

Trabajo de Fin de Máster
Ingeniería Industrial

ADAPTACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LA
INSTRUMENTACIÓN PARA
CRIOPRESERVACIÓN DE ORGANOS Y
MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS
DEL PROCESO DE RECALENTAMIENTO POR
ULTRASONIDOS

Autor: Victor Villalar Lara

Tutor: Ramon Risco Delgado

Dpto. Física Aplicada
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Máster
Ingeniería Industrial

**ADAPTACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LA
INSTRUMENTACIÓN PARA
CRIOPRESERVACIÓN DE ORGANOS Y
MODELADO MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS DEL PROCESO DE
RECALENTAMIENTO POR ULTRASONIDOS**

Autor:

Victor Villalar Lara

Tutor:

Ramon Risco Delgado

Profesor titular

Dpto. Física Aplicada
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Máster: ADAPTACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA
CRIOPRESERVACIÓN DE ORGANOS Y MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL
PROCESO DE RECALENTAMIENTO POR ULTRASONIDOS

Autor: Victor Villalar Lara

Tutor: Ramón Risco Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

este proyecto vamos a investigar

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Especial agradecimiento a mis compañeros de trabajo durante este proyecto: Enrique Alcalá, Beatriz Albiol, José Manuel Ortiz, Eduardo Guillén Jurado y Pablo Garijo Forcada. Ellos han hecho que los momentos duros sean más amenos y juntos hemos encontrado todas las soluciones cuando se veía imposible, reinventándonos con cada adversidad.

También me gustaría dar las gracias por todo a nuestro tutor, Ramón Risco. Llegué un día a él a hacerle una consulta sobre otro tema, y salí de su despacho con muchísima ilusión por empezar este proyecto. Además de tutor técnico del proyecto ha sido mi tutor emocional, ya que me ayudó en los momentos más duros a no rendirme y a seguir adelante hasta el día de la entrega. Conseguir al fin mi título de Ingeniero Superior se lo debo en gran parte a él.

Por último, como no, mi más sincero agradecimiento a mi familia que me han apoyado durante toda la vida para conseguir mi sueño de convertirme en ingeniero.

Victor Villalar Lara

Sevilla, 2020

Resumen

En este documento vamos a profundizar en el tema de la criopreservación de órganos, centrándonos en el desarrollo de un sistema automatizado de criopreservación. Dicho sistema consta a su vez de varios subsistemas:

- Sistema de vitrificación: denominado como BioCool, por la marca que hemos utilizado. Que se encarga de bajar la temperatura mediante la programación de rampas descendente.
- Sistema de perfusión: se ha desarrollado una adaptación del sistema de perfusión que construyó Álvaro Pérez en su proyecto de fin de máster [1], de forma que se integre con el resto de sistemas.
- Sistema Langendorff: que nos ayuda a conocer el estado de un corazón extraído del organismo haciendo que lata al hacer circular por él una solución salina a una presión concreta.

Durante el desarrollo de este documento se va a describir los diferentes sistemas anteriormente nombrados, de forma que pueda ser replicable y adaptable para futuras investigaciones.

Además, y con motivo de la pandemia actual, se ha hecho investigación simulada en el área del recalentamiento de tejidos vitrificados utilizando el programa COMSOL Multiphysics®, con el cual se propone una solución para el recalentamiento de una sección de vena aorta mediante ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU).

Abstract

In this document, we are going to delve into the topic of organ cryopreservation, focusing on the development of an automated cryopreservation system. This system in turn consists of several subsystems:

- Vitrification system: called BioCool, for the brand we have used. Which is responsible for lowering the temperature by programming descending ramps.
- Perfusion system: an adaptation of the perfusion system that Álvaro Pérez built in his master's degree project [1] has been developed, so that it can be integrated with the rest of the systems.
- Langendorff System: which helps us to know the state of a heart extracted from the body by making it beat by circulating a saline solution through it at a specific pressure.

During the development of this document, the different aforementioned systems will be described, so that it can be replicable and adaptable for future research.

In addition, and due to the current pandemic, simulated research has been carried out in the area of rewarming vitrified tissues using the COMSOL Multiphysics® program, with which a solution is proposed for rewarming an aortic vein section using high intensity focused ultrasound waves. (HIFU).

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Ilustraciones	xv
Notación	xvii
1 Introducción	1
1.1 Criopreservación	1
1.2 Crioprotectores	2
1.3 Estrategia de perfusión del Corazón	3
1.4 Recalentamiento por Ultrasonidos focalizados de alta intensidad	5
2 Objetivo	7
3 Sistemas que componen el proceso de vitrificación	9
3.1 Controlled Rate Freezer (BioCool)	9
3.1.1 Programación de la rampa de enfriamiento	10
3.1.2 Agitador	10
3.1.3 Ventilador externo del BioCool	11
3.2 Sistema de perfusión	11
3.2.1 Hardware	11
3.2.2 Software	13
3.3 Langendorff	22
3.3.1 Solución Tyrodes	23
3.3.2 Bomba de jeringa de precisión	24
3.3.3 Oxigenación de la solución Tyrodes	26
3.3.4 Estabilización del pH	26
3.4 Monitorización de temperatura	27
4 Resultados experimentales de la vitrificación	29
5 Simulación de recalentamiento HIFU	31
5.1 <i>Construcción del modelo</i>	31
5.2 <i>Definición de las propiedades físicas del modelo</i>	32
5.3 <i>Físicas que intervienen</i>	35
5.3.1 Física de Presión acústica	35
5.3.2 Física de Transferencia de Biocalor	38
6 Resultados	39
7 Conclusiones y Líneas futuras	44
Referencias	45
Anexo I: Instalación Software LabVIEW	46
Anexo II: Informe COMSOL	52

1	Contenido	53
1	Definiciones globales	54
1.1	<i>Parámetros</i>	54
2	Componente 3	55
2.1	<i>Definiciones</i>	55
2.1.1	Sondas	55
2.1.2	Sistemas de coordenadas	56
2.2	<i>Geometría 3</i>	56
2.2.1	Esfera 1 (sph1)	57
2.2.2	Bloque 1 (blk1)	57
2.2.3	aorta (blk2)	57
2.2.4	HIELO (sph2)	58
2.2.5	Esfera 3 (sph3)	58
2.3	<i>Materiales</i>	59
2.3.1	Ethylene glycol	59
2.3.2	H2O (water) [solid,tension]	63
2.3.3	Muscle	71
2.4	<i>Presión acústica, frecuencia</i>	72
2.4.1	Ajustes de interfaz de física	73
2.4.2	Variables	74
2.4.3	Presión acústica 1	76
2.4.4	Contorno rígido al sonido (pared) 1	85
2.4.5	Valores iniciales 1	86
2.4.6	Desplazamiento normal 1	87
2.4.7	Presión acústica 2	89
2.4.8	Presión acústica 3	98
2.5	<i>Transferencia de biocalor 2</i>	107
2.5.1	Ajustes de interfaz de física	108
2.5.2	Variables	109
2.5.3	Tejido biológico 1	119
2.5.4	Valores iniciales 1	130
2.5.5	Aislamiento térmico 1	131
2.5.6	etilenglicol	133
2.5.7	Fuente de calor 1	146
2.5.8	Valores iniciales 2	147
2.6	<i>Malla 6</i>	147
2.6.1	Tamaño (size)	148
2.6.2	Tetraédrico libre 1 (ftet1)	149
3	Estudio 1	150
3.1	<i>Dominio de la frecuencia</i>	150
3.2	<i>Configuraciones del resoledor</i>	150
3.2.1	Solución 1	150
4	Estudio 2	154
4.1	<i>Temporal</i>	154
4.2	<i>Configuraciones del resoledor</i>	155
4.2.1	Solución 2	155
5	Resultados	161
5.1	<i>Conjuntos de datos</i>	161
5.1.1	Estudio 1/Solución 1	161
5.1.2	Plano de corte 1	161
5.1.3	Estudio 2/Solución 2	162
5.1.4	Plano de corte 2	163

5.1.5	Solución de sonda 5	163
5.2	<i>Tablas</i>	164
5.2.1	Evaluation 3D	164
5.2.2	Tabla de sonda 1	164
5.3	<i>Trazar grupos</i>	166
5.3.1	Presión acústica (acpr)	166
5.3.2	Nivel de presión sonora (acpr)	166
5.3.3	Presión acústica, isosuperficies (acpr)	167
5.3.4	Temperatura (ht2)	167
5.3.5	Contornos isotérmicos (ht2)	168
5.3.6	Grupo gráfico de sonda 8	168

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Estructura de un tejido.	2
Figura 2: Flujo natural del corazón	4
Figura 3: Concentración, presión y temperatura para experimento con riñón de conejo.	5
Figura 4: HIFU	6
Figura 5: Sistema de vitrificación	10
Figura 6: Sistema de perfusión	11
Figura 7: Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS	12
Figura 8: Bomba peristáltica.	13
Figura 9: Código completo sin control de temperatura	14
Figura 10: Código del módulo caudal/temperatura para DMSO	15
Figura 11: Código del módulo caudal/temperatura para cualquier crioprotector	15
Figura 12: Código del módulo componentes concentración	16
Figura 13: Código del módulo rampa concentración	17
Figura 14: Interfaz del módulo configuración bomba1	18
Figura 15: Código del módulo configuración bomba 1	18
Figura 16: Código del módulo configuración bomba 2	19
Figura 17: Código del módulo control bomba 1	19
Figura 18: Interfaz de usuario del SW de perfusión	20
Figura 19: Seleccionar ruta para exporta datos	20
Figura 20: Configuración tarjeta y caudal	20
Figura 21: Configuración de las bombas	21
Figura 22: Datos del Crioprotector	21
Figura 23: Switchs para activar las bombas	21
Figura 24: Offset de tiempo	22
Figura 25: Sistema Langendorff	23
Figura 26: Bomba de jeringa de precisión HARVARD PHP 4400	24
Figura 27: Bombona de Carbógeno	26
Figura 28: Solución Tyrodes oxigenada con carbógeno	27
Figura 29: <i>PicoLog</i>	28
Figura 30: Corazón conectado al sistema Langendorff	29
Figura 31: Evolución de temperaturas del experimento 15	30
Figura 32: Resultado de los experimentos	30
Figura 33: Modelo de 6 transductores propuesto	31
Figura 34: Geometría completa del modelo	32
Figura 35: Dominio del material aorta	33
Figura 36: Propiedades físicas de aorta	33

Figura 37: Dominio del material hielo	34
Figura 38: Propiedades físicas del hielo	34
Figura 39: Dominio del material etilenglicol	35
Figura 40: Propiedades físicas del medio transmisor	35
Figura 41: contornos rígidos al sonido	37
Figura 42: Transductores de presión	38
Figura 43: Asociación de parámetros a la geometría	40
Figura 44: Resultado de la Presión acústica	41
Figura 45: Resultado del calentamiento en $T=0s$	41
Figura 46: Resultado del calentamiento en $T=7.5s$	41
Figura 47: Resultado del calentamiento en $T=60s$	42
Figura 48: Gradiente de temperatura durante la simulación	42
Figura 49: Gradiente de temperatura al final de la simulación	43
Figura 50: Archivos necesarios para la instalación	46
Figura 51: InstaCal	47
Figura 52: Configuración de la Tarjeta DAQ en InstaCal	48
Figura 53: Asignación del puerto de la tarjeta DAQ	48
Figura 54: Test analógico de DAQ	49
Figura 55: Opciones del test DAQ	50
Figura 56: Pantalla de inicio del Test DAQ	51
Figura 57: Resultados típicos del Test DAQ	51

Notación

DAQ	Adquisición de datos
V	Voltio
USB	Universal Serial Bus
SW	Software

1 INTRODUCCIÓN

En este proyecto vamos a investigar sobre la criopreservación de órganos desde el punto de vista ingenieril, ahondando en los problemas tecnológicos que se presentan en el proceso de la criopreservación y planteando vías para alcanzar la criopreservación del corazón de ratón.

En primer lugar, se dará una visión general de la criopreservación y cómo alcanza su objetivo de preservar las células y tejidos vivos una vez extirpados del cuerpo, y daremos algunas de las aplicaciones que puede llegar a tener esta técnica.

Por un lado, explicaremos cómo hemos llevado a cabo el proceso de vitrificación de un corazón de ratón integrando los diferentes sistemas necesarios, comprobando primero su estado una vez extraído del ratón, mediante el sistema conocido como Langendorff. Posteriormente se comienza con la perfusión de los crioprotectores usando dos bombas que irán variando su caudal en función del momento en el que estemos de la perfusión. De forma cooperada con la perfusión se irá reduciendo la temperatura para que los tejidos aumenten la concentración de crioprotector sin intoxicarse.

Por otro lado, realizaremos una simulación del recalentamiento de un pequeño tejido de aorta utilizando la técnica ultrasonidos focalizados de alta potencia (HIFU), comprobando la validez de un modelo de 6 transductores posicionados en las caras de un cubo.

1.1 Criopreservación

La criopreservación es el proceso en el cual las células o tejidos son vitrificados a muy bajas temperaturas, generalmente entre -80 °C y -196 °C , para disminuir las funciones vitales de una célula o un organismo y poderlo mantener en condiciones de vida suspendida por tiempo indefinido. A esas temperaturas, cualquier actividad biológica, incluidas las reacciones bioquímicas que producirían la muerte de una célula, quedan efectivamente detenidas. De esta forma se consigue conservar órganos vivos durante mucho más tiempo.

Una de las metas de la ciencia es prolongar la vida de los seres vivos, y con ello de sus órganos. De ahí la importancia de la criopreservación que podría lograr mantener vivos los órganos fuera del cuerpo durante más tiempo, dando lugar a más trasplantes o más durabilidad para su investigación. Algunas de las aplicaciones de la criopreservación podrían ser:

- Un banco de órganos, al igual que ya existen los bancos de espermatozoides, embriones u otros tipos celulares. Se podría llegar a conseguir almacenar durante años órganos sanos para poder ser trasplantados a quien lo necesite. Actualmente cuando se hace un trasplante, el proceso debe ser en un breve periodo de tiempo entre la extracción y el trasplante, puesto que los órganos por lo general duran poco tiempo vivos fuera del organismo. Esto provoca que el transporte sea complejo, e incluso que no se puedan hacer trasplantes por falta de compatibilidad histológica.
- Se podría almacenar de forma más longeva la sangre, lo que sería muy interesante para aquellas personas que por motivos culturales o religiosos no aceptan perfusiones de sangre de otras personas, de esta forma podrían almacenar su propia sangre hasta que la necesiten.
- Ampliar el tiempo de estudio de un órgano, tanto para investigación científica como para estudiar la compatibilidad que tendrá con un cierto sujeto que necesite un trasplante.

La principal dificultad a la que se enfrenta la criopreservación de órganos es la creación de cristales de hielo en los tejidos, esto provoca dos problemas:

- Desequilibrio osmótico:

La ósmosis es un fenómeno físico relacionado con el movimiento de un disolvente (agua) a través de una membrana semipermeable. Tal comportamiento supone una difusión simple a través de la membrana, sin gasto de energía, provocado por la diferencia de concentraciones de soluto (sales).

En los tejidos formados por células, tenemos el líquido intracelular y el líquido intersticial que están separados por las membranas de las células. Estas células viven gracias a la ósmosis entre ambos líquidos.

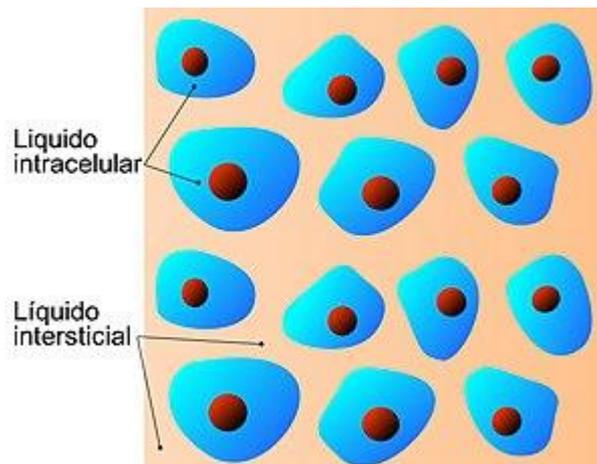


Figura 1: Estructura de un tejido.

Si el líquido intersticial se solidifica antes que el líquido intracelular se crea un desequilibrio osmótico debido a que las sales disueltas dentro de la célula no se pueden regular con el exterior, provocando la deshidratación de la célula y por tanto su muerte.

Por otro lado, está la creación de cristales. Cuando estos cristales crecen, teniendo en cuenta que el hielo ocupa más volumen que el agua, provocan daños físicos irreparables en los tejidos celulares.

- Creación de cristales

El agua solidifica mediante dos procesos: La nucleación y el crecimiento de cristales.

La nucleación es el agrupamiento de varias moléculas de agua formando un núcleo de crecimiento del cristal. Este fenómeno se produce en una posición aleatoria y se ve desfavorecido por la agitación, dado que los núcleos se destruyen. A medida que la temperatura disminuye, las moléculas necesitan menos energía para unirse, por lo que llega un punto en el que la agitación no es suficiente para evitar la nucleación.

El crecimiento de cristales se produce una vez están los núcleos formados, y lo hacen por donde la viscosidad del líquido es menor, por lo que para evitar este fenómeno es conveniente aumentar la viscosidad del líquido. En este caso, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura.

Para evitar la creación de cristales se usan crioprotectores. Se podría cargar el órgano de una alta concentración de crioprotector y bajar su temperatura, y el órgano vitrificaría sin crear cristales. Pero estaríamos dejando inservible el órgano por la toxicidad del crioprotector.

Es muy importante partir de la idea de que el crioprotector es tanto menos tóxico para el órgano cuanto menor sea la temperatura de este. Por lo que tendremos que ir aumentando la concentración de crioprotector a la vez que disminuimos la temperatura del órgano, alcanzando la concentración máxima a una temperatura cercana a los -20°C , de esta forma no intoxicamos el órgano y evitamos la creación de cristales.

Aunque estemos particularizando en el enfriamiento, la problemática y solución mencionada son aplicable tanto al enfriamiento como al posterior recalentamiento.

En el recalentamiento se puede dar el fenómeno de la recristalización, es decir que puede aparecer cristales cuando estemos recalentando, aunque en el enfriamiento no se produjeran. Por lo que ahora la filosofía debe ser la contraria que en el enfriamiento, disminuir la concentración de crioprotector a medida que aumentamos la temperatura de forma rápida y uniforme.

1.2 Crioprotectores

Los crioprotectores son sustancias hidrosolubles y de baja toxicidad, que disminuyen el punto eutéctico de una solución dada, (punto en el cual una composición dada de A y B solidifica como un elemento puro), el descenso del punto eutéctico implica que se alcanzará una concentración dada de solutos a una temperatura menor, de forma que la célula estará más deshidratada y el gradiente osmótico al que estará sometido será menor. Bioquímicamente es posible distinguir tres tipos de crioprotectores, los alcoholes (metanol, etanol, propanol, 1-

2 propanediol y glicerol), azúcares (glucosa, lactosa, sacarosa) y el dimetil sulfóxido, los crioprotectores pueden clasificarse también en agentes penetrantes y no penetrantes de acuerdo a la permeabilidad celular.

Agentes crioprotectores no-penetrantes: son sustancias de alto peso molecular, efectivas a velocidades altas de congelación, son importantes por ejercer su acción crioprotectora promoviendo la rápida deshidratación celular y suelen usarse asociados a los agentes penetrantes. Los más utilizados son: sacarosa, glucosa, dextrosa y dextrano. Estos compuestos generalmente son polímeros que forman puentes hidrógeno con el agua, reduciendo la actividad de agua a una magnitud mucho mayor que la que se predeciría por su concentración molar (ellos no obedecen la ley de Raoult).

Los crioprotectores penetrantes: son de bajo peso molecular y permeables a través de la membrana celular. Son utilizados: el glicerol, el dimetilsulfoxido (DMSO) y propanediol (PROH). El dimetilsulfoxido es un solvente bipolar aprótico, hidrosoluble, de bajo peso molecular; desde el descubrimiento de sus propiedades crioprotectoras por Lovelock en 1959, el DMSO se ha usado como un crioprotector. Su acción crioprotectora se atribuye principalmente a su habilidad de prevenir acumulación excesiva de electrolitos y otras sustancias durante el proceso de congelamiento, y la formación de cristales de hielo que rompen la estructura de la membrana, su bajo peso molecular permite la entrada rápida través de la membrana celular, modula la estabilidad y fases de la bicapa de los fosfolípidos, así como también afecta los procesos de solvatación de agua. Se han sugerido las interacciones electrostáticas de DMSO con fosfolípidos lo cual parece ser crítico para la crioprotección de la membrana. El 1-2 propanediol ha sido utilizado principalmente para congelación de blastocistos y embriones en estado de preimplantación de humanos y otras especies.

Para este proyecto hemos usado DMSO como crioprotector por su extendido uso, por disponibilidad y por continuación del proyecto de Álvaro Pérez Aguilar [1].

Queda como línea futura utilizar otros tipos de crioprotectores y comprobar la efectividad de estos. Como ejemplo de comparativa entre diferentes crioprotectores se puede consultar la referencia [11].

1.3 Estrategia de perfusión del Corazón

Partiendo del flujo natural de la sangre por el corazón, vamos a canular la perfusión por la vena aorta, es decir, en sentido contrario a flujo natural. La presión hacia atrás hace que la válvula aórtica se cierre, obligando a la solución de crioprotector introducirse por los vasos coronarios, que normalmente suministran sangre al tejido del corazón. De esta forma inundamos por completo y de la forma más homogénea posible el corazón de crioprotector.

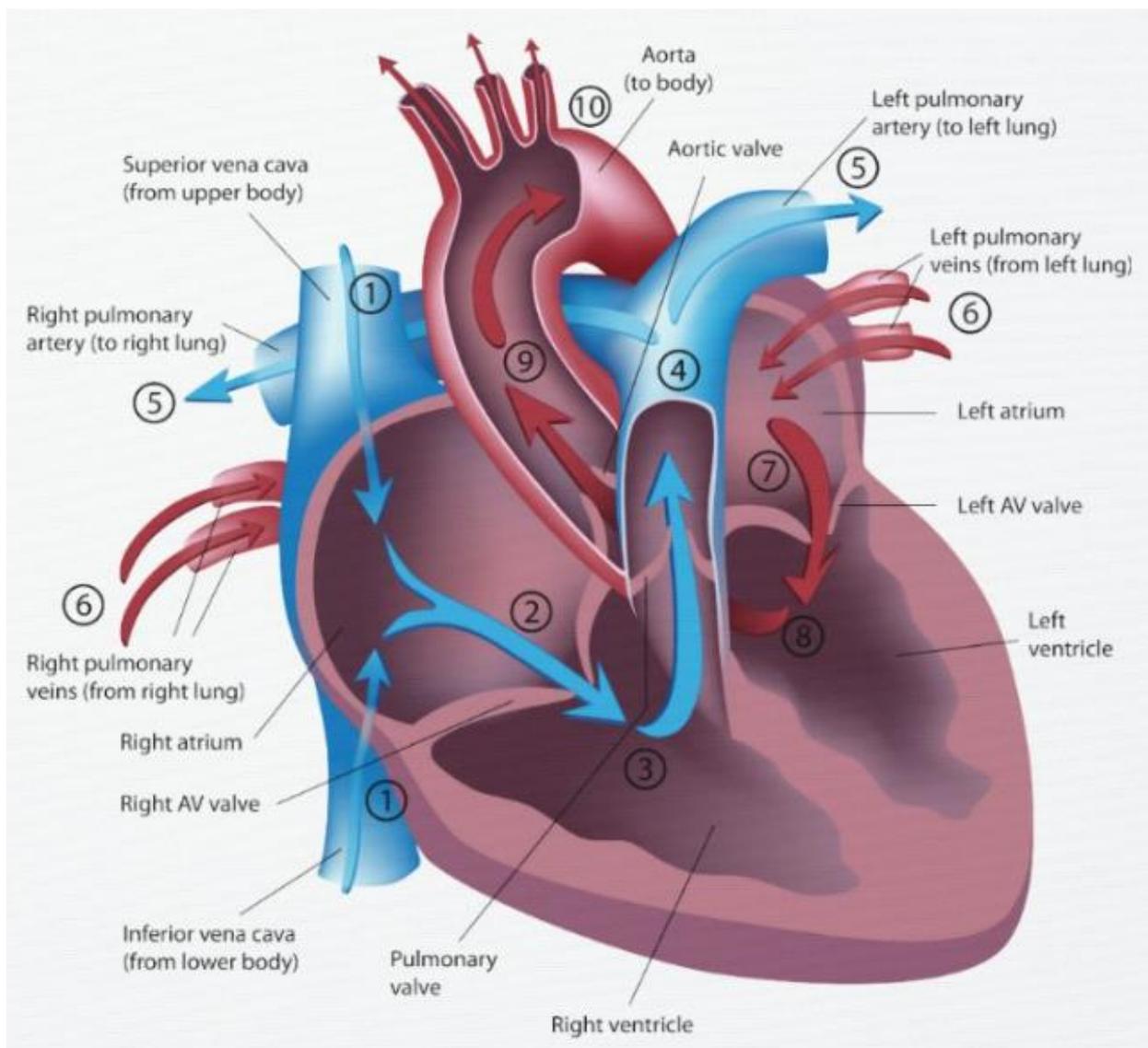


Figura 2: Flujo natural del corazón

La perfusión de crioprotector debe hacerse de forma progresiva, aumentando la concentración a la misma vez que bajamos la temperatura. Para el perfil de concentración-temperatura nos hemos basado en el experimento de Gregory M. Fahy [10]. En el cual se vitrifica un riñón de conejo.

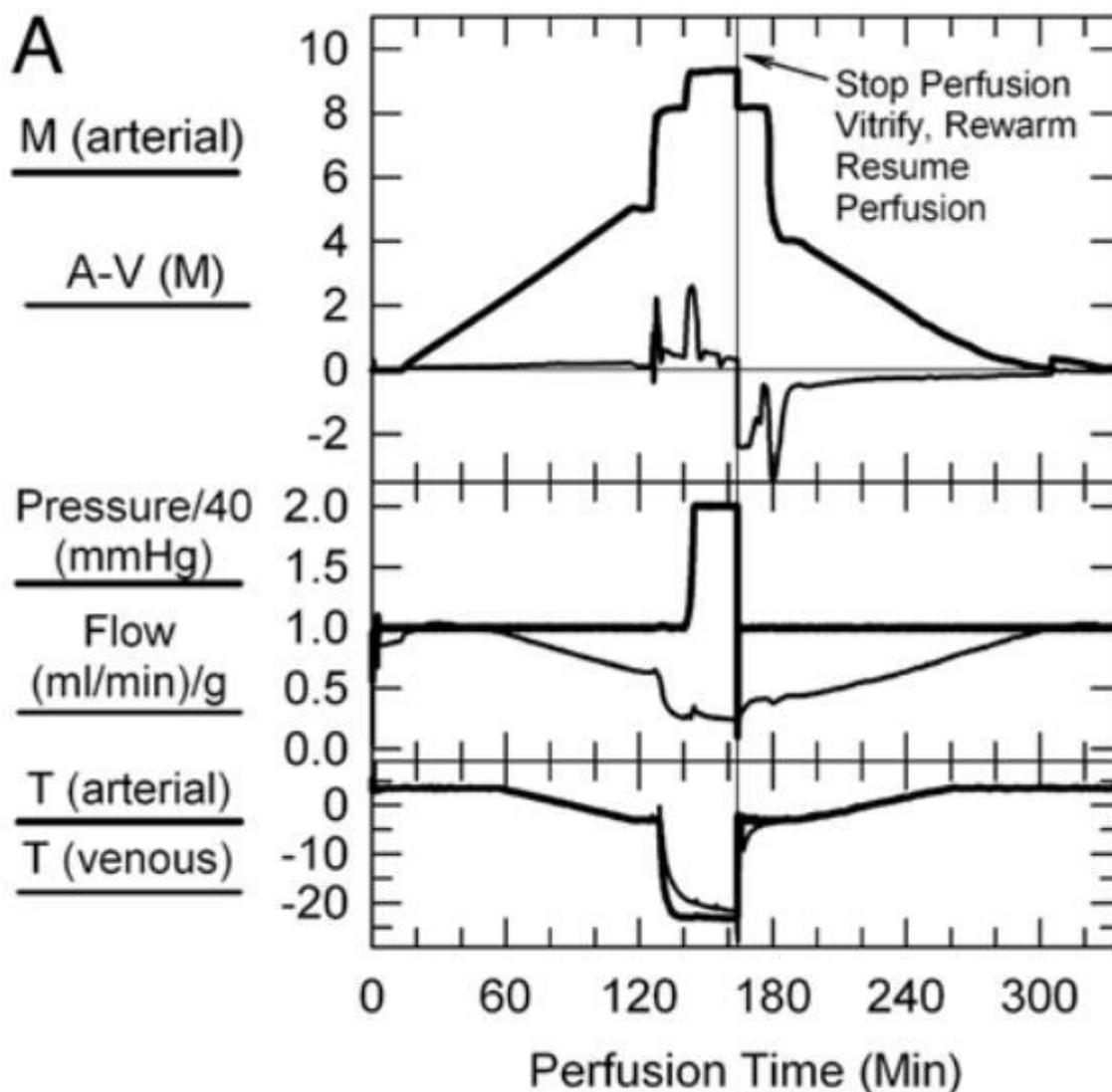


Figura 3: Concentración, presión y temperatura para experimento con riñón de conejo.

En nuestro experimento hemos adaptado la curva de Fahy [10] a un tiempo de perfusión de una hora. Cómo lo hemos hecho de se verá en el apartado “*Componentes recta de concentración*”.

1.4 Recalentamiento por Ultrasonidos focalizados de alta intensidad

A la hora del recalentamiento debemos tener en cuenta que aunque no hayan aparecido cristales durante el enfriamiento es posible que aparezcan en el recalentamiento, a este fenómeno se le llama *recristalización*. Por lo que es necesario calentar el órgano rápidamente y de forma uniforme en todo su dominio.

El Recalentamiento por Ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU) es una técnica de recalentamiento se basa en la propagación de ondas a una alta frecuencia con la intención de calentar una zona en concreto cuya geometría depende de la geometría del transductor que genere dichas ondas. Con esta técnica con la que pretendemos evitar la formación de cristales en el órgano a recalentar es posible calentar de una forma rápida y uniforme, del orden de decenas de grados por segundo.

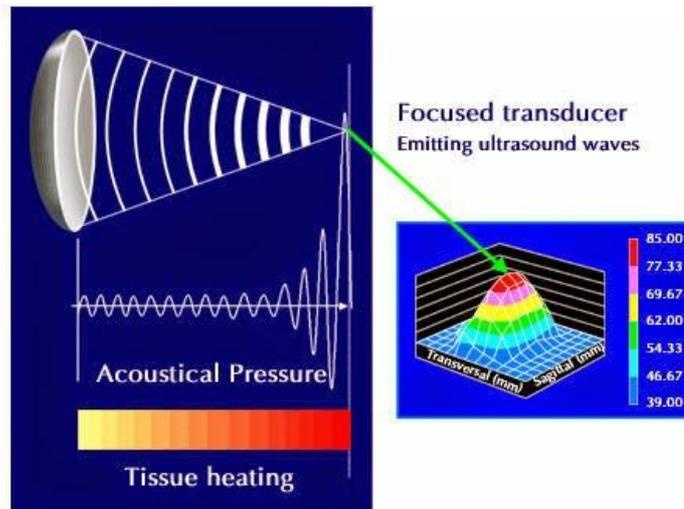


Figura 4: HIFU

Los ultrasonidos son generados mediante un material piezoeléctrico sometido a una tensión, de forma que el material sufre contracciones y expansiones proporcionales a la corriente a la que se somete. Los campos de ultrasonidos generados por transductores acústicos dependen del tamaño, forma y frecuencia de la fuente.[5]

Gracias a la ventaja que tiene de que únicamente afecta a la zona focal y no a las zonas colindantes, esta técnica es usada en la oncología para la extirpación de tumores o en el ámbito de la estética para diversos tratamientos de la piel.

2 OBJETIVO

Actualmente en el área de criopreservación estamos bastante avanzados en la criopreservación de pequeños grupos de células, pero queda mucho por delante en la criopreservación de órganos. El objetivo de este proyecto es avanzar en esta área con la criopreservación experimental de pequeños órganos, que en este caso será un corazón de ratón.

Centrándonos en la instrumentación necesaria, vamos a adaptar un sistema de perfusión controlado creado por el compañero Alvaro [1] y un sistema de enfriamiento programable de forma que consigamos hacer admisible la perfusión de crioprotector en un corazón de ratón para la vitrificación simultánea del mismo. Este sistema será utilizado experimentalmente en los proyectos de mis compañeros Enrique [4], Beatriz [3] y José Manuel [2].

Por otra parte, vamos a proponer una geometría y unos parámetros para la ejecución de un recalentamiento HIFU sobre una sección de aorta. El modelo consistirá en 6 transductores colocados en las caras de un cubo, de forma que el foco sea el centro del cubo, y emitirán un haz de ondas sobre el foco a una frecuencia de 2 MHz. Se analizarán los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el software COMSOL Multiphysics®.

3 SISTEMAS QUE COMPONEN EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN

En este apartado se van a presentar los tres sistemas independientes que se integrarán para formar parte del proceso único de vitrificación.

3.1 Controlled Rate Freezer (BioCool)

En el proyecto se ha utilizado un congelador de rampa controlada de la marca Bio-Cool que amistosamente denominaremos como BioCool en este documento.

El BioCool nos permite hacer una disminución controlada de la temperatura del órgano. El BioCool se programa por rampas decrecientes de temperatura/tiempo. Para definir estas rampas, debemos introducir la temperatura inicial, la temperatura final y la pendiente en °C/min, con un máximo de pendiente de -0.5 °C/min.

Durante el experimento utilizaremos el BioCool para bajar la temperatura del órgano progresivamente desde 4°C a -22°C. La curva de enfriamiento estará basada en el experimento de Fahy [10], el cual relacionó la temperatura de perfusión con la concentración de anticongelante (DMSO) en la perfusión. Debido a que la toxicidad del DMSO va disminuyendo a medida que disminuimos la temperatura, debemos ir subiendo la concentración de perfusión a medida que bajamos la temperatura.

Para enfriar el órgano se va a utilizar una solución de 700 ml, compuesta en volumen de 30% de agua destilada y 70% de etanol para evitar que se congele la solución. Es necesario agitar la solución para que la mezcla siga homogénea en todo momento y no se congele. Además, es necesario aislar térmicamente la solución lo máximo posible para poder controlar adecuadamente la temperatura, para ello usamos corcho en la superficie libre.

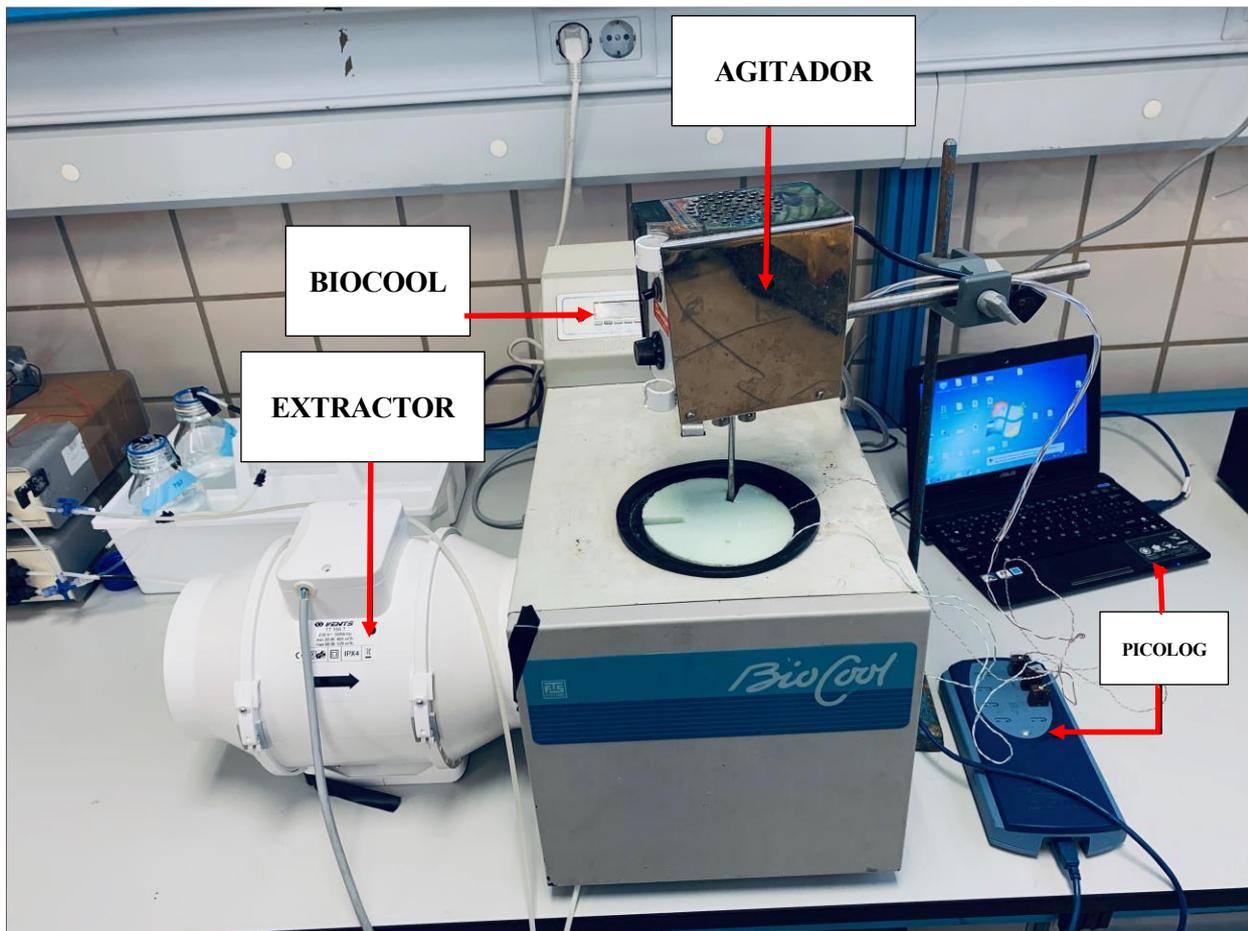


Figura 5: Sistema de vitrificación

3.1.1 Programación de la rampa de enfriamiento

El funcionamiento y programación de rampas es simple:

1. Mantener pulsado Power.
2. Mantener pulsado Set. Aparece en verde “Start Temp”. Seleccionar con las teclas Up y Down la temperatura inicial.
3. Presionar Set. Aparece en verde “Ramp C/min”. Seleccionar con las teclas Up y Down la pendiente de la recta en C/min. No hay que introducir signo, con temperatura inicial y final el programa ya entiende la inclinación.
4. Presionar Set. Aparece en verde “End Temp”. Seleccionar con las teclas Up y Down la temperatura final.
5. Presionar Set. Aparece en verde “Hold Time”. Seleccionar con las teclas Up y Down el tiempo que se mantiene a la temperatura final a partir de que se ha alcanzado.
6. Presionar Set. Aparecerá en rojo “Alarm”. Seleccionar 1 para que reproduzca un sonido cuando termine el Hold time. Pulsar Set.
7. Presionar Run y comienza el programa. En la pantalla se muestra la temperatura actual.

3.1.2 Agitador

Como hemos introducido anteriormente, durante el enfriamiento en el BioCool será necesario un agitador constante de la mezcla de agua y etanol para homogeneizar la temperatura del baño, puesto que el enfriamiento se da desde las paredes de este.

Para ello se utiliza el mezclador con potencia regulable. No es recomendable una gran potencia de agitado, puesto que cuando las temperaturas sean bajas un agitado demasiado violento provocaría un rozamiento que calentaría la mezcla. Lo recomendable es una potencia de agitado en la cual no se forme remolino.

3.1.3 Ventilador externo del BioCool

Como consecuencia del ciclo de refrigeración, internamente el BioCool se calienta bastante, necesitando una buena de refrigeración. A causa de su antigüedad, el ventilador interno dejó de funcionar de buenas a primeras. A pesar de varios intentos de arreglarlo, se optó por dos ventiladores externos uno que introdujera aire por una rejilla y otro que lo extrajera por otra rejilla. Al final, se observó que tan sólo era necesario uno que extrajera el calor por la misma rejilla que expulsaba el antiguo ventilador interno.

3.2 Sistema de perfusión

El sistema de perfusión está basado en el proyecto de fin de master de Álvaro Pérez y está compuesto de dos bombas peristálticas, una se encargará de suministrar PBS y otro crioprotector. En el extremo de los conductos más cercanos del órgano se mezclará ambos líquidos mediante una llave T, que desemboca en una aguja que se insertará en el órgano, en el caso del corazón por la vena aorta.

El software que controla las bombas fue desarrollado por el compañero Álvaro Pérez. Este software fue desarrollado en LabVIEW y controla las bombas suministrándoles un voltaje en función del caudal requerido en cada momento calculado a partir de un perfil de morbilidad basado en el perfil de Fahy [10].

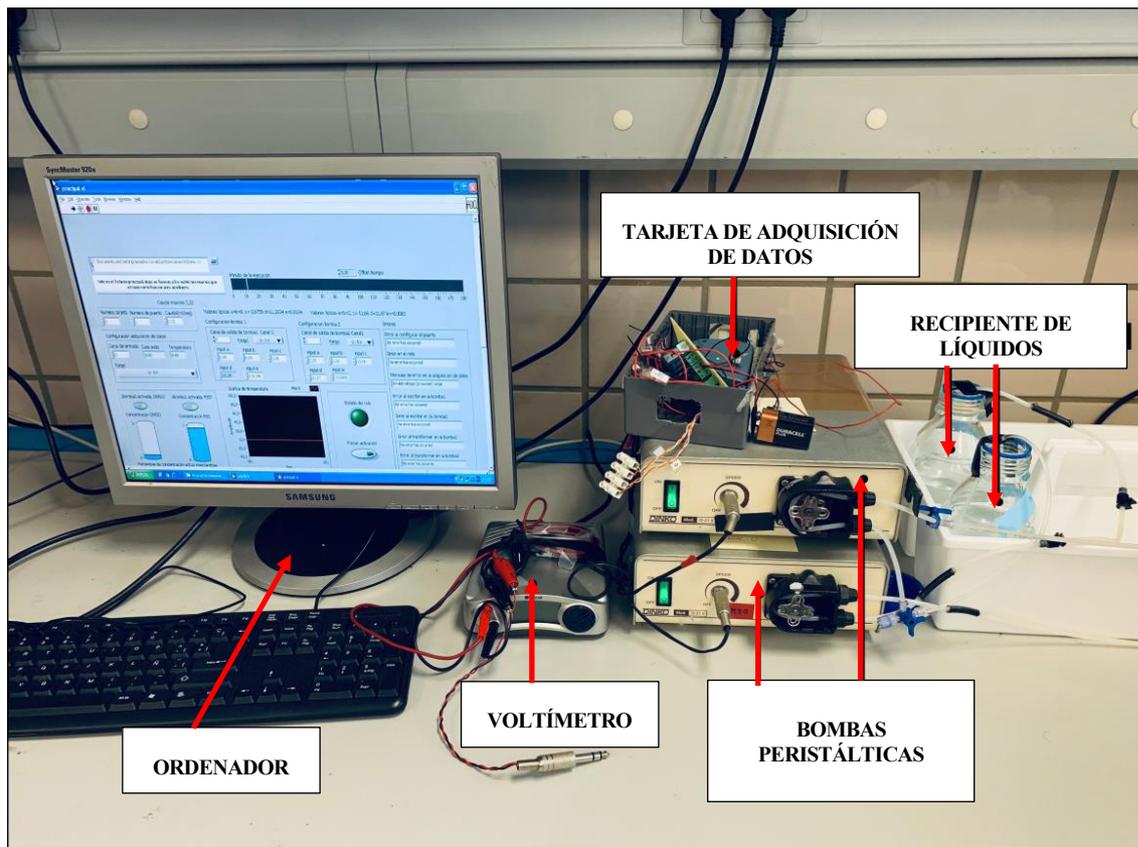


Figura 6: Sistema de perfusión

3.2.1 Hardware

A continuación, describiremos los elementos principales que componen este sistema de perfusión. Para obtener más información del desarrollo de este sistema se puede consultar el proyecto de Álvaro Pérez [1]. De su desarrollo únicamente se ha eliminado las partes que estaban relacionadas con el control y monitoreo de la

temperatura, debido que en este proyecto se va a realizar el control de la temperatura usando el BioCool. Y se ha añadido la opción de usar un crioprotector diferente al DMSO.

3.2.1.1 Tarjeta de adquisición de datos

Para controlar el sistema es necesario una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que nos lea las señales analógicas de las bombas y nos las transforme en señales digitales que pueda leer el ordenador. Y de la misma manera nos lee las señales digitales procedentes del ordenador que controlará las bombas.

Para ello se ha utilizado tarjeta PMD-1208LS, que se conecta al ordenador a través de un puerto USB y se alimenta con 5 V.

Esta tarjeta tiene 8 salidas analógicas, 2 de 10-bits, 16 entradas/salidas digitales y un contador de eventos externos de 32 bits. Cada entrada digital puede ser configurada como entrada o salida.

La mayor limitación que tiene esta DAQ es que debemos usarla con Windows XP.



Figura 7: Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS

3.2.1.2 Bombas peristálticas

Este sistema va a usar bombas peristálticas, que son un tipo de bomba hidráulica, donde el fluido se desplaza por el tubo gracias a un rotor que mediante rodillos comprimen el tubo flexible y empujan el fluido en una dirección. Las bombas peristálticas son típicamente usadas para bombear fluidos limpios o estériles porque la bomba no puede contaminar el líquido, o para bombear fluidos agresivos porque el fluido no puede dañar la bomba. Algunas aplicaciones comunes incluyen bombear productos químicos agresivos, mezclas altas en sólidos y otros materiales donde el aislamiento del producto del ambiente, y el ambiente del producto, son críticos. Como pudiera ser el DMSO, que es capaz de desintegrar algunos elementos.



Figura 8: Bomba peristáltica.

3.2.1.3 Ordenador

Como hemos nombrado anteriormente, es necesario un ordenador con Windows XP (98 o 2000 también valdrían) para que pueda reconocer la DAQ. Esto puede ser un gran inconveniente puesto que estos sistemas operativos están actualmente obsoletos, y nadie los usa, por lo que es necesario tener un ordenador casi exclusivamente para este sistema. Si se quiere instalar los softwares en un ordenador por primera vez, algo que puede ser necesario si el ordenador que se usa es antiguo y deja de funcionar, el procedimiento para poder instalar todos los softwares necesarios en un nuevo ordenador está contemplado en el Anexo I.

3.2.2 Software

Para la automatización de este proceso se ha partido del software desarrollado por otro compañero durante su Trabajo de fin de Máster; Diseño e implementación de sistema de monitorización y control en temperatura y concentración de crioprotector para criopreservación de órganos, Álvaro Pérez Aguilar [1].

Aunque se ha tenido que adaptar para nuestro caso particular, debido a que su software no estaba pensado para operar con BioCool, si no que estaba pensado para hacer un control de la temperatura mediante un relé que alternaba entre encender o apagar una resistencia que calentaba el líquido perfusor que llegaba al corazón, estando éste dentro de un congelador. Para este caso que nos concierne, se ha eliminado todo lo relacionado con el control de la temperatura mediante este sistema, ya que no iba a tener utilidad y se simplificaba para el manejo.

Además, se ha modificado para que introduciendo el peso molecular y la densidad del crioprotector desde la interfaz de usuario se pueda alternar rápidamente el crioprotector, por si fuese necesario introducir otro crioprotector que no fuese el DMSO.

Este software está programado con LABView, y consta de una gran cantidad de mini-programas, conocidos como subvi, conectados por bloques de LABView para formar el programa completo.

Vamos a analizar el software tras la adaptación a nuestro caso, es decir, sin control de temperatura, dando una visión general del funcionamiento de los Subvi creados por Álvaro y los modificados por este documento, para entender mejor el funcionamiento.

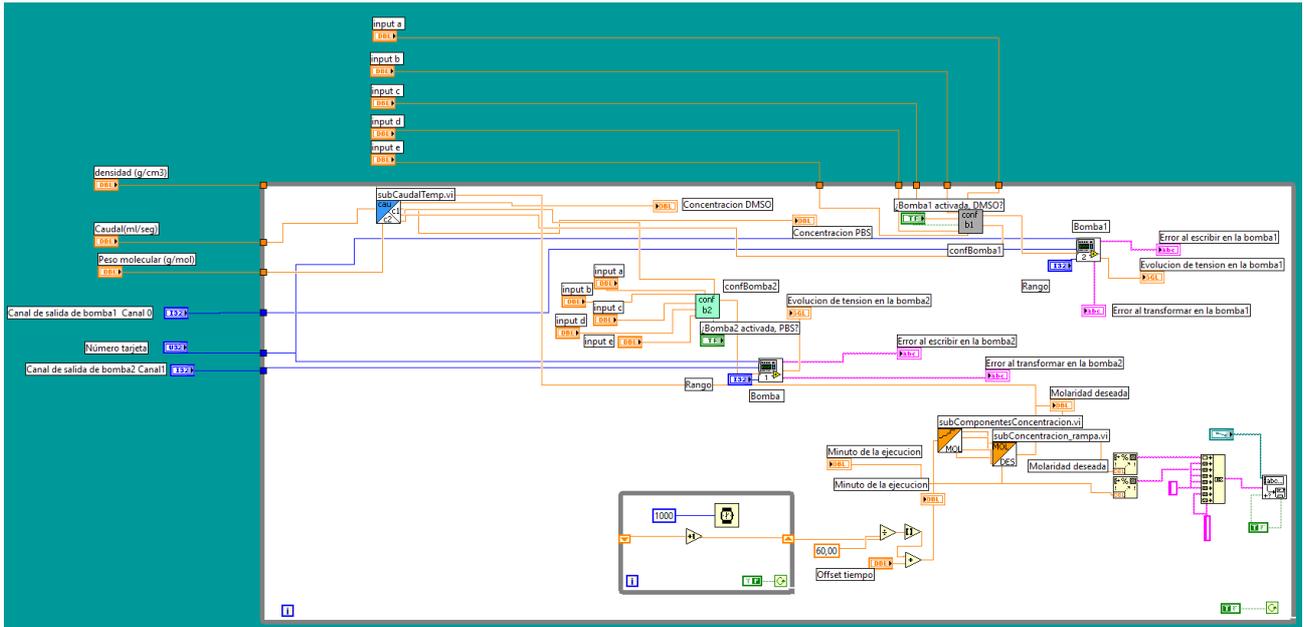


Figura 9: Código completo sin control de temperatura

3.2.2.1 Adquisición de datos

Con este subvi se adquiere los datos del canal y número de la tarjeta de adquisición, y devuelve la temperatura en grados que ésta está leyendo. La medida de temperatura posteriormente no será utilizada, puesto que la temperatura se controla con el BioCool.

3.2.2.2 Activar relé

Este Subvi no será necesario, puesto que el relé lo utilizaba Álvaro para el control de la temperatura, que ahora no es necesario.

3.2.2.3 Configuración puerto

Este Subvi tampoco será necesario, ya que configura el puerto de la tarjeta como entrada o salida, y en nuestro caso será únicamente de salida.

3.2.2.4 Control relé y temperatura

Este Subvi no será necesario, por lo que ya se ha comentado, no vamos a controlar la temperatura mediante este software. Este subvi es el encargado de asignar los 4 estados térmicos posibles en el caso de Álvaro: Calentar, Mantener, Encender/Apagar, Enfriar.

3.2.2.5 Caudal/temperatura

Mediante este Subvi se calcula la concentración de PBS y DMSO, y por tanto el caudal demandado de cada bomba, en función de la molaridad y el caudal máximo entre ambas bombas.

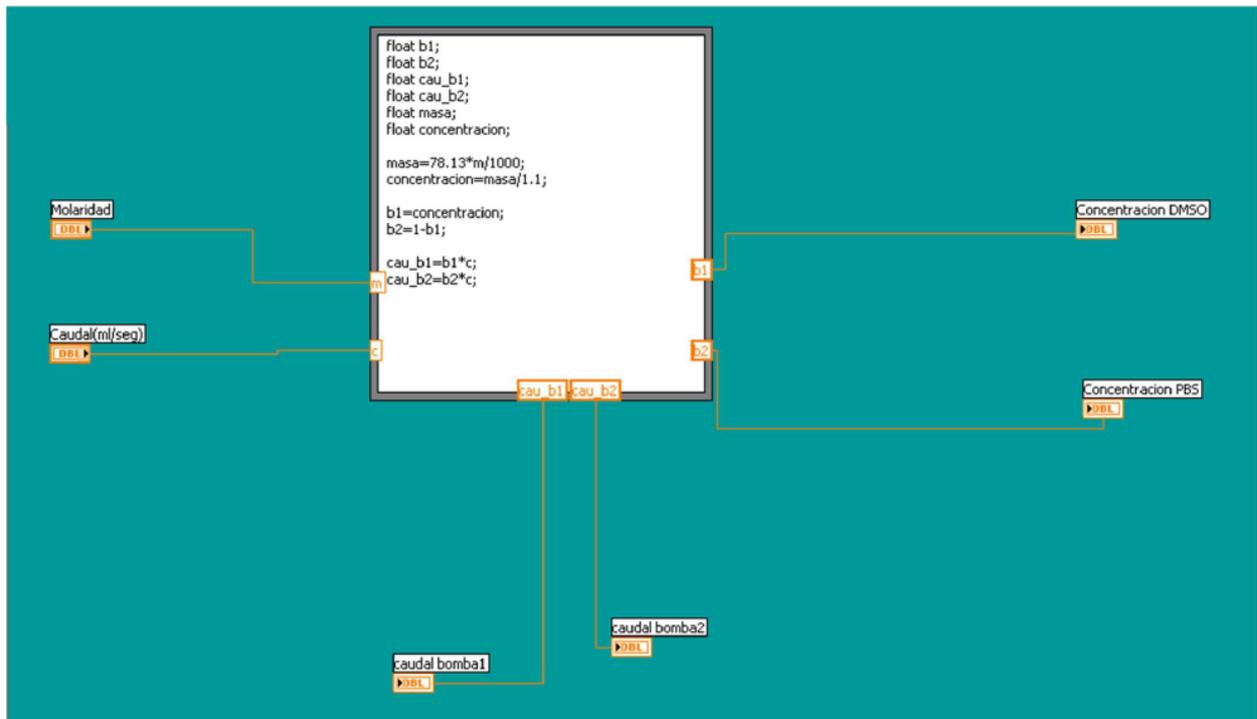


Figura 10: Código del módulo caudal/temperatura para DMSO

Este subvi ha sido modificado para que en lugar de usar únicamente el DMSO se pueda usar cualquier crioprotector.

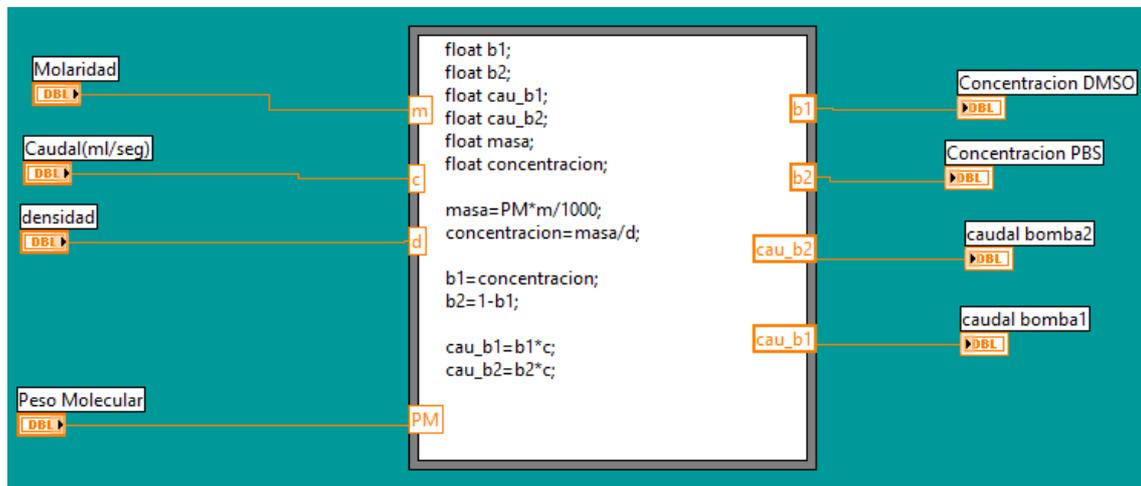


Figura 11: Código del módulo caudal/temperatura para cualquier crioprotector

Dado que la concentración de PBS y crioprotector se puede calcular a partir de la molaridad deseada, la densidad de crioprotector y el peso molecular de éste, se ha cambiado las constantes que tenía introducidas el programa anterior, para que los parámetros de densidad y peso molecular puedan ser introducidos por el usuario en la interfaz de usuario. La molaridad deseada debe ser reajustada en los siguientes 2 subvi, por defecto está programado el perfil de molaridad de Fahy [10].

3.2.2.6 Componentes recta de concentración

Subvi que debemos modificar para adaptar la curva de enfriamiento de Fahy [10] a nuestro experimento. A este Subvi se le pasa como entrada el tiempo de ejecución, y devuelve 2 puntos, $[x_0, y_0]$ y $[x_1, y_1]$, que son los vértices de las rampas del perfil de Fahy [10], necesarios para crear una recta.

En la ilustración 13 se muestra con los tiempos del experimento de Fahy [10], para modificarlo sería necesario modificar cada dígito de tiempo indicado en el código. Por ejemplo, si queremos que el experimento dure una

tercera parte debemos dividir entre 3 todos los números que aparecen junto a la variable “tiempo”.

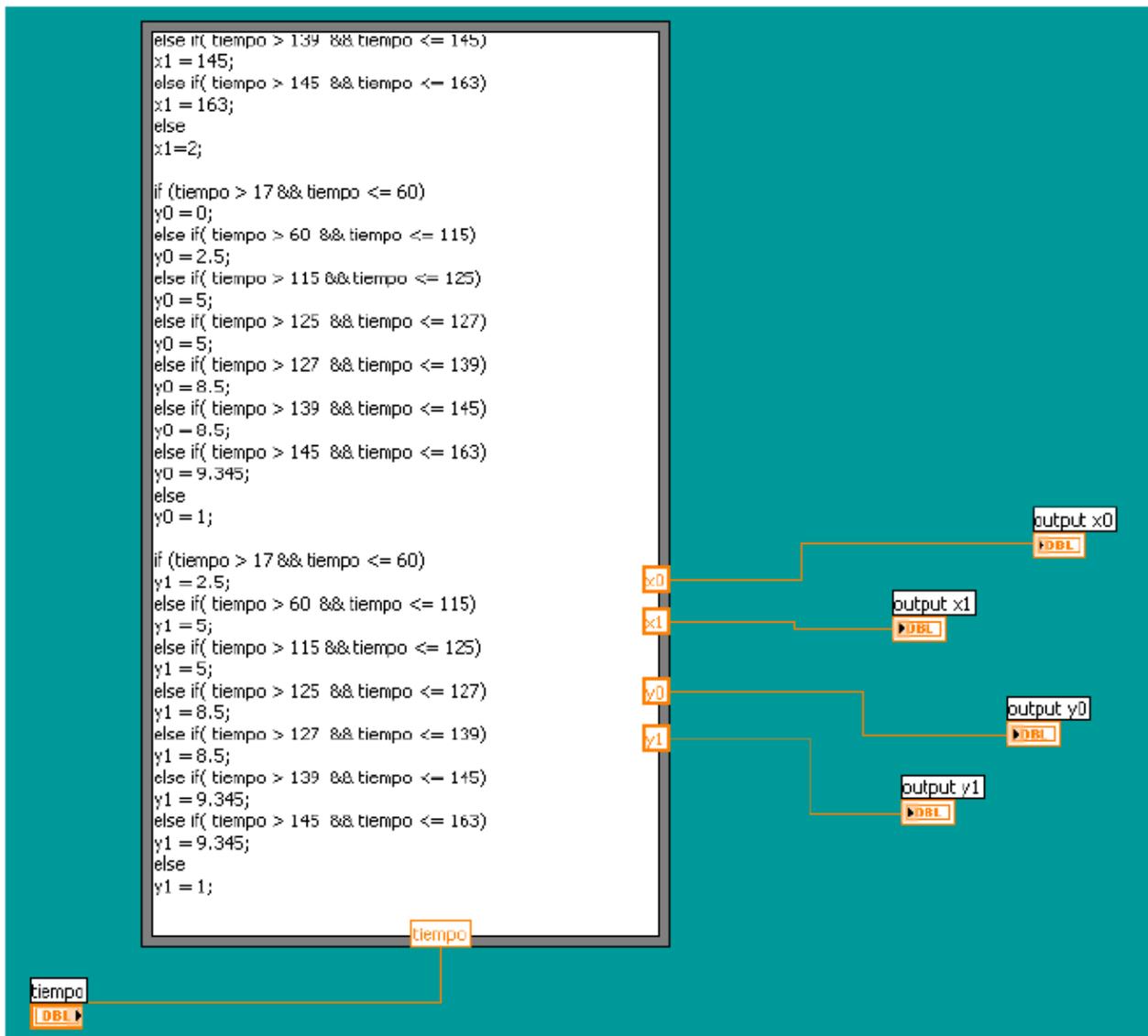


Figura 12: Código del módulo componentes concentración

3.2.2.7 Componentes recta de temperatura

Subvi no necesario. Este subvi haría lo mismo que el anterior de componentes recta de concentración, pero en vez de calcular la concentración calcula la temperatura a partir del tiempo y el experimento de Fahy [10].

3.2.2.8 Rampa concentración

Con este Subvi vamos a calcular la molaridad a partir de los puntos que hemos obtenido del Subvi componentes recta de concentración. Basándose en la construcción de una recta a partir de los 2 puntos que tiene como entrada. Estos dos puntos se obtienen del subvi “Componentes recta de concentración” del apartado 3.3.6. Una vez construida la ecuación de la recta, con ayuda del tiempo de ejecución, se obtiene fácilmente la molaridad requerida en un momento concreto.

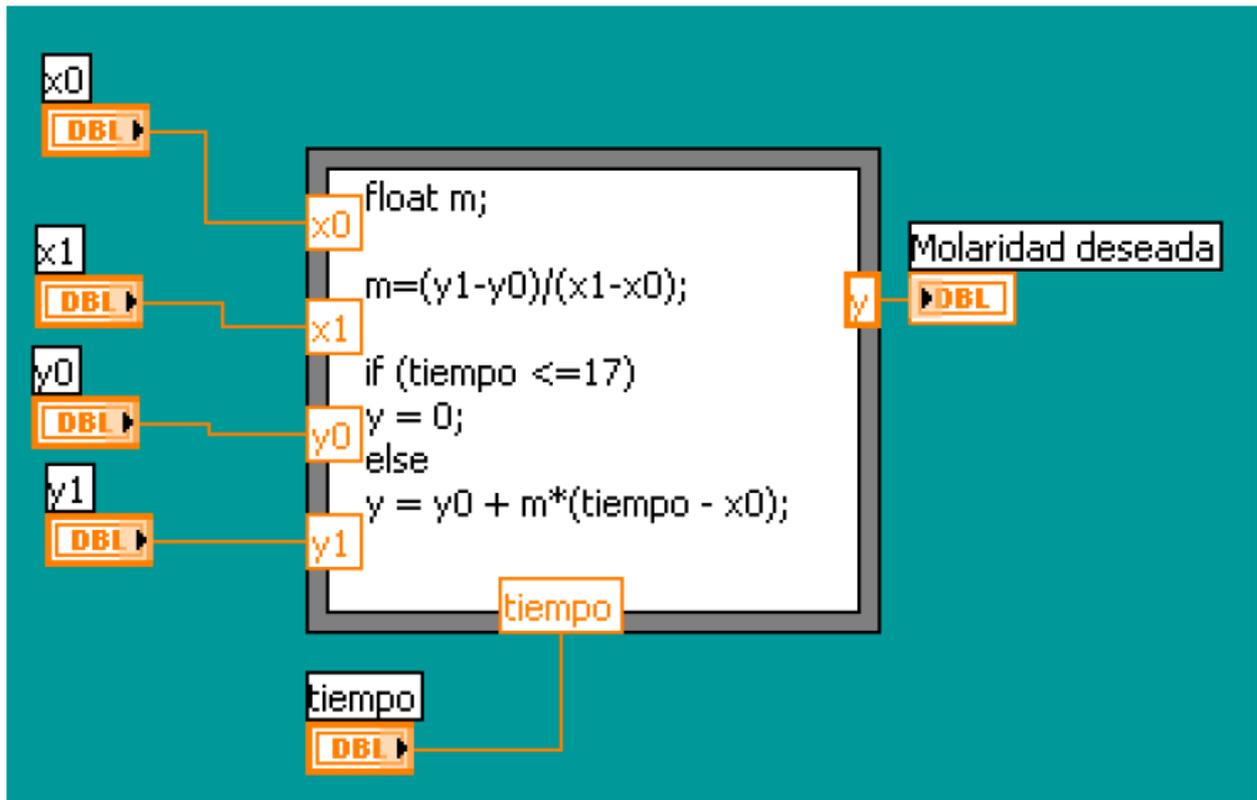


Figura 13: Código del módulo rampa concentración

3.2.2.9 Rampa temperatura

Subvi no necesario. De la misma forma que la rampa de concentración, este Subvi calcula la temperatura deseada.

3.2.2.10 Configuración bomba 1

Este subvi tiene como entradas: 5 variables para construir su función de transferencia, un booleano para activar o desactivar la bomba y el caudal deseado en ml/min. Y como salida da la tensión deseada en binario. El caudal viene ya calculado del módulo anterior Caudal/temperatura.

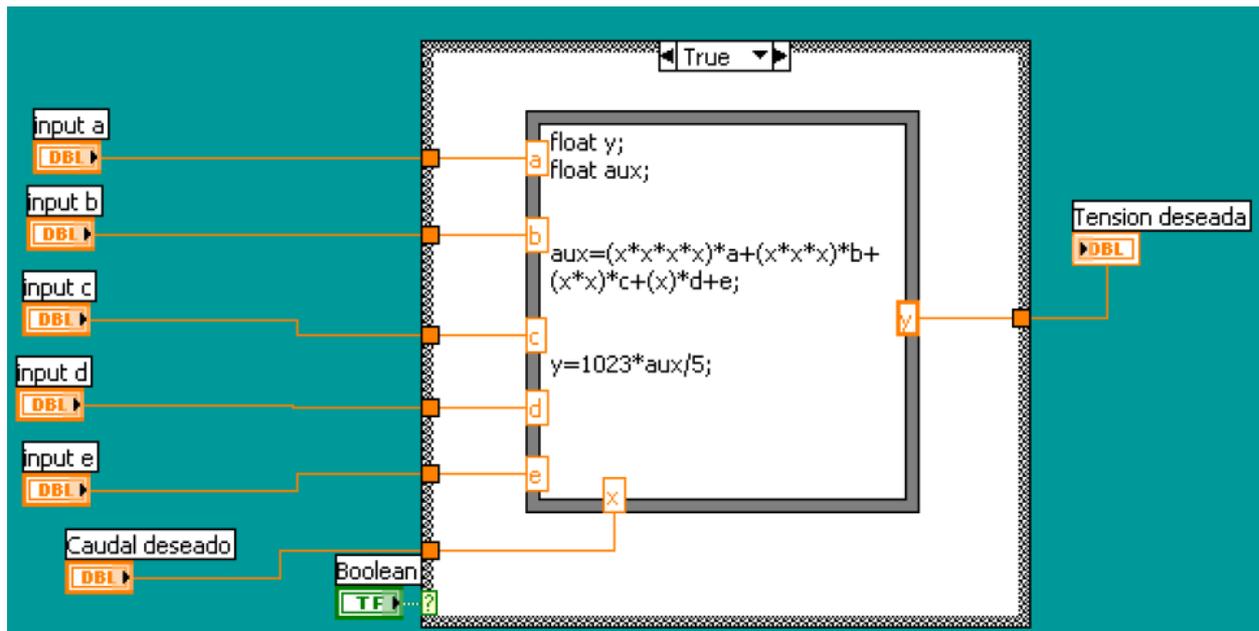


Figura 16: Código del módulo configuración bomba 2

3.2.2.12 Control bomba 1

Este subvi tiene como entrada, el nº de la tarjeta, el nº de puerto, el rango y el valor binario procedente del módulo Configuración bomba 1. Como salida tiene una gráfica donde se dibuja la evolución de la tensión.

El funcionamiento de este subvi se basa en el uso del módulo AOut, el cual escribe en el puerto deseado la tensión indicada. Para poder pintar la gráfica en unidades del sistema internacional se usa el módulo ToEng para pasar el valor binario a voltios.

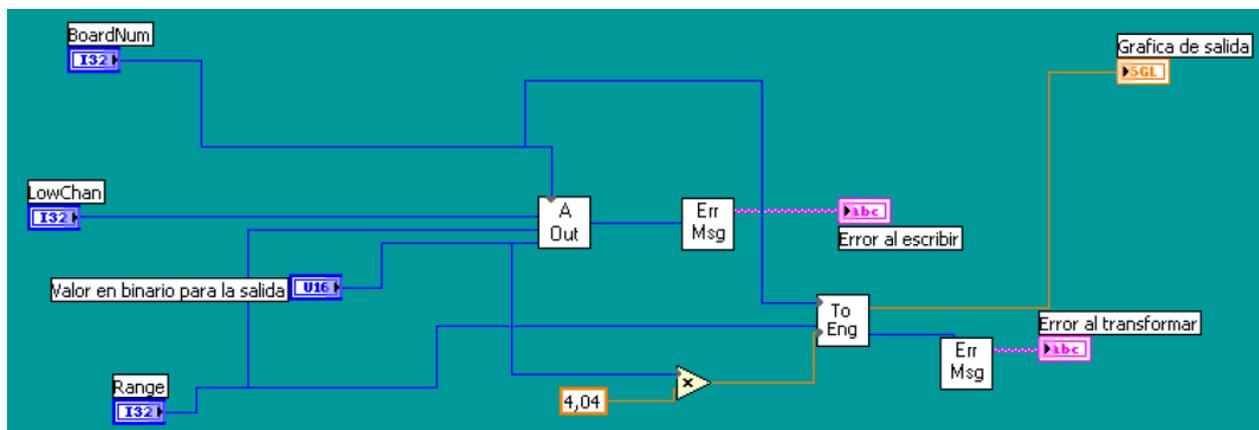


Figura 17: Código del módulo control bomba 1

3.2.2.13 Control bomba 2

Este Subvi sería similar al anterior, pero para la Bomba 2.

3.2.2.14 Principal

Este sería el documento que integra todos los demás. El cual tenemos que ejecutar para comenzar a controlar las bombas y así la perfusión.

Antes de comenzar la perfusión el usuario debe configurar los apartados remarcados en la siguiente ilustración. A continuación, detallaremos el orden.

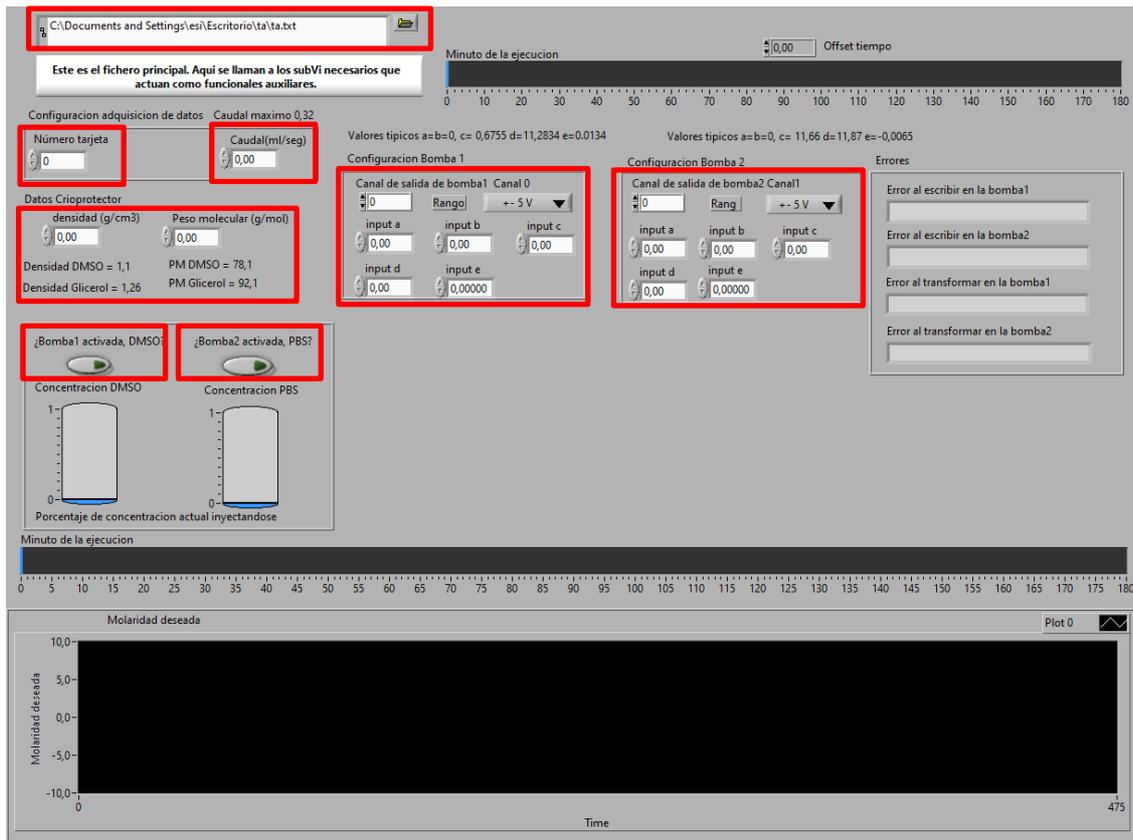


Figura 18: Interfaz de usuario del SW de perfusión

Paso 1

El programa exporta todos los datos que se manejan a un documento .txt, por eso lo primero será seleccionar donde queremos que se guarde. El documento .txt debe estar previamente creado y conviene que esté en la misma carpeta que el ejecutable del programa.

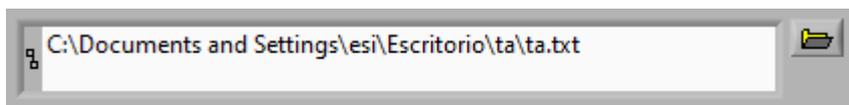


Figura 19: Seleccionar ruta para exporta datos

Paso 2

Lo segundo será seleccionar el número de la tarjeta y el puerto que le hayamos asignado al configurarla. Se aconseja asigna el 1 a la tarjeta.

Además, hay que asignar el caudal que queremos entre las dos bombas. El máximo posible es de 0.32 ml/s.

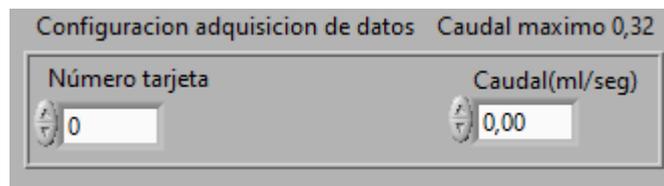


Figura 20: Configuración tarjeta y caudal

Paso 3

Lo siguiente será configurar las bombas, tal y como aparece en la ilustración 20. Dándole canal 0 a la bomba 1 y canal 1 a la bomba 2. El rango de voltaje para ambas bombas es de 0-5 V. Y por último asignar los valores de las constantes del polinomio de la función de transferencia de cada bomba, los valores que hay que asignar para las bombas peristálticas que usó Álvaro, que son las mismas que hemos usado nosotros, están colocados en la

propia interfaz. Estos valores fueron hallados experimentalmente en el proyecto de Álvaro.

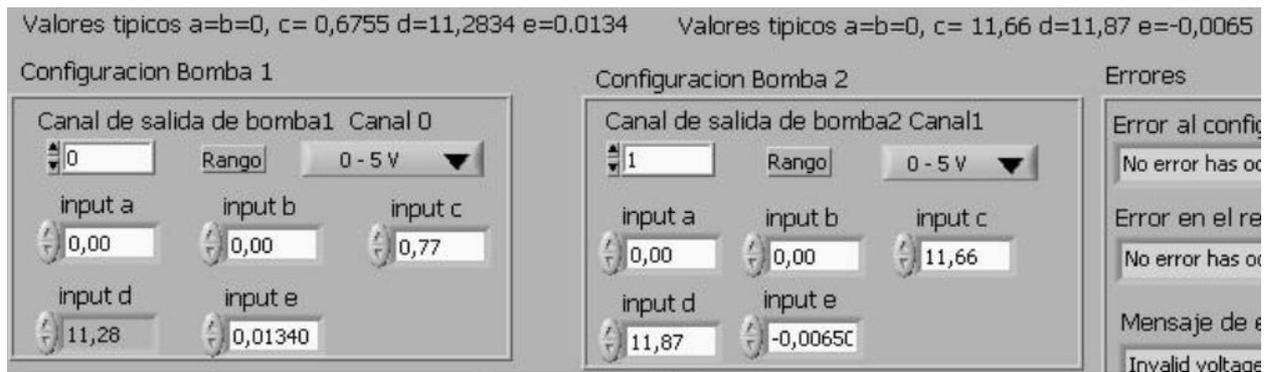


Figura 21: Configuración de las bombas

Paso 4

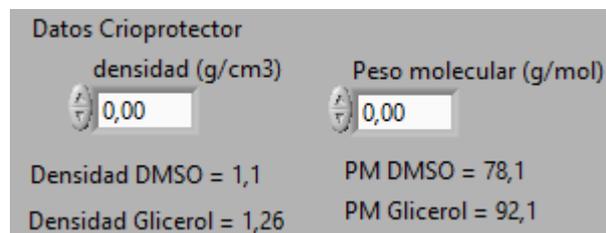


Figura 22: Datos del Crioprotector

Debemos recordar introducir los datos del crioprotector; densidad y peso molecular, ya que por defecto aparece en 0 y podría estropear el experimento. Se han puesto los datos de los crioprotectores más típicos, siendo el DMSO el usado siempre en este proyecto.

Paso 5

Por último, activar las bombas. Además, nos muestra el porcentaje del caudal máximo que va a inyectar cada bomba.

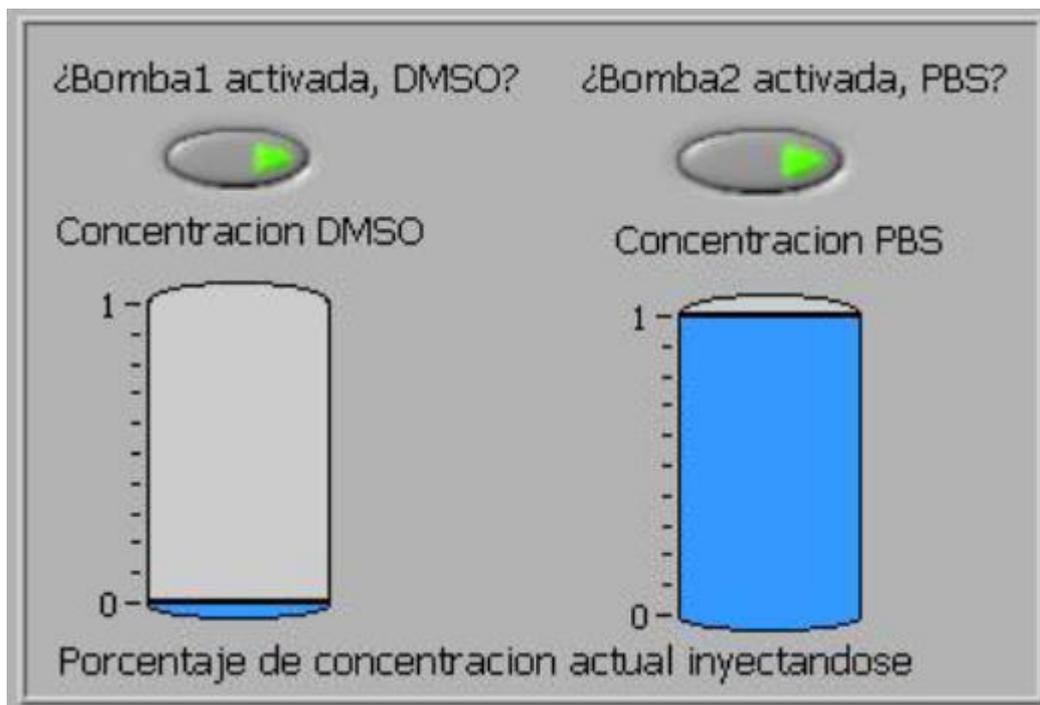


Figura 23: Switchs para activar las bombas

Una vez realizado los 4 pasos en el orden establecido, podemos dar RUN al programa. Si a mitad de ejecución

queremos detener las bombas, hay que desactivarlas utilizando los switches del *paso 5* antes de darle a STOP a la ejecución del programa, dado que, si le damos únicamente a STOP, la tarjeta dejará las variables de salida en el estado que estuviesen, es decir, las bombas activadas.

También podemos avanzar o retroceder el tiempo de ejecución utilizando un offset de tiempo que se localiza en la parte superior de la interfaz.

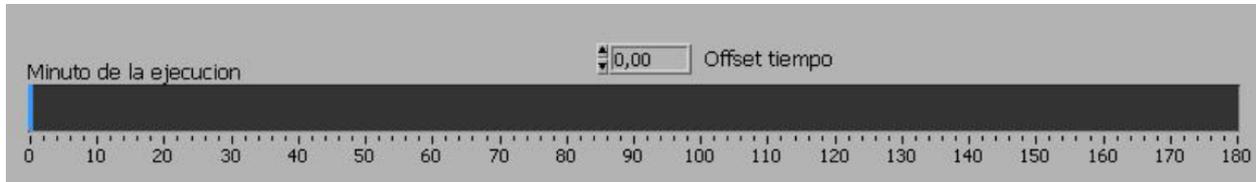


Figura 24: Offset de tiempo

3.3 Langendorff

El sistema Langendorff sería el último sistema involucrado en el proceso, con el cual nos aseguramos de que el corazón sigue vivo antes de un trasplante. Como en nuestro caso no hemos descriogenizado ningún corazón, lo hemos utilizado al revés, antes de criogenizar, para comprobar que el corazón seguía vivo antes de proceder a perfundir. Es algo que parece lógico para no criogenizar en valde, pero al utilizar este sistema aumentamos en riesgo de matar al órgano en el proceso, por lo que sólo sería obligatorio antes de trasplantarlo.

El procedimiento consiste en perfundir las arterias coronarias a través de una cánula de perfusión insertada en la aorta, con una solución oxigenada rica en nutrientes (solución Tyrodes). La presión en sentido contrario al de funcionamiento normal hace que la válvula aórtica se cierre, obligando a la solución a propagarse por los vasos coronarios, que normalmente suministran sangre al tejido del corazón. De esta forma, alimenta de nutrientes y oxígeno al músculo cardíaco, lo que permite continuar latiendo durante varias horas en vacío, fuera del animal.

Para que este fenómeno se produzca es necesario una serie de condiciones:

- Una temperatura de 39°C, que conseguimos introduciendo en el corazón en un baño con agua caliente, sin contacto directo utilizando un recipiente que separe el agua del corazón.
- Que la solución Tyrodes esté bien oxigenada, para ello utilizamos una bombona de carbógeno y un agitador que homogenice la solución.
- Un pH estable de 7.4, lo cual controlamos con carbógeno y con hidróxido de sodio.
- Introducir un flujo constante de solución por el órgano, lo cual conseguimos utilizando una bomba de jeringa de precisión.

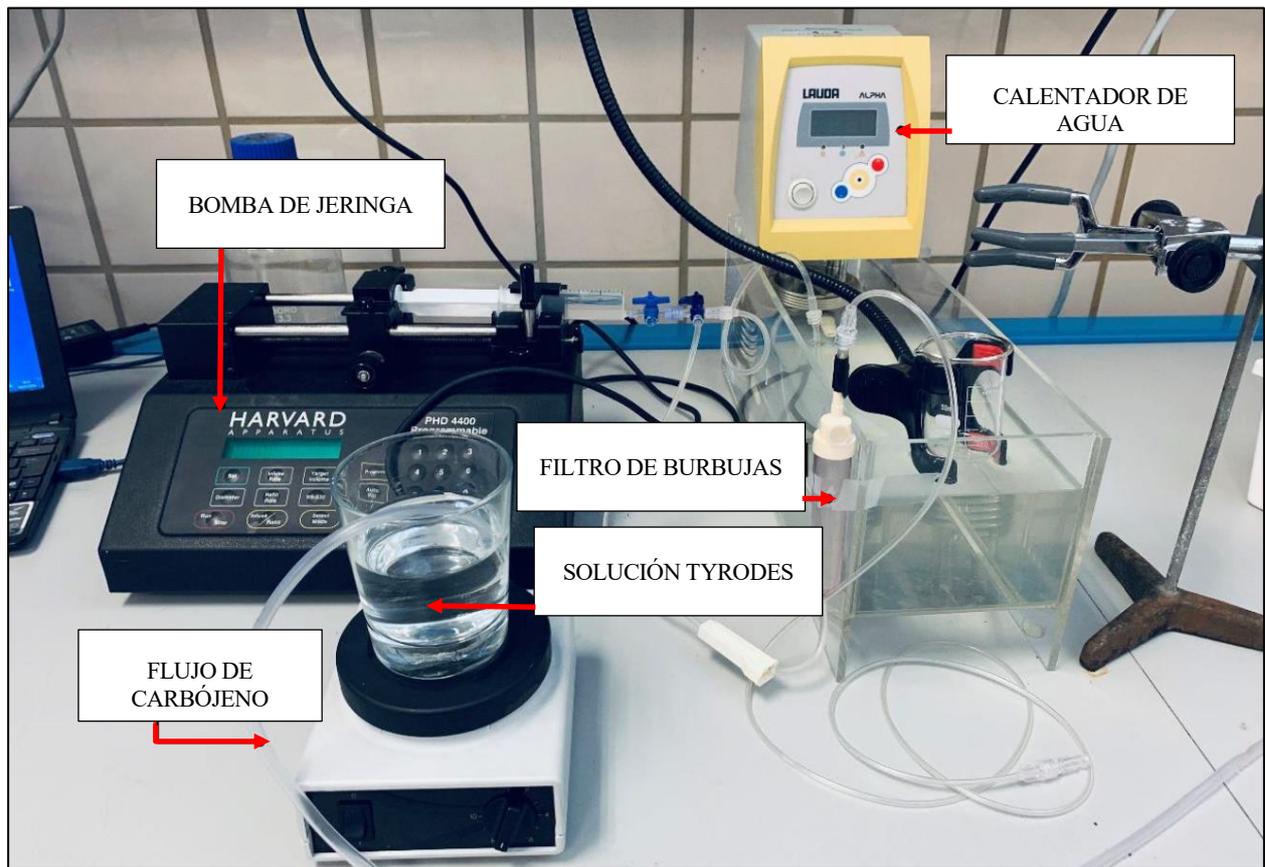


Figura 25: Sistema Langendorff

3.3.1 Solución Tyrodes

La solución de Tyrodes es una solución que es más o menos isotónica con el fluido intersticial y se utiliza en experimentos fisiológicos y cultivo de tejidos. Contiene magnesio, azúcar (generalmente glucosa) como fuente de energía y utiliza bicarbonato y fosfato como tampón. Debe ser gaseado con 95% oxígeno y 5% de dióxido de carbono cuando se usa para aplicaciones de cultivo celular y experimentos de fisiología para lograr un pH apropiado.

Para realizar el experimento, se ha obtenido la solución Tyrodes disolviendo un sobre concentrado, T2145-1L marca Sigma Aldrich, de 9.6 gramos para obtener 1 litro de solución. El Tyrodes utilizado tiene la siguiente concentración:

Solución Tyrodes	
Sustancia	Concentración (g/L)
NaCl	8.00
KCl	0.20
CaCl ₂	0.20

MgCl ₂	0.10
NaH ₂ PO ₄	0.05
NaHCO ₃	1.00
Glucose	1.00
pH 6.5	

3.3.2 Bomba de jeringa de precisión

Para asegurar un flujo constante de solución Tyrodes a través de vena aorta del corazón utilizamos una bomba de jeringa, que ejerce una presión constante sobre la solución. Este sistema es bastante simple de controlar, pues se basa únicamente de un mecanismo que empuja el émbolo de una jeringa, de forma que sólo tenemos que pasarle como dato de entrada el caudal que necesitamos y la bomba ejerce la presión necesaria para obtenerlo.



Figura 26: Bomba de jeringa de precisión HARVARD PHP 4400

En nuestro caso se ha utilizado el modelo HARVARD PHP 4400 Programmable, que se ve en la *ilustración 24*. Este modelo puede soportar jeringas que vayan desde los 0.5 microlitros hasta 140 mililitros, dando caudales desde los 0.006 µl/minuto hasta 220,82 ml/minuto.

Para programarla sigue las siguientes instrucciones:

- 1°. Colocar la jeringuilla totalmente llena anclada con el pistón.
- 2°. Presionar botón Set y a continuación Infuse rate.
- 3°. Seleccionar el caudal. Presionar Enter.
- 4°. Presionar Run/Stop.

En la pantalla se visualiza los ml acumulados desde que ha comenzado el programa.

Cálculo del caudal necesario

La presión a la entrada de la aorta del corazón del ratón es un factor a tener en cuenta pues no queremos dañarla, ni que se salga la aguja. Por lo tanto, partimos de que la presión máxima que admite sin dañarse la aorta del corazón de un ratón de raza Mus Musculus es 120 mmHg (según Roca i Acín, Joan. La utilización de animales en experimentación biomédica (I). 2001)

Para calcular esta presión se va a utilizar la ecuación de Bernoulli particularizada entre el punto de entrada a la aguja, Punto A, y el punto de salida, Punto B.

$$\frac{1}{2}V_i^2\rho + P_i + \rho gz = \text{cte}$$

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada.

ρ = densidad del fluido.

P_i = presión en un punto i.

g = aceleración de la gravedad.

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

El término ρgz de la ecuación será despreciable porque la aguja está prácticamente en posición horizontal.

Por lo que tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}V_A^2\rho + P_A = \frac{1}{2}V_B^2\rho + P_B$$

Siendo igualmente:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q = Caudal

A = Área de la sección transversal

$$\frac{1}{2}\left(\frac{Q_A}{A_A}\right)^2\rho + P_A = \frac{1}{2}\left(\frac{Q_B}{A_B}\right)^2\rho + P_B$$

De esta forma, si el caudal que entra es el mismo que sale, es decir:

$$Q = Q_A = Q_B$$

Siendo A_A Y A_B conocidos:

$$A_A = 1.59 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$A_B = 1.59 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Nos quedaría P_B en función de P_A y Q.

$$P_B = \frac{1}{2}Q\left(\frac{1}{A_A} - \frac{1}{A_B}\right)^2\rho + P_A$$

Programando el caudal, Q, y calculando con manómetro la presión a la entrada de la aguja, P_A , calculamos la presión a la salida, P_B , y obtenemos que prácticamente la presión a la salida es igual a la entrada, como es de esperar.

Como la presión máxima que puede admitir la aorta del corazón de un ratón es 120 mmHg que equivale a 15996 Pa , determinamos que el caudal que se puede mandar desde la bomba (entrada de la aguja) es de hasta 2.8 ml/min . Debido a que el cálculo no es totalmente exacto por aproximaciones e hipótesis a la hora de emplear la fórmula, se toma el valor de $Q = 2.1 \text{ ml/min}$ para dejar margen respecto al límite.

3.3.3 Oxigenación de la solución Tyrodes

Para asegurar la correcta oxigenación y controlar el pH de la solución Tyrodes, se ha decidido usar gas carbónico, una mezcla de dióxido de carbono (CO_2 5%) y oxígeno gas (O_2 95%). Que se utiliza en biología para la investigación sobre rodajas de cerebro.



Figura 27: Bombona de Carbógeno

Para oxigenar la solución se le introduce el tubo de salida de carbógeno en el recipiente donde tenemos la solución de Tyrodes. La presión de salida de carbógeno se controla mediante una válvula y un manómetro. La válvula hay que abrirla con especial suavidad y al cerrarla asegurarse de que está bien cerrada.

3.3.4 Estabilización del pH

Para alcanzar el pH de 7.4 se va hacer un ajuste manual entre carbógeno e Hidróxido de Sodio con el siguiente proceso:

- 1°. Introducir un medidor de pH bien calibrado en la solución, para monitorizar el pH.
- 2°. Comenzamos a subir suavemente la presión del carbógeno, lo que hará que el pH baje, hasta que este se estabilice lo que asumimos que la solución está saturada tanto de CO_2 como de O_2 .
- 3°. Añadimos gotas de Hidróxido de Sodio (NaOH) para que el pH suba, hasta alcanzar el pH 7.4.

Todo este proceso con la solución en constante movimiento mediante un agitador para garantizar homogeneidad.



Figura 28: Solución Tyrodes oxigenada con carbógeno

Antes de introducir la solución Tyrodes al órgano debe pasar por un filtro antiburbujas, puesto que una burbuja podría ser fatal para el órgano.

3.4 Monitorización de temperatura

Para poder visualizar la temperatura real que hay en los diferentes puntos relevantes, como pueden ser el recipiente donde se va a alojar el órgano o el líquido del interior del BioCool, vamos a utilizar un sistema de adquisición de datos denominado PicoLog.

El sistema consta de parte de software y parte de hardware.

El hardware no es más que una tarjeta de adquisición de datos que irá conectada a un ordenador. Sobre la tarjeta conectaremos tantos sensores termopares como necesitemos, con un máximo de 8 sensores.

El software nos permitirá almacenar las lecturas de temperatura de los diferentes sensores para posteriormente comparar mediante gráficas los resultados experimentales con los teóricos. Además, nos muestra la temperatura en tiempo real por si necesitásemos modificar del experimento sobre la marcha.

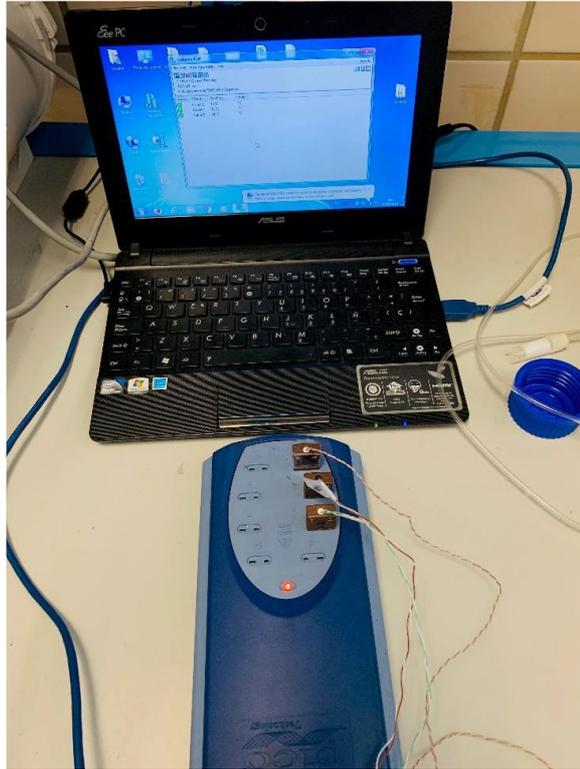


Figura 29: *PicoLog*

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA VITRIFICACIÓN

Los experimentos fueron llevados a cabo por de mis compañeros Enrique [4], Beatriz [3] y José Manuel [2], y con la colaboración de nuestro tutor; Ramón Risco. Gracias al gran trabajo de mis compañeros se ha podido comprobar la funcionalidad del sistema de perfusión en corazones de ratón. Mi participación en dichos experimentos se ha centrado en el sistema de perfusión y el BioCool, proponiendo soluciones a los inconvenientes que fueron surgiendo desde el inicio, como fueron en la adaptación del software para que únicamente se encargue del control de la perfusión y los problemas de ventilación del BioCool, que dejó de funcionar el ventilador interno.

Ellos se han encargado de llevar a cabo hasta 19 experimentos, en cada uno de los cuales una vez extraído el corazón del ratón se ha puesto en el sistema Langendorff para comprobar si la cirugía había sido exitosa y el corazón seguía vivo.

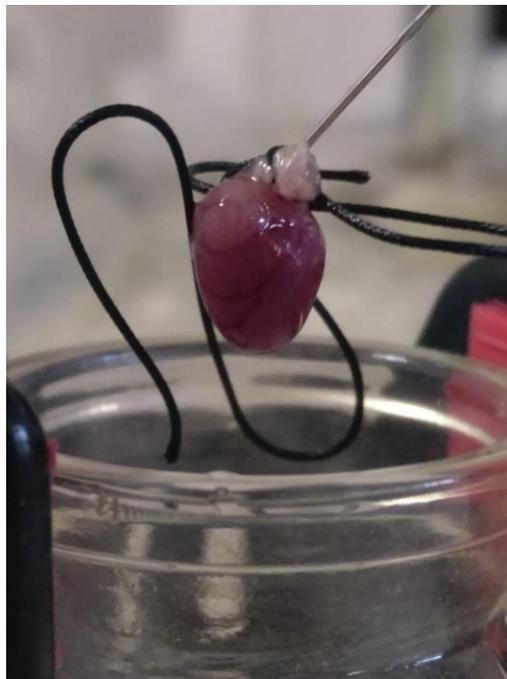


Figura 30: Corazón conectado al sistema Langendorff

Estos fueron los resultados obtenidos de algunos experimentos:

Con la siguiente gráfica de evolución de la temperatura, donde de nuevo el Canal 1 y 3 representan la temperatura procedente de la solución de Agua y Etanol en el interior del BioCool. Canal 2 representa la temperatura dentro del recipiente donde se aloja el corazón, añadiendo también la temperatura teórica a la que debería estar el experimento y a la que habíamos programado el BioCool:

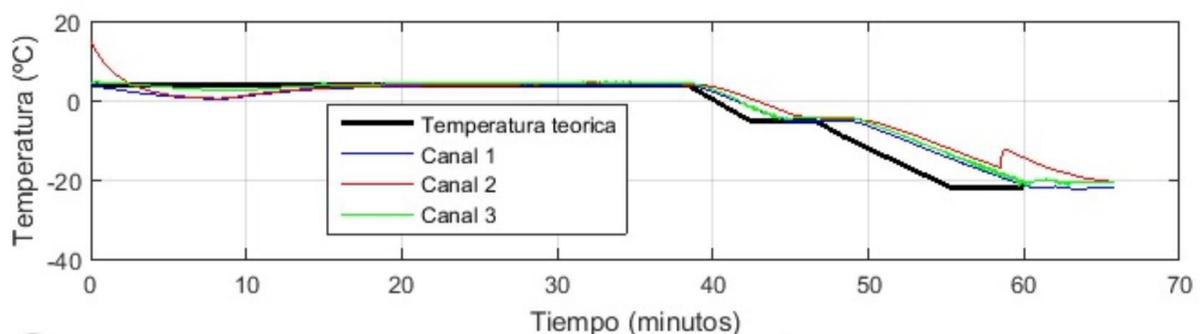


Figura 31: Evolución de temperaturas del experimento 15

Observamos como la temperatura del corazón sigue bastante bien la temperatura teórica del experimento, con un pequeño retraso que es admisible por el tiempo que tardaría el líquido en llegar desde las bombas al corazón.

En la Figura 30, se observa algo muy interesante que es el pico en la temperatura del interior del recipiente (línea roja), esto es debido probablemente a una congelación. El sensor ha recogido el aumento de temperatura debido a la liberación del calor latente de solidificación, por lo que la muestra ha formado hielo en ese instante, si se vitrificase sin formar hielo no aparecería ese pico.

Por último, se muestran los resultados obtenidos en los experimentos en los cuales se realizó el procedimiento de criopreservación completo:

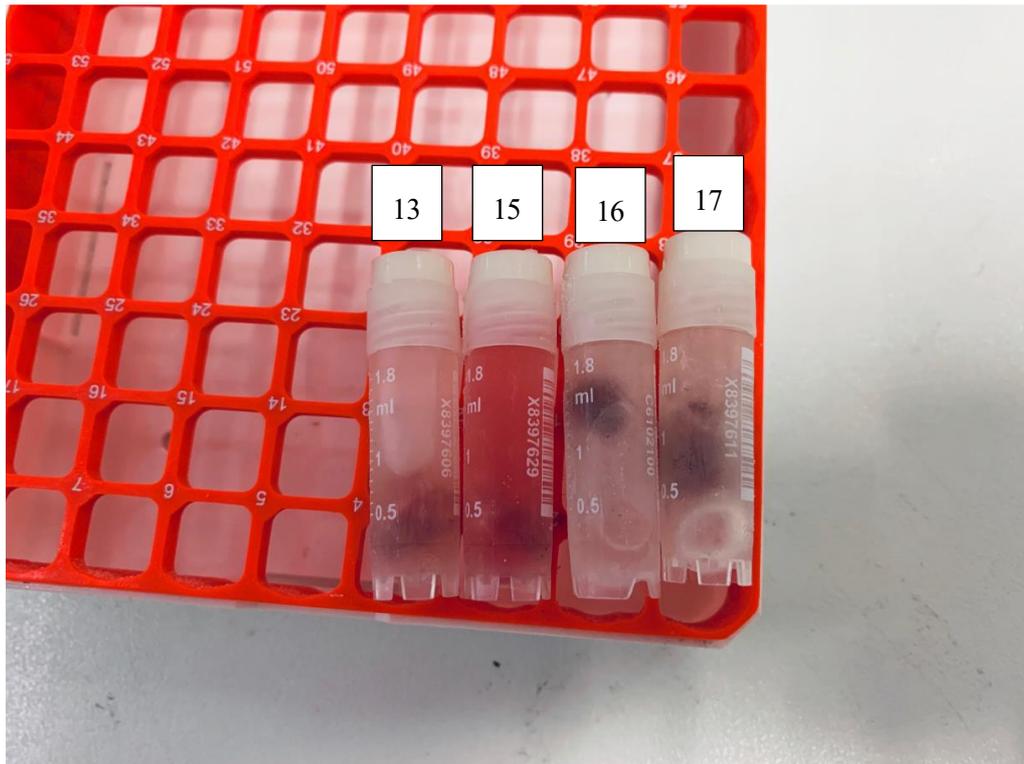


Figura 32: Resultado de los experimentos

Se observó que el líquido interior está congelado en los experimentos 13 y 15, con posible cristalización como hemos visto en la Figura 30.

En el experimento 16, con una solución del 10% DMSO en el interior del recipiente previo al protocolo. solución no cristaliza y el órgano queda más protegido.

Por último, en el experimento 17 el líquido en el interior del recipiente es la propia solución que drena el corazón, estando el recipiente vacío al comienzo del protocolo, sin aparentes evidencias de daños.

Faltaría ser capaces de recalentar el órgano para poder realizar el proceso Langendorff y comprobar si permanece en buen estado el corazón.

5 SIMULACIÓN DE RECALENTAMIENTO HIFU

5.1 Construcción del modelo

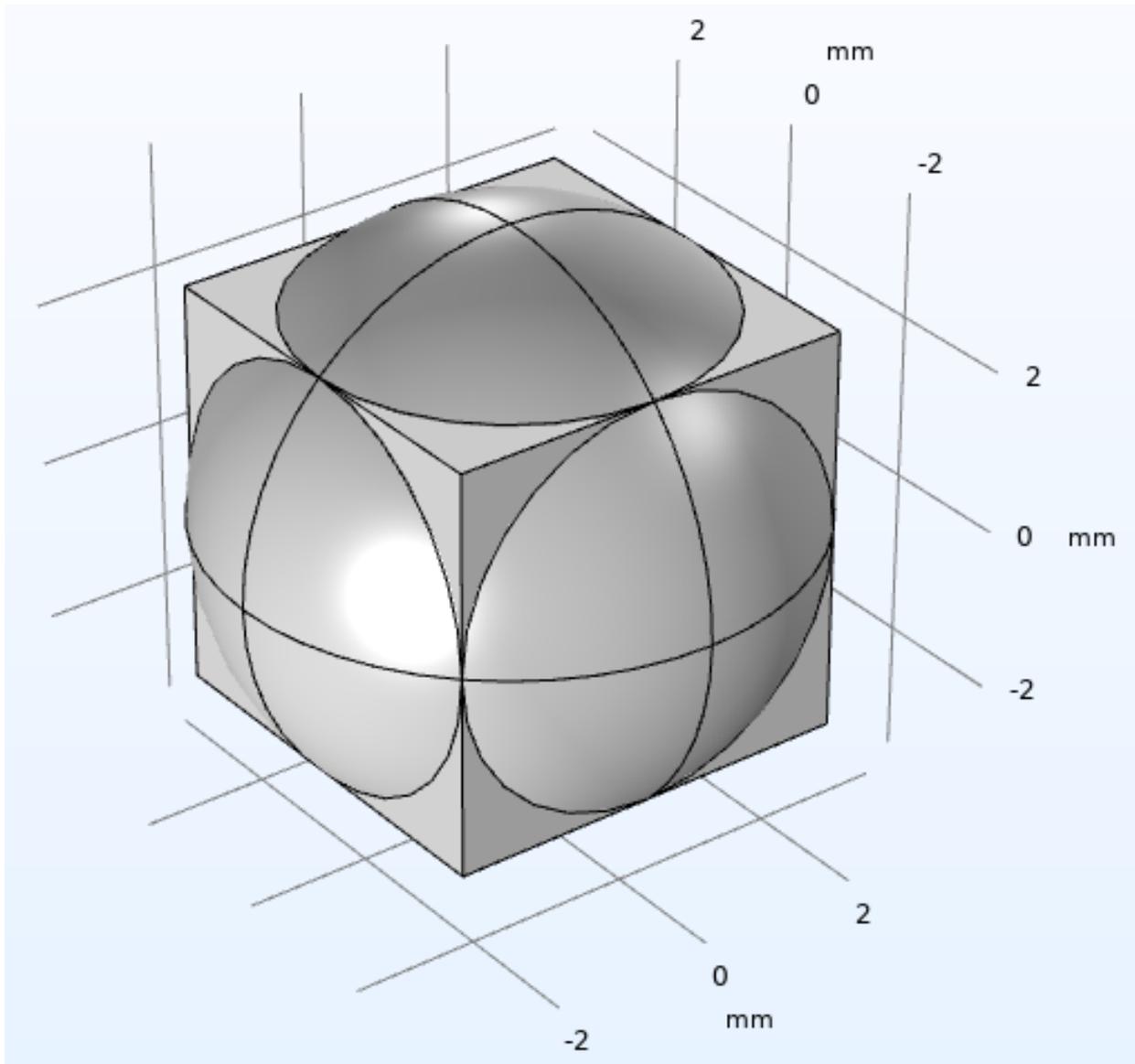


Figura 33: Modelo de 6 transductores propuesto

1. **Elección de componente o número de dimensiones:** podemos elegir entre crear un modelo en 1D, 2D, 2D axisimétrico o 3D. La geometría que deseamos construir consta de 6 transductores equidistantes de un punto, la forma más sencilla de conseguir esta geometría es posicionando los transductores en las caras de un cubo. Por lo tanto, necesitaremos seleccionar el componente en 3D. El mayor inconveniente de este tipo de geometría, aparte de que necesita de mayor potencia de cálculo, es que la propia geometría externa oculta la geometría interna y se hace engorroso en ocasiones seleccionar los dominios internos a la hora de asignarles características físicas.
2. **Definición de la geometría usando figuras simples:** para la construcción de nuestro sistema vamos a utilizar el propio constructor de COMSOL, aunque también es posible importar un modelo CAD procedente de otro software.

Nuestro modelo va a estar centrado en el punto (0,0,0) del sistema xyz de coordenadas, y se va a componer de un cuadrado de 1 mm de lado que representa la aorta, que está rodeada por una capa de hielo de radio $\sqrt{0.5^2 \times 2 + 0.5^2}$ mm de forma que la diagonal mayor del cuadrado de la aorta coincide con el diámetro del círculo de hielo.

Luego añadimos un círculo alrededor de del conjunto aorta-hielo de 1.5 mm de radio que va a representar la zona imaginaria donde se produce el calentamiento.

Por último, añadimos lo que sería el recipiente y los transductores, que es un cuadrado de 5 mm de lado y un círculo de $\sqrt{2.5^2 \times 2}$ mm de radio, de forma que la diagonal de cara del cuadrado coincide con el diámetro del círculo y lo divide así en 6 arcos de círculo iguales que formarán nuestros transductores.

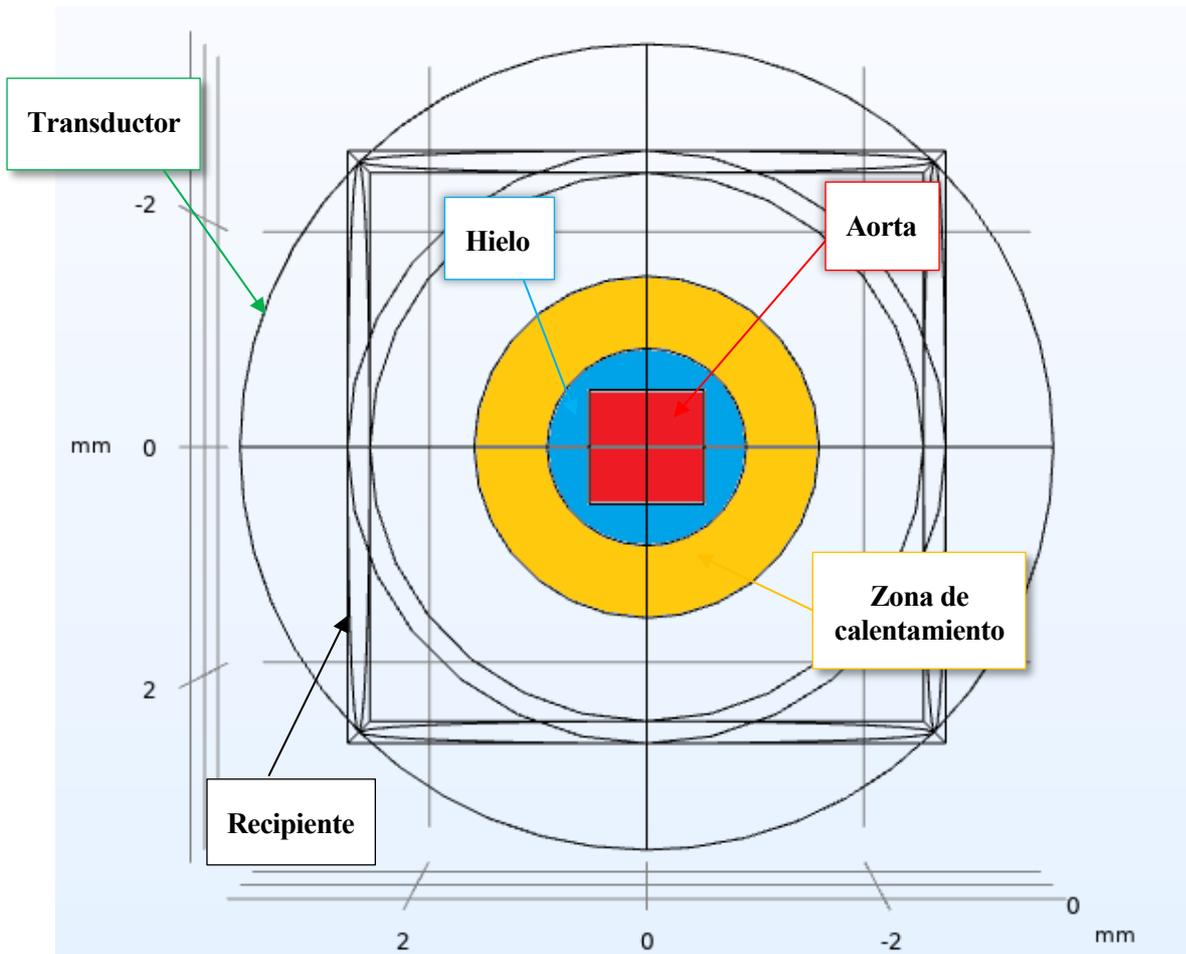


Figura 34: Geometría completa del modelo

5.2 Definición de las propiedades físicas del modelo

Es necesario asignar una serie de propiedades físicas al modelo para que pueda resolver las ecuaciones, en caso de no asignarlas el programa nos avisará de que le faltan datos. Ayuda bastante la gran librería de materiales que tiene COMSOL, pues seleccionando únicamente el material del que va a estar compuesto cada elemento de la geometría que hemos definido anteriormente ya nos importa la mayoría de características físicas de dicho material. A continuación, se muestra las características físicas de los diferentes materiales que hemos seleccionado:

- **Músculo:** Vamos a seleccionar este material para el dominio de la aorta, debido a que no existe un material que sea exactamente “aorta”, vamos a seleccionar Músculo que para el caso tiene unas propiedades muy similares al corazón.

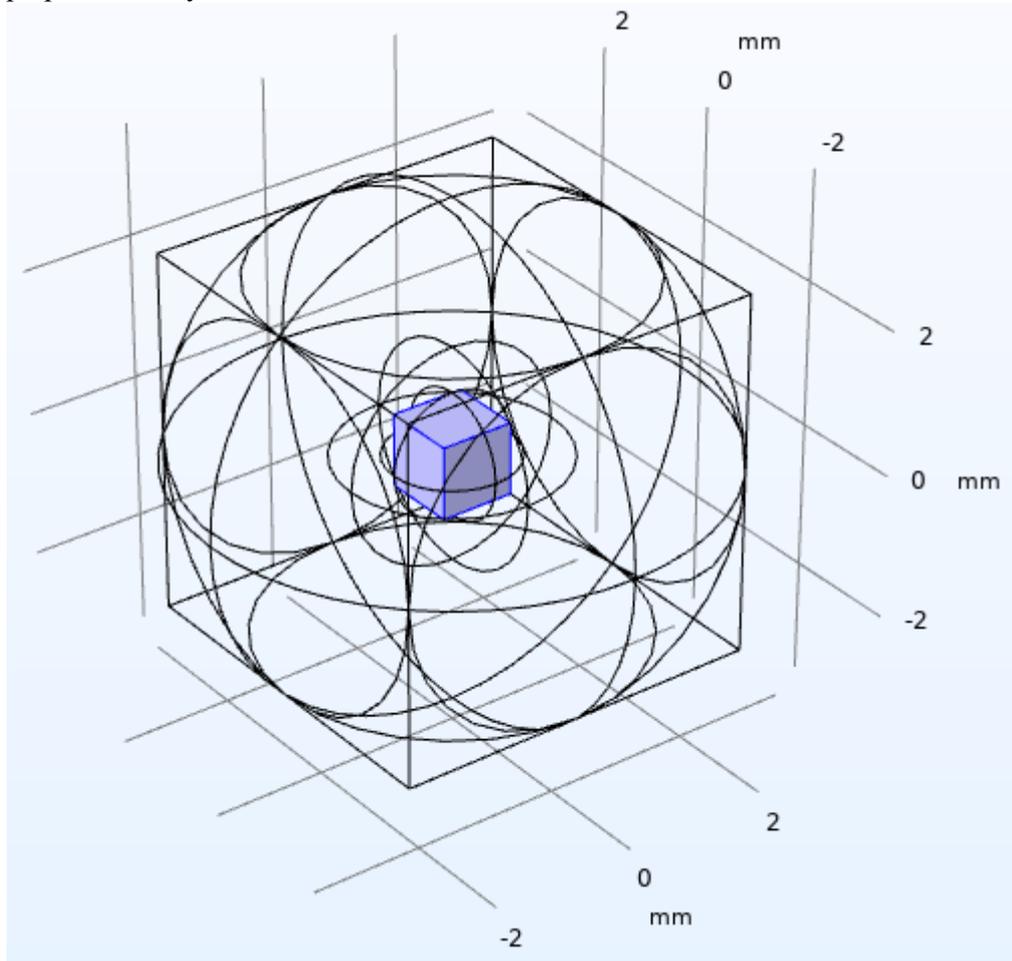


Figura 35: Dominio del material aorta

»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
✓	Capacidad térmica con presión constante	Cp	3421[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Básico
✓	Densidad	rho	1090[kg/m^3]	kg/m³	Básico
✓	Conductividad térmica	k_iso ; kii = k_iso, kij = 0	0.49[W/(m*K)]	W/(m·K)	Básico
✓	Velocidad del sonido	c	1585	m/s	Básico
	Coefficiente de dilatación adiabática	gamma	0.5	1	Básico

Figura 36: Propiedades físicas de aorta

- **H2O (sólido):** Es el material que compone la fina capa que recubre a la aorta. Sustituye a la solución isotónica que se utiliza en la criopreservación, por ejemplo, PBS, por su similitud en propiedades físicas. Además, en la realidad también se puede producir hielo exterior debido a la solidificación de la humedad del ambiente en su almacenaje o transporte.

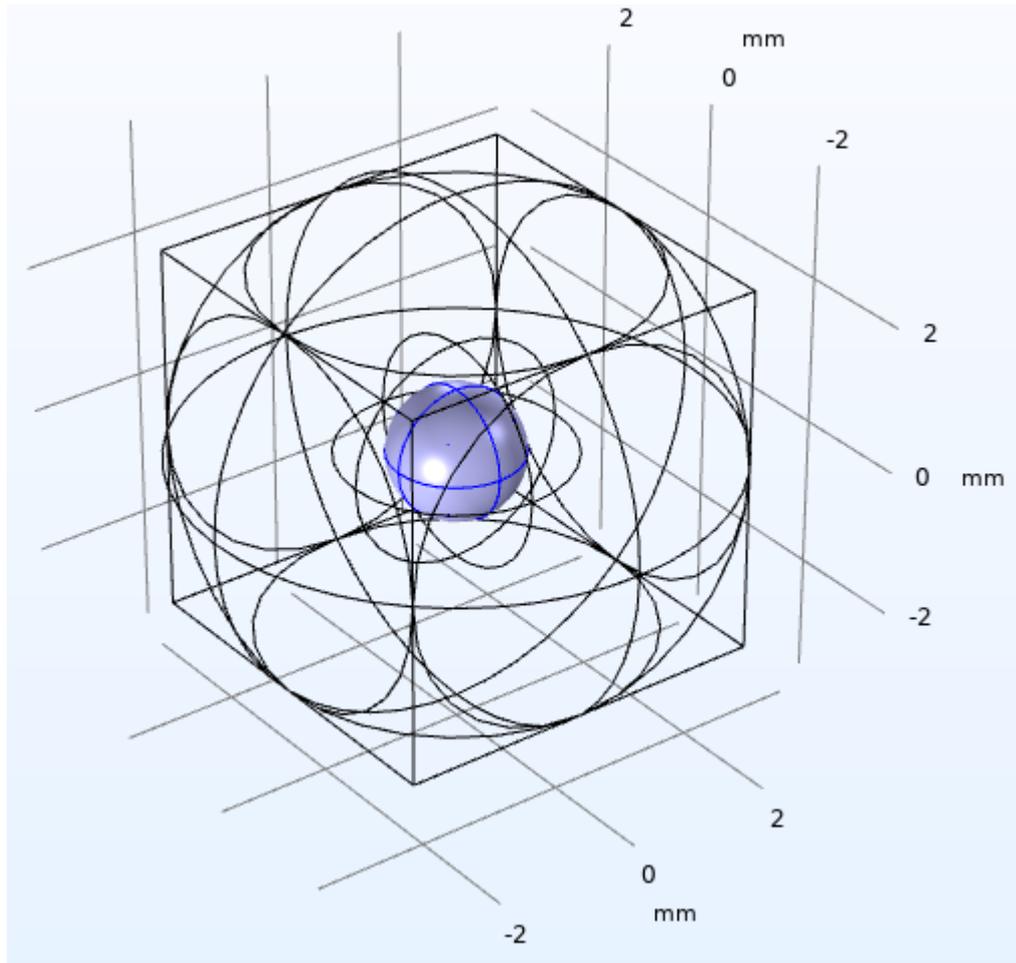


Figura 37: Dominio del material hielo

» Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad térmica	k_{iso} ; $k_{ii} = k_{iso}$, $k_{ij} = 0$	$k_{solid_1}(T[1/K])[W/(...$	W/(m·K)	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Capacidad térmica con presión constante	Cp	$C_{solid_1}(T[1/K])[J/(kg...$	J/(kg·K)	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	$\rho_{solid_1}(T[1/K])[kg/...$	kg/m ³	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Velocidad del sonido	c	5130	m/s	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Coeficiente de dilatación adiabática	gamma	1.3	1	Básico
Propiedad local Syt	Syt	$Syt_{solid_tension_1}(T[1...$	Pa	Propiedades locales
Coeficiente de expansión térmica	α_{iso} ; $\alpha_{hii} = \alpha_{iso}$, $\alpha_{hij} = 0$	$(\alpha_{solid_1}(T[1/K])[...$	1/K	Básico
Propiedad local HC	HC	$HC_{solid_1}(T[1/K])[J/(...$	J/(mol·K)	Propiedades locales
Propiedad local VP	VP	$VP_{solid_1}(T[1/K])[Pa]$	Pa	Propiedades locales
Propiedad local TD	TD	$TD_{solid_1}(T[1/K])[m^...$	m ² /s	Propiedades locales
Coeficiente tangencial de expansión térmica	$\alpha_{phan_{iso}}$; $\alpha_{phan_{ii}} = \alpha_{phan_{iso}}$, $\alpha_{phan_{ij}} = 0$	$CTE_{solid_1}(T[1/K])[1/K]$	1/K	Expansión térmica
Deformación térmica	dL_{iso} ; $dL_{ii} = dL_{iso}$, $dL_{ij} = 0$	$(dL_{solid_1}(T[1/K])-dL...$	1	Expansión térmica

Figura 38: Propiedades físicas del hielo

- **Etilenglicol:** Será el material que elijamos para el medio en el que está inmerso el tejido, y será el medio por el que se transmitan las ondas. El etilenglicol es un medio muy utilizado en estas prácticas por su alta viscosidad y bajo punto de solidificación, lo que ayuda que no se disipe demasiada energía en la transmisión.

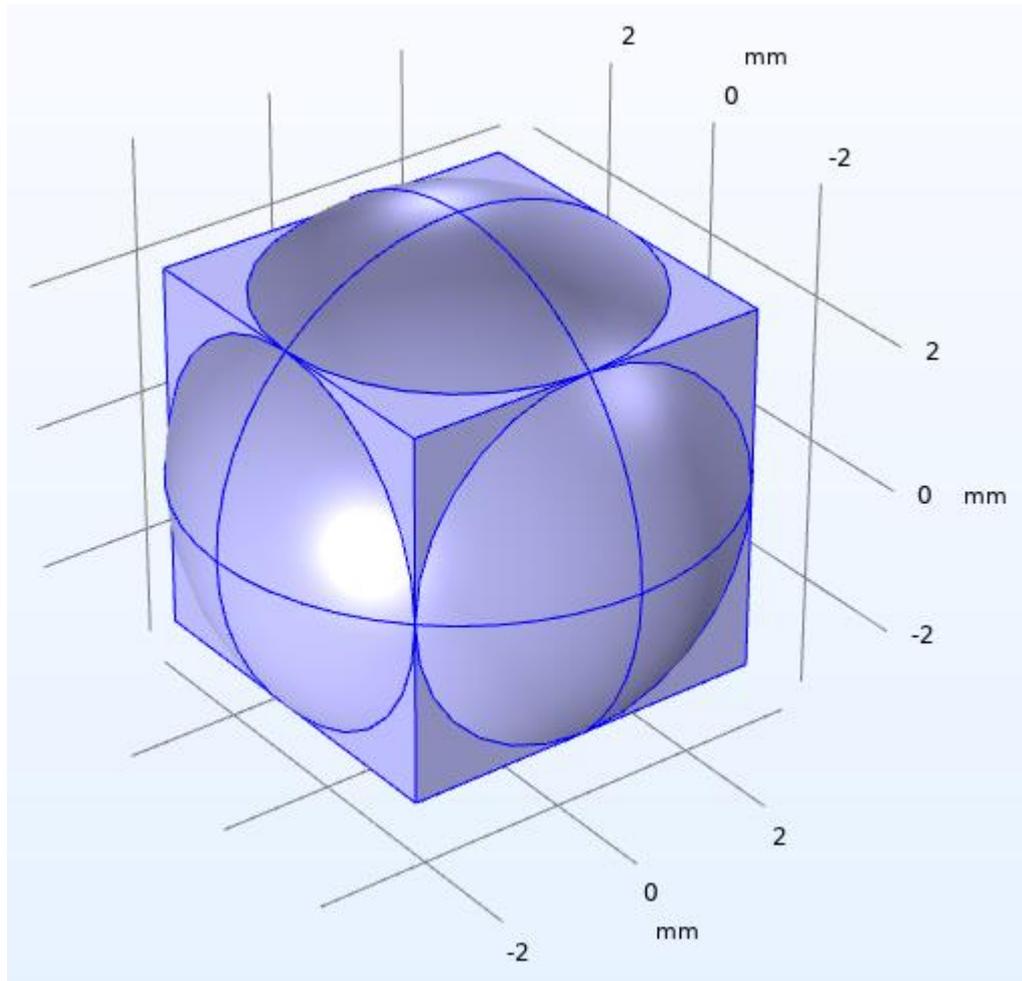


Figura 39: Dominio del material etilenglicol

»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/>	Capacidad térmica con presión constante	Cp	Cp(T)	J/(kg·K)	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Densidad	rho	rho(T)	kg/m ³	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad térmica	k_iso ; k_ii = k_iso, k_ij = 0	k(T)	W/(m·K)	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Velocidad del sonido	c	1500	m/s	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Coefficiente de dilatación adiabática	gamma	0.0062	1	Básico
	Viscosidad dinámica	mu	eta(T)	Pa·s	Básico

Figura 40: Propiedades físicas del medio transmisor

5.3 Físicas que intervienen

En nuestro modelo las principales físicas que van a interactuar son la presión acústica, que por contacto de las ondas producidas en los diferentes transductores y propagadas por el medio conductor van provocar el calentamiento biológico de la aorta. Como es de esperar las propiedades físicas de los materiales anteriormente mencionados van a variar en función de la presión y temperatura a lo largo del tiempo de simulación. COMSOL partiendo de una situación inicial y a través de las ecuaciones que modelan las físicas implicadas, por el método de elementos finitos, nos devuelve la solución en cada instante de los diferentes puntos del modelo.

5.3.1 Física de Presión acústica

Habrà que caracterizar cada regi3n del modelo geométrico utilizando las siguientes caracterizaciones físicas:

- **Presión acústica:**

El modelo de presión acústica está definido por la ecuación de Helmholtz (1):

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 \cdot p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2 \quad (3)$$

$$c_c = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

$$k = \frac{\omega}{c} - i\alpha \quad (5)$$

$$\rho_c = \frac{\rho \cdot c^2}{c_c^2} \quad (6)$$

Dónde:

Q_m : Fuente acústica monopolar

q_d : Fuente acústica dipolar

$c\rho$: Densidad del medio

p_t : Presión total ejercida por ondas acústicas

p : Presión (variable dependiente)

p_b : Campo de presión de fondo

c : Velocidad del sonido en el medio

ω : Frecuencia angular

α : Coeficiente de atenuación

Dado que tenemos 3 regiones claramente diferenciadas por el material (dominio de la aorta, dominio de hielo y dominio de etilenglicol) utilizaremos tres caracterizaciones diferentes para cada una de estas regiones donde se diferenciarán en las características del medio, como son la velocidad del sonido, la densidad y el coeficiente de atenuación.

- **Contorno rígido al sonido:**

Los contornos rígidos implementarían la ecuación la siguiente ecuación:

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = 0 \quad (7)$$

Donde:

n : es el vector normal a la superficie.

Por defecto, el contorno rígido viene definido en todas las superficies exteriores de la geometría, pero los arcos de círculo, que están en la superficie exterior de nuestro modelo, serán sustituidos por la física de transductor. Por lo que únicamente quedará como contorno rígido las esquinas del cubo, que surge de la resta de intersección entre el círculo de los transductores y el cubo recipiente.

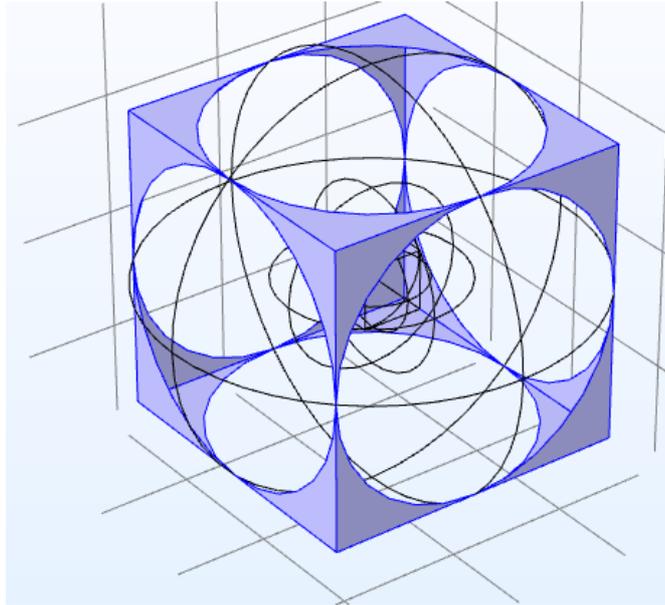


Figura 41: contornos rígidos al sonido

- **Valores iniciales:**

Como valor inicial de presión en todo el dominio de la geometría tendremos 1 atm.

- **Desplazamiento normal:**

Esta caracterización es la correspondiente a los transductores, donde definiremos la amplitud de desplazamiento normal de los transductores a la frecuencia que determinemos posteriormente.

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = (i\omega)^2 d_n \quad (8)$$

Donde:

d_n : es el desplazamiento normal.

Se define esta caracterización física en las superficies del círculo que quedan exteriores al cubo.

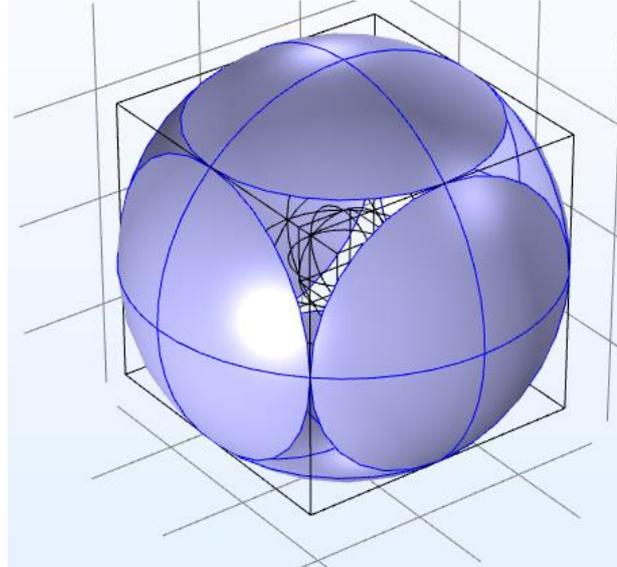


Figura 42: Transductores de presión

5.3.2 Física de Transferencia de Biocalor

El modelo físico de transferencia de calor se da asumiendo las condiciones de presión acústicas anteriormente descritas, y se caracteriza de la siguiente forma:

- **Tejido biológico:**

Se caracteriza así a la región de la aorta, que sería nuestro tejido biológico.

$$\rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{bio} \quad (9)$$

$$q = -k \nabla T \quad (10)$$

Dónde:

ρ : Densidad del medio

u : Vector de velocidad del fluido

c_p : capacidad calorífica a presión constante

K : Conductividad térmica

Q : Fuente de calor

q : Flujo de calor conductivo

Q_{bio} : Fuente de calor biológica (tejido)

En nuestro caso al estar el tejido congelado, $Q_{bio} = 0$, dado que esta fuente de calor correspondería al fluir de la sangre.

- **Valores iniciales:**

Tendremos dos temperaturas diferentes inicialmente, que serán la temperatura de la aorta más el hielo y la temperatura el etilenglicol.

- **Aislamiento térmico:**

El aislamiento térmico está definido en todo el contorno de la geometría, y la ecuación en dicha región es la siguiente:

$$-n \cdot q = 0 \quad (11)$$

Donde:

n : es el vector normal de la superficie

- **Fuente de calor:**

Como fuente de calor definimos la región que queda dentro del círculo de calentamiento, aorta, hielo y parte de etilenglicol.

Que vendrá caracterizado por la siguiente ecuación

$$Q = Q_0 \quad (12)$$

Donde:

$Q_0 = acpr.Q_{pw}$ que representa el calor producido del estudio de presión.

6 RESULTADOS

A continuación, vamos a mostrar los resultados obtenidos en un plano $x=0$ de la simulación anteriormente descrita partiendo de las siguientes condiciones:

Parámetros	Valor	Comentario
TiempoFinal	60[s]	Tiempo de simulación
TempHielo	133[K]	Temperatura del hielo y aorta al inicio
TempEtilenglicol	225[K]	Temperatura del etilenglicol al inicio
TempAmbiente	293[K]	Temperatura de referencia
Lado	5 [mm]	Lado del cubo recipiente
Frecuencia	2[MHz]	Frecuencia de los transductores
Amplitud	100[nm]	Desplazamiento de los transductores
Alpha_Hielo	0.05[1/m]	Coefficiente de atenuación del hielo
Alpha_Etilenglicol	0.855[1/m]	Coefficiente de atenuación del etilenglicol
Alpha_Aorta	0.7[1/m]	Coefficiente de atenuación de la aorta

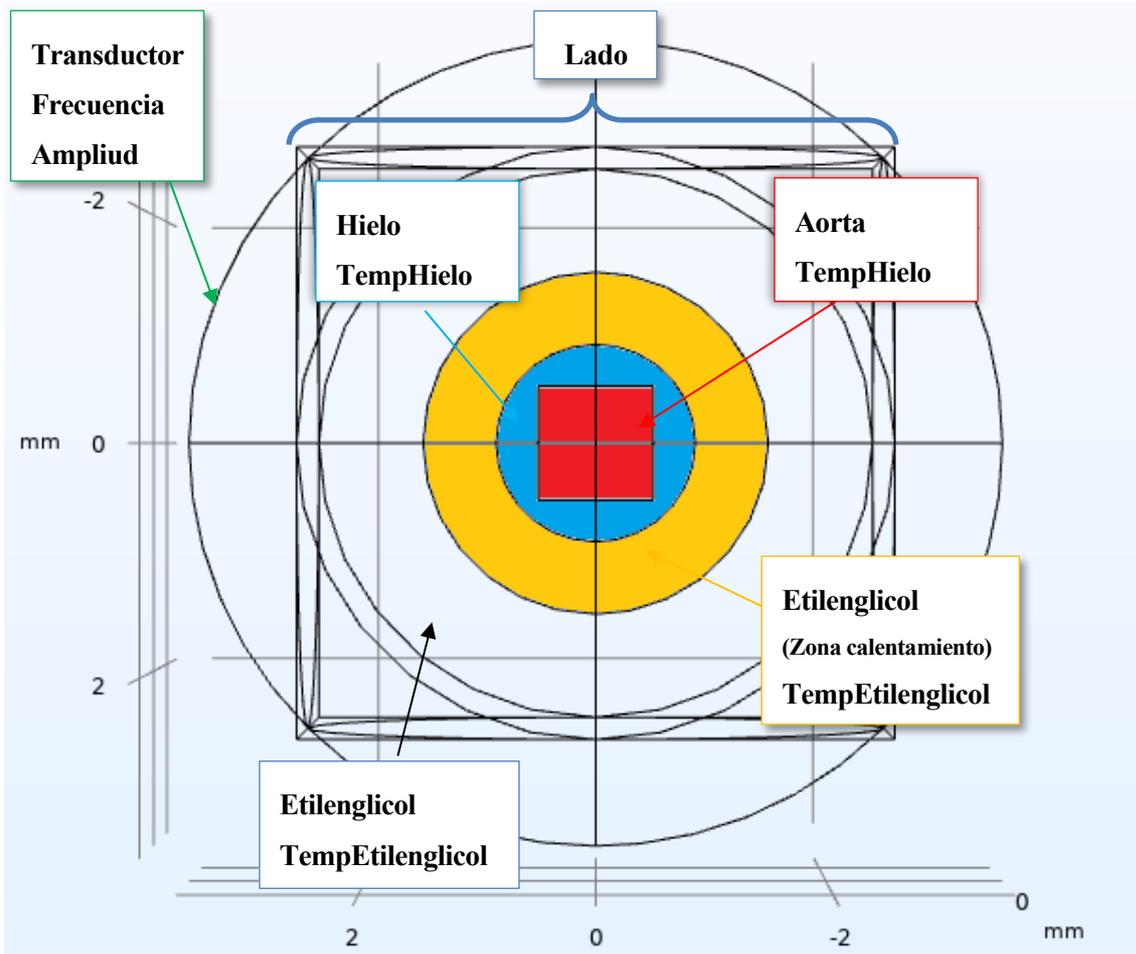


Figura 43: Asociación de parámetros a la geometría

Presión acústica:

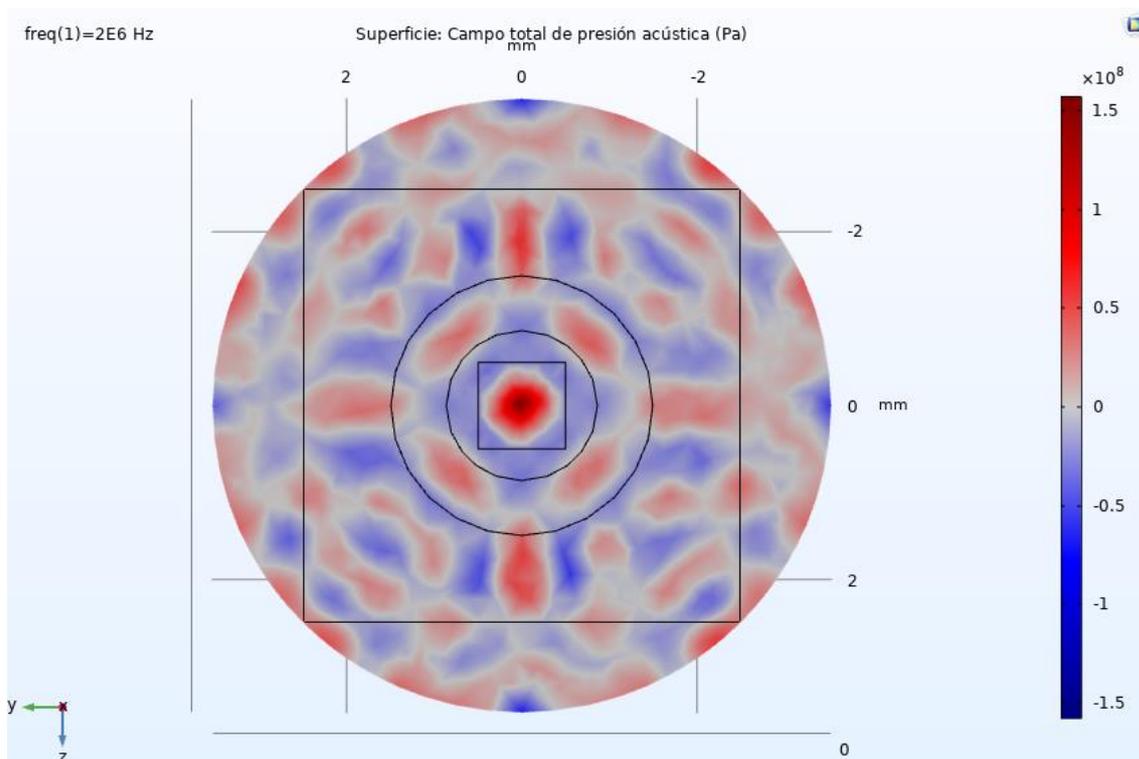


Figura 44: Resultado de la Presión acústica

Temperatura:

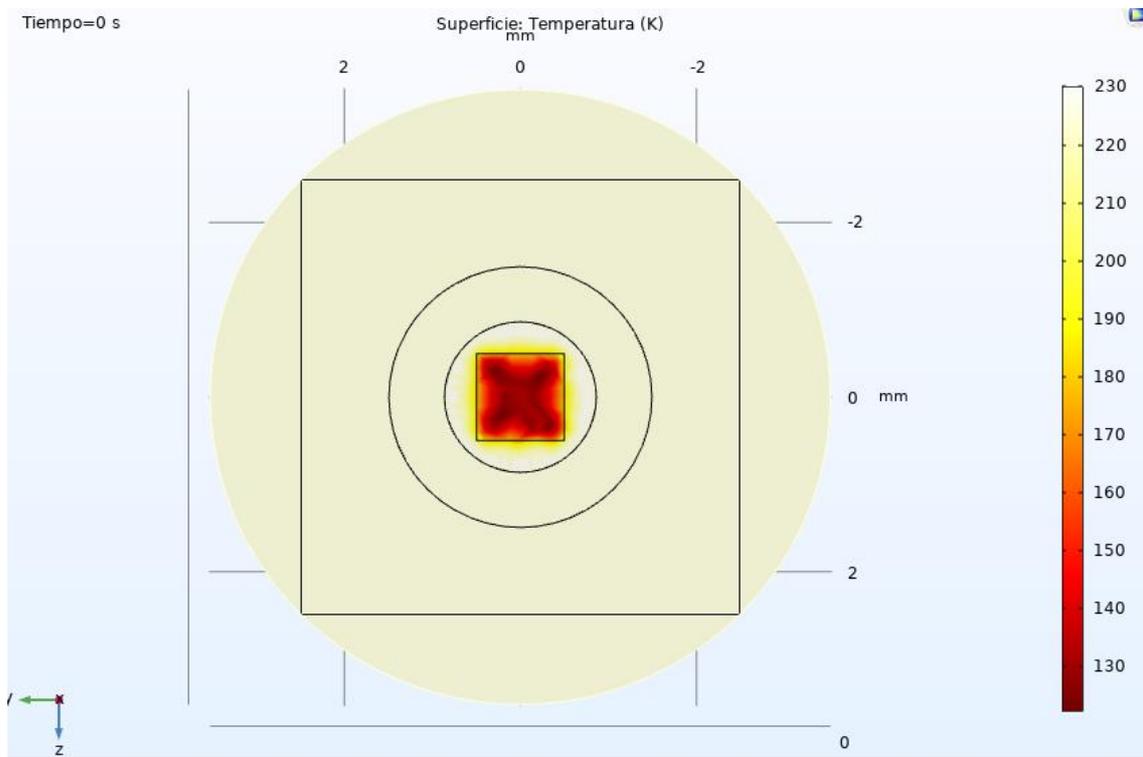


Figura 45: Resultado del calentamiento en T=0s

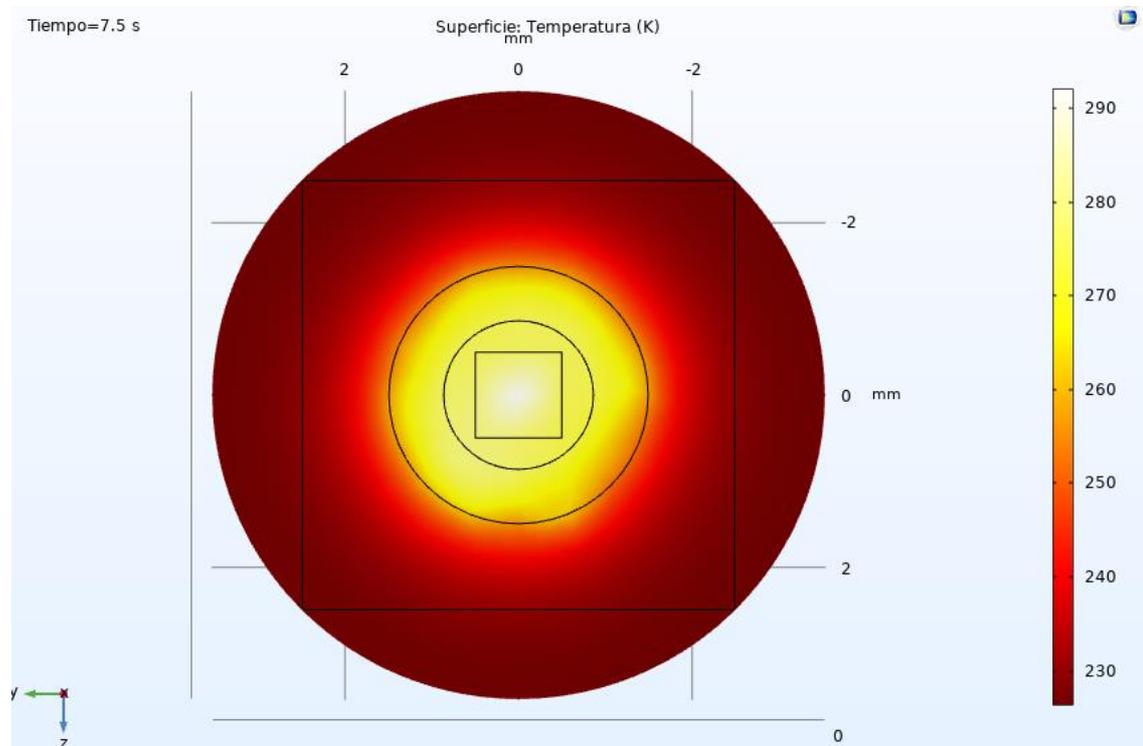


Figura 46: Resultado del calentamiento en T=7.5s

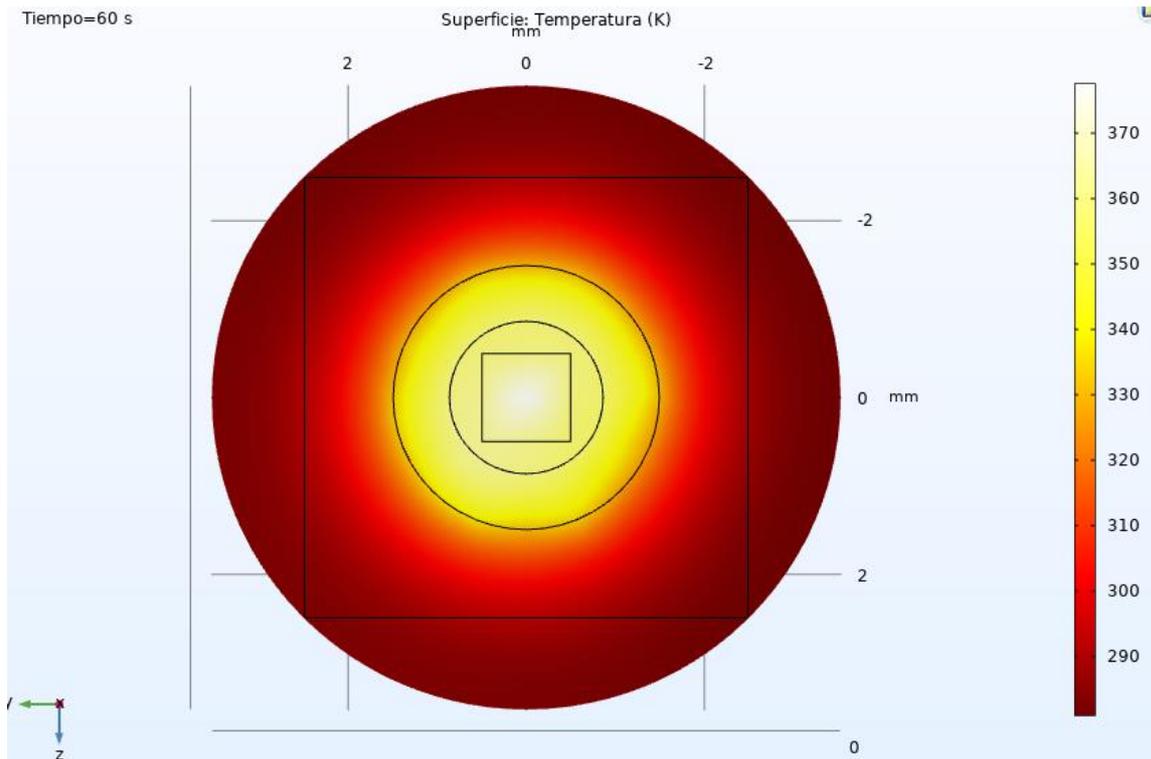


Figura 47: Resultado del calentamiento en $T=60\text{s}$

Gradiente de temperatura

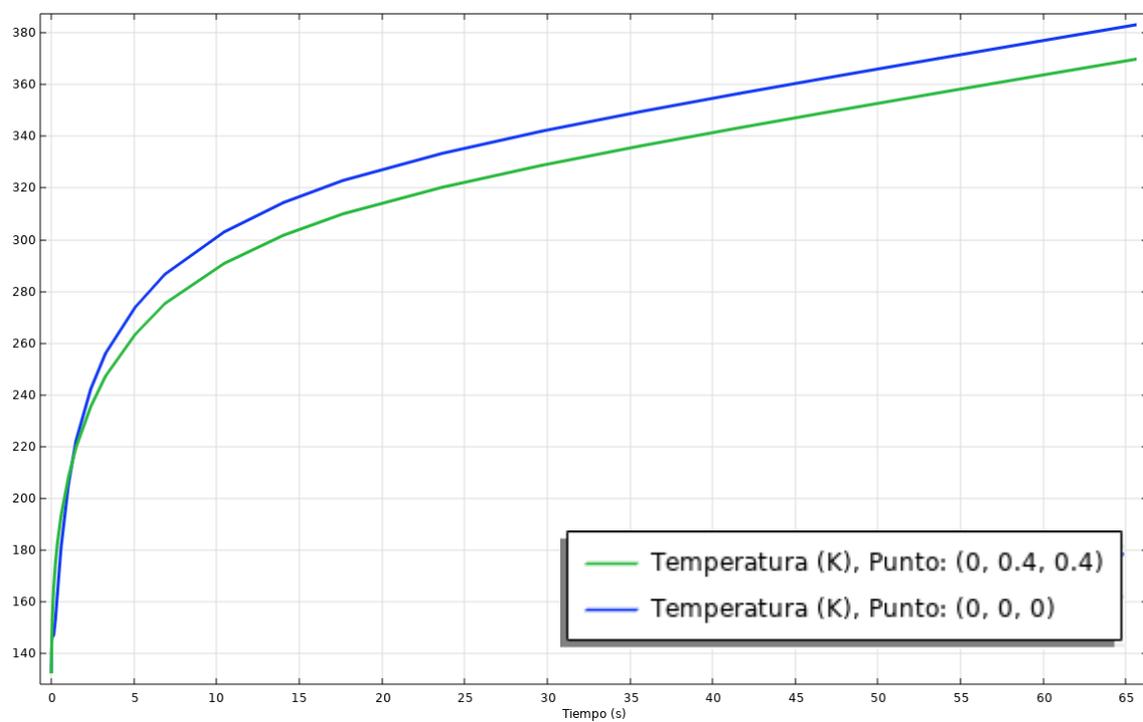


Figura 48: Gradiente de temperatura durante la simulación

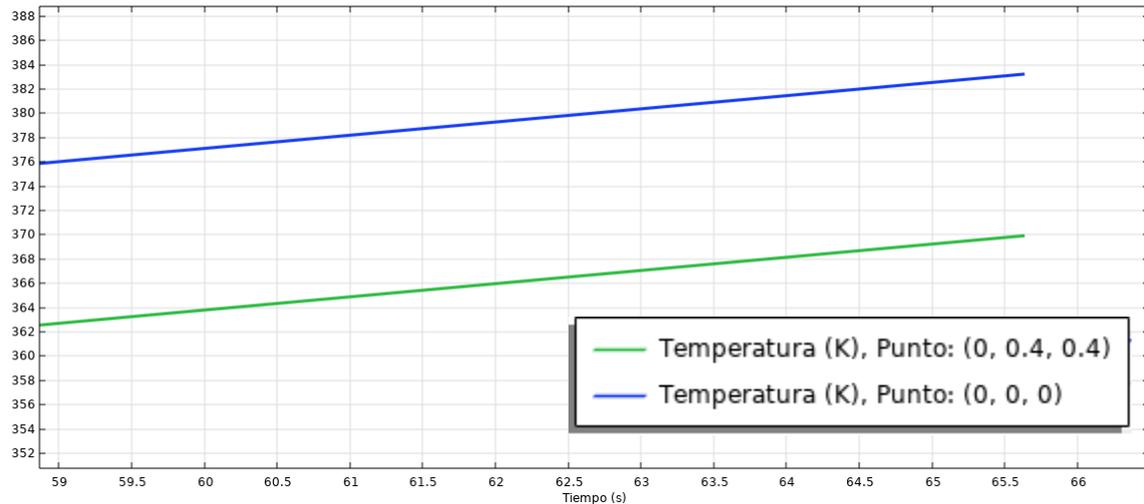


Figura 49: Gradiente de temperatura al final de la simulación

Observando las gráficas obtenidas podemos ver como las ondas se focalizan en el centro de la aorta calentándola de forma rápida y aceptablemente uniforme. La aorta se lleva desde los 133 K hasta una temperatura ambiente en apenas 15 segundos, siendo un primer calentamiento muy rápido que posteriormente se aplanaba subiendo prácticamente a un ritmo de 1 K por segundo. La diferencia de temperatura entre el centro de la aorta y un punto exterior de la misma es estrecha al inicio del calentamiento y se mantiene constantes a partir de los 15 segundos aproximadamente, con una diferencia de 13 K.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Después de llevar a cabo la experimentación del proceso, queda demostrada la robustez del sistema de perfusión que permite la vitrificación aparente de corazón de ratón. Gracias a la monitorización de la temperatura del corazón durante la perfusión mediante Picolog, podemos ver el grado de integración del sistema de perfusión y del sistema de enfriamiento, BioCool.

A pesar de la complejidad que nos supuso inicialmente manejar cada sistema, hemos conseguido dominarlos de forma simultánea. Además de intentar reflejar la forma más sencilla de usarlos para que al siguiente investigador que lo necesite no le suponga un problema su comprensión y lo pueda usar también desde otro ordenador.

Con respecto a este apartado quedaría como líneas futuras el testeo del método con distintos crioprotectores con el fin de comparar las ventajas y desventajas de cada uno. Además de pasar el software a un sistema más compacto y manejable como podría ser un Arduino o una Raspberry.

Sobre el modelo de recalentamiento con 6 transductores en posición de cubo hexagonal propuesto hemos podido comprobar mediante simulación que podría ser una buena solución para llevar al ámbito experimental, puesto que hemos observado un sistema HIFU capaz de recalentar de forma rápida y homogénea una sección de aorta criopreservada mediante vitrificación. Es interesante escalar el modelo a otras dimensiones mayores, como ha hecho mi compañero Pablo [12].

REFERENCIAS

- [1] Álvaro Pérez Aguilar, Diseño e implementación de sistema de monitorización y control en temperatura y concentración de crioprotector para criopreservación de órganos, 2018.
- [2] José Manuel Ortiz Serrano, Desarrollo de sistemas de perfusión, criopreservación y valoración de corazón. Estudio experimental, 2019.
- [3] Beatriz Albiol Tortosa, Diseño y aplicación de técnicas de vitrificación en equilibrio para la criopreservación de corazón y encéfalo de *Mus musculus*, 2019.
- [4] Enrique Alcalá Guerrero, Diseño y desarrollo experimental de sistemas y dispositivos electrónicos para el apoyo a la criopreservación mediante equilibrio termodinámico de órganos, 2019.
- [5] Eduardo Guillén Jurado, Modelización de un sistema de HIFU mediante una herramienta de cálculo basada en elementos finitos, 2020.
- [6] Carlos Moñino Hormigo, Simulación del recalentamiento mediante ultrasonidos de una aorta de roedor en Comsol Multiphysics, 2020.
- [7] Luz Mabel Ávila-Portillo, José I. Madero, Claudia López, María Fernanda León, Lucía Acosta, Claudia Gómez, Lucy Gabriela Delgado, Claudio Gómez, José Manuel Lozano, María T. Reguero, FUNDAMENTOS DE CRIOPRESERVACIÓN, *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología* Vol.57 No. 4, 2006, (291-300).
- [8] Wikipedia, <https://es.wikipedia.org>
- [9] Roca i Acín, Joan. La utilización de animales en experimentación biomédica (I). 2001.
- [10] Gregory M. Fahy. *Physical and biological aspects of renal vitrification*. Organogenesis. 2009.
- [11] Modes of Interaction of Cryoprotectants with Membrane Phospholipids during Freezing, Thomas J. Anchordoguy, Alan S. Rudolph, John F. Carpenter, and John H. Crowe. *CRYOBIOLOGY* 24, 324-331 (1987).
- [12] Pablo Garijo Forcada, Estudio de las condiciones óptimas de calentamiento para una muestra de tejido biológico 2020.

ANEXO I: INSTALACIÓN SOFTWARE LABVIEW

En primer lugar, para utilizar el Software y el Hardware desarrollado por Álvaro [1] será necesario partir de un ordenador con Windows XP, debido a que la tarjeta de adquisición es antigua y que el programa está desarrollado con LabVIEW 6.1.

Quedaría como línea futura adaptar el Software a un entorno más actual, como pudiera ser una tarjeta de adquisición más moderna, una Raspberry o un Arduino, para que no esté tan limitado en cuanto al sistema operativo y pueda funcionar en cualquier ordenador actual sin tener necesidad de instalar Windows XP, que actualmente está bastante en desuso.

En el siguiente enlace están disponibles los archivos necesarios:

<https://drive.google.com/drive/folders/15IQRwN7RejjXG6I1m4HQz3rYQ4piz8Sb?usp=sharing>

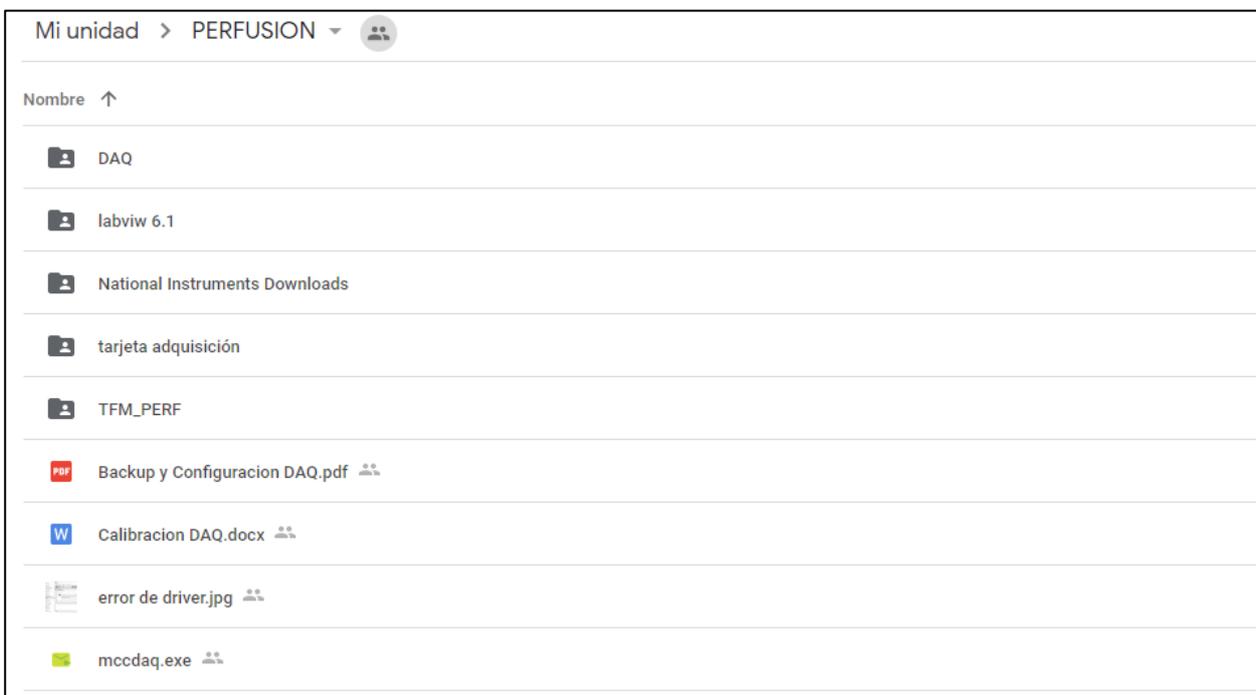


Figura 50: Archivos necesarios para la instalación

Después de descargar los archivos del enlace, hay que seguir los siguientes pasos:

1. De los archivos que nos hemos descargado debemos entrar en la carpeta “*labviw 6.1\labview fadi*” y copiar la carpeta “*National Instruments*” en la ruta “*C:\Archivos de programa*”.
2. Instalar los drivers del controlador de instaCal, instalando la aplicación “*mccdaq*”, pichando en el ejecutable que está en la carpeta principal. (si no están los drivers instalados dará un error en el archivo CBUL.SYS al intentar abrir *instaCal*).
3. Copiar la carpeta “*DAQ*” y pegarla en el directorio del disco duro “*C:\Archivos de programa\Mesasurement Computing\DAQ*”.
4. Dentro de la carpeta “*DAQ*”, abrir el archivo “*inscal32.exe*”. Conectar la tarjeta mediante USB al PC y para que el programa la identifique.

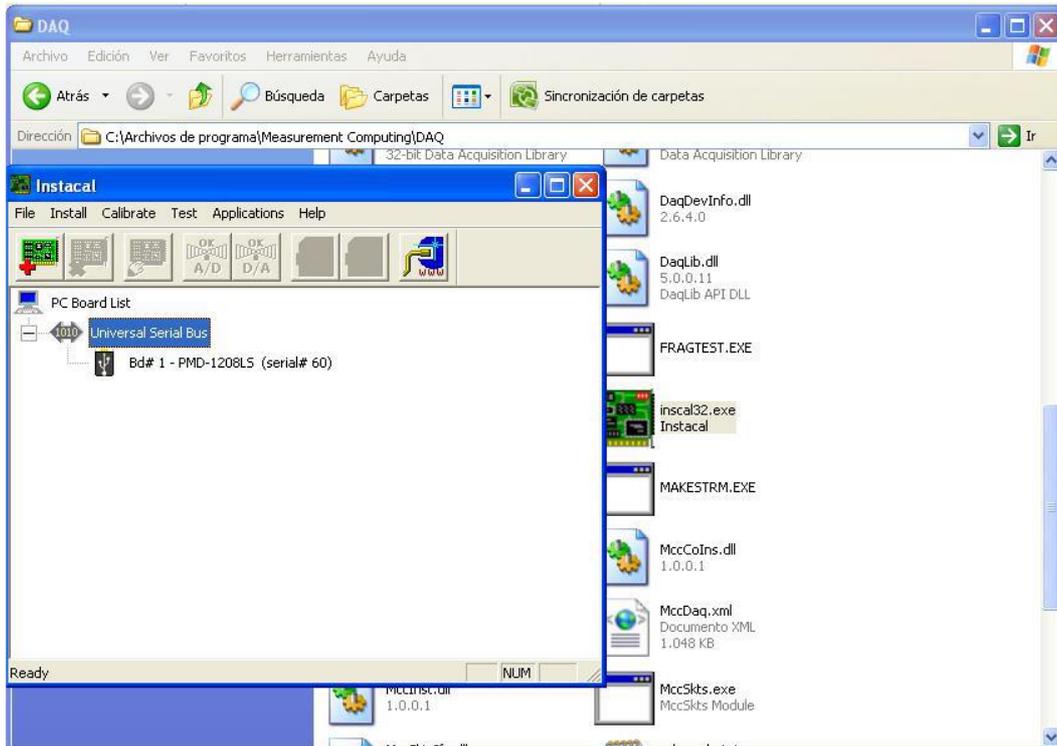


Figura 51: InstaCal

5. Seleccionar la tarjeta con doble clic y saldrá el menú de configuración. Escribir los siguientes datos:

Serial Nº: 60

Nº Of Channels: 4 Differential.



Figura 52: Configuración de la Tarjeta DAQ en InstaCal

A continuación, clic derecho sobre la tarjeta y pulsar en “Change Board”.

Board Number: 1.

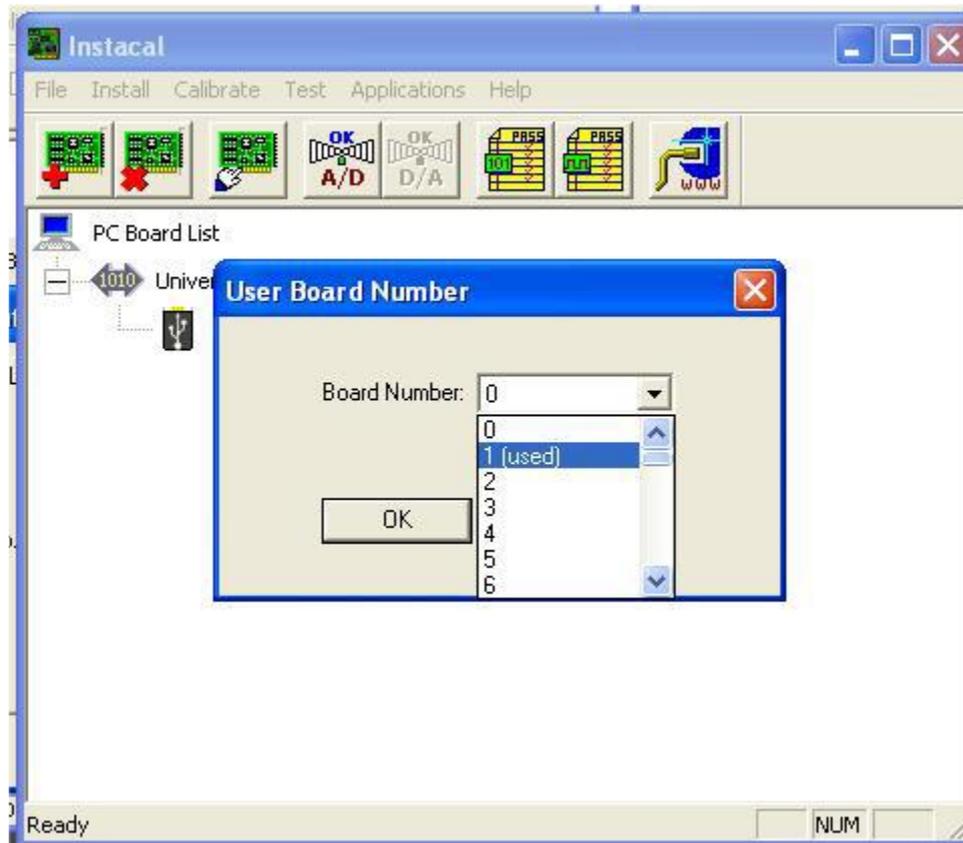


Figura 53: Asignación del puerto de la tarjeta DAQ

6. Para comprobar que está bien conectada se realiza un Test analógico.

Seleccionar “Analog Test”.

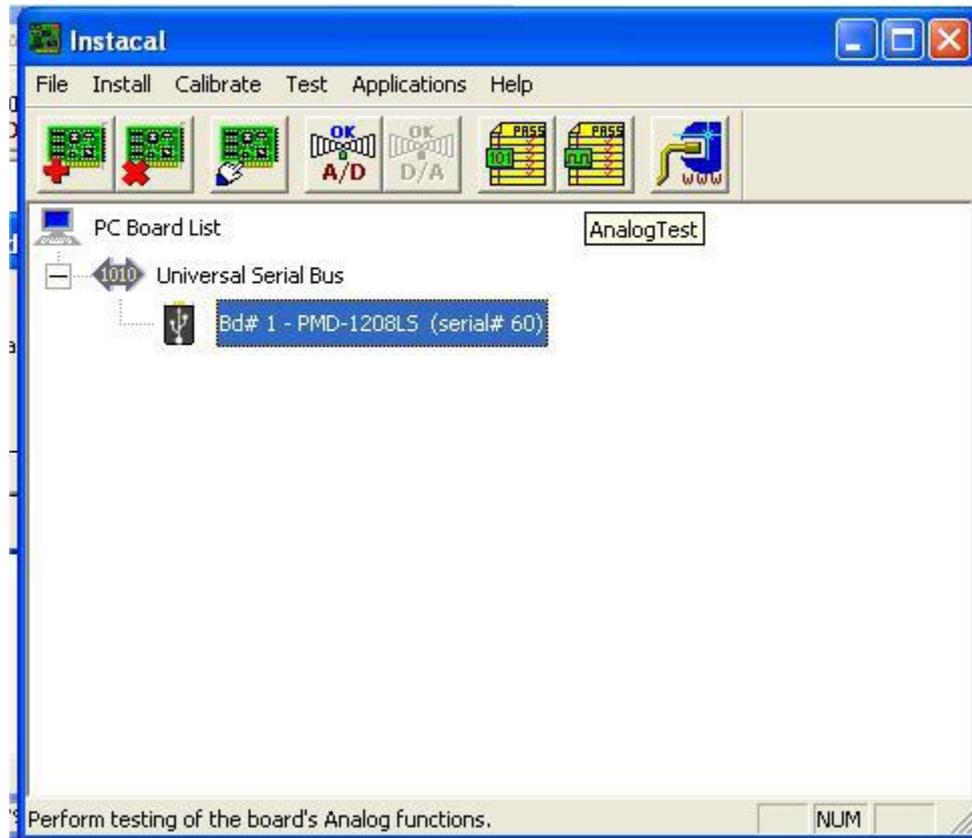


Figura 54: Test analógico de DAQ

Abrir "Scan Options". Sin cambiar los valores, seleccionar "OK".

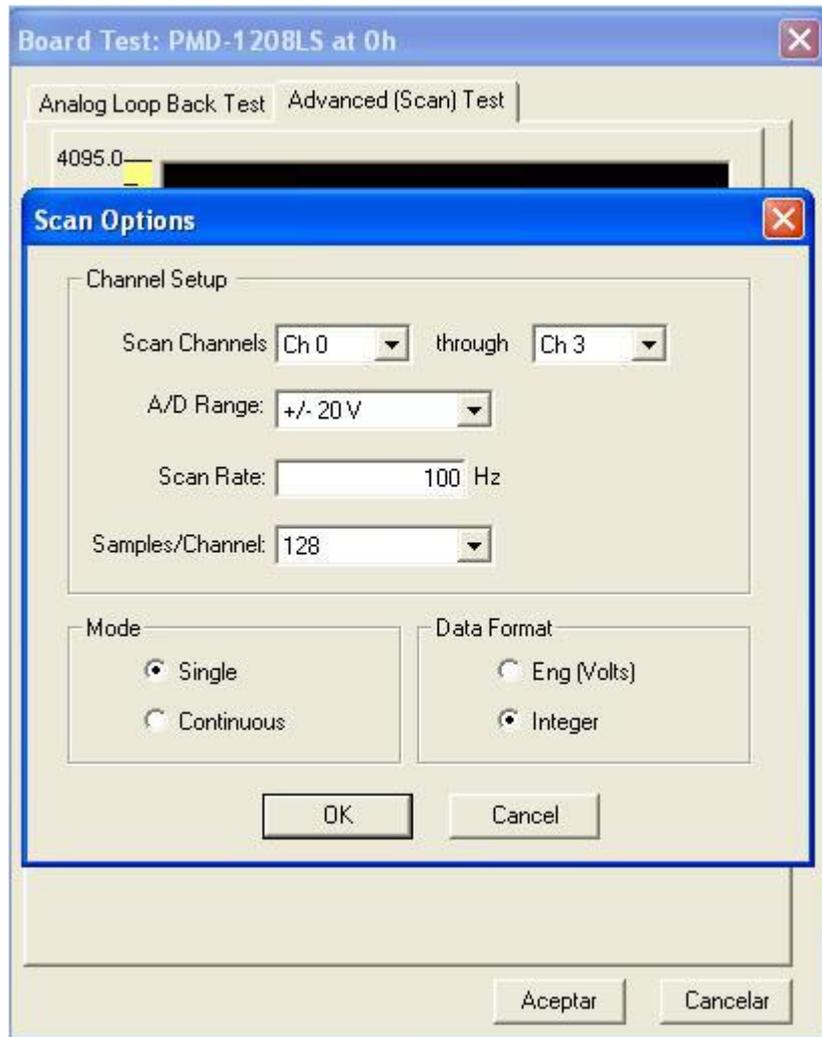


Figura 55: Opciones del test DAQ

Pulsar “Start” y a continuación “View Data”.

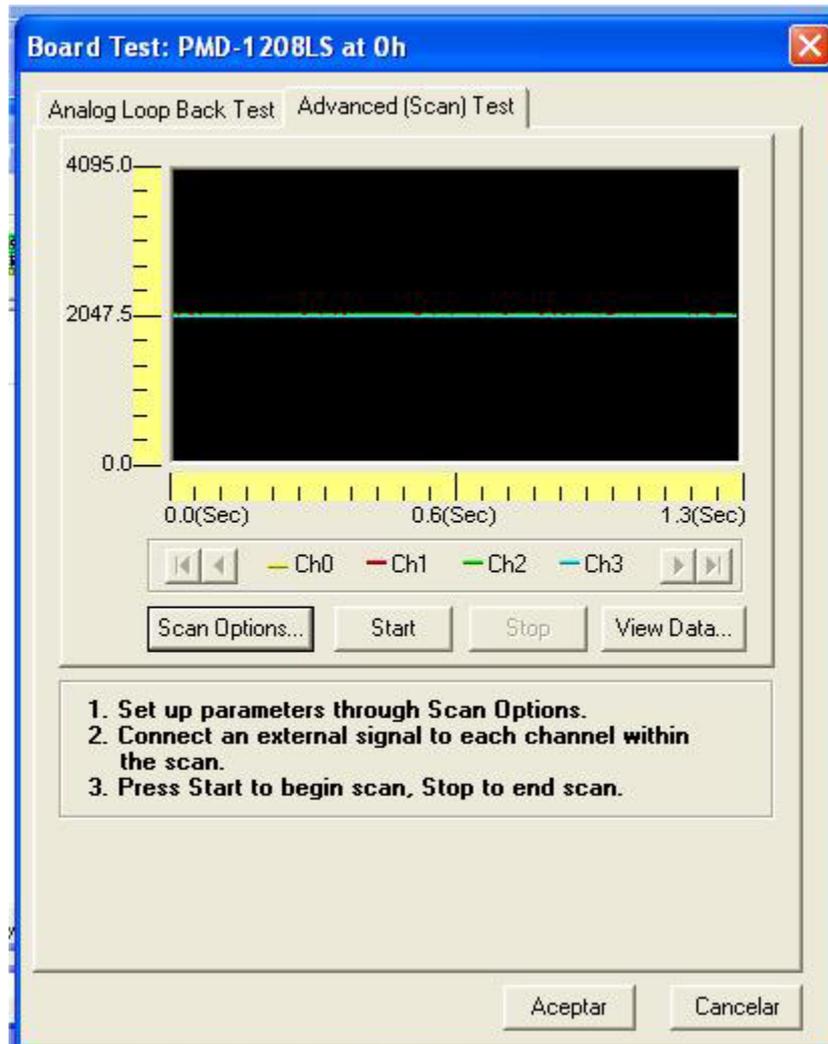


Figura 56: Pantalla de inicio del Test DAQ

En View data saldrá una tabla con valores similares a los siguientes:

	Scan Info	Time(sec)	Chan 0	Chan 1	Chan 2	Chan 3
1						
2						
3		1.2100	2059.000	2048.000	2048.000	2047.000
4		1.2200	2059.000	2048.000	2048.000	2047.000
5		1.2300	2059.000	2048.000	2048.000	2047.000
6		1.2400	2059.000	2048.000	2048.000	2047.000
7		1.2500	2059.000	2048.000	2049.000	2047.000
8		1.2600	2059.000	2048.000	2048.000	2047.000
9		1.2700	2059.000	2048.000	2049.000	2047.000
10						
11	Mean		2059.008	2047.945	2047.945	2047.000
12	Var		0.008	0.099	0.430	0.000
13	Std Dev		0.088	0.315	0.656	0.000
14	Avg Dev		0.016	0.106	0.444	0.000
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Figura 57: Resultados típicos del Test DAQ

ANEXO II: INFORME COMSOL

En este anexo se expone el informe extraído directamente desde COMSOL donde se muestra al detalle todos los datos tanto introducidos como internos del propio programa, así como los resultados obtenidos.

1 MODELO DE 6 TRANSDUCTORES EN CUBO

Autor	Victor Villalar Lara
-------	----------------------

1 CONTENIDO

1. Definiciones globales	54
1.1. <i>Parámetros</i>	54
2. Componente 3	55
2.1. <i>Definiciones</i>	55
2.2. <i>Geometría 3.....</i>	56
2.3. <i>Materiales.....</i>	59
2.4. <i>Presión acústica, frecuencia</i>	72
2.5. <i>Transferencia de biocalor 2</i>	107
2.6. <i>Malla 6.....</i>	147
3. Estudio 1	150
3.1. <i>Dominio de la frecuencia</i>	150
3.2. <i>Configuraciones del resolvedor</i>	150
4. Estudio 2	154
4.1. <i>Temporal.....</i>	154
4.2. <i>Configuraciones del resolvedor</i>	155
5. Resultados	161
5.1. <i>Conjuntos de datos</i>	161
5.2. <i>Tablas.....</i>	164
5.3. <i>Trazar grupos</i>	166

1 Definiciones globales

UTILIZAR PRODUCTOS

COMSOL Multiphysics
Acoustics Module
Heat Transfer Module

1.1 PARÁMETROS

PARÁMETROS 1

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
TiempoFinal	60[s]	60 s	
TempHielo	133[K]	133 K	
TempEtilenglicol	225[K]	225 K	
TempAmbiente	293[K]	293 K	
Lado	5 [mm]	0.005 m	
Frecuencia	2[MHz]	2E6 Hz	
Amplitud	100[nm]	1E-7 m	
Alpha_Hielo	0.05[1/m]	0.05 1/m	
Alpha_Etilenglicol	0.855[1/m]	0.855 1/m	
Alpha_Aorta	0.7[1/m]	0.7 1/m	

2 Componente 3

AJUSTES

Descripción	Valor
Sistema de unidades	SI
Orden de forma geométrica	Automático

COORDENADAS DEL MARCO ESPACIAL

Primero	Segunda	Tercera
x	y	z

COORDENADAS DE MARCO DE MATERIAL

Primero	Segunda	Tercera
X	Y	Z

COORDENADA DE MARCO DE GEOMETRÍA

Primero	Segunda	Tercera
Xg	Yg	Zg

COORDENADAS DEL MARCO DE MALLA

Primero	Segunda	Tercera
Xm	Ym	Zm

2.1 DEFINICIONES

2.1.1 Sondas

1.1.1.1 temp centro

Tipo de sonda	Sonda en un punto del dominio
---------------	-------------------------------

1.1.1.2 Temp vertice

Tipo de sonda	Sonda en un punto del dominio
---------------	-------------------------------

2.1.2 Sistemas de coordenadas

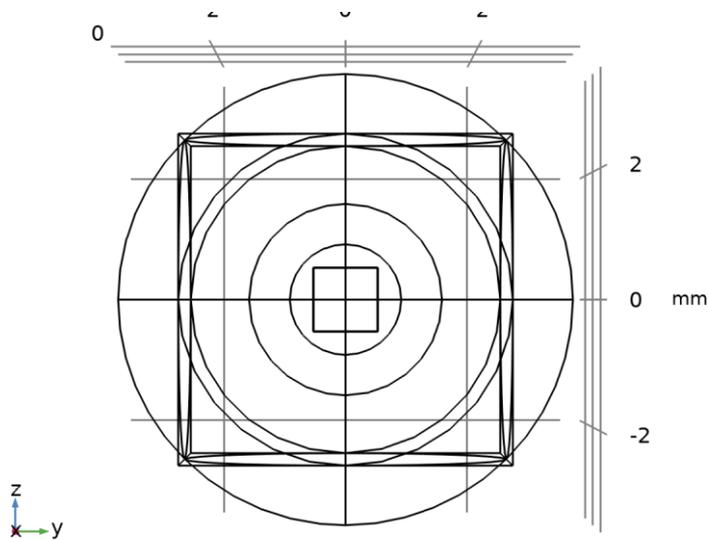
1.1.1.3 Sistema de contornos 3

Tipo de sistema de coordenadas	Sistema de contornos
Etiqueta	sys3

NOMBRES DE COORDENADAS

Primero	Segunda	Tercera
t1	t2	n

2.2 GEOMETRÍA 3



Geometría 3

UNIDADES

Unidad de longitud	mm
Unidad angular	deg

ESTADÍSTICAS DE GEOMETRÍA

Descripción	Valor
Dimensión de espacio	3
Número de dominios	18
Número de contornos	84
Número de aristas	108

Descripción	Valor
Número de vértices	46

2.2.1 Esfera 1 (sph1)

POSICIÓN

Descripción	Valor
Posición	{0, 0, 0}

EJE

Descripción	Valor
Tipo de eje	Eje z

TAMAÑO

Descripción	Valor
Radio	$\sqrt{((Lado/2)^2)*2}$

2.2.2 Bloque 1 (blk1)

POSICIÓN

Descripción	Valor
Posición	{0, 0, 0}
Base	Centro

EJE

Descripción	Valor
Tipo de eje	Eje z

TAMAÑO Y FORMA

Descripción	Valor
Ancho	Lado
Profundidad	Lado
Altura	Lado

2.2.3 aorta (blk2)

POSICIÓN

Descripción	Valor
Posición	{0, 0, 0}
Base	Centro

EJE

Descripción	Valor
Tipo de eje	Eje z

TAMAÑO Y FORMA

Descripción	Valor
Ancho	1
Profundidad	1
Altura	1

2.2.4 HIELO (sph2)

POSICIÓN

Descripción	Valor
Posición	{0, 0, 0}

EJE

Descripción	Valor
Tipo de eje	Eje z

TAMAÑO

Descripción	Valor
Radio	$\sqrt{\sqrt{((0.5)^2 * 2)^2 + (0.5^2)}}$

2.2.5 Esfera 3 (sph3)

POSICIÓN

Descripción	Valor
Posición	{0, 0, 0}

EJE

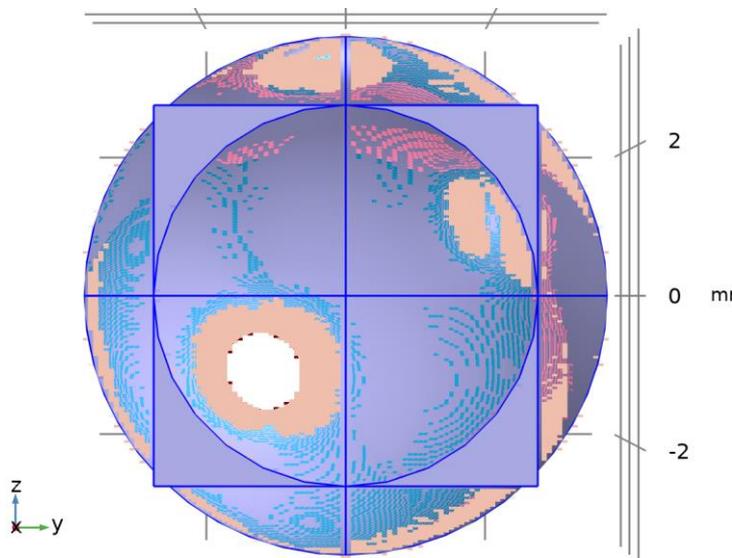
Descripción	Valor
Tipo de eje	Eje z

TAMAÑO

Descripción	Valor
Radio	1.5

2.3 MATERIALES

2.3.1 Ethylene glycol



Ethylene glycol

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

PARÁMETROS DE MATERIAL

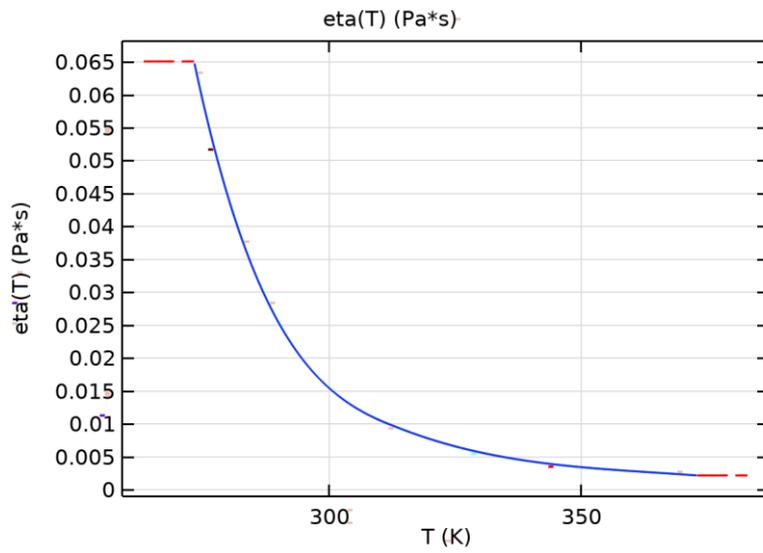
Nombre	Valor	Unidad
Capacidad térmica con presión constante	$C_p(T)$	J/(kg·K)
Densidad	$\rho(T)$	kg/m ³
Conductividad térmica	$k(T)$	W/(m·K)
Velocidad del sonido	1500	m/s
Coefficiente de dilatación adiabática	0.0062	1

BASIC AJUSTES

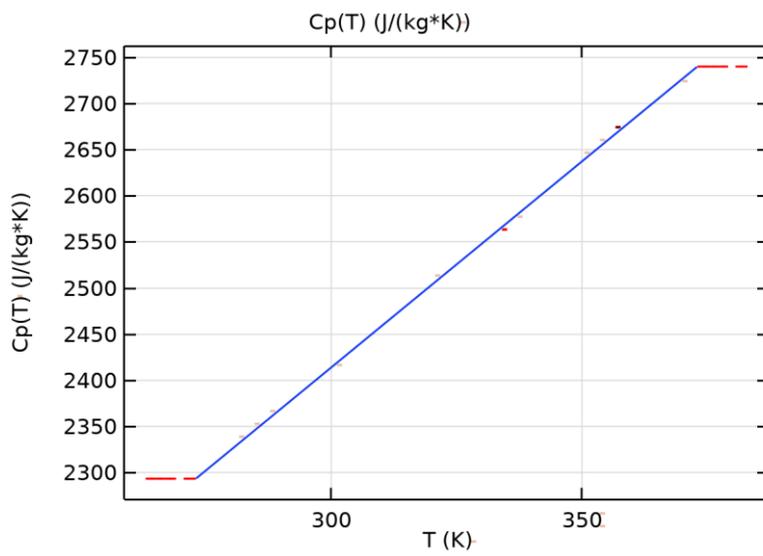
Description	Value
Viscosidad dinámica	eta(T)
dynamicviscosity_symmetry	0
Capacidad térmica con presión constante	Cp(T)
heatcapacity_symmetry	0
Densidad	rho(T)
density_symmetry	0
Conductividad térmica	{{k(T), 0, 0}, {0, k(T), 0}, {0, 0, k(T)}}
thermalconductivity_symmetry	3
Velocidad del sonido	1500
soundspeed_symmetry	0
Coefficiente de dilatación adiabática	0.0062
ratioofspecifichat_symmetry	0

FUNCTIONS

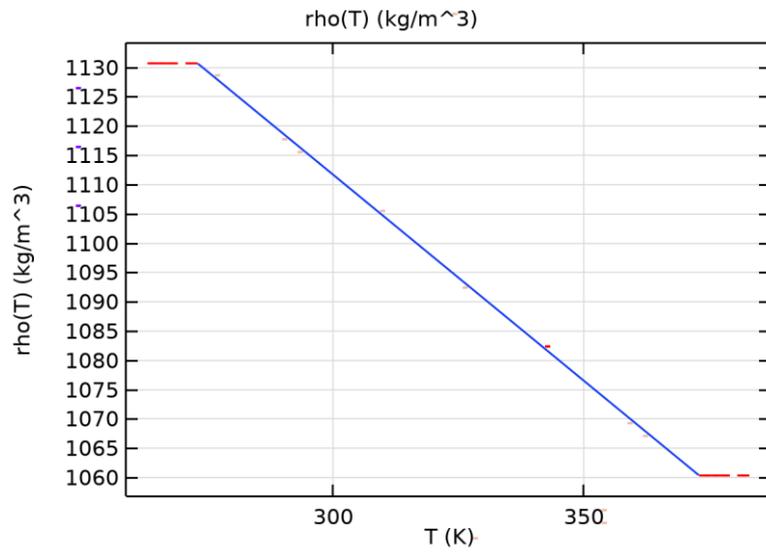
Nombre de función	Type
eta	Piecewise
Cp	Piecewise
rho	Piecewise
k	Piecewise



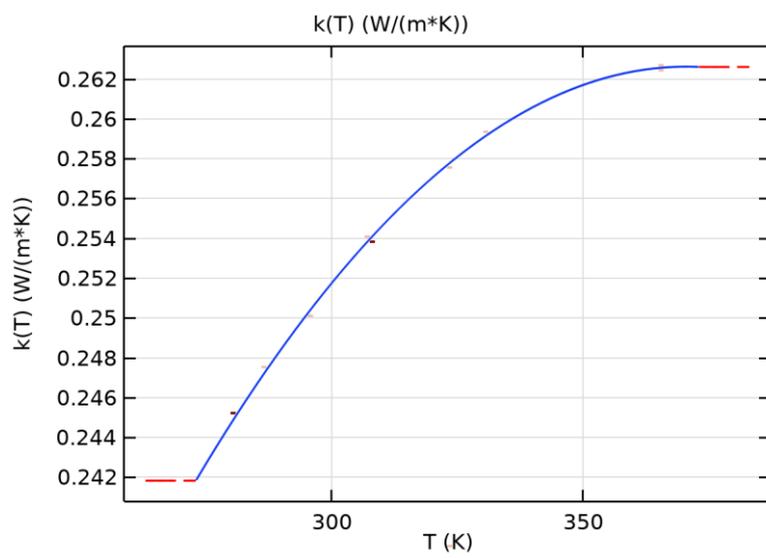
eta



Cp

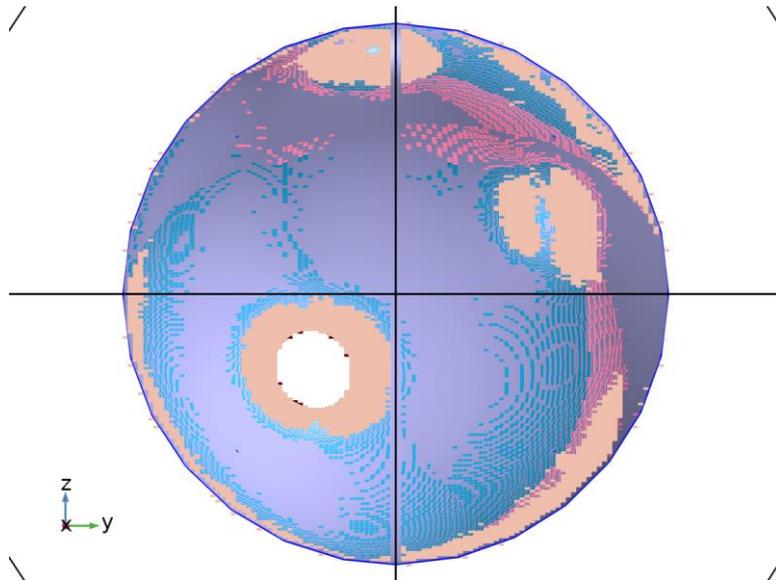


rho



k

2.3.2 H2O (water) [solid,tension]



H2O (water) [solid,tension]

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominio 12

PARÁMETROS DE MATERIAL

Nombre	Valor	Unidad
Conductividad térmica	$k_solid_1(T[1/K])[W/(m*K)]$	$W/(m \cdot K)$
Capacidad térmica con presión constante	$C_solid_1(T[1/K])[J/(kg*K)]$	$J/(kg \cdot K)$
Densidad	$\rho_solid_1(T[1/K])[kg/m^3]$	kg/m^3
Velocidad del sonido	5130	m/s
Coefficiente de dilatación adiabática	1.3	1

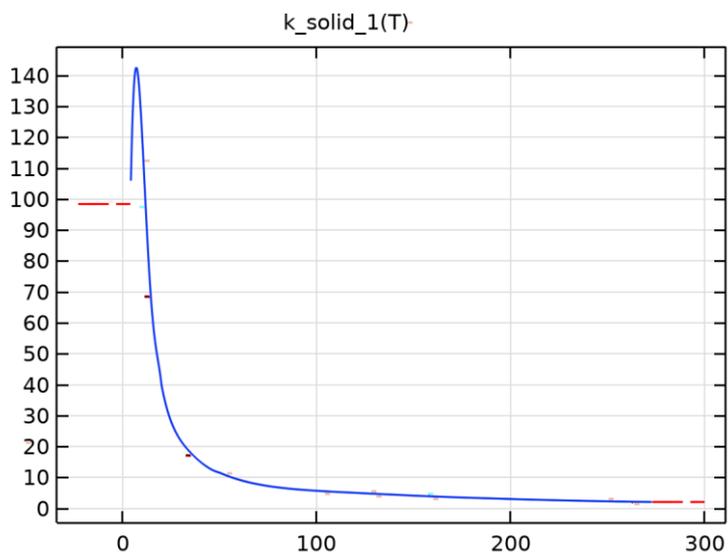
BÁSICO AJUSTES

Description	Value
Conductividad térmica	$\{\{k_solid_1(T[1/K])[W/(m*K)], 0, 0\}, \{0, k_solid_1(T[1/K])[W/(m*K)], 0\}, \{0, 0, k_solid_1(T[1/K])[W/(m*K)]\}\}$
thermalconductivity_symmetry	0
Syt	$Syt_solid_tension_1(T[1/K])[Pa]$
Syt_symmetry	0

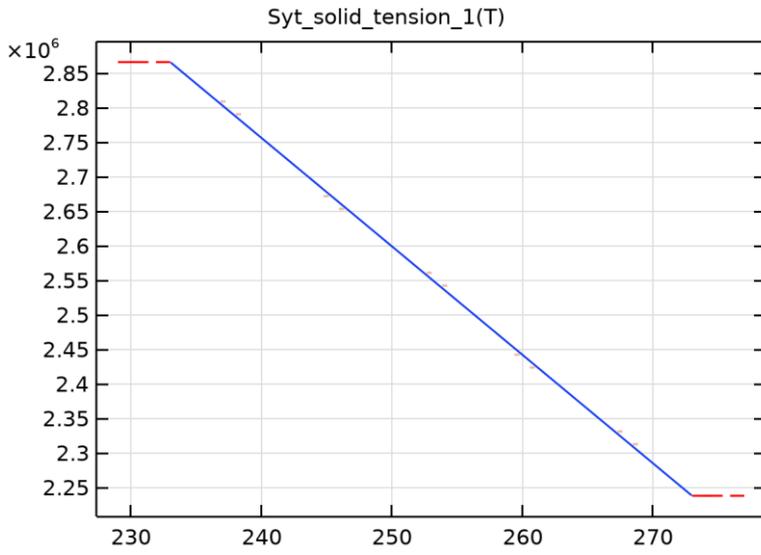
Description	Value
Coeficiente de expansión térmica	$\left\{ \left\{ \begin{aligned} & \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] + (\text{Tempref} - 273[K]) \cdot \text{if}(\text{abs}(T - \text{Tempref}) > 1e-3, \\ & \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] - \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] / (T - \text{Tempref}), \\ & d(\alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K], T)) / (1 + \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] \cdot (\text{Tempref} - 273[K])), 0, 0 \end{aligned} \right\}, \left\{ 0, 0, \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] + (\text{Tempref} - 273[K]) \cdot \text{if}(\text{abs}(T - \text{Tempref}) > 1e-3, \right. \\ & \left. \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] - \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] / (T - \text{Tempref}), \right. \\ & \left. d(\alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K], T)) / (1 + \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] \cdot (\text{Tempref} - 273[K])), 0 \right\}, \left\{ 0, 0, \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] + (\text{Tempref} - 273[K]) \cdot \text{if}(\text{abs}(T - \text{Tempref}) > 1e-3, \right. \\ & \left. \alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K] - \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] / (T - \text{Tempref}), \right. \\ & \left. d(\alpha_{\text{solid}_1}(T[1/K])[1/K], T)) / (1 + \alpha_{\text{solid}_1}(\text{Tempref}[1/K])[1/K] \cdot (\text{Tempref} - 273[K])) \right\} \right\}$
thermalexpansioncoefficient_symmetry	0
Capacidad térmica con presión constante	$C_{\text{solid}_1}(T[1/K])[J/(kg \cdot K)]$
heatcapacity_symmetry	0
HC	$HC_{\text{solid}_1}(T[1/K])[J/(mol \cdot K)]$
HC_symmetry	0
VP	$VP_{\text{solid}_1}(T[1/K])[Pa]$
VP_symmetry	0
Densidad	$\rho_{\text{solid}_1}(T[1/K])[kg/m^3]$
density_symmetry	0
TD	$TD_{\text{solid}_1}(T[1/K])[m^2/s]$
TD_symmetry	0
Velocidad del sonido	5130
soundspeed_symmetry	0
Coeficiente de dilatación adiabática	1.3
ratioofspecificeat_symmetry	0

FUNCTIONS

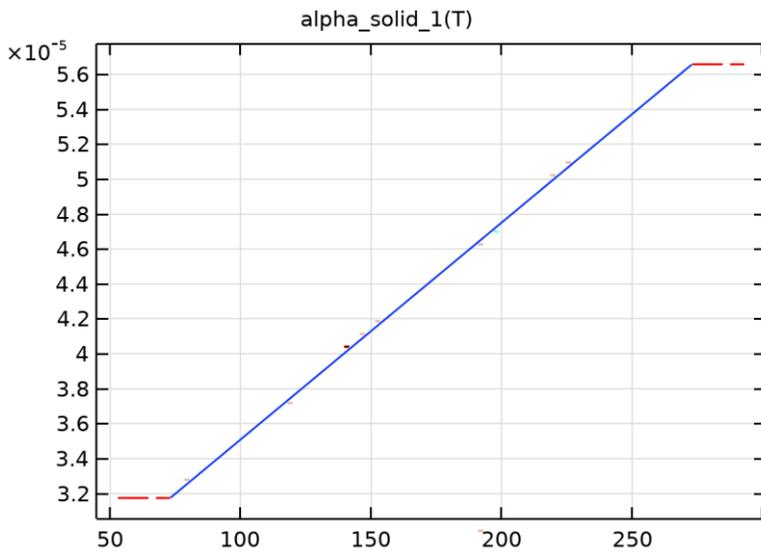
Nombre de función	Type
k_solid_1	Piecewise
Syt_solid_tension_1	Piecewise
alpha_solid_1	Piecewise
C_solid_1	Piecewise
HC_solid_1	Piecewise
VP_solid_1	Piecewise
rho_solid_1	Piecewise
TD_solid_1	Piecewise



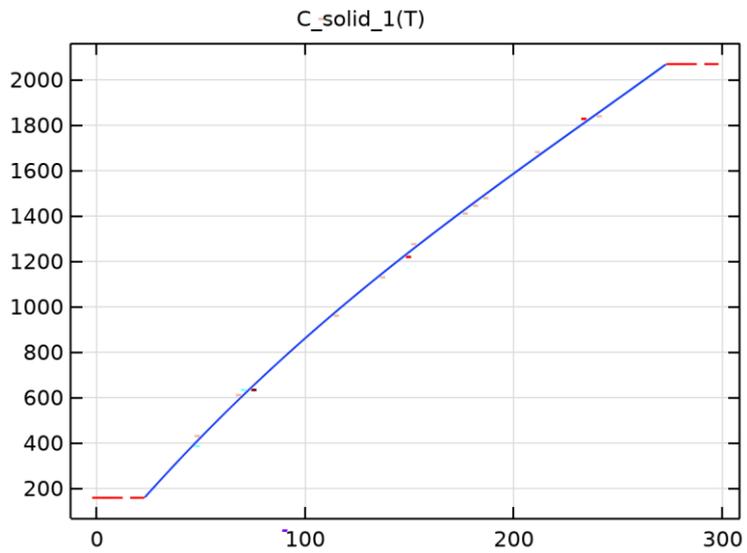
k_solid_1



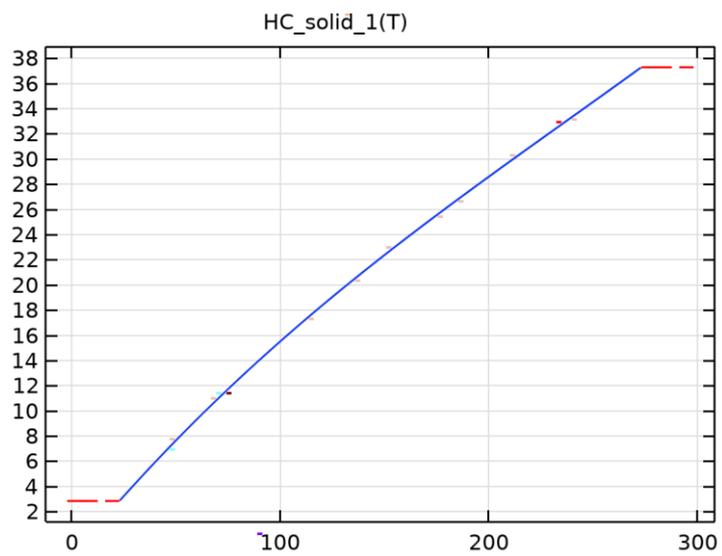
Syt_solid_tension_1



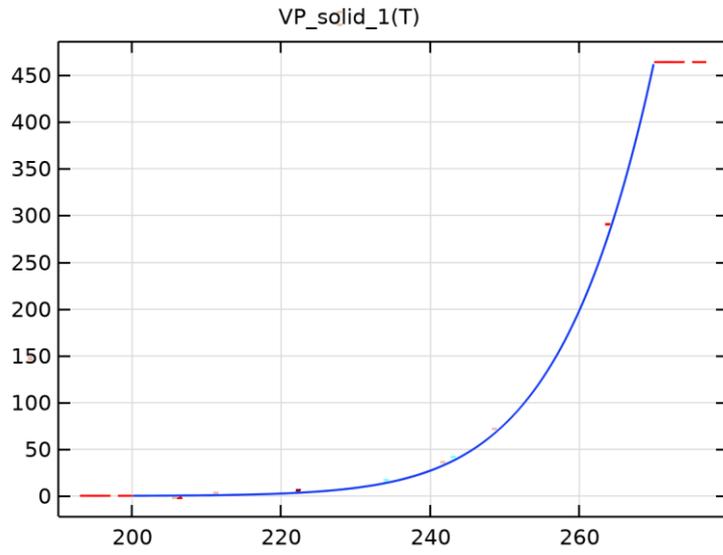
alpha_solid_1



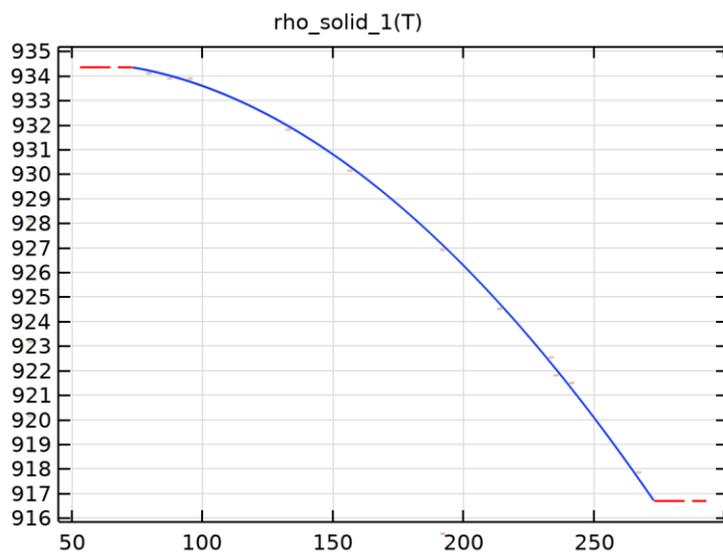
C_solid_1



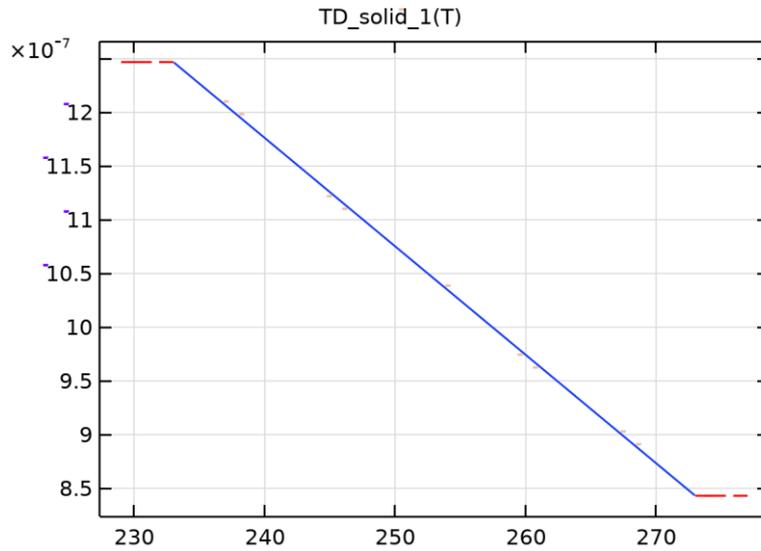
HC_solid_1



VP_solid_1



rho_solid_1



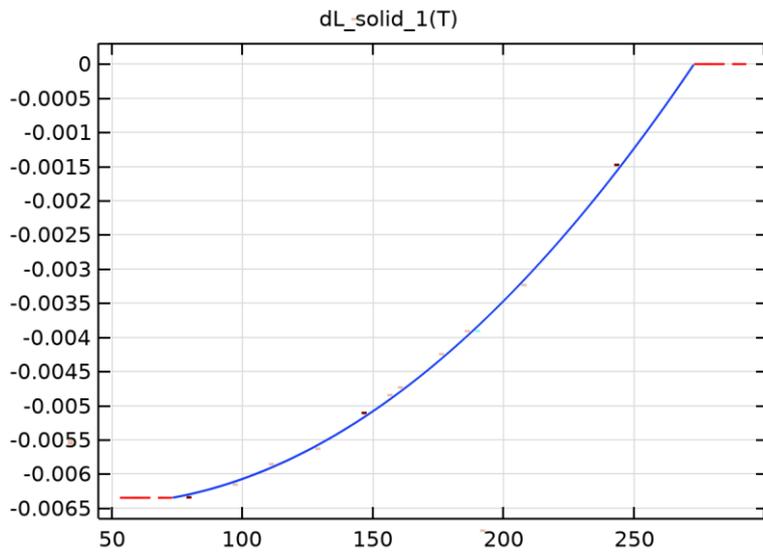
TD_solid_1

EXPANSIÓN TÉRMICA AJUSTES

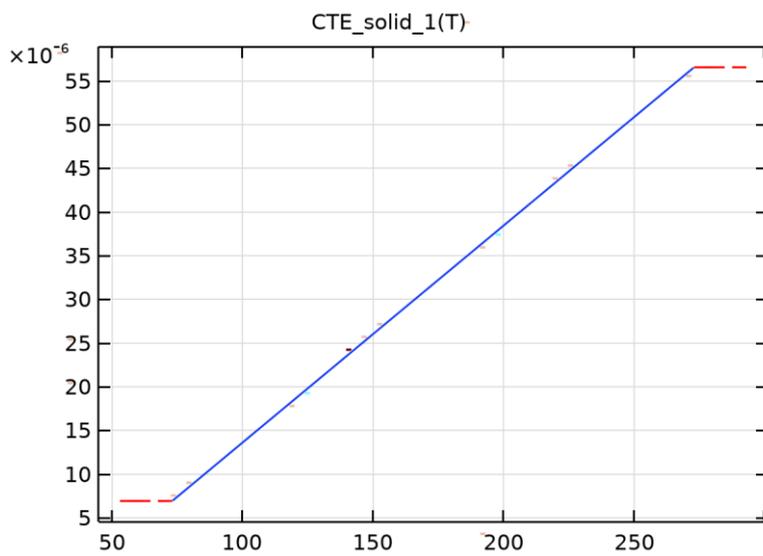
Description	Value
Coefficiente tangencial de expansión térmica	$\{\{CTE_solid_1(T[1/K])[1/K], 0, 0\}, \{0, CTE_solid_1(T[1/K])[1/K], 0\}, \{0, 0, CTE_solid_1(T[1/K])[1/K]\}\}$
Deformación térmica	$\{\{(dL_solid_1(T[1/K]) - dL_solid_1(Tempref[1/K]))/(1 + dL_solid_1(Tempref[1/K])), 0, 0\}, \{0, (dL_solid_1(T[1/K]) - dL_solid_1(Tempref[1/K]))/(1 + dL_solid_1(Tempref[1/K])), 0\}, \{0, 0, (dL_solid_1(T[1/K]) - dL_solid_1(Tempref[1/K]))/(1 + dL_solid_1(Tempref[1/K]))\}\}$
Coefficiente tangencial isotrópico de expansión térmica	$CTE_solid_1(T[1/K])[1/K]$
Deformación térmica isotrópica	$(dL_solid_1(T[1/K]) - dL_solid_1(Tempref[1/K]))/(1 + dL_solid_1(Tempref[1/K]))$
alphatan_symmetry	0
dL_symmetry	0
alphatanIso_symmetry	0
dLIso_symmetry	0

FUNCTIONS

Nombre de función	Type
dL_solid_1	Piecewise
CTE_solid_1	Piecewise



dL_{solid_1}



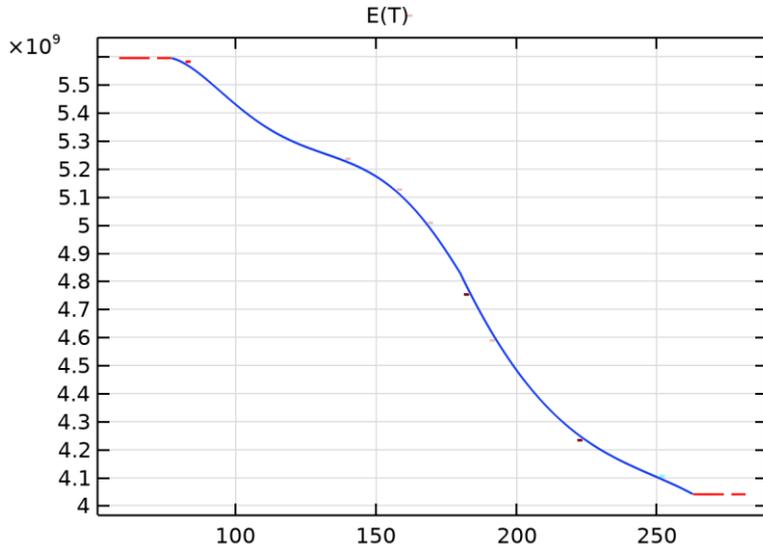
CTE_{solid_1}

MÓDULO DE YOUNG Y COEFICIENTE DE POISSON AJUSTES

Description	Value
Módulo de Young	$E(T[1/K])[Pa]$
youngsmodulus_symmetry	0
Coefficiente de Poisson	1
poissonsratio_symmetry	0

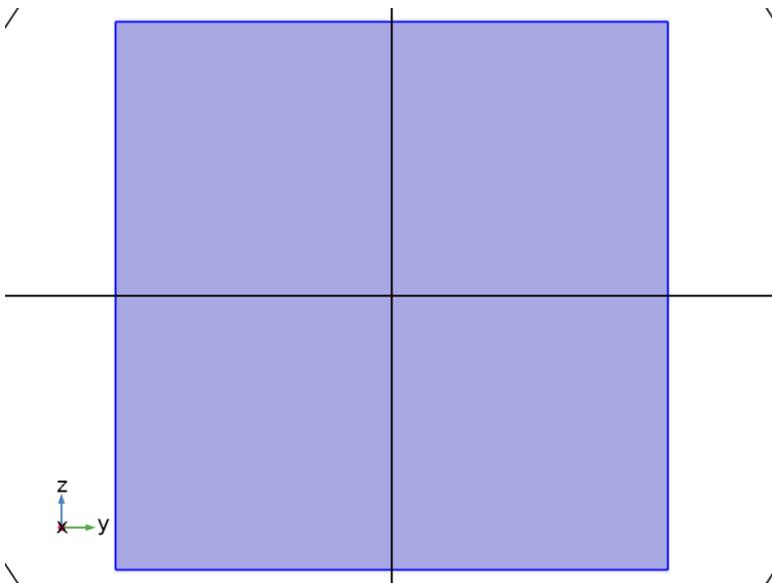
FUNCTIONS

Nombre de función	Type
E	Piecewise



E

2.3.3 Muscle



Muscle

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominio 13

PARÁMETROS DE MATERIAL

Nombre	Valor	Unidad
Capacidad térmica con presión constante	3421[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
Densidad	1090[kg/m ³]	kg/m ³
Conductividad térmica	0.49[W/(m*K)]	W/(m·K)
Velocidad del sonido	1585	m/s

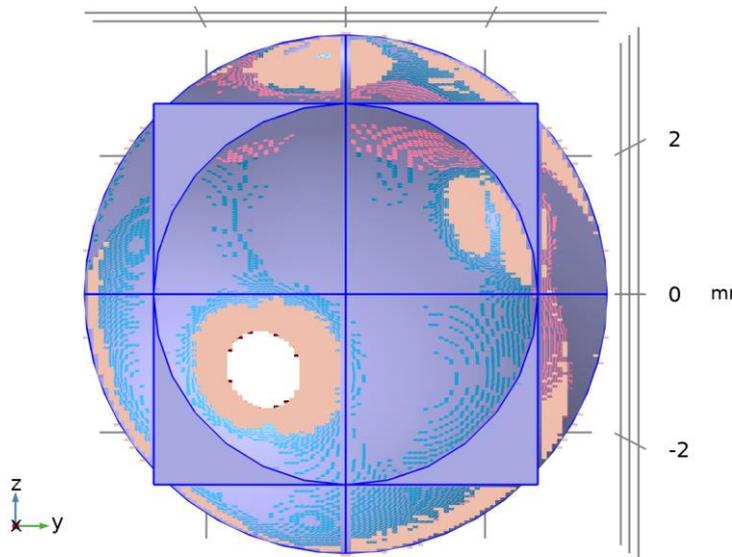
BASIC AJUSTES

Description	Value
Capacidad térmica con presión constante	3421[J/(kg*K)]
heatcapacity_symmetry	0
Densidad	1090[kg/m ³]
density_symmetry	0
Conductividad térmica	{{0.49[W/(m*K)], 0, 0}, {0, 0.49[W/(m*K)], 0}, {0, 0, 0.49[W/(m*K)]}}
thermalconductivity_symmetry	3
Velocidad del sonido	1585
soundspeed_symmetry	0
Coefficiente de dilatación adiabática	0.5
ratioofspecificeat_symmetry	0

2.4 PRESIÓN ACÚSTICA, FRECUENCIA

UTILIZAR PRODUCTOS

COMSOL Multiphysics
Acoustics Module



Presión acústica, frecuencia

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

EQUATIONS

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m$$

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2$$

2.4.1 Ajustes de interfaz de física

1.1.1.4 Símbolos de física

SETTINGS

Description	Value
Habilitar símbolos físicos	Encendido

1.1.1.5 Discretización

SETTINGS

Description	Value
Orden del elemento	Lagrange cuadrático

1.1.1.6 Puerto, configuración de barrido

SETTINGS

Description	Value
Activar barrido de puertos	Apagado

1.1.1.7 Ajustes de nivel de presión de sonido

SETTINGS

Description	Value
Presión de referencia para nivel de sonido	Usar presión de referencia para el agua

1.1.1.8 Velocidad de onda típica para PMLs

SETTINGS

Description	Value
Velocidad de onda típica para PMLs	1500[m/s]

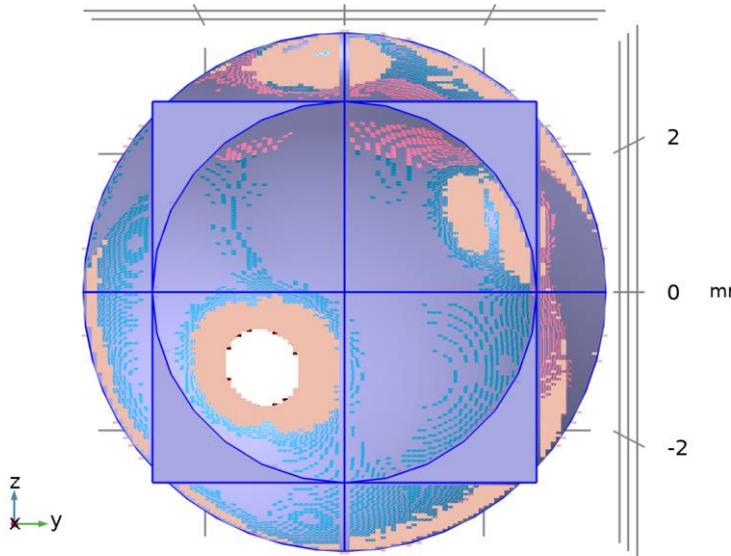
2.4.2 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección
acpr.freq	freq	Hz	Frecuencia	Global
acpr.omega	$2\pi \cdot \text{acpr.freq}$	rad/s	Frecuencia angular	Global
acpr.delta	$1/\text{acpr.omega}^2$	s ²	Factor de escala	Dominios 1–18
acpr.pref_SPL	1.0E-6[Pa]	Pa	Presión de referencia	Global
acpr.Iref_SIL	1.0E-12[W/m ²]	W/m ²	Intensidad de referencia	Global
acpr.Pref_SWL	1.0E-12[W]	W	Potencia de referencia	Global
acpr.cref	1500[m/s]	m/s	Velocidad de onda típica para PMLs	Dominios 1–18
acpr.nx	nx	1	Vector normal, componente x	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78
acpr.ny	ny	1	Vector normal, componente y	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78
acpr.nz	nz	1	Vector normal, componente z	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección
acpr.nx	dnx	1	Vector normal, componente x	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.ny	dny	1	Vector normal, componente y	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.nz	dnz	1	Vector normal, componente z	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.nxmesh	nxmesh	1	Vector normal, (malla), componente x	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78
acpr.nymesh	nymesh	1	Vector normal, (malla), componente y	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78
acpr.nzmesh	nzmesh	1	Vector normal, (malla), componente z	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78
acpr.nxmesh	dnxmesh	1	Vector normal, (malla), componente x	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.nymesh	dnymesh	1	Vector normal, (malla), componente y	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.nzmesh	dnzmesh	1	Vector normal, (malla), componente z	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección
				51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84
acpr.iomega	acpr.omega*i	rad/s	Frecuencia compleja angular	Global

2.4.3 Presión acústica 1



Presión acústica 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

ECUACIONES

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m$$

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2$$

$$c_c = \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{\omega}{c} - i\alpha, \quad \rho_c = \frac{\rho c^2}{c_c^2}$$

1.1.1.9 Modelo de presión acústica

SETTINGS

Description	Value
Modelo de fluido	User - defined attenuation

Description	Value
Velocidad del sonido	Del material
Densidad	Del material
Tipo de atenuación	Coefficiente de atenuación, Np por unidades de longitud
Coefficiente de atenuación	Alpha_Etilenglicol

1.1.1.10 Entrada del modelo

SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Definido por el usuario
Temperatura	293.15[K]
Presión absoluta	Definido por el usuario
Presión absoluta	1[atm]
Volume reference temperature	Definido por el usuario
Volume reference temperature	293.15[K]

PROPIEDADES DESDE EL MATERIAL

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Densidad	Ethylene glycol	Basic
Velocidad del sonido	Ethylene glycol	Basic

1.1.1.11 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.p_s	acpr.p_t-acpr.p_b	Pa	Campo de presión difractado	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Lp_s	$10 \cdot \log_{10}(0.5 \cdot \text{acpr.p}_s \cdot \text{conj}(\text{acpr.p}_s) / \text{acpr.pref_SPL}^2)$	dB	Nivel de presión de sonido difractado	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.p_b	0	Pa	Campo de presión en segundo plano	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.rho	material.rho	kg/m ³	Densidad	Dominios 1–	Meta

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				11, 14–18	
acpr.c	material.c	m/s	Velocidad del sonido	Dominios 1–11, 14–18	Meta
acpr.alpha1	Alpha_Etilenglicol	Np/m	Coefficiente de atenuación	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.q_totx	acpr.qx	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente x	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.q_toty	acpr.qy	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente y	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.q_totz	acpr.qz	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente z	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.nacc	0	m/s ²	Inward acceleration (source)	Contornos 1–41, 47–74, 76–84	Operación +
acpr.Q	0	1/s ²	Total monopole domain source	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.qx	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente x	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.qy	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente y	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.qz	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente z	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.FAcoPerArea_x	acpr.p_t*acpr.nx*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente x	Contornos 1–41, 47–74, 76–84	
acpr.FAcoPerArea_y	acpr.p_t*acpr.ny*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente y	Contornos 1–41, 47–74, 76–84	
acpr.FAcoPerArea_z	acpr.p_t*acpr.nz*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente z	Contornos 1–41, 47–74, 76–84	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.p_t	$p + acpr.p_b$	Pa	Campo total de presión acústica	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.c_c	$acpr.iomega/acpr.ik$	m/s	Velocidad del sonido compleja	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_c	$acpr.rho*(acpr.c/acpr.c_c)^2$	kg/m ³	Densidad compleja	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Z	$acpr.rho_c*acpr.c_c$	Pa·s/m	Impedancia acústica característica	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.k	$acpr.ik/i$	rad/m	Número de onda	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.ik	$acpr.iomega/acpr.c + acpr.alpha1$	rad/m	Número de onda desfasado	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.delta_diff	2.0E-5[m ² /s]	m ² /s	Sound diffusivity	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.K_eff	$acpr.rho_c*acpr.c_c^2$	Pa	Módulo de compresibilidad efectivo	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.gradpx	$d(acpr.p_t,x)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente x	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.gradpy	$d(acpr.p_t,y)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente y	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.gradpz	$d(acpr.p_t,z)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente z	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.gradtestpx	test(px)	N/m ³	Variable de ayuda, componente x	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.gradtestpy	test(py)	N/m ³	Variable de ayuda, componente y	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.gradtestpz	test(pz)	N/m ³	Variable de ayuda, componente z	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpxx	$d(d(acpr.p_t,x),x)$	N/(m·m ³)	Hessiano de la presión total, componente xx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.hessianpyx	$d(d(\text{acpr.p}_t,y),x)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpzx	$d(d(\text{acpr.p}_t,z),x)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpxy	$d(d(\text{acpr.p}_t,x),y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpyy	$d(d(\text{acpr.p}_t,y),y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpzy	$d(d(\text{acpr.p}_t,z),y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpxz	$d(d(\text{acpr.p}_t,x),z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpyz	$d(d(\text{acpr.p}_t,y),z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessianpzz	$d(d(\text{acpr.p}_t,z),z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpx x	test(pxx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpy x	test(pyx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpz x	test(pzx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente zx	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpx y	test(pxy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpy y	test(pyy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.hessiantestpzy	test(pzy)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente zy	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpxz	test(pxz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente xz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpyz	test(pyz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente yz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.hessiantestpzz	test(pzz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente zz	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.keq_sq	-acpr.ik^2	1/m ²	Número de onda al cuadrado para ecuaciones	Dominios 1–11, 14–18	Operación +
acpr.keq	sqrt(acpr.keq_sq)	rad/m	Número de onda para ecuaciones	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.absp	sqrt(realdot(acpr.p_t,acpr.p_t))	Pa	Presión absoluta	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.ax	-(acpr.gradpx-acpr.q_totx)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.ay	-(acpr.gradpy-acpr.q_toty)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.az	-(acpr.gradpz-acpr.q_totz)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente z	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.a_inst	sqrt(real(acpr.ax)^2+real(acpr.ay)^2+real(acpr.az)^2)	m/s ²	Aceleración local instantánea	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.aipx	acpr.ax	m/s ²	Aceleración en el plano, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.aipy	acpr.ay	m/s ²	Aceleración en el plano, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.aipz	acpr.az	m/s ²	Aceleración en el plano, componente z	Dominios 1–11, 14–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.aopx	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.aopy	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.aopz	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente z	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.a_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.ax,acpr.ax)+\text{realdot}(acpr.ay,acpr.ay)+\text{realdot}(acpr.az,acpr.az))}$	m/s ²	Aceleración local, (RMS)	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vx	$-(acpr.gradpx-acpr.q_totx)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vy	$-(acpr.gradpy-acpr.q_toty)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vz	$-(acpr.gradpz-acpr.q_totz)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente z	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.v_inst	$\sqrt{\text{real}(acpr.vx)^2+\text{real}(acpr.vy)^2+\text{real}(acpr.vz)^2}$	m/s	Velocidad local instantánea	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.v_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.vx,acpr.vx)+\text{realdot}(acpr.vy,acpr.vy)+\text{realdot}(acpr.vz,acpr.vz))}$	m/s	Velocidad local, componente (RMS)	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Ix	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vx)$	W/m ²	Intensidad, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Iy	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vy)$	W/m ²	Intensidad, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Iz	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vz)$	W/m ²	Intensidad, componente z	Dominios 1–11, 14–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.I_mag	$\sqrt{\text{acpr.Ix}^2 + \text{acpr.Iy}^2 + \text{acpr.Iz}^2}$	W/m ²	Magnitud de intensidad	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Lp	$10 * \log_{10}(0.5 * \text{acpr.p}_t * \text{conj}(\text{acpr.p}_t) / \text{acpr.pref_SPL}^2)$	dB	Nivel de presión sonora	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vipx	acpr.vx	m/s	Velocidad en el plano, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vipy	acpr.vy	m/s	Velocidad en el plano, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vipz	acpr.vz	m/s	Velocidad en el plano, componente z	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vopx	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente x	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vopy	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente y	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.vopz	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente z	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.diss_visc	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia viscosa	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.diss_therm	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia térmica	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.diss_tot	acpr.diss_visc + acpr.diss_therm	W/m ³	Densidad de disipación de potencia termo-viscosa total	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.Q_pw	$-2 * \text{imag}(\text{acpr.k}) * \text{acpr.I_mag}$	W/m ³	Densidad de disipación total de onda plana	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invx	$1 / \text{acpr.rho_c}$	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the	Dominios 1–	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
x			effective density	11, 14–18	
acpr.rho_eff_invx	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invy	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invz	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invx	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_eff_invz	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effxx	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xx	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effyx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yx	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effzx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zx	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effxy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xy	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effyy	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yy	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effzy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zy	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effxz	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xz	Dominios 1–11, 14–18	
acpr.rho_effyz	0	kg/m ³	Densidad efectiva,	Dominios 1–11, 14–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			componente yz		
acpr.rho_effzz	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zz	Dominios 1–11, 14–18	

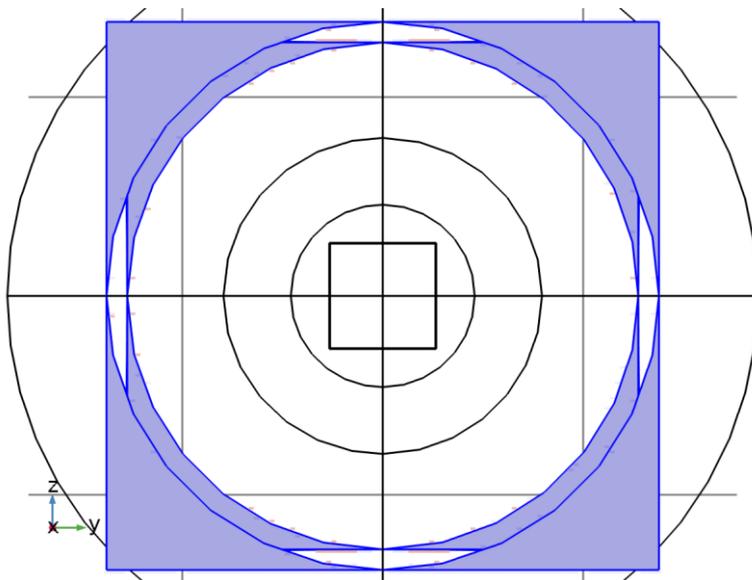
1.1.1.12 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección
p	Lagrange (Cuadrático)	Pa	Presión	Marco espacial	Dominios 1–11, 14–18

1.1.1.13 Expresiones débiles

Expresión débil	Orden de integración	Marco de integración	Selección
$(-acpr.gradpx*acpr.gradtestpx - acpr.gradpy*acpr.gradtestpy - acpr.gradpz*acpr.gradtestpz - acpr.p_t*test(p)*acpr.ik^2)*acpr.delta/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominios 1–11, 14–18
$acpr.delta*acpr.Q*test(p)$	4	Marco espacial	Dominios 1–11, 14–18
$acpr.delta*(acpr.q_totx*acpr.gradtestpx + acpr.q_toty*acpr.gradtestpy + acpr.q_totz*acpr.gradtestpz)/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominios 1–11, 14–18

2.4.4 Contorno rígido al sonido (pared) 1



Contorno rígido al sonido (pared) 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Contorno
Selección	Geometría geom3: Dimensión 2: Todos los contornos

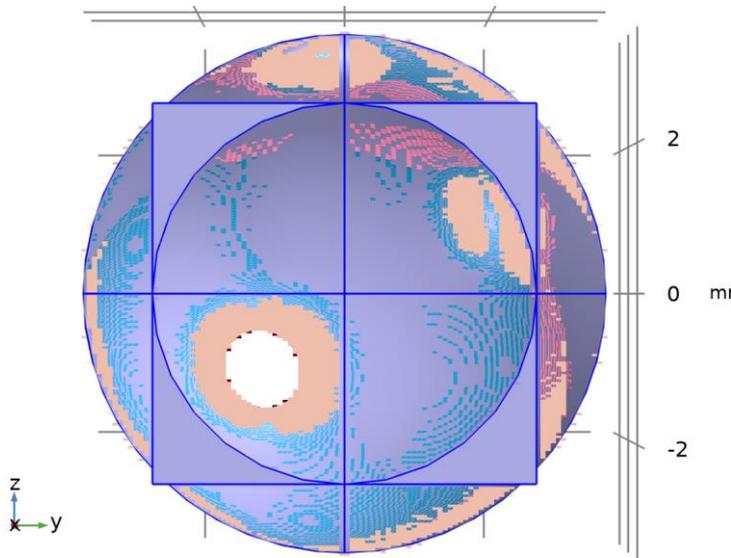
ECUACIONES

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = 0$$

UTILIZAR PRODUCTOS

COMSOL Multiphysics

2.4.5 Valores iniciales 1



Valores iniciales 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

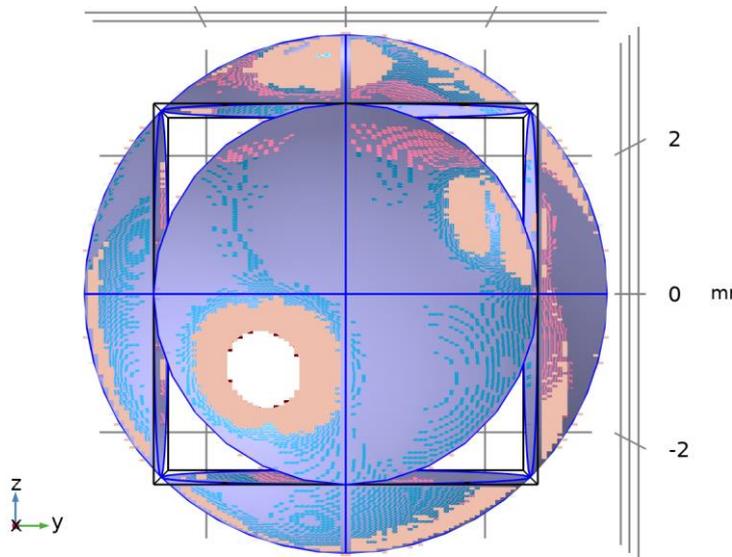
SETTINGS

Description	Value
Presión	1 [atm]

UTILIZAR PRODUCTOS

COMSOL Multiphysics

2.4.6 Desplazamiento normal 1



Desplazamiento normal 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Contorno
Selección	Geometría geom3: Dimensión 2: Contornos 1-4, 13-14, 20, 22, 26, 28, 32-33, 47-49, 53, 61, 66-67, 71, 79-80, 82, 84

ECUACIONES

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_t - \mathbf{q}_d) \right) = (i\omega)^2 d_n$$

1.1.1.14 Desplazamiento normal

SETTINGS

Description	Value
Tipo	Desplazamiento hacia adentro
Desplazamiento hacia adentro	Amplitud

1.1.1.15 Variables

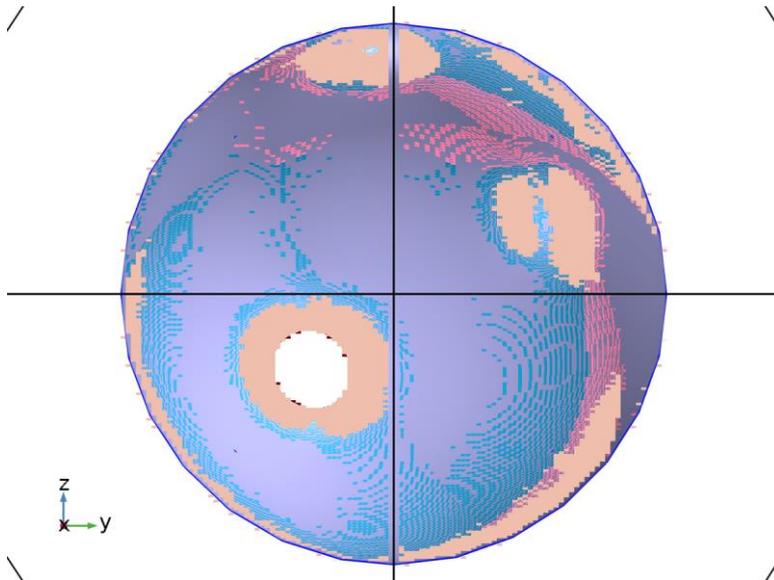
Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.nacc	acpr.iomega^2*acpr.ndispl.ndisp	m/s ²	Inward acceleration (source)	Contornos 1-4, 13-14, 20, 22, 26, 28, 32-33, 47-49, 53, 61, 66-67, 71, 79-80, 82, 84	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.ndisp1.ndisp p	Amplitud	m	Inward displacement (source)	Contornos 1–4, 13–14, 20, 22, 26, 28, 32–33, 47–49, 53, 61, 66–67, 71, 79–80, 82, 84	
acpr.ndisp1.area	acpr.ndisp1.int(1)	m ²	Área de superficie	Contornos 1–4, 13–14, 20, 22, 26, 28, 32–33, 47–49, 53, 61, 66–67, 71, 79–80, 82, 84	
acpr.Zac	$acpr.iomega * acpr.ndisp1.int(acpr.p_t) / (acpr.ndisp1.int(acpr.nacc) * acpr.ndisp1.area)$	kg/(m ⁴ ·s)	Impedancia acústica	Contornos 1–4, 13–14, 20, 22, 26, 28, 32–33, 47–49, 53, 61, 66–67, 71, 79–80, 82, 84	
acpr.Zi	$acpr.iomega * acpr.p_t / acpr.nacc$	Pa·s/m	Impedancia específica	Contornos 1–4, 13–14, 20, 22, 26, 28, 32–33, 47–49, 53, 61, 66–67, 71, 79–80, 82, 84	

1.1.1.16 Expresiones débiles

Expresión débil	Orden de integración	Marco de integración	Selección
$acpr.iomega^2 * acpr.ndisp1.ndisp * test(p) * acpr.delta$	4	Marco espacial	Contornos 1–4, 13–14, 20, 22, 26, 28, 32–33, 47–49, 53, 61, 66–67, 71, 79–80, 82, 84

2.4.7 Presión acústica 2



Presión acústica 2

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominio 12

ECUACIONES

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m$$

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2$$

$$c_c = \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{\omega}{c} - i\alpha, \quad \rho_c = \frac{\rho c^2}{c_c^2}$$

1.1.1.17 Modelo de presión acústica

SETTINGS

Description	Value
Modelo de fluido	User - defined attenuation
Velocidad del sonido	Del material
Densidad	Del material
Tipo de atenuación	Coefficiente de atenuación, Np por unidades de longitud
Coefficiente de atenuación	Alpha_Hielo

1.1.1.18 Entrada del modelo

SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Definido por el usuario
Temperatura	293.15[K]
Presión absoluta	Definido por el usuario
Presión absoluta	1[atm]
Volume reference temperature	Definido por el usuario
Volume reference temperature	293.15[K]

PROPIEDADES DESDE EL MATERIAL

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Densidad	H2O (water) [solid,tension]	Básico
Velocidad del sonido	H2O (water) [solid,tension]	Básico

1.1.1.19 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.p_s	acpr.p_t-acpr.p_b	Pa	Campo de presión difractado	Dominio 12	
acpr.Lp_s	$10 \cdot \log_{10}(0.5 \cdot \text{acpr.p}_s \cdot \text{conj}(\text{acpr.p}_s) / \text{acpr.pref_SPL}^2)$	dB	Nivel de presión de sonido difractado	Dominio 12	
acpr.p_b	0	Pa	Campo de presión en segundo plano	Dominio 12	Operación +
acpr.rho	material.rho	kg/m ³	Densidad	Dominio 12	Meta
acpr.c	material.c	m/s	Velocidad del sonido	Dominio 12	Meta
acpr.alpha1	Alpha_Hielo	Np/m	Coefficiente de atenuación	Dominio 12	
acpr.q_totx	acpr.qx	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente x	Dominio 12	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.q_toty	acpr.qy	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente y	Dominio 12	Operación +
acpr.q_totz	acpr.qz	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente z	Dominio 12	Operación +
acpr.nacc	0	m/s ²	Inward acceleration (source)	Contornos 38–46, 59–60, 63–64, 75	Operación +
acpr.Q	0	1/s ²	Total monopole domain source	Dominio 12	Operación +
acpr.qx	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente x	Dominio 12	Operación +
acpr.qy	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente y	Dominio 12	Operación +
acpr.qz	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente z	Dominio 12	Operación +
acpr.FAcoPerArea_x	acpr.p_t*acpr.nx*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente x	Contornos 38–46, 59–60, 63–64, 75	
acpr.FAcoPerArea_y	acpr.p_t*acpr.ny*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente y	Contornos 38–46, 59–60, 63–64, 75	
acpr.FAcoPerArea_z	acpr.p_t*acpr.nz*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente z	Contornos 38–46, 59–60, 63–64, 75	
acpr.p_t	p+acpr.p_b	Pa	Campo total de presión acústica	Dominio 12	
acpr.c_c	acpr.iomega/acpr.ik	m/s	Velocidad del sonido compleja	Dominio 12	
acpr.rho_c	acpr.rho*(acpr.c/acpr.c_c)^2	kg/m ³	Densidad compleja	Dominio 12	
acpr.Z	acpr.rho_c*acpr.c_c	Pa·s/m	Impedancia acústica	Dominio 12	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			característica		
acpr.k	$acpr.ik/i$	rad/m	Número de onda	Dominio 12	
acpr.ik	$acpr.iomega/acpr.c + acpr.alpha1$	rad/m	Número de onda desfasado	Dominio 12	
acpr.delta_diff	$2.0E-5[m^2/s]$	m ² /s	Sound diffusivity	Dominio 12	
acpr.K_eff	$acpr.rho_c * acpr.c_c^2$	Pa	Módulo de compresibilidad efectivo	Dominio 12	
acpr.gradpx	$d(acpr.p_t,x)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente x	Dominio 12	Operación +
acpr.gradpy	$d(acpr.p_t,y)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente y	Dominio 12	Operación +
acpr.gradpz	$d(acpr.p_t,z)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente z	Dominio 12	Operación +
acpr.gradtestpx	test(px)	N/m ³	Variable de ayuda, componente x	Dominio 12	Operación +
acpr.gradtestpy	test(py)	N/m ³	Variable de ayuda, componente y	Dominio 12	Operación +
acpr.gradtestpz	test(pz)	N/m ³	Variable de ayuda, componente z	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpxx	$d(d(acpr.p_t,x),x)$	N/(m·m ³)	Hessiano de la presión total, componente xx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpyx	$d(d(acpr.p_t,y),x)$	N/(m·m ³)	Hessiano de la presión total, componente yx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpzx	$d(d(acpr.p_t,z),x)$	N/(m·m ³)	Hessiano de la presión total, componente zx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpxy	$d(d(acpr.p_t,x),y)$	N/(m·m ³)	Hessiano de la presión total, componente xy	Dominio 12	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.hessianppy	$d(d(\text{acpr.p}_t, y), y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yy	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpzy	$d(d(\text{acpr.p}_t, z), y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zy	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpxz	$d(d(\text{acpr.p}_t, x), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xz	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpyz	$d(d(\text{acpr.p}_t, y), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yz	Dominio 12	Operación +
acpr.hessianpzz	$d(d(\text{acpr.p}_t, z), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zz	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpx x	test(pxx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpy x	test(pyx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpz x	test(pzx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente zx	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpx y	test(pxy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xy	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpy y	test(pyy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yy	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpz y	test(pzy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente zy	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpx z	test(pxz)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xz	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpy z	test(pyz)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yz	Dominio 12	Operación +
acpr.hessiantestpz	test(pzz)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de	Dominio 12	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
z			ayuda, componente zz		
acpr.keq_sq	$-\text{acpr.ik}^2$	1/m ²	Número de onda al cuadrado para ecuaciones	Dominio 12	Operación +
acpr.keq	$\text{sqrt}(\text{acpr.keq_sq})$	rad/m	Número de onda para ecuaciones	Dominio 12	
acpr.absp	$\text{sqrt}(\text{realdot}(\text{acpr.p_t}, \text{acpr.p_t}))$	Pa	Presión absoluta	Dominio 12	
acpr.ax	$-(\text{acpr.gradpx} - \text{acpr.q_totx})/\text{acpr.rho_c}$	m/s ²	Aceleración local, componente x	Dominio 12	
acpr.ay	$-(\text{acpr.gradpy} - \text{acpr.q_toty})/\text{acpr.rho_c}$	m/s ²	Aceleración local, componente y	Dominio 12	
acpr.az	$-(\text{acpr.gradpz} - \text{acpr.q_totz})/\text{acpr.rho_c}$	m/s ²	Aceleración local, componente z	Dominio 12	
acpr.a_inst	$\text{sqrt}(\text{real}(\text{acpr.ax})^2 + \text{real}(\text{acpr.ay})^2 + \text{real}(\text{acpr.az})^2)$	m/s ²	Aceleración local instantánea	Dominio 12	
acpr.aipx	acpr.ax	m/s ²	Aceleración en el plano, componente x	Dominio 12	
acpr.aipy	acpr.ay	m/s ²	Aceleración en el plano, componente y	Dominio 12	
acpr.aipz	acpr.az	m/s ²	Aceleración en el plano, componente z	Dominio 12	
acpr.aopx	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente x	Dominio 12	
acpr.aopy	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente y	Dominio 12	
acpr.aopz	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente z	Dominio 12	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.a_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.ax,acpr.ax)+\text{realdot}(acpr.ay,acpr.ay)+\text{realdot}(acpr.az,acpr.az))}$	m/s ²	Aceleración local, (RMS)	Dominio 12	
acpr.vx	$-(acpr.gradpx-acpr.q_totx)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente x	Dominio 12	
acpr.vy	$-(acpr.gradpy-acpr.q_toty)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente y	Dominio 12	
acpr.vz	$-(acpr.gradpz-acpr.q_totz)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente z	Dominio 12	
acpr.v_inst	$\sqrt{\text{real}(acpr.vx)^2+\text{real}(acpr.vy)^2+\text{real}(acpr.vz)^2}$	m/s	Velocidad local instantánea	Dominio 12	
acpr.v_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.vx,acpr.vx)+\text{realdot}(acpr.vy,acpr.vy)+\text{realdot}(acpr.vz,acpr.vz))}$	m/s	Velocidad local, componente (RMS)	Dominio 12	
acpr.Ix	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vx)$	W/m ²	Intensidad, componente x	Dominio 12	
acpr.Iy	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vy)$	W/m ²	Intensidad, componente y	Dominio 12	
acpr.Iz	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vz)$	W/m ²	Intensidad, componente z	Dominio 12	
acpr.I_mag	$\sqrt{acpr.Ix^2+acpr.Iy^2+acpr.Iz^2}$	W/m ²	Magnitud de intensidad	Dominio 12	
acpr.Lp	$10*\log_{10}(0.5*acpr.p_t*conj(acpr.p_t)/acpr.pref_SPL^2)$	dB	Nivel de presión sonora	Dominio 12	
acpr.vipx	acpr.vx	m/s	Velocidad en el plano, componente x	Dominio 12	
acpr.vipy	acpr.vy	m/s	Velocidad en el	Dominio 12	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			plano, componente y		
acpr.vipz	acpr.vz	m/s	Velocidad en el plano, componente z	Dominio 12	
acpr.vopx	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente x	Dominio 12	
acpr.vopy	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente y	Dominio 12	
acpr.vopz	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente z	Dominio 12	
acpr.diss_visc	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia viscosa	Dominio 12	
acpr.diss_therm	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia térmica	Dominio 12	
acpr.diss_tot	acpr.diss_visc+acpr.diss_therm	W/m ³	Densidad de disipación de potencia termo- viscosa total	Dominio 12	
acpr.Q_pw	- 2*imag(acpr.k)*acpr.I_mag	W/m ³	Densidad de disipación total de onda plana	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invx	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invz	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invy	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.rho_eff_invz	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_eff_invz	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 12	
acpr.rho_effxx	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xx	Dominio 12	
acpr.rho_effyx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yx	Dominio 12	
acpr.rho_effzx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zx	Dominio 12	
acpr.rho_effxy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xy	Dominio 12	
acpr.rho_effyy	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yy	Dominio 12	
acpr.rho_effzy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zy	Dominio 12	
acpr.rho_effxz	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xz	Dominio 12	
acpr.rho_effyz	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yz	Dominio 12	
acpr.rho_effzz	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zz	Dominio 12	

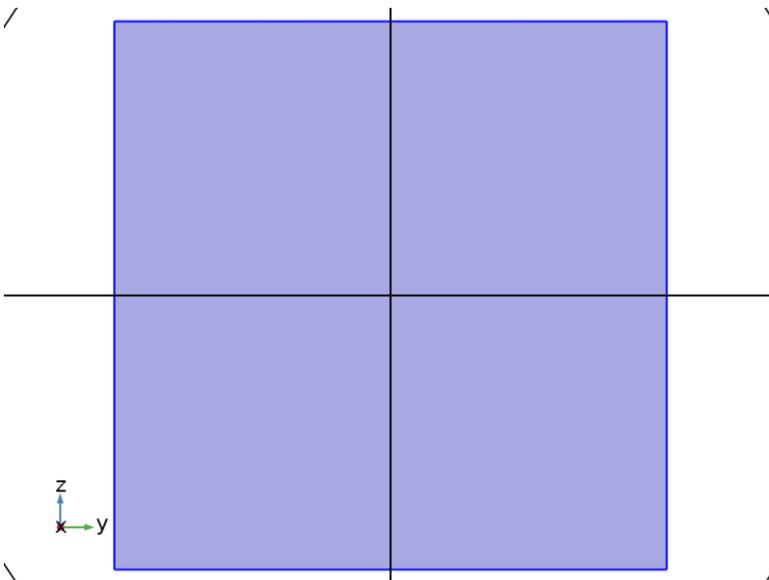
1.1.1.20 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección
p	Lagrange (Cuadrático)	Pa	Presión	Marco espacial	Dominio 12

1.1.1.21 Expresiones débiles

Expresión débil	Orden de integración	Marco de integración	Selección
$(-acpr.gradpx*acpr.gradtestpx - acpr.gradpy*acpr.gradtestpy - acpr.gradpz*acpr.gradtestpz - acpr.p_t*test(p)*acpr.ik^2)*acpr.delta/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominio 12
$acpr.delta*acpr.Q*test(p)$	4	Marco espacial	Dominio 12
$acpr.delta*(acpr.q_totx*acpr.gradtestpx+acpr.q_toty*acpr.gradtestpy+acpr.q_totz*acpr.gradtestpz)/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominio 12

2.4.8 Presión acústica 3



Presión acústica 3

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominio 13

ECUACIONES

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m$$

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2$$

$$c_c = \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{\omega}{c} - i\alpha, \quad \rho_c = \frac{\rho c^2}{c_c^2}$$

1.1.1.22 Modelo de presión acústica

SETTINGS

Description	Value
Modelo de fluido	User - defined attenuation
Velocidad del sonido	Del material
Densidad	Del material
Tipo de atenuación	Coefficiente de atenuación, Np por unidades de longitud
Coefficiente de atenuación	Alpha_Aorta

1.1.1.23 Entrada del modelo

SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Definido por el usuario
Temperatura	293.15[K]
Presión absoluta	Definido por el usuario
Presión absoluta	1[atm]
Volume reference temperature	Definido por el usuario
Volume reference temperature	293.15[K]

PROPIEDADES DESDE EL MATERIAL

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Densidad	Muscle	Basic
Velocidad del sonido	Muscle	Basic

1.1.1.24 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.p_s	acpr.p_t-acpr.p_b	Pa	Campo de presión difractado	Dominio 13	
acpr.Lp_s	$10 \cdot \log_{10}(0.5 \cdot \text{acpr.p}_s \cdot \text{conj}(\text{acpr.p}_s) / \text{acpr.pref_SPL}^2)$	dB	Nivel de presión de sonido difractado	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.p_b	0	Pa	Campo de presión en segundo plano	Dominio 13	Operación +
acpr.rho	material.rho	kg/m ³	Densidad	Dominio 13	Meta
acpr.c	material.c	m/s	Velocidad del sonido	Dominio 13	Meta
acpr.alpha1	Alpha_Aorta	Np/m	Coefficiente de atenuación	Dominio 13	
acpr.q_totx	acpr.qx	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente x	Dominio 13	Operación +
acpr.q_toty	acpr.qy	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente y	Dominio 13	Operación +
acpr.q_totz	acpr.qz	N/m ³	Fuente de dipolo total, componente z	Dominio 13	Operación +
acpr.nacc	0	m/s ²	Inward acceleration (source)	Contornos 42–46, 75	Operación +
acpr.Q	0	1/s ²	Total monopole domain source	Dominio 13	Operación +
acpr.qx	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente x	Dominio 13	Operación +
acpr.qy	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente y	Dominio 13	Operación +
acpr.qz	0	N/m ³	Fuente de dipolo de dominio, componente z	Dominio 13	Operación +
acpr.FAcoPerArea_x	acpr.p_t*acpr.nx*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente x	Contornos 42–46, 75	
acpr.FAcoPerArea_y	acpr.p_t*acpr.ny*dvol_spatial/dvol	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente y	Contornos 42–46, 75	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.FAcoPerAreaz	$acpr.p_t * acpr.nz * dvol_spatial / dvol$	N/m ²	Carga acústica por unidad de área, componente z	Contornos 42–46, 75	
acpr.p_t	$p + acpr.p_b$	Pa	Campo total de presión acústica	Dominio 13	
acpr.c_c	$acpr.iomega / acpr.ik$	m/s	Velocidad del sonido compleja	Dominio 13	
acpr.rho_c	$acpr.rho * (acpr.c / acpr.c_c)^2$	kg/m ³	Densidad compleja	Dominio 13	
acpr.Z	$acpr.rho_c * acpr.c_c$	Pa·s/m	Impedancia acústica característica	Dominio 13	
acpr.k	$acpr.ik / i$	rad/m	Número de onda	Dominio 13	
acpr.ik	$acpr.iomega / acpr.c + acpr.alpha1$	rad/m	Número de onda desfasado	Dominio 13	
acpr.delta_diff	2.0E-5[m ² /s]	m ² /s	Sound diffusivity	Dominio 13	
acpr.K_eff	$acpr.rho_c * acpr.c_c^2$	Pa	Módulo de compresibilidad efectivo	Dominio 13	
acpr.gradpx	$d(acpr.p_t, x)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente x	Dominio 13	Operación +
acpr.gradpy	$d(acpr.p_t, y)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente y	Dominio 13	Operación +
acpr.gradpz	$d(acpr.p_t, z)$	N/m ³	Gradiente de la presión total, componente z	Dominio 13	Operación +
acpr.gradtestpx	test(px)	N/m ³	Variable de ayuda, componente x	Dominio 13	Operación +
acpr.gradtestpy	test(py)	N/m ³	Variable de ayuda, componente y	Dominio 13	Operación +
acpr.gradtestpz	test(pz)	N/m ³	Variable de ayuda, componente z	Dominio 13	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.hessianpxx	$d(d(\text{acpr.p}_t, x), x)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpyx	$d(d(\text{acpr.p}_t, y), x)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpzx	$d(d(\text{acpr.p}_t, z), x)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpxy	$d(d(\text{acpr.p}_t, x), y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xy	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpyy	$d(d(\text{acpr.p}_t, y), y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yy	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpzy	$d(d(\text{acpr.p}_t, z), y)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zy	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpxz	$d(d(\text{acpr.p}_t, x), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente xz	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpyz	$d(d(\text{acpr.p}_t, y), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente yz	Dominio 13	Operación +
acpr.hessianpzz	$d(d(\text{acpr.p}_t, z), z)$	$N/(m \cdot m^3)$	Hessiano de la presión total, componente zz	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpx x	test(pxx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpy x	test(pyx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente yx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpz x	test(pzx)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente zx	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpx y	test(pxy)	$N/(m \cdot m^3)$	Variable de ayuda, componente xy	Dominio 13	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.hessiantestpy y	test(pyy)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente yy	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpz y	test(pzy)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente zy	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpx z	test(pxz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente xz	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpy z	test(pyz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente yz	Dominio 13	Operación +
acpr.hessiantestpz z	test(pzz)	N/(m·m ³)	Variable de ayuda, componente zz	Dominio 13	Operación +
acpr.keq_sq	-acpr.ik^2	1/m ²	Número de onda al cuadrado para ecuaciones	Dominio 13	Operación +
acpr.keq	sqrt(acpr.keq_sq)	rad/m	Número de onda para ecuaciones	Dominio 13	
acpr.absp	sqrt(realdot(acpr.p_t,acpr.p_t))	Pa	Presión absoluta	Dominio 13	
acpr.ax	-(acpr.gradpx-acpr.q_totx)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente x	Dominio 13	
acpr.ay	-(acpr.gradpy-acpr.q_toty)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente y	Dominio 13	
acpr.az	-(acpr.gradpz-acpr.q_totz)/acpr.rho_c	m/s ²	Aceleración local, componente z	Dominio 13	
acpr.a_inst	sqrt(real(acpr.ax)^2+real(acpr.ay)^2+real(acpr.az)^2)	m/s ²	Aceleración local instantánea	Dominio 13	
acpr.aipx	acpr.ax	m/s ²	Aceleración en el plano, componente x	Dominio 13	
acpr.aipy	acpr.ay	m/s ²	Aceleración en el plano, componente y	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.aipz	acpr.az	m/s ²	Aceleración en el plano, componente z	Dominio 13	
acpr.aopx	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente x	Dominio 13	
acpr.aopy	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente y	Dominio 13	
acpr.aopz	0	m/s ²	Aceleración fuera del plano, componente z	Dominio 13	
acpr.a_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.ax,acpr.ax)+\text{realdot}(acpr.ay,acpr.ay)+\text{realdot}(acpr.az,acpr.az))}$	m/s ²	Aceleración local, (RMS)	Dominio 13	
acpr.vx	$-(acpr.gradpx-acpr.q_totx)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente x	Dominio 13	
acpr.vy	$-(acpr.gradpy-acpr.q_toty)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente y	Dominio 13	
acpr.vz	$-(acpr.gradpz-acpr.q_totz)/(acpr.rho_c*acpr.iomega)$	m/s	Velocidad local, componente z	Dominio 13	
acpr.v_inst	$\sqrt{\text{real}(acpr.vx)^2+\text{real}(acpr.vy)^2+\text{real}(acpr.vz)^2}$	m/s	Velocidad local instantánea	Dominio 13	
acpr.v_rms	$\sqrt{0.5*(\text{realdot}(acpr.vx,acpr.vx)+\text{realdot}(acpr.vy,acpr.vy)+\text{realdot}(acpr.vz,acpr.vz))}$	m/s	Velocidad local, componente (RMS)	Dominio 13	
acpr.Ix	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vx)$	W/m ²	Intensidad, componente x	Dominio 13	
acpr.Iy	$0.5*\text{realdot}(acpr.p_t,acpr.vy)$	W/m ²	Intensidad, componente y	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.Iz	$0.5 * \text{realdot}(\text{acpr.p}_t, \text{acpr.vz})$	W/m ²	Intensidad, componente z	Dominio 13	
acpr.I_mag	$\text{sqrt}(\text{acpr.Ix}^2 + \text{acpr.Iy}^2 + \text{acpr.Iz}^2)$	W/m ²	Magnitud de intensidad	Dominio 13	
acpr.Lp	$10 * \log_{10}(0.5 * \text{acpr.p}_t * \text{conj}(\text{acpr.p}_t) / \text{acpr.pref_SPL}^2)$	dB	Nivel de presión sonora	Dominio 13	
acpr.vipx	acpr.vx	m/s	Velocidad en el plano, componente x	Dominio 13	
acpr.vipy	acpr.vy	m/s	Velocidad en el plano, componente y	Dominio 13	
acpr.vipz	acpr.vz	m/s	Velocidad en el plano, componente z	Dominio 13	
acpr.vopx	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente x	Dominio 13	
acpr.vopy	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente y	Dominio 13	
acpr.vopz	0	m/s	Velocidad fuera del plano, componente z	Dominio 13	
acpr.diss_visc	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia viscosa	Dominio 13	
acpr.diss_therm	0	W/m ³	Densidad de disipación de potencia térmica	Dominio 13	
acpr.diss_tot	acpr.diss_visc + acpr.diss_therm	W/m ³	Densidad de disipación de potencia termo-viscosa total	Dominio 13	
acpr.Q_pw	$-2 * \text{imag}(\text{acpr.k}) * \text{acpr.I_mag}$	W/m ³	Densidad de disipación total de onda plana	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invx	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
x			effective density		
acpr.rho_eff_invx	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invz	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invy	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invz	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invx	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invy	0	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_eff_invz	1/acpr.rho_c	m ³ /kg	Inverse of the effective density	Dominio 13	
acpr.rho_effxx	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xx	Dominio 13	
acpr.rho_effyx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yx	Dominio 13	
acpr.rho_effzx	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zx	Dominio 13	
acpr.rho_effxy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xy	Dominio 13	
acpr.rho_effyy	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yy	Dominio 13	
acpr.rho_effzy	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zy	Dominio 13	
acpr.rho_effxz	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente xz	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
acpr.rho_effyz	0	kg/m ³	Densidad efectiva, componente yz	Dominio 13	
acpr.rho_effzz	acpr.rho_c	kg/m ³	Densidad efectiva, componente zz	Dominio 13	

1.1.1.25 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección
p	Lagrange (Cuadrático)	Pa	Presión	Marco espacial	Dominio 13

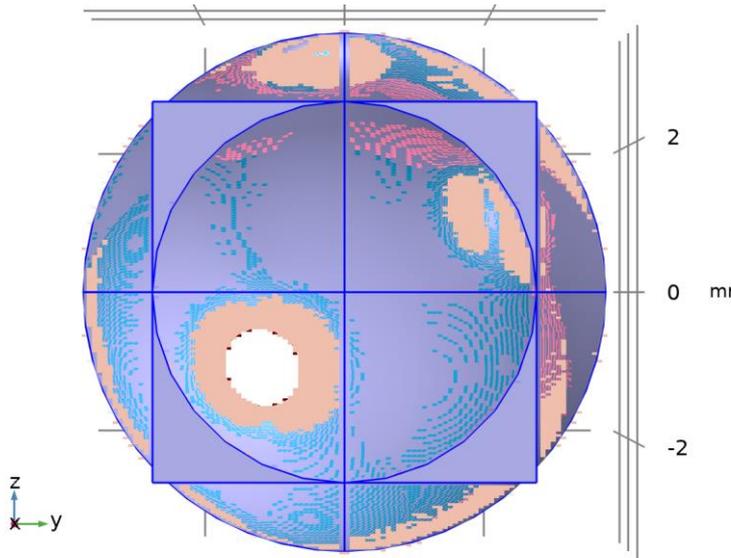
1.1.1.26 Expresiones débiles

Expresión débil	Orden de integración	Marco de integración	Selección
$(-acpr.gradpx*acpr.gradtestpx - acpr.gradpy*acpr.gradtestpy - acpr.gradpz*acpr.gradtestpz - acpr.p_t*test(p)*acpr.ik^2)*acpr.delta/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominio 13
$acpr.delta*acpr.Q*test(p)$	4	Marco espacial	Dominio 13
$acpr.delta*(acpr.q_totx*acpr.gradtestpx + acpr.q_toty*acpr.gradtestpy + acpr.q_totz*acpr.gradtestpz)/acpr.rho_c$	4	Marco espacial	Dominio 13

2.5 TRANSFERENCIA DE BIOCALOR 2

UTILIZAR PRODUCTOS

COMSOL Multiphysics
Heat Transfer Module



Transferencia de biocalor 2

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

EQUATIONS

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T_2 + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{bio}}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T_2$$

2.5.1 Ajustes de interfaz de física

1.1.1.27 Discretización

SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Lagrange cuadrático

1.1.1.28 Modelo físico

SETTINGS

Description	Value
Dominio isotérmico	Apagado
Transferencia de calor en medios porosos	Apagado
Temperatura de referencia	Definido por el usuario
Temperatura de referencia	TempAmbiente

2.5.2 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.Tref	model.input.Tref	K	Temperatura de referencia	Global	Meta
ht2.d	1	1	Grosor	Dominios 1–18	
ht2.HRef	0	J/kg	Entalpía de referencia	Dominios 1–18	
ht2.DeltaH	0	J/kg	Sensibilidad de entalpía	Dominios 1–18	Operación +
ht2.H	0	J/kg	Entalpía	Dominios 1–18	Operación +
ht2.H0	ht2.H+ht2.Ek	J/kg	Entalpía total	Dominios 1–18	
ht2.Ei	0	J/kg	Energía interna	Dominios 1–18	Operación +
ht2.Ei0	ht2.Ei+ht2.Ek	J/kg	Energía total interna	Dominios 1–18	
ht2.Ek	0	J/kg	Energía cinética	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxx	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxy	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxz	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxx	mean(ht2.dfluxx)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	Operación +
ht2.dfluxy	mean(ht2.dfluxy)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Contornos 1–84	Operación +
ht2.dfluxz	mean(ht2.dfluxz)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.dfluxtestx	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxtesty	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxtestz	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominios 1–18	Operación +
ht2.dfluxtestx	mean(ht2.dfluxtestx)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	Operación +
ht2.dfluxtesty	mean(ht2.dfluxtesty)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Contornos 1–84	Operación +
ht2.dfluxtestz	mean(ht2.dfluxtestz)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	Operación +
ht2.dfluxMag	$\sqrt{\text{ht2.dfluxx}^2 + \text{ht2.dfluxy}^2 + \text{ht2.dfluxz}^2}$	W/m ²	Magnitud de flujo de calor conductivo	Dominios 1–18	
ht2.cfluxx	0	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente x	Dominios 1–18	Operación +
ht2.cfluxy	0	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente y	Dominios 1–18	Operación +
ht2.cfluxz	0	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente z	Dominios 1–18	Operación +
ht2.cfluxMag	$\sqrt{\text{ht2.cfluxx}^2 + \text{ht2.cfluxy}^2 + \text{ht2.cfluxz}^2}$	W/m ²	Magnitud de flujo de calor convectivo	Dominios 1–18	
ht2.tfluxx	ht2.dfluxx+ht2.cfluxx	W/m ²	Flujo de calor total, componente x	Dominios 1–18	
ht2.tfluxy	ht2.dfluxy+ht2.cfluxy	W/m ²	Flujo de calor total, componente y	Dominios 1–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.tfluxz	$ht2.dfluxz + ht2.cfluxz$	W/m ²	Flujo de calor total, componente z	Dominios 1–18	
ht2.tfluxMag	$\sqrt{ht2.tfluxx^2 + ht2.tfluxy^2 + ht2.tfluxz^2}$	W/m ²	Magnitud de flujo de calor total	Dominios 1–18	
ht2.tefluxx	0	W/m ²	Flujo de energía total, componente x	Dominios 1–18	Operación +
ht2.tefluxy	0	W/m ²	Flujo de energía total, componente y	Dominios 1–18	Operación +
ht2.tefluxz	0	W/m ²	Flujo de energía total, componente z	Dominios 1–18	Operación +
ht2.tefluxMag	$\sqrt{ht2.tefluxx^2 + ht2.tefluxy^2 + ht2.tefluxz^2}$	W/m ²	Magnitud de flujo de energía total	Dominios 1–18	
ht2.dflux_ux	$up(ht2.dfluxx)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	
ht2.dflux_uy	$up(ht2.dfluxy)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Contornos 1–84	
ht2.dflux_uz	$up(ht2.dfluxz)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	
ht2.dflux_dx	$down(ht2.dfluxx)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	
ht2.dflux_dy	$down(ht2.dfluxy)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Contornos 1–84	
ht2.dflux_dz	$down(ht2.dfluxz)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	
ht2.dfluxtest_ux	$up(ht2.dfluxtestx)$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	
ht2.dfluxtest_uy	$up(ht2.dfluxtesty)$	W/m ²	Flujo de calor	Contornos 1–	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			conductivo, componente y	84	
ht2.dfluxtest_uz	up(ht2.dfluxtestz)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	
ht2.dfluxtest_dx	down(ht2.dfluxtestx)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Contornos 1–84	
ht2.dfluxtest_dy	down(ht2.dfluxtesty)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Contornos 1–84	
ht2.dfluxtest_dz	down(ht2.dfluxtestz)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Contornos 1–84	
ht2.rflux	0	W/m ²	Flujo de calor radiativo	Contornos 1–84	Operación +
ht2.ncflux	mean(ht2.cfluxx)*ht2.nx+mean(ht2.cfluxy)*ht2.ny+mean(ht2.cfluxz)*ht2.nz	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal	Contornos 1–84	
ht2.ncflux_u	up(ht2.cfluxx)*ht2.unx+up(ht2.cfluxy)*ht2.uny+up(ht2.cfluxz)*ht2.unz	W/m ²	Flujo de calor convectivo normal interno, lado superior	Contornos 1–84	
ht2.ncflux_d	down(ht2.cfluxx)*ht2.dnx+down(ht2.cfluxy)*ht2.dny+down(ht2.cfluxz)*ht2.dnz	W/m ²	Flujo de calor convectivo normal interno, lado inferior	Contornos 1–84	
ht2.ndflux	0.5*(ht2.ndflux_d-ht2.ndflux_u)	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal	Contornos 1–84	Operación +
ht2.ndflux_u	-ht2.ndflux_d	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal interno, lado superior	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77,	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				79-84	
ht2.ndflux_u	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal interno, lado superior	Contornos 10-12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34-46, 52, 55, 57-60, 62-65, 69, 72, 75, 78	Operación +
ht2.ndflux_d	0	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal interno, lado inferior	Contornos 1-84	Operación +
ht2.ntflux	ht2.ndflux+ht2.ncflux	W/m ²	Flujo de calor normal total	Contornos 1-84	
ht2.ntflux_u	ht2.ndflux_u+ht2.ncflux_u	W/m ²	Flujo total normal interno, lado superior	Contornos 1-84	
ht2.ntflux_d	ht2.ndflux_d+ht2.ncflux_d	W/m ²	Flujo total normal interno, lado inferior	Contornos 1-84	
ht2.nteflux	mean(ht2.tefluxx)*ht2.nx+mean(ht2.tefluxy)*ht2.ny+mean(ht2.tefluxz)*ht2.nz-mean(ht2.dfluxx)*ht2.nx-mean(ht2.dfluxy)*ht2.ny-mean(ht2.dfluxz)*ht2.nz+ht2.ndflux	W/m ²	Flujo de energía normal total	Contornos 1-84	
ht2.nteflux_u	up(ht2.tefluxx)*ht2.unx+up(ht2.tefluxy)*ht2.uny+up(ht2.tefluxz)*ht2.unz-up(ht2.dfluxx)*ht2.unx-up(ht2.dfluxy)*ht2.uny-up(ht2.dfluxz)*ht2.unz+ht2.ndflux_u	W/m ²	Flujo de energía total normal interno, lado superior	Contornos 1-84	
ht2.nteflux_d	down(ht2.tefluxx)*ht2.dnx+down(ht2.tefluxy)*ht2.dny+down(ht2.tefluxz)	W/m ²	Flujo de energía total normal interno, lado inferior	Contornos 1-84	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
) *ht2.dnz-down(ht2.dfluxx)* ht2.dnx-down(ht2.dfluxy)* ht2.dny-down(ht2.dfluxz)* ht2.dnz+ht2.ndflux_d		inferior		
ht2.Qm	0	kg/(m ³ ·s)	Fuente de masa	Dominios 1–18	
ht2.Q	0	W/m ³	Fuente de calor	Dominios 1–18	Operación +
ht2.Qoop	0	W/m ³	Fuente de calor fuera del plano	Dominios 1–18	Operación +
ht2.Qtot	0	W/m ³	Fuente de calor total	Dominios 1–18	Operación +
ht2.Qbtot	0	W/m ²	Fuente de calor total en contorno	Contornos 1–84	Operación +
ht2.qs	0	W/(m ³ ·K)	Coefficiente de producción/absorción	Dominios 1–18	Operación +
ht2.qs_oop	0	W/(m ³ ·K)	Coefficiente de producción/absorción fuera del plano	Dominios 1–18	Operación +
ht2.Tvar	T2	K	Temperatura	Dominios 1–18	
ht2.Tvar	T2	K	Temperatura	Contornos 1–84	
ht2.Tvar	T2	K	Temperatura	Aristas 1–108	
ht2.Tvar	T2	K	Temperatura	Puntos 1–46	
ht2.Tu	up(T2)	K	Temperatura	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.Tu	T2	K	Temperatura	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.Td	down(T2)	K	Temperatura	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	
ht2.Td	T2	K	Temperatura	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.q0	0	W/m ²	Flujo de calor entrante	Dominios 1–18	Operación +
ht2.nx	nx	1	Vector normal, componente x	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	
ht2.ny	ny	1	Vector normal, componente y	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	

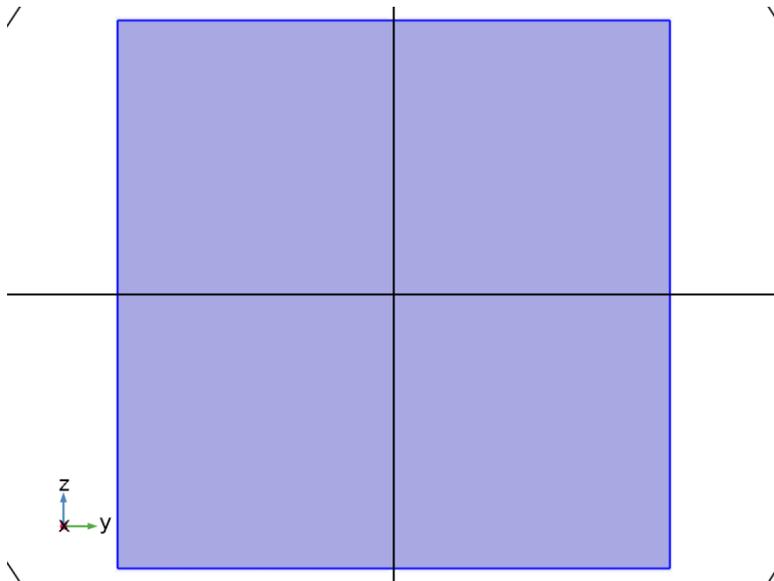
Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.nz	nz	1	Vector normal, componente z	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	
ht2.nx	dnx	1	Vector normal, componente x	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.ny	dny	1	Vector normal, componente y	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.nz	dnz	1	Vector normal, componente z	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.nxmesh	nxmesh	1	Vector normal, (malla), componente x	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72,	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				75, 78	
ht2.nymesh	nymesh	1	Vector normal, (malla), componente y	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	
ht2.nzmesh	nzmesh	1	Vector normal, (malla), componente z	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–46, 52, 55, 57–60, 62–65, 69, 72, 75, 78	
ht2.nxmesh	dnxmesh	1	Vector normal, (malla), componente x	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.nymesh	dnymesh	1	Vector normal, (malla), componente y	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	
ht2.nzmesh	dnzmesh	1	Vector normal, (malla), componente z	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77,	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				79–84	
ht2.dnx	dnx	1	Vector normal hacia abajo, componente x	Contornos 1–84	
ht2.dny	dny	1	Vector normal hacia abajo, componente y	Contornos 1–84	
ht2.dnz	dnz	1	Vector normal hacia abajo, componente z	Contornos 1–84	
ht2.unx	unx	1	Vector normal hacia arriba, componente x	Contornos 1–84	
ht2.uny	uny	1	Vector normal hacia arriba, componente y	Contornos 1–84	
ht2.unz	unz	1	Vector normal hacia arriba, componente z	Contornos 1–84	
ht2.dEiInt	0	W	Tasa de calor acumulado total	Global	Operación +
ht2.dEi0Int	0	W	Tasa de energía total acumulada	Global	Operación +
ht2.ntfluxInt	$ht2.intExtBnd(ht2.ntflux*ht2.varIntSpa)$	W	Tasa neta de calor total	Global	
ht2.ntefluxInt	$ht2.intExtBnd(ht2.nteflux*ht2.varIntSpa)$	W	Tasa neta de energía total	Global	
ht2.QInt	$ht2.intDom(ht2.Qtot*ht2.varIntSpa)-ht2.intIntBnd(ht2.ndflux_u*up(ht2.varIntSpa)+ht2.ndflux_d*down(ht2.varIntSpa))$	W	Fuente de calor total	Global	
ht2.WnsInt	0	W	Fuente de trabajo total	Global	Operación +
ht2.WInt	0	W	Fuente de trabajo total	Global	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.varIntSpa	ht2.d	1	Variable intermedia	Dominios 1–18	Meta

2.5.3 Tejido biológico 1



Tejido biológico 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

ECUACIONES

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{bio}}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

1.1.1.29 Conducción de calor, sólido

SETTINGS

Description	Value
Conductividad térmica	Del material

1.1.1.30 Termodinámica, sólido

SETTINGS

Description	Value
Densidad	Del material
Capacidad térmica con presión constante	Del material

1.1.1.31 Selección de sistema de coordenadas

SETTINGS

Description	Value
Sistema de Coordenadas	Sistema de coordenadas global

1.1.1.32 Entrada del modelo

SETTINGS

Description	Value
Volume reference temperature	Common model input

PROPIEDADES DESDE EL MATERIAL

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Conductividad térmica	Muscle	Basic
Densidad	Muscle	Basic
Capacidad térmica con presión constante	Muscle	Basic

1.1.1.33 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
domflux.T2x	ht2.dfluxx*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente x	Dominio 13	
domflux.T2y	ht2.dfluxy*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente y	Dominio 13	
domflux.T2z	ht2.dfluxz*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente z	Dominio 13	
ht2.DeltaH	integrate(subst(ht2.Cp,ht2.bt1.minput_pressure,ht2.pref),T2,ht2.DeltaH_Tlow,T2)+integrate(ht2.mujfT,ht2.bt1.minput_pressure,ht2.DeltaH_plow,ht2.pA)	J/kg	Sensibilidad de entalpía	Dominio 13	Operación +
ht2.H	ht2.HRef+ht2.DeltaH	J/kg	Entalpía	Dominio 13	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.Ei	ht2.H	J/kg	Energía interna	Dominio 13	Operación +
ht2.Ek	$0.5*(ht2.ux^2+ht2.uy^2+ht2.uz^2)$	J/kg	Energía cinética	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxx	$-ht2.k_effx*T2x-ht2.k_effy*T2y-ht2.k_effz*T2z$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxy	$-ht2.k_effx*T2x-ht2.k_effy*T2y-ht2.k_effz*T2z$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxz	$-ht2.k_effx*T2x-ht2.k_effy*T2y-ht2.k_effz*T2z$	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxtestx	- ht2.k_effx*test(T2x)- ht2.k_effy*test(T2y)- ht2.k_effz*test(T2z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxtesty	- ht2.k_effx*test(T2x)- ht2.k_effy*test(T2y)- ht2.k_effz*test(T2z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominio 13	Operación +
ht2.dfluxtestz	- ht2.k_effx*test(T2x)- ht2.k_effy*test(T2y)- ht2.k_effz*test(T2z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominio 13	Operación +
ht2.cfluxx	ht2.rho*ht2.ux*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente x	Dominio 13	Operación +
ht2.cfluxy	ht2.rho*ht2.uy*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente y	Dominio 13	Operación +
ht2.cfluxz	ht2.rho*ht2.uz*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente z	Dominio 13	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.tefluxx	$ht2.dfluxx+ht2.rho*ht2.ux*ht2.H0$	W/m ²	Flujo de energía total, componente x	Dominio 13	Operación +
ht2.tefluxy	$ht2.dfluxy+ht2.rho*ht2.uy*ht2.H0$	W/m ²	Flujo de energía total, componente y	Dominio 13	Operación +
ht2.tefluxz	$ht2.dfluxz+ht2.rho*ht2.uz*ht2.H0$	W/m ²	Flujo de energía total, componente z	Dominio 13	Operación +
ht2.ndflux_d	- dflux_spatial(T2)/d own(ht2.d)	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal interno, lado inferior	Contornos 42–46, 75	Operación +
ht2.dEiInt	ht2.bt1.dEiInt	W	Tasa de calor acumulado total	Global	Operación +
ht2.dEi0Int	ht2.bt1.dEi0Int	W	Tasa de energía total acumulada	Global	Operación +
ht2.WnsInt	ht2.bt1.WnsInt	W	Fuente de trabajo total	Global	Operación +
ht2.kxx	material.k11	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xx	Dominio 13	Meta
ht2.kyx	material.k21	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yx	Dominio 13	Meta
ht2.kzx	material.k31	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zx	Dominio 13	Meta
ht2.kxy	material.k12	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xy	Dominio 13	Meta
ht2.kyy	material.k22	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yy	Dominio 13	Meta
ht2.kzy	material.k32	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zy	Dominio 13	Meta
ht2.kxz	material.k13	W/(m·K)	Conductividad térmica,	Dominio 13	Meta

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			componente xz		
ht2.kyz	material.k23	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yz	Dominio 13	Meta
ht2.kzz	material.k33	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zz	Dominio 13	Meta
ht2.k_iso	material.k_iso	W/(m·K)	Conductividad térmica, valor isotrópico	Dominio 13	Meta
ht2.rho	material.rho	kg/m ³	Densidad	Dominio 13	Meta
ht2.Cp	material.Cp	J/(kg·K)	Capacidad térmica con presión constante	Dominio 13	Meta
ht2.res_T	-ht2.k_effxx*T2xx- ht2.k_effxy*T2xy- ht2.k_effxz*T2xz- ht2.k_effyx*T2yx- ht2.k_effyy*T2yy- ht2.k_effyz*T2yz- ht2.k_effzx*T2zx- ht2.k_effzy*T2zy- ht2.k_effzz*T2zz- (ht2.qs+ht2.qs_ooop) *T2+ht2.C_eff*(ht2 .ux*T2x+ht2.uy*T2 y+ht2.uz*T2z)- ht2.Q-ht2.Qoop	W/m ³	Residuos de ecuación	Dominio 13	Operación +
ht2.alphap	- d(ht2.rho,T2)/(ht2.r ho+eps)	1/K	Coefficiente de compresibilidad isobárico	Dominio 13	
ht2.pA	ht2.pref	Pa	Presión absoluta	Dominio 13	
ht2.gradTmag	sqrt(ht2.gradTx^2+ ht2.gradTy^2+ht2.g radTz^2)	K/m	Magnitud de gradiente de la temperatura	Dominio 13	
ht2.Qmet	0	W/m ³	Fuente de calor metabólica	Dominio 13	Operación +
ht2.pref	ht2.bt1.pref	Pa	Nivel de presión de referencia	Dominio 13	
ht2.DeltaH_Tlow	ht2.Tref	K	Límite inferior de temperatura para evaluación	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			de entalpía		
ht2.DeltaH_plow	ht2.pref	Pa	Límite inferior de presión para evaluación de entalpía	Dominio 13	
ht2.rhoInit	subst(ht2.rho,T2,ht2.Tinit,minput.pA,ht2.pref)	kg/m ³	Densidad inicial	Dominio 13	
ht2.rho_eff	ht2.rho	kg/m ³	Densidad efectiva	Dominio 13	
ht2.C_eff	ht2.rho*ht2.Cp	J/(m ³ ·K)	Capacidad térmica volumétrica efectiva	Dominio 13	
ht2.muJT	0	m ³ /kg	Coefficiente isotérmico de Joule-Thomson	Dominio 13	
ht2.k_effxx	ht2.kxx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente xx	Dominio 13	
ht2.k_effyx	ht2.kyx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente yx	Dominio 13	
ht2.k_effzx	ht2.kzx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zx	Dominio 13	
ht2.k_effxy	ht2.kxy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente xy	Dominio 13	
ht2.k_effyy	ht2.kyy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente yy	Dominio 13	
ht2.k_effzy	ht2.kzy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zy	Dominio 13	
ht2.k_effxz	ht2.kxz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente xz	Dominio 13	
ht2.k_effyz	ht2.kyz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva,	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			componente yz		
ht2.k_effzz	ht2.kzz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zz	Dominio 13	
ht2.kappaTxx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente xx	Dominio 13	
ht2.kappaTyx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yx	Dominio 13	
ht2.kappaTzx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zx	Dominio 13	
ht2.kappaTxy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente xy	Dominio 13	
ht2.kappaTyy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yy	Dominio 13	
ht2.kappaTzy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zy	Dominio 13	
ht2.kappaTxz	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente xz	Dominio 13	
ht2.kappaTyz	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yz	Dominio 13	
ht2.kappaTzz	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zz	Dominio 13	
ht2.kmean	$(ht2.k_effxx+ht2.k_effyy+ht2.k_effzz)/$	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
	3		media		
ht2.ux	0	m/s	Campo de velocidad, componente x	Dominio 13	Operación +
ht2.uy	0	m/s	Campo de velocidad, componente y	Dominio 13	Operación +
ht2.uz	0	m/s	Campo de velocidad, componente z	Dominio 13	Operación +
ht2.gradTx	T2x	K/m	Gradiente de temperatura, componente x	Dominio 13	
ht2.gradTy	T2y	K/m	Gradiente de temperatura, componente y	Dominio 13	
ht2.gradTz	T2z	K/m	Gradiente de temperatura, componente z	Dominio 13	
ht2.cellPe	$0.5 * ht2.rho * ht2.Cp * h * \sqrt{ht2.ux^2 + ht2.uy^2 + ht2.uz^2} / ht2.kmean$	1	Número Peclet de celda	Dominio 13	
ht2.Qltot	0	W/m	Fuente de calor total de línea	Aristas 41–48, 89–92	Operación +
ht2.Qptot	0	W	Fuente total de calor en punto	Puntos 12–15, 32–35	Operación +
ht2.alphaTdx	$ht2.k_effx / ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xx	Dominio 13	
ht2.alphaTdy	$ht2.k_effy / ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yx	Dominio 13	
ht2.alphaTdz	$ht2.k_effz / ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zx	Dominio 13	
ht2.alphaTdx	$ht2.k_effxy / ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xy	Dominio 13	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.alphaTdyy	$ht2.k_effyy/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yy	Dominio 13	
ht2.alphaTdzy	$ht2.k_effzy/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zy	Dominio 13	
ht2.alphaTdxz	$ht2.k_effxz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xz	Dominio 13	
ht2.alphaTdyz	$ht2.k_effyz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yz	Dominio 13	
ht2.alphaTdzz	$ht2.k_effzz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zz	Dominio 13	
ht2.alphaTdMean	$ht2.kmean/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica media	Dominio 13	
ht2.Tradu	ht2.Tu	K	Temperatura, lado superior	Dominio 13	
ht2.Tradu	ht2.Tu	K	Temperatura, lado superior	Contornos 42-46, 75	
ht2.Tradd	ht2.Td	K	Temperatura en lado inferior	Dominio 13	
ht2.Tradd	ht2.Td	K	Temperatura en lado inferior	Contornos 42-46, 75	
ht2.dEi	0	W/m ³	Densidad de tasa de calor acumulada total	Dominio 13	
ht2.dEi0	0	W/m ³	Densidad de tasa de energía total acumulada	Dominio 13	
ht2.timeDerivative	0	K/s	Temperatura, primer derivada en el tiempo	Dominio 13	
ht2.gamma	1	1	Coefficiente de dilatación adiabática	Dominio 13	
ht2.Trho	ht2.Tref	K	Temperature for density	Dominio 13	

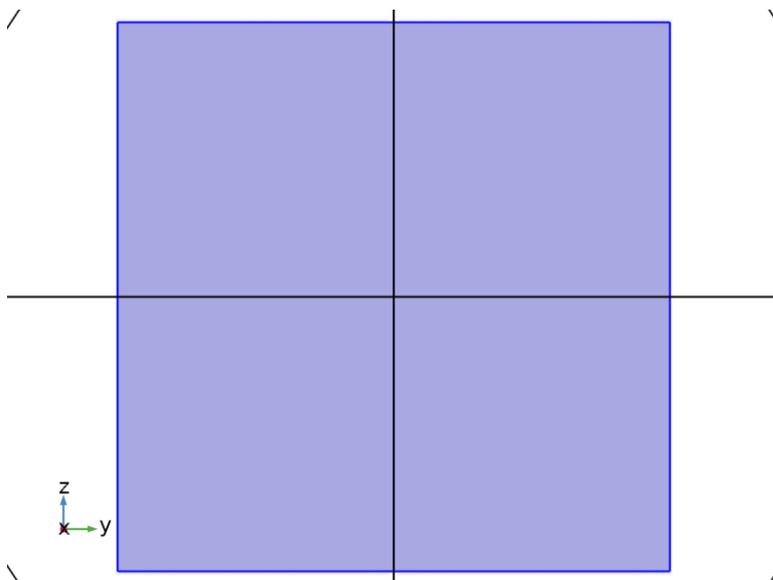
Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			evaluation		
ht2.dfltopaque	1	1	Opacidad predeterminada	Dominio 13	
ht2.helem	h_{spatial}	m	Tamaño de elemento	Dominio 13	
ht2.bt1.pref	1[atm]	Pa	Nivel de presión de referencia	Dominio 13	
ht2.bt1.dEiInt	$ht2.bt1.intDom((ht2.dEi-ht2.Qm*ht2.Ei)*ht2.bt1.varIntSpa)$	W	Tasa de calor acumulado total	Global	
ht2.bt1.dEi0Int	$ht2.bt1.intDom((ht2.dEi0-ht2.Qm*ht2.H)*ht2.bt1.varIntSpa)$	W	Tasa de energía total acumulada	Global	
ht2.bt1.ntfluxInt	$ht2.bt1.intExtBnd(ht2.ntflux*ht2.bt1.varIntSpa)+ht2.bt1.intExtBndUp(ht2.ntflux_u*ht2.bt1.varIntSpa)+ht2.bt1.intExtBndDown(ht2.ntflux_d*ht2.bt1.varIntSpa)$	W	Tasa neta de calor total	Global	
ht2.bt1.ntefluxInt	$ht2.bt1.intExtBnd(ht2.nteflux*ht2.bt1.varIntSpa)+ht2.bt1.intExtBndUp(ht2.nteflux_u*ht2.bt1.varIntSpa)+ht2.bt1.intExtBndDown(ht2.nteflux_d*ht2.bt1.varIntSpa)$	W	Tasa neta de energía total	Global	
ht2.bt1.QInt	$ht2.bt1.intDom(ht2.Qtot*ht2.bt1.varIntSpa)-ht2.bt1.intIntBnd(ht2.ndflux_u*up(ht2.bt1.varIntSpa)+ht2.ndflux_d*down(ht2.bt1.varIntSpa))$	W	Fuente de calor total	Global	
ht2.bt1.WnsInt	$ht2.bt1.intDom(ht2.pA*(d(ht2.ux,x)+d(ht2.uy,y)+d(ht2.uz,$	W	Fuente de trabajo total	Global	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
	z))*ht2.bt1.varIntSp a)				
ht2.bt1.WInt	0	W	Fuente de trabajo total	Global	
ht2.bt1.varIntSpa	ht2.d	1	Variable intermedia	Dominio 13	Meta

1.1.1.34 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Marco espacial	Dominio 13

1.1.1.35 Biocalor 1



Biocalor 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

ECUACIONES

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T_2 + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{bio}}$$

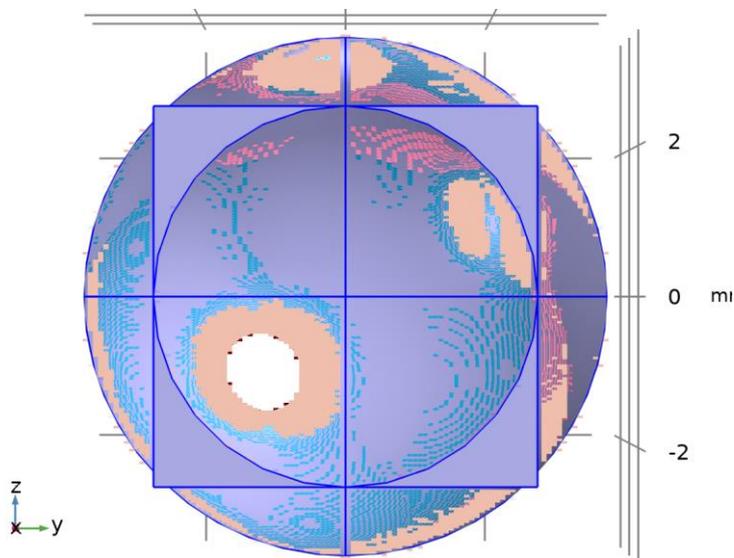
$$Q_{\text{bio}} = \rho_b C_{p,b} \omega_b (T_b - T_2) + Q_{\text{met}}$$

1.1.1.35.1 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.Q	ht2.rhobl*ht2.Cp_b*ht	W/m ³	Fuente de calor	Dominio 13	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
	$2.\omega_{gab}*(ht2.T_b - T2) + ht2.Q_{met}$				
ht2.Qtot	$ht2.\rho_{hobl} * ht2.C_p_b * ht2.\omega_{gab} * (ht2.T_b - T2) + ht2.Q_{met}$	W/m ³	Fuente de calor total	Dominio 13	Operación +
ht2.Qmet	0	W/m ³	Fuente de calor metabólica	Dominio 13	Operación +
ht2.Tb	TempHielo	K	Temperatura de sangre arterial	Dominio 13	
ht2.Cp_b	0	J/(kg·K)	Calor específico, sangre	Dominio 13	
ht2.omegab	0	1/s	Tasa de perfusión de la sangre	Dominio 13	
ht2.rhobl	0	kg/m ³	Densidad, sangre	Dominio 13	

2.5.4 Valores iniciales 1



Valores iniciales 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Todos los dominios

1.1.1.36 Valores iniciales

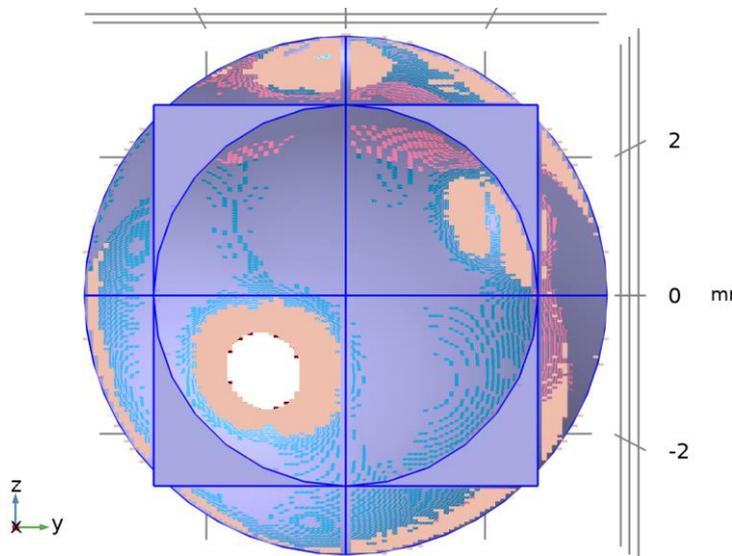
SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Definido por el usuario
Temperatura	TempEtilenglicol

1.1.1.37 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección
ht2.Tinit	TempEtilenglicol	K	Temperatura	Dominios 1–11, 14–18

2.5.5 Aislamiento térmico 1



Aislamiento térmico 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Contorno
Selección	Geometría geom3: Dimensión 2: Todos los contornos

ECUACIONES

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0.$$

1.1.1.38 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.ins1.ntfluxInt	ht2.ins1.intExtBnd(ht2.ntflux*ht2.ins1.varIntSpa)	W	Tasa neta de calor total	Global	

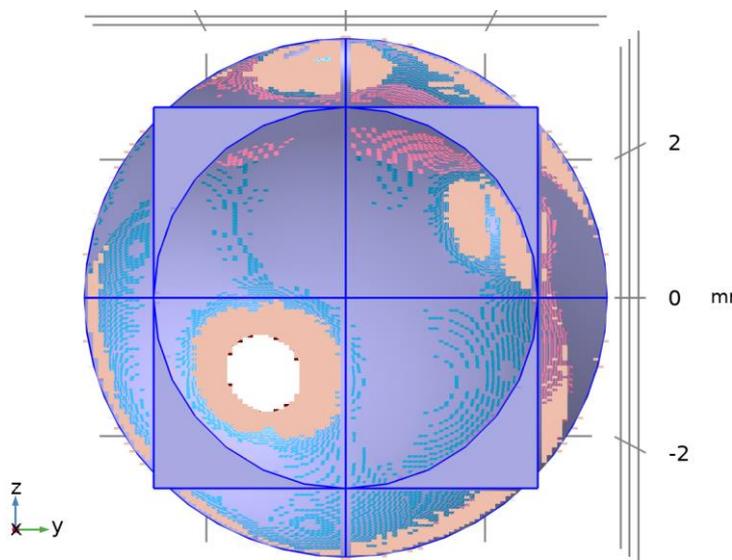
Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.ins1.ntefluxInt	$ht2.ins1.intExtBnd(ht2.nteflux*ht2.ins1.varIntSpa)$	W	Tasa neta de energía total	Global	
ht2.ins1.ntfluxInt_u	$ht2.ins1.intIntBnd(ht2.ntflux_u*up(ht2.ins1.varIntSpa))$	W	Tasa neta de calor total, lado positiva	Global	
ht2.ins1.ntefluxInt_u	$ht2.ins1.intIntBnd(ht2.nteflux_u*up(ht2.ins1.varIntSpa))$	W	Tasa neta de energía total, lado positiva	Global	
ht2.ins1.ntfluxInt_d	$ht2.ins1.intIntBnd(ht2.ntflux_d*down(ht2.ins1.varIntSpa))$	W	Tasa neta de calor total, lado negativa	Global	
ht2.ins1.ntefluxInt_d	$ht2.ins1.intIntBnd(ht2.nteflux_d*down(ht2.ins1.varIntSpa))$	W	Tasa neta de energía total, lado negativa	Global	
ht2.ins1.Tave	$nojac(ht2.ins1.intBnd(ht2.ins1.varIntSpa*ht2.rho*ht2.Cp*T2*\max(abs(ht2.ux*ht2.nx+ht2.uy*ht2.ny+ht2.uz*ht2.nz),eps))) / nojac(ht2.ins1.intBnd(ht2.ins1.varIntSpa*ht2.rho*ht2.Cp*\max(abs(ht2.ux*ht2.nx+ht2.uy*ht2.ny+ht2.uz*ht2.nz),eps)))$	K	Temperatura promedio ponderada	Global	
ht2.ins1.varIntSpa	ht2.d	1	Variable intermedia	Contornos 1–9, 13–14, 16–18, 20, 22–23, 25–26, 28–30, 32–33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73–74, 76–77, 79–84	Meta

1.1.1.39 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección	Detalles
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Marco espacial	No hay contornos	Abertura

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	de Selección	Detalles
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Material	No hay contornos	Abertura
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Geometría	No hay contornos	Abertura
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Malla	No hay contornos	Abertura

2.5.6 etilenglicol



etilenglicol

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominios 1–12, 14–18

ECUACIONES

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

1.1.1.40 Convección de calor

SETTINGS

Description	Value
Campo de velocidad	Definido por el usuario
Campo de velocidad	{0, 0, 0}

1.1.1.41 **Conducción de calor, fluido**

SETTINGS

Description	Value
Conductividad térmica	Del material

1.1.1.42 **Termodinámica, fluido**

SETTINGS

Description	Value
Tipo de fluido	Gas/líquido
Densidad	Del material
Capacidad térmica con presión constante	Del material
Coefficiente de dilatación adiabática	Del material

1.1.1.43 **Selección de sistema de coordenadas**

SETTINGS

Description	Value
Sistema de Coordenadas	Sistema de coordenadas global

1.1.1.44 **Entrada del modelo**

SETTINGS

Description	Value
Presión absoluta	Common model input
Volume reference temperature	Definido por el usuario
Volume reference temperature	293.15[K]

PROPIEDADES DESDE EL MATERIAL

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Conductividad térmica	Ethylene glycol	Basic
Densidad	Ethylene glycol	Basic
Capacidad térmica con presión constante	Ethylene glycol	Basic
Coefficiente de dilatación adiabática	Ethylene glycol	Basic
Conductividad térmica	H2O (water) [solid,tension]	Básico

Propiedad	Material	Grupo de propiedad
Densidad	H2O (water) [solid,tension]	Básico
Capacidad térmica con presión constante	H2O (water) [solid,tension]	Básico
Coefficiente de dilatación adiabática	H2O (water) [solid,tension]	Básico

1.1.1.45 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
domflux.T2x	ht2.dfluxx*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente x	Dominios 1–12, 14–18	
domflux.T2y	ht2.dfluxy*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente y	Dominios 1–12, 14–18	
domflux.T2z	ht2.dfluxz*ht2.d	W/m ²	Flujo del dominio, Componente z	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.DeltaH	integrate(subst(ht2.Cp,ht2.fluid1.minput_pressure,ht2.pref),T2,ht2.DeltaH_Tlow,T2)+integrate(ht2.muJT,ht2.fluid1.minput_pressure,ht2.DeltaH_plow,ht2.pA)	J/kg	Sensibilidad de entalpía	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.H	ht2.HRef+ht2.DeltaH	J/kg	Entalpía	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.Ei	ht2.H-ht2.pA/ht2.rho	J/kg	Energía interna	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.Ek	0.5*(ht2.ux^2+ht2.uy^2+ht2.uz^2)	J/kg	Energía cinética	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.dfluxx	-ht2.k_effxx*T2x-ht2.k_effxy*T2y-ht2.k_effxz*T2z	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.dfluxy	-ht2.k_effyx*T2x-ht2.k_effyy*T2y-ht2.k_effyz*T2z	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.dfluxz	-ht2.k_effzx*T2x-ht2.k_effzy*T2y-ht2.k_effzz*T2z	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominios 1–12, 14–18	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.dfluxtestx	- ht2.k_effxx*test(T2 x)- ht2.k_effxy*test(T2 y)- ht2.k_effxz*test(T2 z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente x	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.dfluxtesty	- ht2.k_effyx*test(T2 x)- ht2.k_effyy*test(T2 y)- ht2.k_effyz*test(T2 z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente y	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.dfluxtestz	- ht2.k_effzx*test(T2 x)- ht2.k_effzy*test(T2 y)- ht2.k_effzz*test(T2 z)	W/m ²	Flujo de calor conductivo, componente z	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.cfluxx	ht2.rho*ht2.ux*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente x	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.cfluxy	ht2.rho*ht2.uy*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente y	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.cfluxz	ht2.rho*ht2.uz*ht2.Ei	W/m ²	Flujo de calor convectivo, componente z	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.tefluxx	ht2.dfluxx+ht2.rho*ht2.ux*ht2.H0	W/m ²	Flujo de energía total, componente x	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.tefluxy	ht2.dfluxy+ht2.rho*ht2.uy*ht2.H0	W/m ²	Flujo de energía total, componente y	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.tefluxz	ht2.dfluxz+ht2.rho*ht2.uz*ht2.H0	W/m ²	Flujo de energía total, componente z	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.ndflux_u	- uflux_spatial(T2)/u p(ht2.d)	W/m ²	Flujo de calor conductivo normal interno, lado superior	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34–41, 52, 55,	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				57–60, 62–65, 69, 72, 78	
ht2.ndflux_u	- uflux_spatial(T2)/u p(ht2.d)	W/m ²	Flujo de calor conectivo normal interno, lado superior	Contornos 42–46, 75	Operación +
ht2.ndflux_d	- dflux_spatial(T2)/d own(ht2.d)	W/m ²	Flujo de calor conectivo normal interno, lado inferior	Contornos 10–12, 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34– 41, 52, 55, 57–60, 62– 65, 69, 72, 78	Operación +
ht2.ndflux_d	- dflux_spatial(T2)/d own(ht2.d)	W/m ²	Flujo de calor conectivo normal interno, lado inferior	Contornos 1– 9, 13–14, 16– 18, 20, 22– 23, 25–26, 28–30, 32– 33, 47–51, 53–54, 56, 61, 66–68, 70–71, 73– 74, 76–77, 79–84	Operación +
ht2.dEiInt	ht2.fluid1.dEiInt	W	Tasa de calor acumulado total	Global	Operación +
ht2.dEi0Int	ht2.fluid1.dEi0Int	W	Tasa de energía total acumulada	Global	Operación +
ht2.WnsInt	ht2.fluid1.WnsInt	W	Fuente de trabajo total	Global	Operación +
ht2.kxx	material.k11	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xx	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kyx	material.k21	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yx	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kzx	material.k31	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zx	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kxy	material.k12	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xy	Dominios 1– 12, 14–18	Meta

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.kyy	material.k22	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yy	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kzy	material.k32	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zy	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kxz	material.k13	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xz	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kyz	material.k23	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yz	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kzz	material.k33	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zz	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.k_iso	material.k_iso	W/(m·K)	Conductividad térmica, valor isotrópico	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.rho	subst(material.rho,ht2.fluid1.minput_pressure,ht2.prho)	kg/m ³	Densidad	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.Cp	material.Cp	J/(kg·K)	Capacidad térmica con presión constante	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.res_T	-ht2.k_effxx*T2xx- ht2.k_effxy*T2xy- ht2.k_effxz*T2xz- ht2.k_effyx*T2yx- ht2.k_effyy*T2yy- ht2.k_effyz*T2yz- ht2.k_effzx*T2zx- ht2.k_effzy*T2zy- ht2.k_effzz*T2zz- (ht2.qs+ht2.qs_ooop) *T2+ht2.C_eff*(ht2. .ux*T2x+ht2.uy*T2y+ht2.uz*T2z)- ht2.Q-ht2.Qoop	W/m ³	Residuos de ecuación	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.alphap	- d(ht2.rho,T2)/max(ht2.rho,eps)	1/K	Coefficiente de compresibilidad isobárico	Dominios 1–12, 14–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.pA	ht2.fluid1.minput_p ressure	Pa	Presión absoluta	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.gradTmag	$\sqrt{ht2.gradTx^2 + ht2.gradTy^2 + ht2.gradTz^2}$	K/m	Magnitud de gradiente de la temperatura	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.Qmet	0	W/m ³	Fuente de calor metabólica	Dominios 1– 12, 14–18	Operación +
ht2.pref	ht2.fluid1.pref	Pa	Nivel de presión de referencia	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.DeltaH_Tlow	ht2.Tref	K	Límite inferior de temperatura para evaluación de entalpía	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.DeltaH_plow	ht2.pref	Pa	Límite inferior de presión para evaluación de entalpía	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.rhoInit	subst(ht2.rho,T2,ht2 .Tinit,minput.pA,ht 2.pref)	kg/m ³	Densidad inicial	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.rho_eff	ht2.rho	kg/m ³	Densidad efectiva	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.C_eff	ht2.rho*ht2.Cp	J/(m ³ ·K)	Capacidad térmica volumétrica efectiva	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.muJT	0	m ³ /kg	Coefficiente isotérmico de Joule-Thomson	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.k_effxx	ht2.kxx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente xx	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.k_effyx	ht2.kyx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente yx	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.k_effzx	ht2.kzx	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zx	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.k_effxy	ht2.kxy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva,	Dominios 1– 12, 14–18	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			componente xy		
ht2.k_effyy	ht2.kyy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente yy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.k_effzy	ht2.kzy	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.k_effxz	ht2.kxz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente xz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.k_effyz	ht2.kyz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente yz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.k_effzz	ht2.kzz	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva, componente zz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTxx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente xx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTyx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTzx	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTxy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente xy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTyy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTzy	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTzx	0	W/(m·K)	Conductividad	Dominios 1–	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			térmica turbulenta, componente xz	12, 14–18	
ht2.kappaTyz	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente yz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kappaTzz	0	W/(m·K)	Conductividad térmica turbulenta, componente zz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.kmean	$(ht2.k_effxx+ht2.k_effyy+ht2.k_effzz)/3$	W/(m·K)	Conductividad térmica efectiva media	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.ux	ht2.u_inputx	m/s	Campo de velocidad, componente x	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.uy	ht2.u_inputy	m/s	Campo de velocidad, componente y	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.uz	ht2.u_inputz	m/s	Campo de velocidad, componente z	Dominios 1–12, 14–18	Operación +
ht2.gradTx	T2x	K/m	Gradiente de temperatura, componente x	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.gradTy	T2y	K/m	Gradiente de temperatura, componente y	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.gradTz	T2z	K/m	Gradiente de temperatura, componente z	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.cellPe	$0.5*ht2.rho*ht2.Cp*h*\sqrt{ht2.ux^2+ht2.uy^2+ht2.uz^2}/ht2.kmean$	1	Número Peclet de celda	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.Qltot	0	W/m	Fuente de calor total de línea	Aristas 1–108	Operación +
ht2.Qptot	0	W	Fuente total de calor en punto	Puntos 1–46	Operación +

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.alphaTdx	$ht2.k_effx/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdy	$ht2.k_effy/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdz	$ht2.k_effz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdx	$ht2.k_effzx/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zx	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdy	$ht2.k_effyx/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdy	$ht2.k_effyy/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdy	$ht2.k_effzy/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zy	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdxz	$ht2.k_effxz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente xz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdyz	$ht2.k_effyz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente yz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdzz	$ht2.k_effzz/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica, componente zz	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.alphaTdMean	$ht2.kmean/ht2.C_eff$	m ² /s	Difusividad térmica media	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.Tradu	ht2.Tu	K	Temperatura, lado superior	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.Tradu	ht2.Tu	K	Temperatura, lado superior	Contornos 1–84	
ht2.Tradd	ht2.Td	K	Temperatura en lado inferior	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.Tradd	ht2.Td	K	Temperatura en lado inferior	Contornos 1–84	
ht2.dEi	0	W/m ³	Densidad de tasa de calor	Dominios 1–	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			acumulada total	12, 14–18	
ht2.dEi0	0	W/m ³	Densidad de tasa de energía total acumulada	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.timeDerivative	0	K/s	Temperatura, primer derivada en el tiempo	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.gamma	material.gamma	1	Coefficiente de dilatación adiabática	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.Trho	ht2.fluid1.minput_temperature	K	Temperature for density evaluation	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.dfltopaque	-1	1	Opacidad predeterminada	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.helem	h_spatial	m	Tamaño de elemento	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.fluid1.pref	model.input.pref	Pa	Nivel de presión de referencia	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.fluid1.dEiInt	ht2.fluid1.intDom((ht2.dEi-ht2.Qm*ht2.Ei)*ht2.fluid1.varIntSpa)	W	Tasa de calor acumulado total	Global	
ht2.fluid1.dEi0Int	ht2.fluid1.intDom((ht2.dEi0-ht2.Qm*ht2.H)*ht2.fluid1.varIntSpa)	W	Tasa de energía total acumulada	Global	
ht2.fluid1.ntfluxInt	ht2.fluid1.intExtBnd(ht2.ntflux*ht2.fluid1.varIntSpa)+ht2.fluid1.intExtBndUp(ht2.ntflux_u*ht2.fluid1.varIntSpa)+ht2.fluid1.intExtBndDown(ht2.ntflux_d*ht2.fluid1.varIntSpa)	W	Tasa neta de calor total	Global	
ht2.fluid1.ntefluxInt	ht2.fluid1.intExtBnd(ht2.nteflux*ht2.fluid1.varIntSpa)+ht2.fluid1.intExtBndUp(ht2.nteflux_u*ht2.fluid1.varIntSpa)+ht2.fluid1.intExtBnd	W	Tasa neta de energía total	Global	

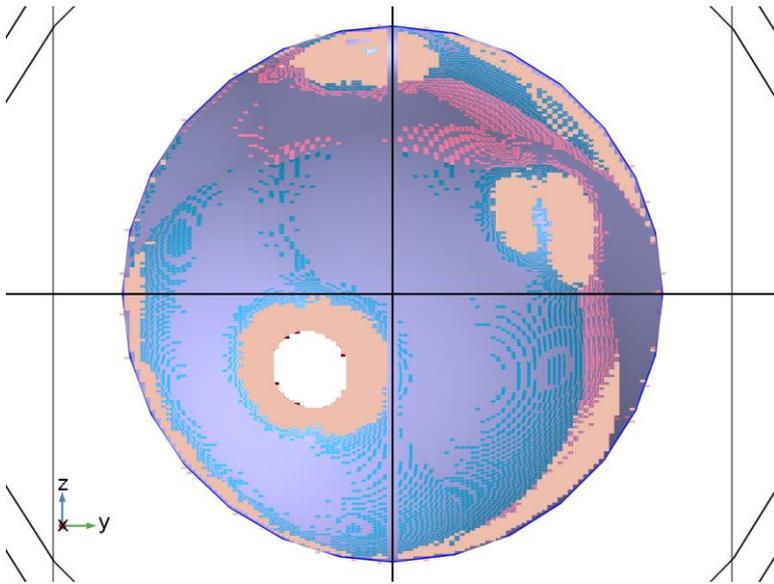
Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
	$\text{Down}(\text{ht2.nreflux_d} * \text{ht2.fluid1.varIntSpa})$				
ht2.fluid1.QInt	$\text{ht2.fluid1.intDom}(\text{ht2.Qtot} * \text{ht2.fluid1.varIntSpa}) - \text{ht2.fluid1.intIntBnd}(\text{ht2.ndflux_u} * \text{up}(\text{ht2.fluid1.varIntSpa}) + \text{ht2.ndflux_d} * \text{down}(\text{ht2.fluid1.varIntSpa}))$	W	Fuente de calor total	Global	
ht2.fluid1.WnsInt	$\text{ht2.fluid1.intDom}(\text{ht2.pA} * (\text{d}(\text{ht2.ux}, \text{x}) + \text{d}(\text{ht2.uy}, \text{y}) + \text{d}(\text{ht2.uz}, \text{z}))) * \text{ht2.fluid1.varIntSpa})$	W	Fuente de trabajo total	Global	
ht2.fluid1.WInt	0	W	Fuente de trabajo total	Global	
ht2.fluid1.varIntSpa	ht2.d	1	Variable intermedia	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.T	ht2.fluid1.minput_temperature	K	Temperatura	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.prho	ht2.fluid1.minput_pressure	Pa	Presión para la evaluación de la densidad.	Dominios 1–12, 14–18	
ht2.rhoref	$\text{subst}(\text{material.rho}, \text{ht2.fluid1.minput_pressure}, \text{ht2.pref}, \text{ht2.fluid1.minput_temperature}, \text{ht2.Tref})$	kg/m ³	Densidad referencial	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.Cpmat	material.Cp	J/(kg·K)	Capacidad térmica con presión constante	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kmatxx	material.k11	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xx	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kmatyx	material.k21	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yx	Dominios 1–12, 14–18	Meta
ht2.kmatzx	material.k31	W/(m·K)	Conductividad	Dominios 1–	Meta

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
			térmica, componente zx	12, 14–18	
ht2.kmatxy	material.k12	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xy	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kmatyy	material.k22	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yy	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kmatzy	material.k32	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zy	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kmatxz	material.k13	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente xz	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kmatyz	material.k23	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente yz	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.kmatzz	material.k33	W/(m·K)	Conductividad térmica, componente zz	Dominios 1– 12, 14–18	Meta
ht2.c_s	$\sqrt{\text{ht2.gamma}/\text{max}(\text{d}(\text{ht2.rho}, \text{ht2.fluid} \\ \text{1.minput_pressure}), \\ \text{eps}))}$	m/s	Velocidad del sonido	Dominios 1– 12, 14–18	
ht2.Ma	$\sqrt{(\text{model.input.u1}^2 + \text{model.input.u2}^2 + \text{model.input.u3}^2) / \text{ht2.c_s}}$	1	Número de Mach	Dominios 1– 12, 14–18	Meta

1.1.1.46 Funciones de forma

Nombre	Función de forma	Unidad	Descripción	Marco de forma	Selección
T2	Lagrange (Cuadrático)	K	Temperatura	Marco espacial	Dominios 1– 12, 14–18

2.5.7 Fuente de calor 1



Fuente de calor 1

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrica	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominios 11–13

ECUACIONES

$$Q = Q_0$$

1.1.1.47 Fuente de calor

SETTINGS

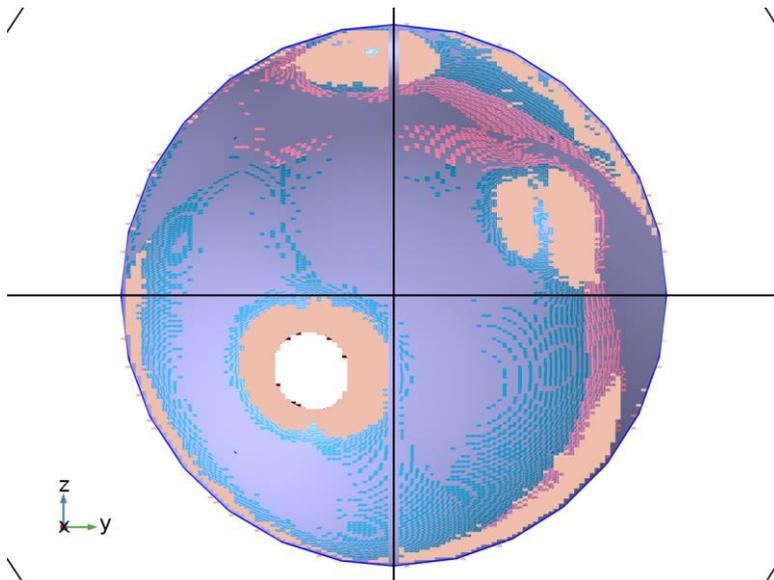
Description	Value
Fuente de calor	Origen general
Fuente de calor	Definido por el usuario
Fuente de calor	acpr.Q_pw

1.1.1.48 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
ht2.Q	ht2.hs1.Q*spatial.detInvF	W/m ³	Fuente de calor	Dominios 11–13	Operación +
ht2.Qtot	ht2.hs1.Q*spatial.detInvF	W/m ³	Fuente de calor total	Dominios 11–13	Operación +
ht2.hs1.Q0	acpr.Q_pw	W/m ³	Fuente de calor	Dominios	

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección	Detalles
				11–13	
ht2.hs1.Q	ht2.hs1.Q0	W/m ³	Fuente de calor	Dominios 11–13	

2.5.8 Valores iniciales 2



Valores iniciales 2

SELECCIÓN

Nivel de entidad geométrico	Dominio
Selección	Geometría geom3: Dimensión 3: Dominios 12–13

1.1.1.49 Valores iniciales

SETTINGS

Description	Value
Temperatura	Definido por el usuario
Temperatura	TempHielo

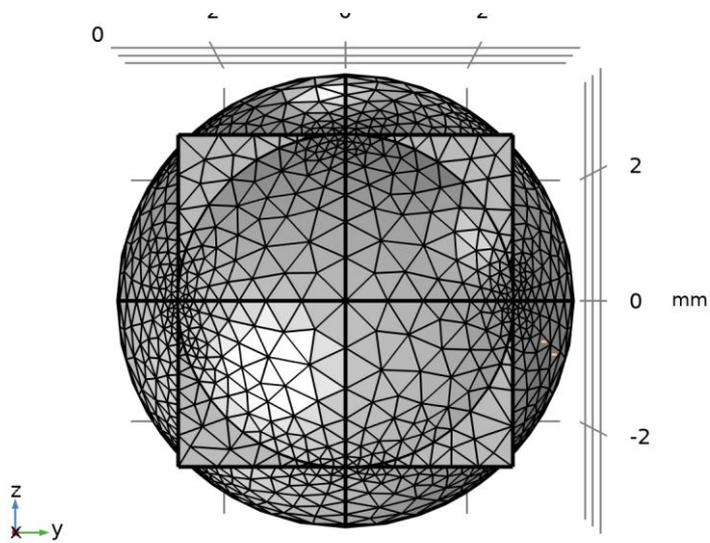
1.1.1.50 Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción	Selección
ht2.Tinit	TempHielo	K	Temperatura	Dominios 12–13

2.6 MALLA 6

ESTADÍSTICAS DE MALLA

Descripción	Valor
Calidad mínima de elemento	5.278E-5
Calidad media de elemento	0.6423
Tetraedro	24660
Triángulo	7136
Elemento de arista	872
Elemento de vértice	46



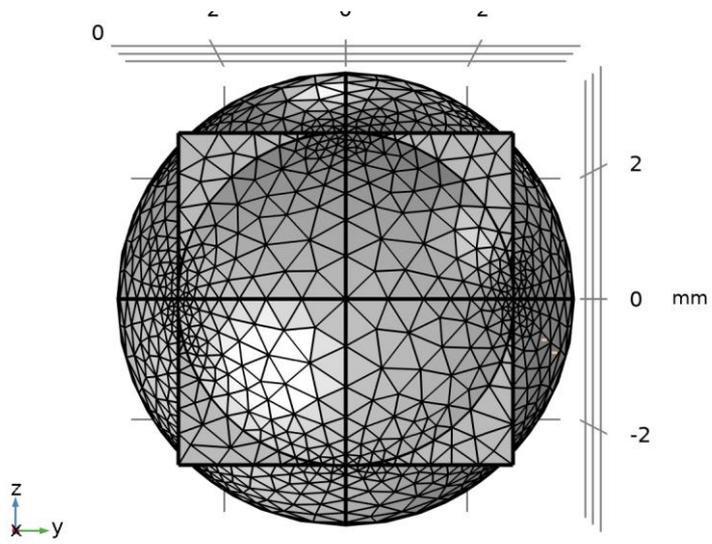
Malla 6

2.6.1 Tamaño (size)

AJUSTES

Descripción	Valor
Tamaño máximo de elemento	0.707
Tamaño mínimo de elemento	0.127
Factor de curvatura	0.6
Resolución de regiones estrechas	0.5
Tasa de crecimiento máxima de elemento	1.5

2.6.2 Tetraédrico libre 1 (ftet1)



Tetraédrico libre 1

3 Estudio 1

INFORMACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Tiempo de computación	21 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 78 Stepping 3, 2 núcleos
Sistema operativo	Windows 10

3.1 DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Frecuencias (Hz)
Frecuencia

CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO

Descripción	Valor
Incluir no linealidad geometría	Apagado

AJUSTES

Descripción	Valor
Frecuencias	2000000

SELECCIÓN DE FÍSICAS Y VARIABLES

Interfaz de física	Discretización
Presión acústica, frecuencia (acpr)	physics

SELECCIÓN DE MALLAS

Geometría	Malla
Geometría 3 (geom3)	mesh6

3.2 CONFIGURACIONES DEL RESOLVEDOR

3.2.1 Solución 1

1.1.1.51 Compilar ecuaciones: Dominio de la frecuencia (st1)

ESTUDIO Y PASO

Descripción	Valor
Usar estudio	Estudio 1
Usar paso de estudio	Dominio de la frecuencia

LOG

```

<---- Compilar ecuaciones: Dominio de la frecuencia en Estudio 1/Solución 1
      (sol1) -----
Inició en 01-nov-2020 18:20:05.
Orden de forma geométrica: Cuadrático
Se ejecuta en Intel64 Family 6 Model 78 Stepping 3, GenuineIntel.
Using 1 socket with 2 cores in total on DESKTOP-PIVC884.
Memoria disponible: 3.89 GB.
# 0 nodos de orden superior movidos lejos de '# 1' para evitar elementos mal formados.
La distancia máxima desde un punto a la geometría es 0.000618 mm.
Tiempo: 5.
Memoria física: 1.51 GB
Memoria virtual: 1.85 GB
Terminó en 01-nov-2020 18:20:10.
----- Compilar ecuaciones: Dominio de la frecuencia en Estudio 1/Solución 1
      (sol1) ----->

```

1.1.1.52 Variables dependientes 1 (v1)

GENERAL

Descripción	Valor
Definido por paso estudio	Dominio de la frecuencia

CONSTANTES DE CÁLCULO DE VALOR INICIAL

Nombre constante	\$Fuente de valor inicial
freq	Frecuencia

LOG

```

<---- Variables dependientes 1 en Estudio 1/Solución 1 (sol1) -----
Inició en 01-nov-2020 18:20:10.
Tiempo de solución: 0 s.
Memoria física: 1.5 GB
Memoria virtual: 1.83 GB
Terminó en 01-nov-2020 18:20:10.
----- Variables dependientes 1 en Estudio 1/Solución 1 (sol1) ----->

```

1.1.1.52.1 Presión (comp3.p) (comp3_p)

GENERAL

Descripción	Valor
Variables de campo	comp3.p

1.1.1.52.2 Temperatura (comp3.T2) (comp3_T2)

GENERAL

Descripción	Valor
Variables de campo	comp3.T2
Variables internas	{comp3.uflux.T2, comp3.dflux.T2}

Descripción	Valor
Resolver para este campo	Apagado

1.1.1.53 Resolvedor estacionario 1 (s1)

GENERAL

Descripción	Valor
Definido por paso estudio	Dominio de la frecuencia

LOG

```

<---- Resolvedor estacionario 1 en Estudio 1/Solución 1 (sol1) -----
Inició en 01-nov-2020 18:20:11.
Resolvedor lineal
Número de grados de libertad resueltos para 36600
Se encontraron matrices simétricas.
Escala para variables dependientes:
Presión (comp3.p): 1e+05
Empleada función de espacio nulo Ortonormal.
Iter      SolEst      Damping      Stepsize #Res #Jac #Sol   LinErr   LinRes
   1         1    1.0000000          1     1     1     1  1.9e-12  2.8e-12
Tiempo de solución: 15 s.
Memoria física: 1.68 GB
Memoria virtual: 2.1 GB
Terminó en 01-nov-2020 18:20:26.
----- Resolvedor estacionario 1 en Estudio 1/Solución 1 (sol1) ----->

```

1.1.1.53.1 Avanzado (aDef)

AJUSTES DE ENSAMBLE

Descripción	Valor
Permitir resultados complejos de funciones con argumento real	Encendido

1.1.1.53.2 Paramétrico 1 (p1)

GENERAL

Descripción	Valor
Definido por paso estudio	Dominio de la frecuencia
Ejecutar la continuación de	Ningún parámetro
Reutilizar solución desde el paso anterior	Auto

PARÁMETROS

Nombre de parámetro	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parámetros
freq	Frecuencia	Hz

1.1.1.53.3 Completamente acoplado 1 (fc1)

GENERAL

Descripción	Valor
Resolvidor lineal	Suggested Direct Solver (acpr)

4 Estudio 2

INFORMACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Tiempo de computación	4 min 14 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 78 Stepping 3, 2 núcleos
Sistema operativo	Windows 10

4.1 TEMPORAL

Tiempos	Unidad
range(0,TiempoFinal/40,TiempoFinal)	s

CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO

Descripción	Valor
Incluir no linealidad geometría	Apagado

CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO

Descripción	Valor
Tiempos	{0, 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12, 13.5, 15, 16.5, 18, 19.5, 21, 22.5, 24, 25.5, 27, 28.5, 30, 31.5, 33, 34.5, 36, 37.5, 39, 40.5, 42, 43.5, 45, 46.5, 48, 49.5, 51, 52.5, 54, 55.5, 57, 58.5, 60}

VALORES DE VARIABLES DEPENDIENTE

Descripción	Valor
Ajustes	Controlado por usuario
Método	Solución
Estudio	Estudio 1

SELECCIÓN DE FÍSICAS Y VARIABLES

Interfaz de física	Discretización
Transferencia de biocalor 2 (ht2)	physics

SELECCIÓN DE MALLAS

Geometría	Malla
Geometría 3 (geom3)	mesh6

4.2 CONFIGURACIONES DEL RESOLVEDOR

4.2.1 Solución 2

1.1.1.54 Compilar ecuaciones: Temporal (st1)

ESTUDIO Y PASO

Descripción	Valor
Usar estudio	Estudio 2
Usar paso de estudio	Temporal

LOG

```
<----- Compilar ecuaciones: Temporal en Estudio 2/Solución 2 (sol2) -----
Inició en 01-nov-2020 18:24:36.
Orden de forma geométrica: Cuadrático
Se ejecuta en Intel64 Family 6 Model 78 Stepping 3, GenuineIntel.
Using 1 socket with 2 cores in total on DESKTOP-PIVC884.
Memoria disponible: 3.89 GB.
# 0 nodos de orden superior movidos lejos de '# 1' para evitar elementos mal formados.
La distancia máxima desde un punto a la geometría es 0.000618 mm.
Tiempo: 6.
Memoria física: 1.65 GB
Memoria virtual: 1.99 GB
Terminó en 01-nov-2020 18:24:42.
----- Compilar ecuaciones: Temporal en Estudio 2/Solución 2 (sol2) ----->
```

1.1.1.55 Variables dependientes 1 (v1)

GENERAL

Descripción	Valor
Definido por paso estudio	Temporal

ESCALA RESIDUAL

Descripción	Valor
Método	Manual

VALORES DE LAS VARIABLES NO COMPUTADAS

Descripción	Valor
Método	Solución
Solución	Solución 1

CONSTANTES DE CÁLCULO DE VALOR INICIAL

Nombre constante	\$Fuente de valor inicial
t	range(0,TiempoFinal/40,TiempoFinal)
timestep	0.06[s]

LOG

```
<---- Variables dependientes 1 en Estudio 2/Solución 2 (sol2) -----
Inició en 01-nov-2020 18:24:42.
Valores de las variables no computadas: Solución 1 (sol1), freq=2E6 Hz [Automático].
Tiempo de solución: 2 s.
Memoria física: 1.64 GB
Memoria virtual: 2.01 GB
Terminó en 01-nov-2020 18:24:44.
----- Variables dependientes 1 en Estudio 2/Solución 2 (sol2) ----->
```

1.1.1.55.1 Presión (comp3.p) (comp3_p)

GENERAL

Descripción	Valor
VARIABLES DE CAMPO	comp3.p
Resolver para este campo	Apagado

1.1.1.55.2 Temperatura (comp3.T2) (comp3_T2)

GENERAL

Descripción	Valor
VARIABLES DE CAMPO	comp3.T2
VARIABLES INTERNAS	{comp3.uflux.T2, comp3.dflux.T2}

1.1.1.56 Resolvedor temporal 1 (t1)

GENERAL

Descripción	Valor
Definido por paso estudio	Temporal
Tiempos	{0, 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12, 13.5, 15, 16.5, 18, 19.5, 21, 22.5, 24, 25.5, 27, 28.5, 30, 31.5, 33, 34.5, 36, 37.5, 39, 40.5, 42, 43.5, 45, 46.5, 48, 49.5, 51, 52.5, 54, 55.5, 57, 58.5, 60}

ESCALADO DE TIEMPO

Descripción	Valor
Orden máximo de BDF	2
Estimación de errores	Excluir algebraico

LOG

```

<---- Resolvedor temporal 1 en Estudio 2/Solución 2 (sol2) -----
Inició en 01-nov-2020 18:24:45.
Resolvedor temporal (BDF ida)
Número de grados de libertad resueltos: 36600 (mas 49644 grados de libertad internos
).
Se encontró matrix no simétrica.
Escala para variables dependientes:
Temperatura (comp3.T2): 2.3e+02
Step      Time      Stepsize      Res  Jac  Sol Order Tfail NLfail   LinErr   LinRes
  0         0         - out         4   3   4         1   0         0 5.3e-16 5.2e-16
  1 0.00043808 0.00043808     6   4   6         1   0         0 5.9e-16 4.5e-16
  2 0.00087616 0.00043808     8   5   8         1   0         0 6.1e-16 4.3e-16
  3 0.0017523 0.00087616    10   6  10         2   0         0 6.8e-16 5.1e-16
  4 0.0035046 0.0017523     12   7  12         1   0         0 6.7e-16 5e-16
  5 0.0052569 0.0017523     14   8  14         1   0         0 6.5e-16 5.6e-16
  6 0.0087616 0.0035046     16   9  16         1   0         0 6.5e-16 5.8e-16
  7 0.015771 0.0070092     18  10  18         1   0         0 7.1e-16 6.4e-16
  8 0.029789 0.014018     20  11  20         1   0         0 8.3e-16 5.9e-16
  9 0.057826 0.028037     22  12  22         1   0         0 7.7e-16 5.6e-16
 10 0.085863 0.028037     24  13  24         1   0         0 9e-16 5.9e-16
 11 0.14194 0.056074     26  14  26         1   0         0 7.6e-16 6.8e-16
 12 0.25409 0.11215      28  15  28         1   0         0 8.7e-16 9e-16
 13 0.36623 0.11215      30  16  30         1   0         0 9.9e-16 1.1e-15
 14 0.59053 0.2243       32  17  32         1   0         0 1.2e-15 1.5e-15
 15 1.0391 0.44859      34  18  34         1   0         0 1.2e-15 1.8e-15
 16 1.4877 0.44859      36  19  36         1   0         0 1.3e-15 1.7e-15
  -         1.5         - out
 17 2.3849 0.89718      38  20  38         1   0         0 1.2e-15 2.4e-15
  -         3         - out
 18 3.2821 0.89718      40  21  40         1   0         0 1.5e-15 1.5e-15
  -         4.5         - out
 19 5.0764 1.7944       42  22  42         1   0         0 1.1e-15 2.3e-15
  -         6         - out
 20 6.8708 1.7944       44  23  44         1   0         0 1e-15 3.7e-15
  -         7.5         - out
  -         9         - out
 21 10.46 3.5887       46  24  46         1   0         0 1.1e-15 6.5e-15
  -         10.5         - out
  -         12         - out
  -         13.5         - out
 22 14.048 3.5887       48  25  48         1   0         0 1.4e-15 9.6e-15
  -         15         - out
  -         16.5         - out
 23 17.637 3.5887       50  26  50         1   0         0 1.5e-15 1.1e-14
  -         18         - out
  -         19.5         - out
  -         21         - out
  -         22.5         - out
 24 23.637 6           52  27  52         1   0         0 1.6e-15 1.5e-14
  -         24         - out
  -         25.5         - out
  -         27         - out
  -         28.5         - out
 25 29.637 6           54  28  54         1   0         0 3e-15 1.4e-14
  -         30         - out
  -         31.5         - out
  -         33         - out
  -         34.5         - out
 26 35.637 6           56  29  56         1   0         0 2e-15 1.3e-14
  -         36         - out

```

-	37.5	- out									
-	39	- out									
-	40.5	- out									
27	41.637	6	58	30	58	1	0	0	1.8e-15	1.1e-14	
-	42	- out									
-	43.5	- out									
-	45	- out									
-	46.5	- out									
28	47.637	6	60	31	60	1	0	0	1.9e-15	9.6e-15	
-	48	- out									
-	49.5	- out									
-	51	- out									
-	52.5	- out									
29	53.637	6	61	32	61	1	0	0	1.1e-15	9.2e-15	
-	54	- out									
-	55.5	- out									
-	57	- out									
-	58.5	- out									
30	59.637	6	62	33	62	1	0	0	1.3e-15	1.5e-14	
-	60	- out									
31	65.637	6	64	34	64	1	0	0	1.5e-15	2.2e-14	

Escalado de tiempo finalizado

Tiempo de solución: 245 s. (4 minutos, 5 segundos)

Memoria física: 1.92 GB

Memoria virtual: 2.71 GB

Terminó en 01-nov-2020 18:28:50.

----- Resolvedor temporal 1 en Estudio 2/Solución 2 (sol2) ----->

1.1.1.56.1 Completamente acoplado 1 (fc1)

GENERAL

Descripción	Valor
Resolvedor lineal	Directo, variables de transferencia de calor (ht2)

MÉTODO Y TERMINACIÓN

Descripción	Valor
Factor de amortiguamiento	0.9
Actualizar Jacobiano	Una vez por cada paso temporal
Número máximo de iteraciones	5
Estabilización y aceleración	Aceleración de Anderson
Dimensión del espacio de iteraciones	5
Mixing parameter	0.9
Iteration delay	1

1.1.1.56.2 Directo, variables de transferencia de calor (ht2) (d1)

GENERAL

Descripción	Valor
Resolvidor	PARDISO
Perturbación de pivote	1.0E-13

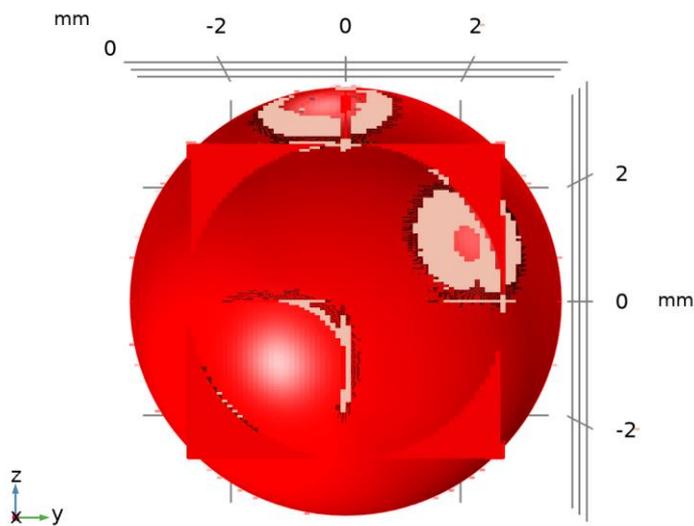
5 Resultados

5.1 CONJUNTOS DE DATOS

5.1.1 Estudio 1/Solución 1

SOLUCIÓN

Descripción	Valor
Solución	Solución 1
Componente	Save Point Geometry 3



Conjunto de datos: Estudio 1/Solución 1

5.1.2 Plano de corte 1

DATOS

Descripción	Valor
Conjunto de datos	Estudio 1/Solución 1

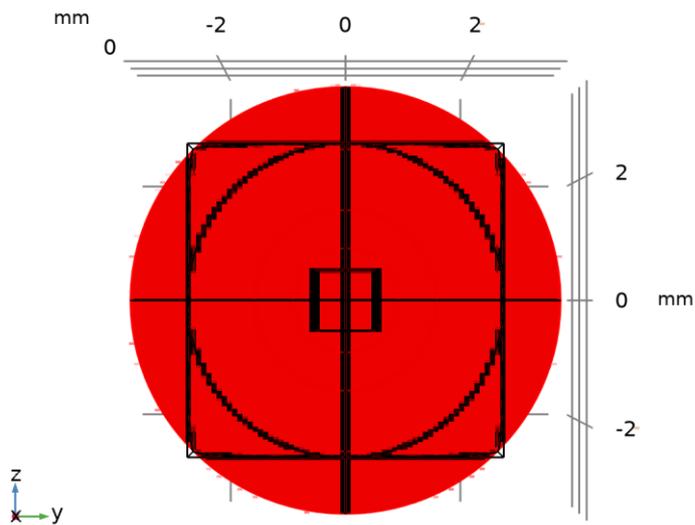
DATOS DE PLANO

Descripción	Valor
Tipo de plano	Rápido
Coordenada X	0

AVANZADO

Descripción	Valor
Variables espaciales	{cpl1x, cpl1y}

Descripción	Valor
Variables normales	{cpl1nx, cpl1ny, cpl1nz}

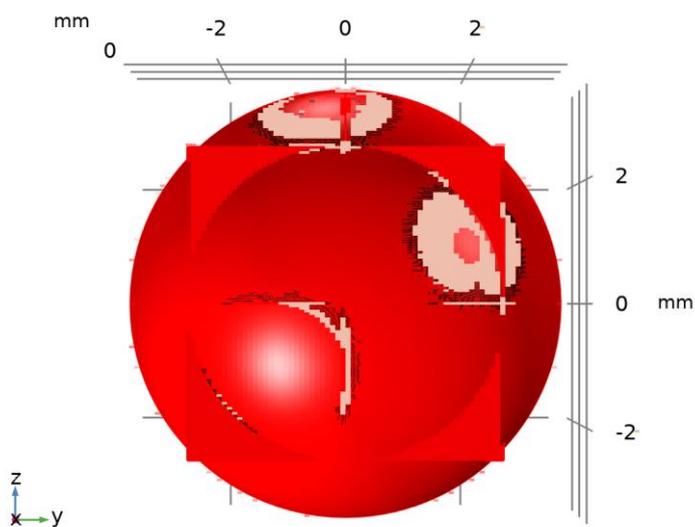


Conjunto de datos: Plano de corte 1

5.1.3 Estudio 2/Solución 2

SOLUCIÓN

Descripción	Valor
Solución	Solución 2
Componente	Save Point Geometry 3



Conjunto de datos: Estudio 2/Solución 2

5.1.4 Plano de corte 2

DATOS

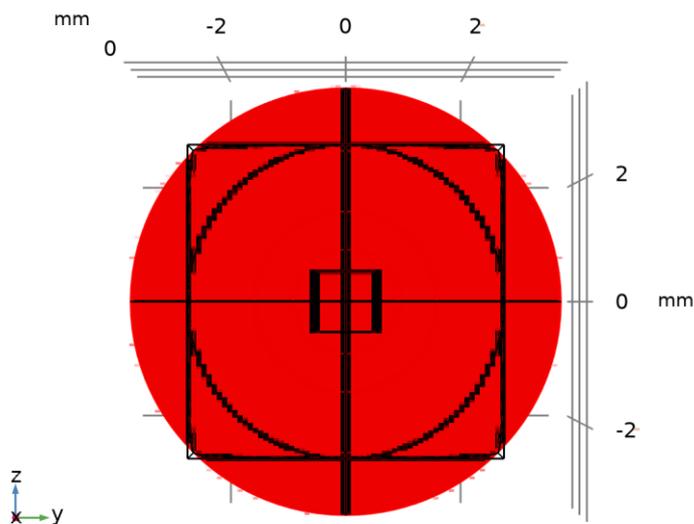
Descripción	Valor
Conjunto de datos	Estudio 2/Solución 2

DATOS DE PLANO

Descripción	Valor
Tipo de plano	Rápido
Coordenada X	0

AVANZADO

Descripción	Valor
Variables espaciales	{cpl2x, cpl2y}
Variables normales	{cpl2nx, cpl2ny, cpl2nz}

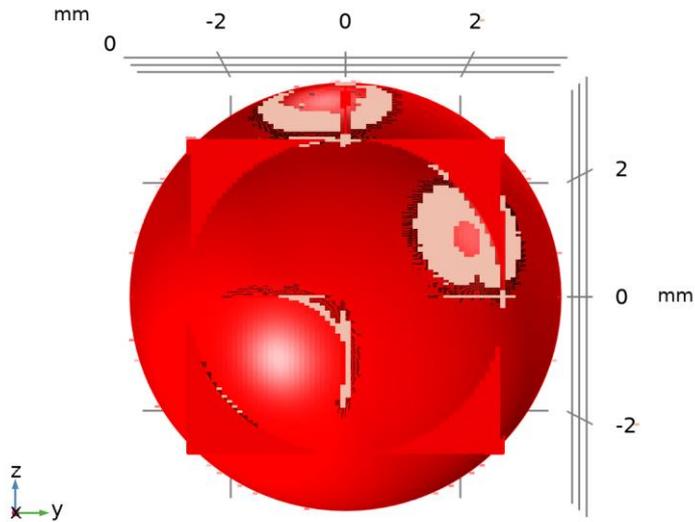


Conjunto de datos: Plano de corte 2

5.1.5 Solución de sonda 5

SOLUCIÓN

Descripción	Valor
Solución	Solución 2
Componente	Save Point Geometry 3
Marco	Coordenada del marco espacial (x, y, z)



Conjunto de datos: Solución de sonda 5

5.2 TABLAS

5.2.1 Evaluation 3D

Valores interactivos 3D

x	y	z	Value
350.70	154.84	-0.50000	133.00
345.53	132.80	39.460	290.82
13.718	18.144	24.164	221.07
0.76810	-0.14311	-7.1054E-15	186.04
9.2753	-20.768	12.303	255.95
1.4211E-14	-15.770	22.691	293.02

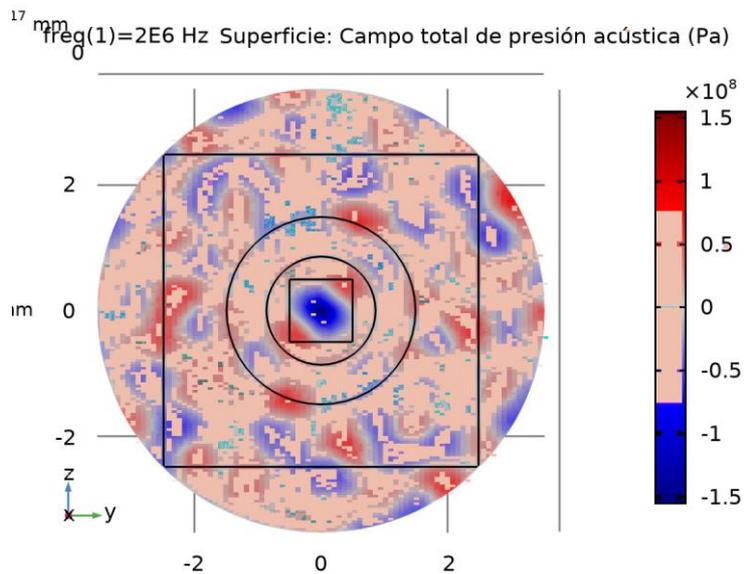
5.2.2 Tabla de sonda 1

Tiempo (s)	Temperatura (K), Punto: (0, 0, 0)	Temperatura (K), Punto: (0, 0.4, 0.4)
0.0000	132.95	133.01
4.3808E-4	133.10	132.70
8.7616E-4	133.32	132.45
0.0017523	133.81	132.24
0.0035046	134.68	133.08

Tiempo (s)	Temperatura (K), Punto: (0, 0, 0)	Temperatura (K), Punto: (0, 0.4, 0.4)
0.0052569	135.62	134.14
0.0087616	137.67	136.20
0.015771	141.11	139.76
0.029789	144.93	145.31
0.057826	146.80	152.78
0.085863	146.63	158.18
0.14194	146.77	165.49
0.25409	153.35	175.18
0.36623	162.86	182.52
0.59053	181.01	193.25
1.0391	205.49	208.19
1.4877	222.09	219.56
2.3849	242.24	235.45
3.2821	256.09	247.27
5.0764	273.90	263.40
6.8708	286.66	275.32
10.460	303.05	290.86
14.048	314.42	301.77
17.637	322.94	310.02
23.637	333.42	320.30
29.637	341.99	328.77
35.637	349.59	336.31
41.637	356.67	343.37
47.637	363.47	350.17
53.637	370.14	356.83
59.637	376.71	363.41
65.637	383.23	369.93

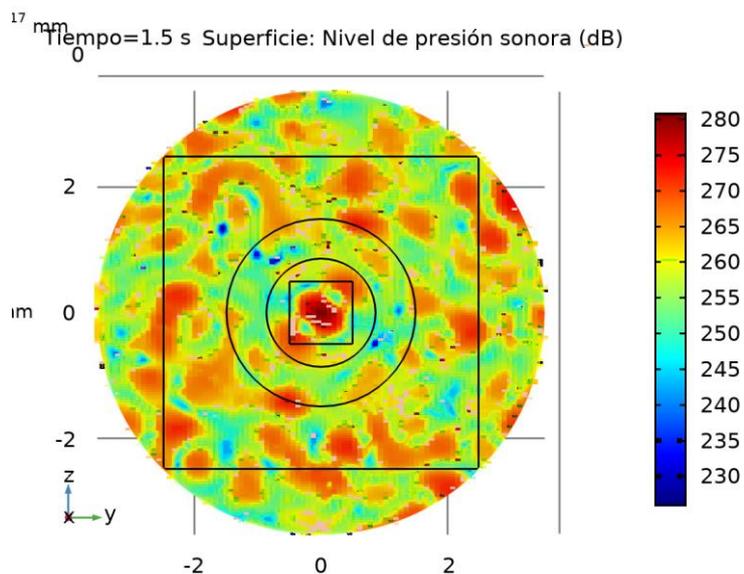
5.3 TRAZAR GRUPOS

5.3.1 Presión acústica (acpr)



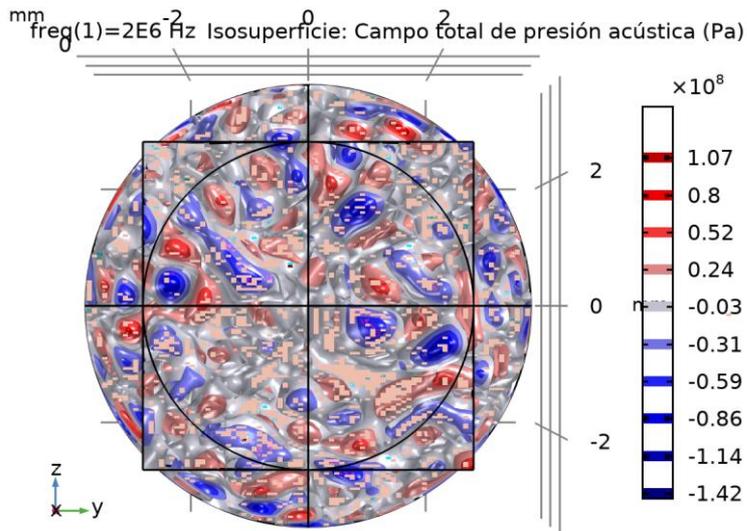
Superficie: Campo total de presión acústica (Pa)

5.3.2 Nivel de presión sonora (acpr)



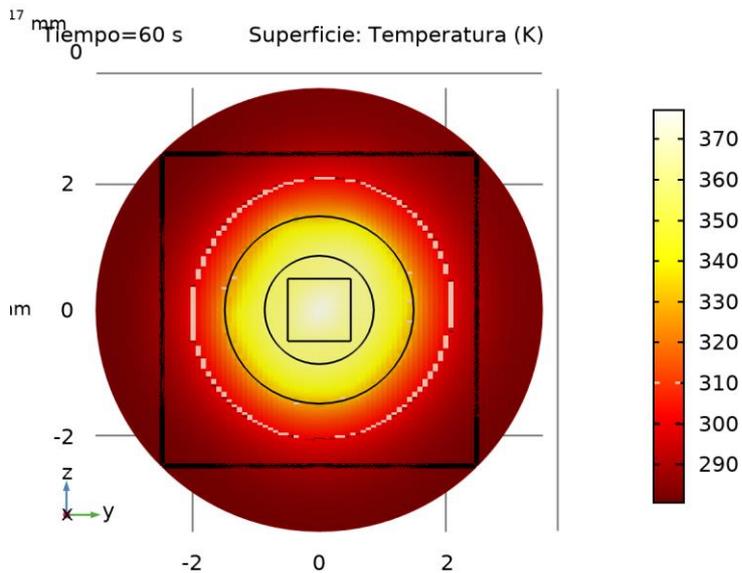
Superficie: Nivel de presión sonora (dB)

5.3.3 Presión acústica, isosuperficies (acpr)



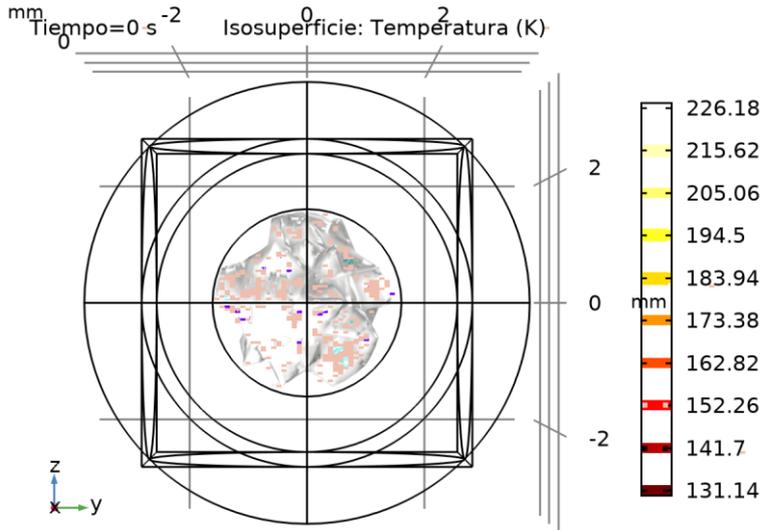
Isosuperficie: Campo total de presión acústica (Pa)

5.3.4 Temperatura (ht2)



Superficie: Temperatura (K)

5.3.5 Contornos isotérmicos (ht2)



Isosuperficie: Temperatura (K)

5.3.6 Grupo gráfico de sonda 8

