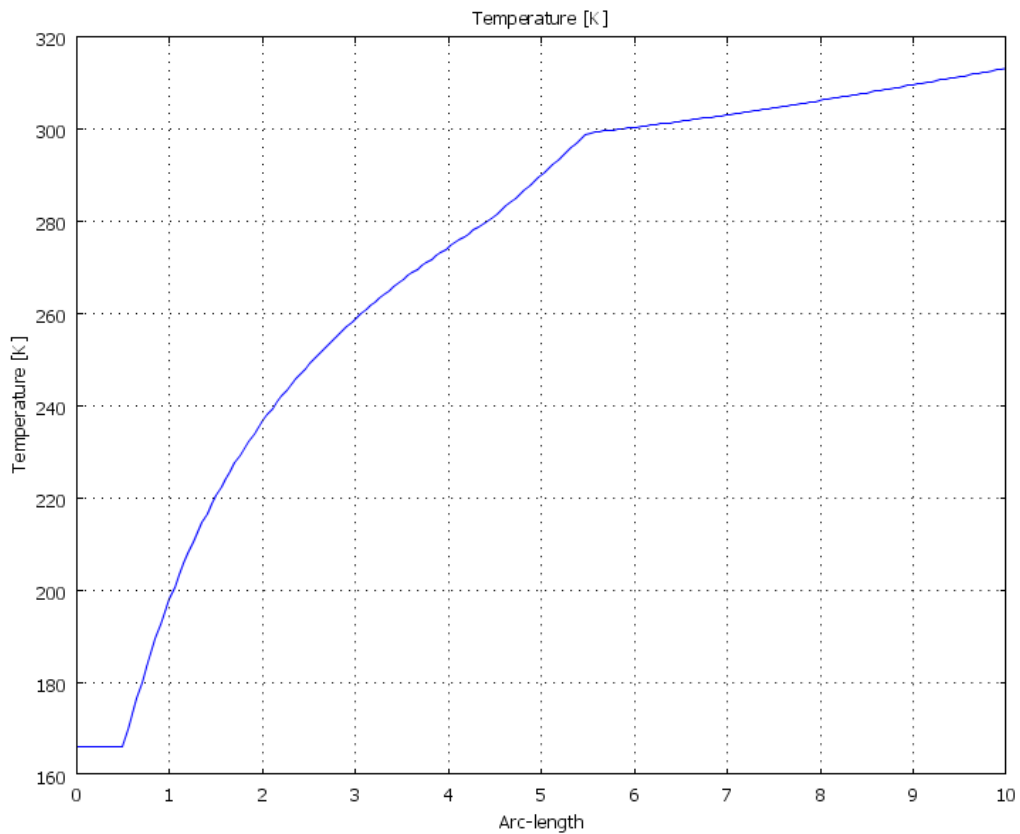
Para las condiciones de contorno **10** y **17**, resolvemos las siguientes ecuaciones:

Para las condiciones de contorno **4, 5, 6, 11, 13, 14** y **15**, se resuelve la siguiente ecuación:

$$-\vec{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - \vec{n}_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = 0$$



Siendo la variación de temperatura, a lo largo de la línea imaginaria que une la termopila con el cuerpo negro a través de la ventana, la siguiente figura.



En esta figura observamos, como la temperatura aumenta de manera exponencial, desde la superficie de la termopila hasta la ventana IR (distancia en centímetros). En la ventana la temperatura aumenta de manera lineal hasta la superficie exterior, desde donde vuelve a aumentar de manera exponencial (prácticamente lineal) hasta la superficie del cuerpo negro.

Vemos que en condiciones de vacío, no se produce ninguna condensación en la superficie de la ventana, lo que nos garantiza que no se produzcan fenómenos de absorción y emisión en la longitud de onda de lectura de las termopilas, ya que el gradiente de temperaturas entre ambas superficies, es muy pequeña. Además de este modo podemos mantener la termopila a la temperatura de la atmosfera de Marte y nuestro cuerpo negro mantenerlo a distintas temperaturas, siempre por encima de los 300°K

Interior del criostato en condiciones atmosféricas de MARTE (95% de CO₂ a 7 mbar)

En este caso tenemos las siguientes condiciones de contorno.

1. Cámara de vacío, en condiciones de Marte (95% CO₂, Ar 1.7%, N 2.8%) a una presión total de 7mbar
2. Termopila en el interior de la cámara de vacío, situada en el centro geométrico de la cámara, enfrente de una ventana de vidrio transparente a la radiación infrarroja, a una temperatura constante de 166°K
3. Cuerpo negro a una temperatura constante de 313°K
4. Ambiente que rodea nuestro sistema experimental, se trata de aire a 300°K y 1 atmosfera de presión

Consideramos que la superficie de las termopilas, así como la superficie del cuerpo negro tienen una emisividad relativa, que hace que consideremos que la transmisión del calor se realice mediante conducción y radiación. Según esto tenemos que resolver la ecuación diferencial del calor, con los siguientes parámetros.

	Condiciones de contorno	h	T _{inf}	T ₀	radiación	ε	T _{amb}	J ₀
1, 2, 3, 21, 22	Temperatura			300				
4, 5, 6, 11, 14	Fuente de calor	100	166					
7, 8, 9	Temperatura			166	Superficie ambiente	0.01	166	εσT ⁴
10	Temperatura			166	Superficie superficie	0.01	166	J
12	Fuente de calor	25	166		Superficie ambiente	0.01	166	εσT ⁴
13, 15	Continuidad							
16	Fuente de calor	25	290		Superficie ambiente	0.01	300	εσT ⁴
17	Temperatura			313	Superficie superficie	0.1	300	J
18, 19, 20	Temperatura			313				

	k	ρ	C _p	Transparente
Marte	0.001	2.473	0.783	Si
Termopila	400	8700	385	No
Cuerpo negro	44.5	7850	475	No
Aire	0.002	1.1774	1.006	Si
Ventana	1.38	2203	703	Si

Para las condiciones de contorno **12** y **16**, tenemos que resolver la siguiente ecuación:

$$-\vec{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - \vec{n}_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = q_0 + h(T_{inf} - T) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$

Para las condiciones de contorno **10** y **17**, resolvemos las siguientes ecuaciones:

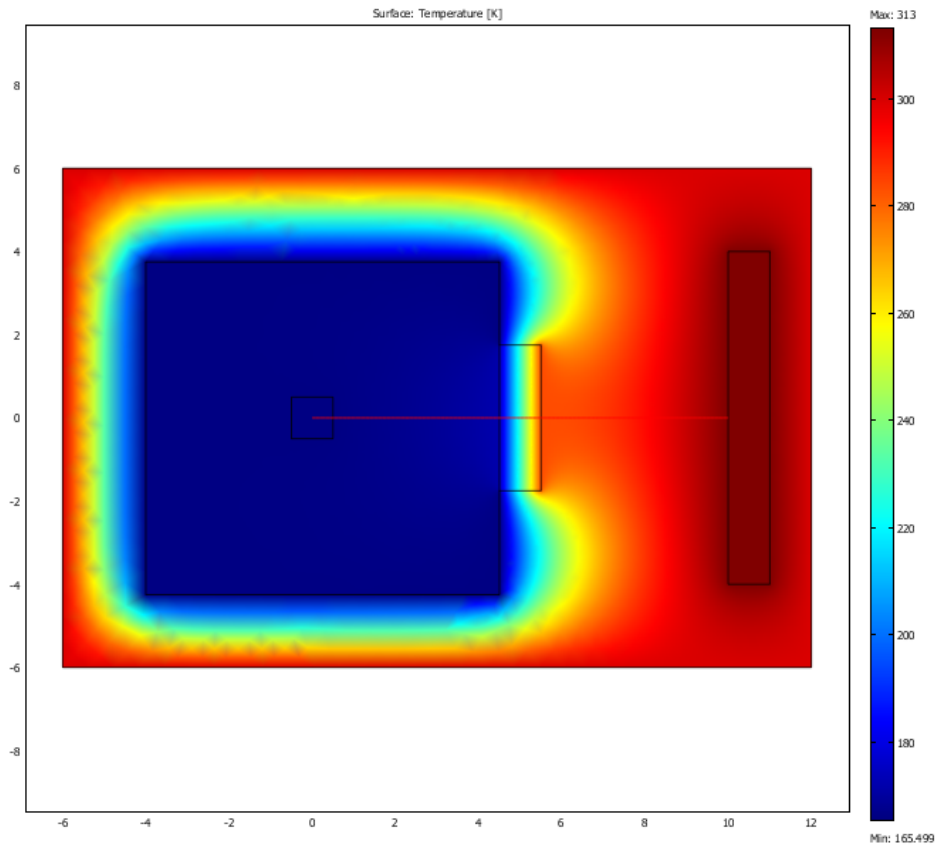
$$T = T_0$$
$$(1 - \varepsilon)G = J_0 - \varepsilon\sigma T^4$$

Para las condiciones de contorno **13** y **15**, se resuelve la siguiente ecuación:

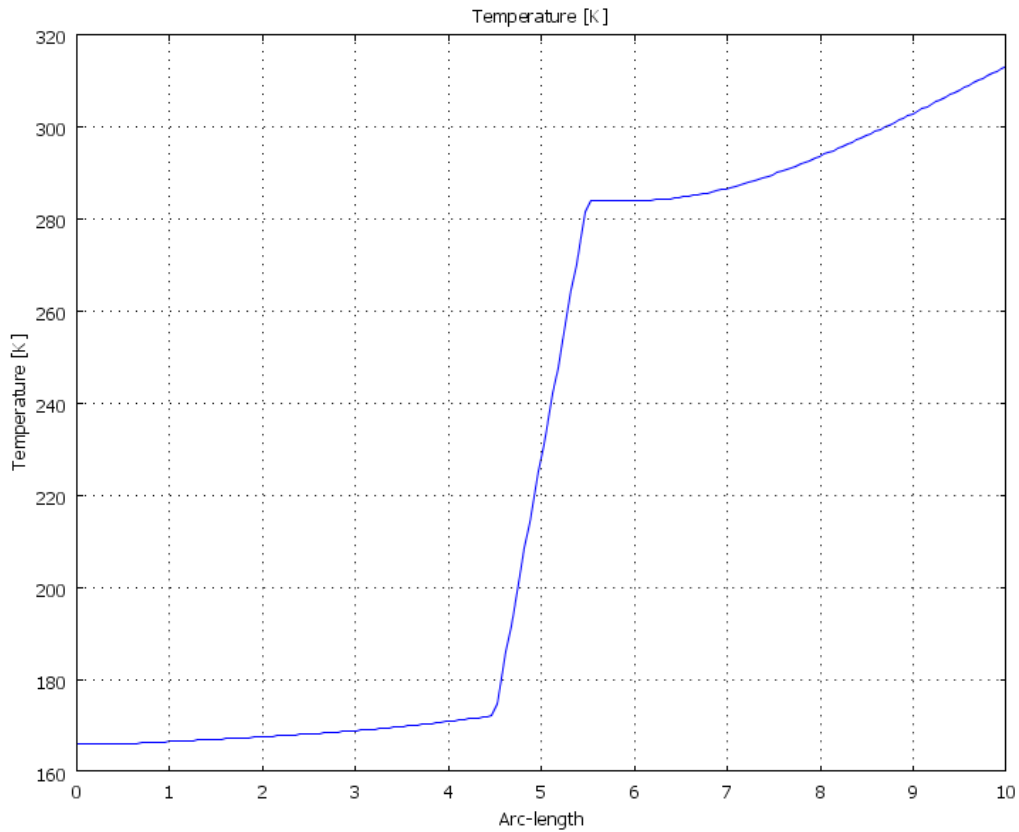
$$-\vec{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - \vec{n}_d (-k_d \nabla T_d) = 0$$

Para las condiciones de contorno **4**, **5**, **6**, **11** y **14**, se resuelve la siguiente ecuación:

$$-\vec{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - \vec{n}_d (-k_d \nabla T_d) = q_0 + h(T_{inf} - T)$$



Siendo la variación de temperatura, a lo largo de la línea imaginaria que une la termopila con el cuerpo negro a través de la ventana, la siguiente figura.



En esta figura observamos, como la temperatura aumenta de manera muy suave (en un proceso casi estático, se logra mantener toda la atmosfera en el interior del criostato a la temperatura de la termopila), desde la superficie de la termopila hasta la ventana IR. En la ventana la temperatura aumenta de manera lineal hasta la superficie exterior, desde donde vuelve a aumentar de manera exponencial hasta la superficie del cuerpo negro.

En este caso la variación de temperatura que se produce en la ventana es importante, por lo que en la parte exterior a ella y en toda la cámara de vacío, es de esperar condensación de agua que provenga del aire que rodea todo el sistema experimental. Este factor se tendrá en cuenta cuando se realice el experimento en el laboratorio. La mejor manera de solucionar este problema en el laboratorio, es crear una atmosfera alrededor de todo el sistema experimental de Nitrógeno, para que desplace al agua.