

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DE UN
MATERIAL ORGÁNICO DE CAMBIO DE FASE Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA EN UN DOMINIO CILINDRICO**

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico
Profesor Guía:
Sr. Carlos Hernán Salinas Lira

FABIÁN ESTEBAN GARCÍA GONZÁLEZ
CONCEPCION – CHILE

2014

SUMARIO

Objetivo: Determinación experimental de propiedades termo físicas de un material orgánico de cambio de fase y simulación computacional del proceso de carga y descarga en un dominio cilíndrico.

La presente tesis ha sido realizada en el marco del desarrollo del proyecto FONDECYT N° 11130168, relacionado con el almacenamiento de energía térmica mediante el uso de materiales orgánicos de cambio de fase (O-PCM) y la mejora de propiedades térmicas, a través del uso de mezclas de éstos materiales con nanopartículas. El proyecto incluye desarrollos experimentales y numéricos, además de la determinación de propiedades termo físicas y reológicas de los O-PCM y el material compuesto o nanofluido, caracterizados en función de la temperatura (283 – 313 K) y la concentración de las nano partículas (0-5% en peso).

En particular, en la presente tesis de pregrado, el primer objetivo es determinar experimentalmente la variación de la conductividad térmica, capacidad calorífica, viscosidad dinámica y densidad del O-PCM denominado hexadecano en función de su temperatura. Para evaluar la conductividad térmica se utilizó un equipo llamado KD2-Pro, a través del cual se determinó que ésta varía entre los 0.135 y los 1.087 (W/mK), para temperaturas entre 283 y 313 K. En cuanto al calor específico ha sido determinado usando un equipo DSC 2920, de lo cual resulta que ésta propiedad presenta una variación entre 1.040 y 6.040 (J/kgK) para temperaturas que varían entre 283 y 308 K, Por otra parte, la densidad ha sido determinada a través del uso de un picnómetro, resultando una variación de densidad de 764.3 a 799.5 (kg/m³) para temperaturas entre 283 y 301 K, Finalmente, para la viscosidad se ha establecido, en base a la literatura disponible, variación entre 0.00225 y 0.00348 (Pa·s) considerando temperaturas entre 293 y 313 K.

A partir de éstas mediciones se han podido establecer ecuaciones que gobiernan el comportamiento de éstas propiedades en un determinado rango de temperatura, lo cual revierte importancia relevante para concretar el segundo objetivo de éste estudio, el cual trata sobre simular computacionalmente, mediante el software ANSYS/FLUENT con licencia académica, el proceso de

carga y descarga de energía en el material orgánico de cambio de fase en un dominio cilíndrico bidimensional.

Se presentan detalles de equipos y procedimientos experimentales que se llevan a cabo en cada una de las mediciones, además de un análisis de los datos extraídos. Se estudia el conocimiento sobre los PCM. Además se presentan ecuaciones que permiten predecir el comportamiento de dichas propiedades en función de su concentración de nanopartículas.

Por otro lado, para cumplir con los objetivos, también es necesario definir la variación de las propiedades térmicas del agua en función de su temperatura, por lo que se presenta un estudio bibliográfico de sus propiedades junto con ecuaciones que describen su comportamiento.

El modelo físico simulado computacionalmente corresponde a un par de tuberías concéntricas de diferente diámetro que se disponen una dentro de la otra, permitiendo que por sus intersticios se puedan alojar los fluidos, de los cuales se desea estudiar el tiempo de solidificación y la cantidad de calor almacenado del nanofluido en función de su concentración de nanopartículas.

Se ha establecido que el tiempo de solidificación del fluido disminuye en un 4 % cuando la concentración de nanopartículas aumenta en un 5% en volumen mientras que la cantidad de calor almacenado aumenta en un 32 % bajo el mismo aumento de concentración de nanopartículas.

ÍNDICE

SUMARIO	1
ÍNDICE	3
NOMENCLATURA	5
INTRODUCCIÓN	6
DESARROLLO	8
CAPITULO 1: Almacenamiento de energía	8
1.1 Métodos de almacenamiento de energía.....	8
1.2 Almacenamiento de calor latente en cambio de fase sólido – líquido	9
1.3 Calor almacenado por un PCM	10
1.4 Uso de PCM	12
1.5 Densidad de almacenamiento	13
1.6 PCM orgánicos	14
1.7 Parafinas.....	15
1.8 Hexadecano	15
1.9 Nanofluidos	17
CAPITULO 2: Propiedades térmicas del hexadecano	18
2.1 Calor específico del Hexadecano	18
2.2 Conductividad Térmica del Hexadecano	27
2.3 Densidad del Hexadecano	40
2.4 Viscosidad dinámica del hexadecano	49
2.5 Variación de las propiedades según concentración de nano partículas.....	53
CAPITULO 3: Propiedades Térmicas del Agua	59
3.1 Densidad del Agua.....	59
3.2 Conductividad Térmica del Agua	60
3.3 Calor específico del Agua.....	61
3.4 Viscosidad del Agua	61
CAPITULO 4: Simulación computacional	63
4.1 Modelo físico	63
4.2 Modelo geométrico	64
4.3 Mallado.....	64
4.4 Situación física	65

4.5	Calculo de velocidad media de entrada del Agua y número de Prandtl.....	67
4.6	Consideraciones de la simulación.....	68
4.7	Validación.....	69
4.8.	Análisis del tamaño de malla	70
4.9	Resultados	71
	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	78
	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXOS	81

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidad de medida
Q	Calor	(W)
T	Temperatura	(K)
C	Capacidad Calorífica	(J/K)
M	Masa	(kg)
H	Entalpia	
U	Energía Interna	
P	Presión	(Pa)
V	Volumen	(m ³)
Δ_{pch}	Entalpia de cambio de fase	(kJ/kg)
T_{pc}	Temperatura de cambio de fase	(K)
C	Calor específico	(J/kgK)
c_p	Calor específico a presión constante	(J/kgK)
c_v	Calor específico a volumen constante	(J/kgK)
K	Conductividad térmica	(W/mK)
A	Área	(m ²)
X	Distancia	(m)
P	Densidad	(kg/m ³)
T	Esfuerzo cortante	(N)
μ	Viscosidad dinámica	(Pa·s)
V	Velocidad	(m/s)
ν	Viscosidad cinemática	(m ² /s)
D	Diámetro	(m)
Re	Número de Reynolds	
Pr	Número de Prandlt	
Nu	Número de Nusselt	
D_h	Diámetro hidráulico	(m)
L	Longitud	(m)
T_0	Temperatura inicial	(K)
T	Tiempo	(s)
L_c	Longitud característica	(m)

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es ampliamente sabido tanto por la comunidad científica como por el mundo en general que el precio del petróleo marca una irrevocable tendencia a la alza, esto se debe principalmente a que es un recurso no renovable, hecho que lo condena a la escases y extinción. Por otra parte, el uso de energías provenientes de la quema del petróleo y sus derivados es uno de los causantes principales del cambio climático y el calentamiento global, por lo que en los últimos tiempos, los esfuerzos por aumentar la eficiencia energética de las instalaciones, en especial las de mayor consumo, han aumentado considerablemente, constituyendo un eje primordial en las políticas de muchos países.

Por otro lado, el ajuste de la producción de electricidad a las diferentes demandas, dado el hecho de que los peaks de demanda energética varían a lo largo del día y también respecto de las estaciones del año, ha sido siempre una problemática difícil de abordar, lo que ha obligado a las autoridades a establecer tarifas diferenciadas por horarios con el objetivo de aplanar las curvas de consumo.

Dentro de las instalaciones que consumen mayor cantidad de energía por la humanidad, se encuentran las que se encargan de la climatización de ambientes, entendiendo esto como la calefacción o enfriamiento de espacios, por lo que en muchas ocasiones se hace necesario almacenar el exceso de temperatura durante el día para ser aprovechado en las noches o bien, en algunos casos, es útil el proceso inverso, es decir, almacenar el frío de un ambiente para ser utilizado en refrigeración.

Esta situación hace muy atractivo cualquier avance en la mejora de la eficiencia energética del área de la climatización, por lo que, el estudio de los PCM (Phase Change Material) adquiere importancia y no debe extrañar que la comunidad científica haya aumentado el número de publicaciones que se refieren al estudio del comportamiento de distintos materiales de cambio de fase en los últimos tiempos.

Los materiales utilizados en la climatización tienen temperaturas de cambio de fase que oscilan entre los 273 y los 373 K (0 - 100 °C), siendo favorable que presenten ciertas características,

tales como; mucha energía almacenada o liberada en dicho cambio de fase, que sean estables en el tiempo, compatibles con los materiales que los contienen, sin problemas de toxicidad o inflamabilidad y de bajo costo. Teniendo en cuenta todos estos condicionantes y que la temperatura sea la adecuada, se reducen mucho los PCM disponibles, siendo el hexadecano, un material altamente llamativo debido a que su temperatura de cambio de fase, se encuentra cercana a los 291 K (18 °C), lo que es cercano a la zona de confort de diversas aplicaciones. (Dominguez M., 2012).

En este contexto, la presente tesis se enmarca principalmente en el estudio de las propiedades térmicas del hexadecano, en cuanto a determinar experimentalmente la variación de la conductividad térmica, la capacidad calorífica, viscosidad dinámica y la densidad del material orgánico de cambio de fase (O-PCM) en función de su temperatura en un rango cercano al cambio de fase.

A partir de estas mediciones se pretende establecer ecuaciones que gobiernen el comportamiento de éstas propiedades en un determinado rango de temperaturas y adicionalmente entrelazarlas con ecuaciones que modelan la variación de estas propiedades en función de su concentración de nanopartículas. Esto entregará información suficiente para concretar el segundo objetivo de éste estudio, el cual trata sobre simular computacionalmente, mediante el software ANSYS/FLUENT con licencia académica, el proceso de carga y descarga del O-PCM en un dominio cilíndrico bidimensional lo que finalmente conlleva a concretar los objetivos del proyecto fondecyt el cual se trata sobre sintetizar un PCM a base de nanopartículas.

En éste documento se presentan los equipos y procesos experimentales que se usaron para la determinación de las propiedades mencionadas en la medición del hexadecano, además del análisis de los datos obtenidos.

DESARROLLO

CAPITULO 1: Almacenamiento de energía

1.1 Métodos de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía térmica, también llamado almacenamiento de frío y calor, trata sobre el almacenamiento de energía que existe en un determinado momento para ser utilizado más adelante. Para que esto sea posible, el método de almacenamiento tiene que ser reversible, es decir, debe tener la capacidad de absorber y liberar calor, la **figura 1.1** muestra un esquema de algunos métodos posibles divididos en procesos físicos y químicos. (Mehling H., 2008).

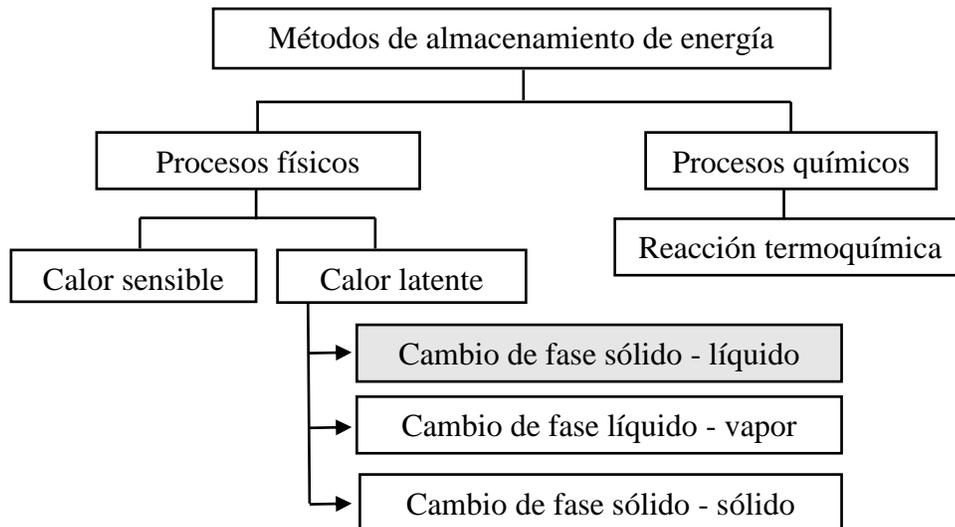


Figura 1.1. Esquema de métodos posibles de almacenamiento de energía térmica.

Existen dos formas de almacenamiento térmico desarrolladas con mayor énfasis en las últimas décadas, una por reacción termoquímica y otra por calor latente. Las reacciones termoquímicas poseen una elevada capacidad de almacenamiento térmico (hasta 350 kWh/m³), dependiendo de la reacción, pero para ello se necesitan altas temperaturas (130 °C

aproximadamente), por lo que no se aplican con estrategias de acondicionamiento de ambientes. (Mehling H., 2008).

Para éste proyecto, el estudio está centrado en el almacenamiento de energía mediante calor latente, específicamente a través del cambio de fase sólido – líquido, por lo que a continuación se presentan los conceptos básicos que rigen el comportamiento y características de éste proceso.

1.2 Almacenamiento de calor latente en cambio de fase sólido – líquido

Cuando el calor es almacenado en forma de calor latente, se utiliza un material de cambio de fase, o PCM, cuya principal característica es que su temperatura de cambio de fase ocurre a la temperatura que requiere la aplicación para la que es escogido. Existen distintas opciones con distintas ventajas y desventajas y se hace necesario un conocimiento amplio del espectro de posibilidades, como también de los requerimientos de la aplicación para poder seleccionar el material más adecuado.

El cambio de fase sólido-líquido, que ocurre por los procesos de fusión y solidificación del material, puede almacenar grandes cantidades de energía térmica o al menos mucho más en comparación con el calor sensible, siempre que hayan sido escogidos los materiales adecuados. La fusión y solidificación se caracteriza por un pequeño cambio de volumen, que por lo general es inferior a un 10%. Luego, si para el recipiente que contiene al PCM se ha considerado ésta variación de volumen de forma que el material pueda expandirse con espacio suficiente, entonces la presión del líquido no cambia significativamente y por lo tanto la fusión y solidificación del PCM ocurren a una temperatura constante. De ésta forma, todo el calor que se transfiere al material, es ocupado en efectuar el cambio de fase del mismo y no en aumentar su temperatura, la cual se mantiene constante. La **figura 1.2** muestra un gráfico que esquematiza éste proceso y compara la diferencia de la cantidad de calor almacenado por calor latente y calor sensible. (Mehling H., 2008)

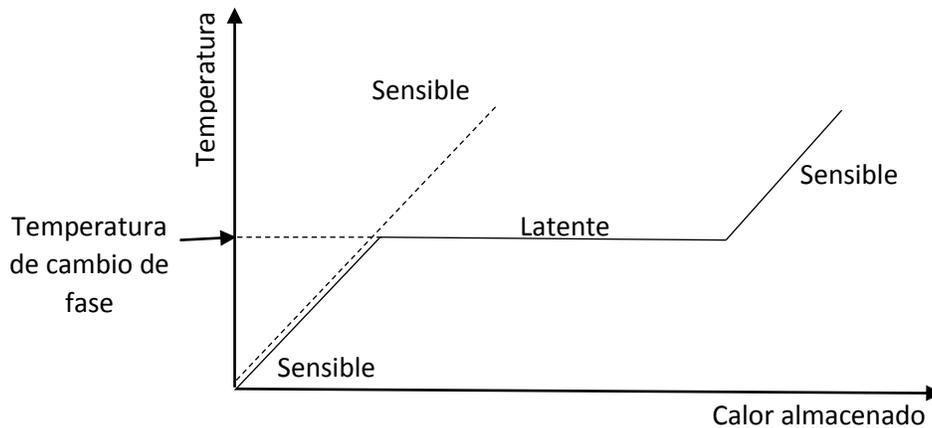


Figura 1.2. Almacenamiento de calor como calor latente para el caso de cambio de fase sólido - líquido

La **figura 1.2** muestra el proceso de absorción de energía de un material que se encuentra inicialmente en estado sólido. Cuando el calor es adicionado al material, éste comienza a almacenar energía en forma de calor sensible, lo que se traduce en un aumento de su temperatura, pero alcanzada la temperatura de cambio de fase, el calor comienza a ser almacenado en forma de calor latente, lo que significa que la temperatura se mantendrá constante hasta que se complete el cambio de estado. Luego de esto, vuelve a producirse el almacenamiento en forma de calor sensible.

1.3 Calor almacenado por un PCM

La inercia térmica de los materiales ha sido aprovechada durante mucho tiempo para regular la temperatura de los ambientes. En toda obra civil, los materiales de construcción tienen alguna capacidad de almacenamiento de calor, la cual puede ser significativa. Gracias a la gran masa de materiales las construcciones gruesas se caracterizan por su buena estabilidad térmica. Sin embargo, la construcción actual tiene una tendencia hacia la ligereza de sus componentes constructivos, lo cual va en desmedro de la cualidad térmica de la edificación. En este contexto incorporar O-PCM a las edificaciones es una buena alternativa para mejorar la estabilidad térmica de edificaciones ligeras. Sin embargo, la capacidad de cambiar de fase de todos los materiales, está limitada a una sola temperatura fija, por lo que solo aquellos PCM que cambian de fase en temperaturas de trabajo son los llamados a reducir notablemente el volumen de acumulación y permitir su integración

arquitectónica en sistemas prefabricados novedosos o en sistemas constructivos convencionales. (Neila, 2008).

La cantidad de calor almacenado en un intervalo de temperaturas es la característica más importante de los PCM, por lo tanto a continuación se repasan los fundamentos que rigen su calorimetría.

El calor almacenado puede ser expresado como:

$$dQ = \frac{dQ}{dT} \cdot dT = C \cdot dT = mc\Delta T \quad (1.1)$$

Esta ecuación define la relación entre el calor almacenado dQ y la capacidad calorífica C (J/K) que puede expresarse también con respecto a su masa c (J/kgK), el volumen (J/m^3K) o la cantidad de materia (J/mol·k). La capacidad calorífica también depende de las condiciones de contorno como la presión y el volumen, que se denotan como C_p y C_v respectivamente de acuerdo a la variable que se considere constante. Sin embargo para el calor latente, no es posible utilizar ésta fórmula, dado que la temperatura es constante, por lo tanto, la **expresión 1.1** sólo sirve para calcular el calor sensible de un PCM. Alternativamente, para determinar el calor latente se usa el concepto de entalpia:

$$H = U + pV \quad (1.2)$$

Considerando la primera ley de la termodinámica, siendo pV el trabajo de deformación,

$$dU = dQ - pdV \quad (1.3)$$

combinando (1.2) y (1.3) se tiene:

$$dH = dQ + Vdp \quad (1.4)$$

En particular, para presión constante, resulta:

$$dH = dQ \quad (1.5)$$

y en consecuencia, también:

$$\Delta H = \Delta Q = m\Delta h = m\Delta_{pc}h \quad (1.6)$$

El calor latente, que es el calor almacenado durante el proceso de cambio de fase, se calcula entonces a partir de la diferencia de entalpía ΔH entre la fase sólida y la fase líquida. En el caso de cambio de fase sólido-líquido, se llama entalpía de cambio de fase sólido-líquido, entalpía de cambio de fase, o calor de fusión y se denota por $\Delta_{pc}h$. A su vez, la temperatura de cambio de fase se denota por T_{pc} .

Por lo tanto, los cambios de entalpía dH y de calor dQ se utilizan a menudo como sinónimos cuando se trata de sólidos y líquidos desde un punto de vista de la física, pero hay una diferencia importante entre H y Q . (Mehling H., 2008).

1.4 Uso de PCM

Los PCM al necesitar una gran cantidad de calor para cambiar de estado, son ideales para cumplir la función de almacenamiento de energía y reducir el espacio de las instalaciones, principalmente para mantener temperaturas estables en edificación u otras aplicaciones. Incluso puede evitarse el uso de equipos de producción de frío y calor en ciertos casos en que solo son suficientes las variaciones de temperatura del aire del ambiente captando el frío o calor en paquetes acumuladores y restituyéndolos oportunamente. (Dominguez M., 2012).

Entre los posibles ámbitos de aplicación del PCM se pueden encontrar directamente de la diferencia básica entre el almacenamiento de calor sensible y latente. Ejemplos de ello son el uso de hielo para mantener las bebidas y los alimentos fríos, la estabilización de la temperatura interior en un edificio, o la temperatura en cajas de transporte.

El almacenamiento de calor latente por PCM es preferible al almacenamiento por calor sensible en aplicaciones que involucran pequeños cambios de temperatura dado que éste es prácticamente isotérmico.

Cuando ocurre un salto de temperatura, el PCM absorbe la energía excesiva cambiando de fase y luego la devuelve en un tiempo posterior. El almacenamiento puede ser dimensionado de tal forma que la temperatura sea mantenida en un rango específico mientras que al mismo tiempo el exceso de energía es absorbido.

Actualmente los PCM son motivo de activo estudio, siendo los ácidos grasos, parafinas y sales los más usados. Sin embargo, nuevos materiales han aparecido en el mercado en los últimos años, que tienen la particularidad de cambiar de fase a diversas temperaturas.

Además se ha descubierto que la mezcla de éstos compuestos con nanopartículas puede mejorar sus propiedades térmicas, aumentando su eficiencia y las aplicaciones en las que puede ser utilizado.

1.5 Densidad de almacenamiento

Desde otro punto de vista, los PCM también son capaces de almacenar grandes cantidades de energía en un rango de temperatura relativamente pequeño. Una comparación de las densidades de almacenamiento de energía logrado con diferentes métodos es mostrado en la **tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Densidad de almacenamiento de algunos materiales. (Mehling H., 2008)

Elemento	MJ/m ³	kJ/kg	Comentario
Calor Sensible			
Granito	50	17	$\Delta T = 293 \text{ K}$
Agua	84	84	$\Delta T = 293 \text{ K}$
Calor Latente de fusión			
Agua	306	330	$T_{\text{fusión}} = 273 \text{ K}$
Parafinas	180	200	$T_{\text{fusión}} = 278 \text{ K} - 403 \text{ K}$
Sales	600 - 1500	300 - 700	$T_{\text{fusión}} = 573 \text{ K} - 1073 \text{ K}$

Como muestra la **tabla 1.1**, los PCM pueden almacenar alrededor de 3 a 4 veces más calor por unidad de volumen que si se almacena como calor sensible en los sólidos o líquidos. Esto puede ser una ventaja significativa en muchas aplicaciones como en la calefacción doméstica.

1.6 PCM orgánicos

Dentro de los PCM orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias diferentes: parafinas, ácidos grasos, y mezclas orgánicas. Los PCM orgánicos (O-PCM) poseen características que los hacen muy útiles en su aplicación para el almacenamiento de calor latente. Cuentan con una alta estabilidad química en comparación con las sustancias inorgánicas, por una parte funden y solidifican convenientemente, sin necesidad de adicionar agentes nucleadores (sustancia química que se utiliza para crear núcleos y formar cristales dentro del polímero) y por otro lado no sufren subenfriamiento o histéresis (enfriamiento por debajo del punto de solidificación pero sin solidificar, lo que ocurre por la formación de estructuras cristalinas durante un estado termodinámicamente metaestable).

El costo inicial de un O-PCM es alto. Incluso es superior al de un PCM inorgánico, sin embargo, su costo es competitivo. De todas formas estos materiales tienen algunas desventajas. La más importante es que son inflamables y emiten gases nocivos durante su combustión, además, sufren envejecimiento por oxidación, cambios de olor y de volumen apreciables. Aunque estos inconvenientes se han eliminado con el tiempo, por ejemplo se ha visto que el envejecimiento por oxidación de los PCM puede ser disminuido usando un oxidante adecuado. A continuación se presenta una tabla que resume sus ventajas y desventajas.

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de los PCM orgánicos. (Mehling H., 2008)

Ventajas	Desventajas
Fáciles de usar	Calor latente y entalpía más bajos
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
No sufren Subenfriamiento	Amplio rango de fusión*
No necesitan agente nucleador para solidificar	Grandes cambios de volumen durante el cambio de fase
No son corrosivos	Reacción potencial con hormigón
Reciclables y ecológicamente inocuos	Potencialmente combustibles
	Más caros

*Especialmente las parafinas, por las diferentes longitudes de sus cadenas de carbono.

1.7 Parafinas

Las parafinas son básicamente alcalinos sólidos refinados, que muestran por lo general dos rangos de enfriamiento, uno más estrecho para un breve periodo de tiempo, y otro más extenso que ocurre durante un periodo más amplio. Ambos se conciben como una transición de líquido a pastoso y pastoso a sólido, respectivamente y parte del calor latente total de fusión se almacena en la sustancia durante cada una de estas transiciones.

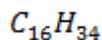
La mayoría de las investigaciones centran su trabajo en materiales orgánicos del tipo alcanos, ceras o parafinas, lo que ha proporcionado una amplia información sobre las propiedades termo físicas de algunas parafinas y ceras, ya que desde el punto de vista práctico de aplicación, cuentan con mayor grado de utilización debido a su temperatura de fusión lo que se ejemplifica en la siguiente tabla:

Tabla 1.3. Valores típicos de energía almacenada de parafinas con temperatura de fusión próxima a la temperatura de confort. (Oliver A., 2007)

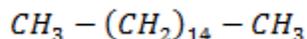
PCM	Temperatura de fusión (K)	Q de fusión (KJ/kg)
Hexadecano	291	236
Heptadecano	295	214
Octadecano	301	244
Parafina	293 – 333	200
RT25	298	147

1.8 Hexadecano

El Hexadecano (antiguamente también denominado cetano o en IUPAC n-hexadecano) es un hidrocarburo de la familia de los alcanos y cuya fórmula química molecular es:



O bien en su forma semidesarrollada:



Su estructura consiste en una cadena lineal de 16 átomos de carbono, con tres hidrógenos unidos a cada uno de los dos carbonos extremos y dos hidrógenos unidos a los restantes 14 átomos de carbono como lo muestra la **figura 1.3** y cuyo peso molecular es de 226,41 g/mol.

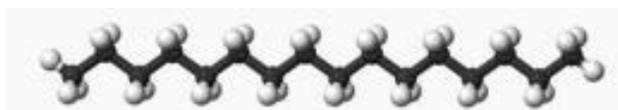


Figura 1.3. Molécula de Hexadecano

Y en su forma estructural se grafica como lo muestra la **figura 1.4**.



Figura 1.4. Imagen estructural del Hexadecano

Naturalmente se ha encontrado en el aceite de pétalo de rosas, el aceite de pimienta larga *Piper longum* y de la madera de *Manilkara bidentata*.

A temperatura ambiente de 298 K (25 °C) (salvo que se indique lo contrario) es un líquido incoloro insoluble al agua. Su punto de fusión es de 291 K (18 °C) y el de ebullición es de 560 K (287 °C), su calor de fusión es de 236 kJ/kg, la viscosidad cinemática es de aproximadamente 7 mm²/s (313 K) y la viscosidad dinámica es aproximadamente de 3.10 x 10⁻³ Pa·s, su densidad es de aproximadamente 773 kg/m³ mientras que la conductividad térmica bordea los 0.135 W/mK y su calor específico es de aproximadamente 2.20 (± 0.1093) kJ/kgK. Los valores aquí mencionados sirven de referencia para el desarrollo experimental, en el que se utiliza Hexadecano de 99% de pureza.

1.9 Nanofluidos

Los nanofluidos son soluciones coloidales de partículas de tamaño nanométrico como metales, óxidos metálicos o nanotubos de carbono disueltos en un fluido base como agua, etilenglicol o parafinas. Éstos poseen propiedades interesantes que los hacen útiles en varias aplicaciones de transferencia de calor, tales como enfriamiento de motores automotrices, refrigeración doméstica, intercambiadores de calor y almacenamiento de energía térmica entre otros. Hoy en día los estudios con nanofluidos se enfocan principalmente al diseño de intercambiadores más pequeños y eficientes.

Existen principalmente dos técnicas para sintetizar nanofluidos; el método de dos pasos y la técnica de evaporación directa o método de un solo paso, descrito por (Zhu, 2004).

Se ha estudiado experimentalmente que la dispersión de una pequeña cantidad de nanopartículas en un fluido base, incrementa notablemente su conductividad térmica y se ha demostrado que nanofluidos con nanopartículas de CuO y Al_2O_3 aumentan su conductividad térmica en un 20% y un 30%, respectivamente. Por otra parte se han realizado pruebas para verificar el aumento de la tasa de transferencia de calor en nanofluidos con varios tipos de nanopartículas (Cu, Al, C/Cu) en un O-PCM. Los experimentos realizados arrojaron mejores resultados con nanopartículas de cobre estabilizadas con un dispersante. Los tiempos de calentamiento y enfriamiento fueron reducidos en un 30.3% y 28.2%, respectivamente (Wu, 2010).

En la actualidad, no existe una teoría general para predecir las propiedades térmicas de los nanofluidos, las cuales dependen de las propiedades térmicas del fluido puro y las nanopartículas, la concentración volumétrica, el área superficial y la forma de las nanopartículas (Murshed, 2008). Sin embargo, existen varias correlaciones semi-empíricas usadas para calcular las propiedades térmicas aparentes de mezclas bifásicas.

La información experimental para las propiedades térmicas de los nanofluidos es limitada, sin embargo es posible encontrar en la bibliografía expresiones matemáticas que modifican las

propiedades originales de un fluido al adicionarse una cierta concentración de nanopartículas que permiten acercarse a los datos experimentales de forma relativamente confiable. (Vasco D., 2013).

CAPITULO 2: Propiedades térmicas del hexadecano

Para cumplir el primer objetivo, es necesario conocer las siguientes propiedades termo físicas del fluido; el calor específico, la conductividad térmica, la densidad y la viscosidad dinámica. Si bien es cierto que, en la literatura es posible encontrar valores de referencia de éstas propiedades para el hexadecano, interesa aquí su determinación en función de la temperatura, particularmente en un rango cercano a su temperatura de fusión. Por lo tanto, dado que la temperatura de fusión del hexadecano es de 291 K, el rango de interés se ha establecido entre los 283 y los 313 K. A continuación se detallan particularidades de cada una de éstas propiedades, su determinación y los resultados obtenidos.

2.1 Calor específico del Hexadecano

2.1.1 Definición:

El calor específico es una propiedad que denota la capacidad de almacenamiento de energía de una sustancia y se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de la unidad de masa de una sustancia. En general, esta energía depende de cómo se ejecute el proceso de elevación de temperatura. En consecuencia se tiene dos tipos de calor específico: a volumen constante c_v y a presión constante c_p . El c_p es siempre mayor que c_v porque a presión constante se permite que el sistema se expanda y la energía para este trabajo de expansión también debe ser suministrada al sistema (Cengel A. Yunes, 2009).

El calor específico medio (\hat{c}) correspondiente a un cierto intervalo de temperaturas ΔT se define como:

$$\hat{c} = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.1)$$

Luego el calor específico (c) correspondiente a una temperatura dada se define como:

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (2.2)$$

El calor específico en el SI tiene unidades de J/kg·K y según la bibliografía, éste tiene un valor de referencia de 2 200 (± 109.3) J/kgK a 298 K (25 °C) para el Hexadecano. Éste ha sido medido por (Todd, 1967) en un amplio rango de temperaturas (20 a 280 K) en intervalos de 10 K, sin embargo interesa obtener datos en intervalos más pequeños y en un rango de 283 a 308 K.

Cuando ocurre un cambio de fase, teóricamente el calor específico tiene un valor infinito, lo cual no tiene una interpretación física.

2.1.2 Metodología:

La medición del calor específico en función de la temperatura se ha realizado con un equipo denominado DSC 2920 Modulated DSC mostrado en la **figura 2.1**, el cual realiza un barrido de temperaturas adicionando un flujo de calor conocido dentro del rango de temperaturas de interés a un crisol que contiene una masa conocida del fluido estudiado, ver **figura 2.2**.

El resultado obtenido es el calor específico para un rango dado de temperaturas y además de entregar un gráfico de flujo de calor \dot{Q} vs temperatura, que permite determinar la entalpía de cambio de fase. Se ha realizado una réplica de cada experimento.

El rango de temperaturas seleccionado ha sido desde los 268 hasta 308 K (-5 a 35 °C). Se observa que para efectos del proyecto son de interés valores a partir de los 283 K (10 °C). Sin embargo se excede el límite inferior de temperatura para permitir que el equipo entre en régimen de medición previo al rango de interés.



Figura 2.1. Equipo DSC 2920 Modulated.

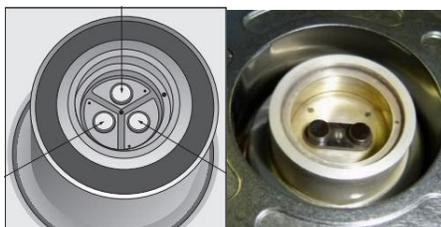


Figura 2.2. Instalación de crisol.

2.1.3 Resultados:

La **figura 2.3** muestra un gráfico con los resultados de Flujo de calor (W/g) v/s temperatura ($^{\circ}C$).

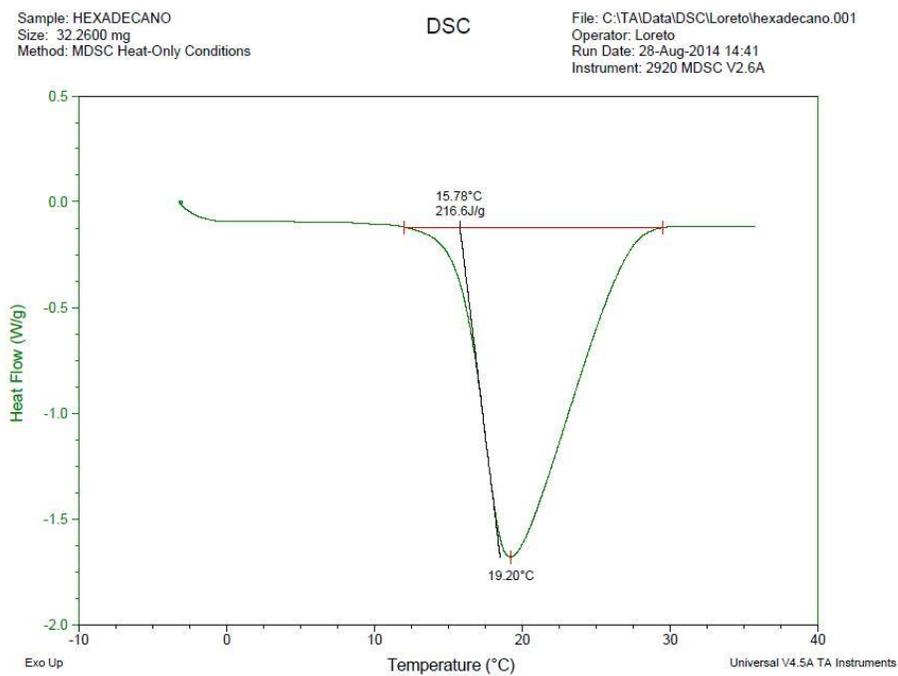


Figura 2.3. Flujo de calor (W/g) v/s Temperatura ($^{\circ}C$) del fluido Hexadecano

Del gráfico se puede obtener la entalpia de cambio de fase calculando el área sobre la curva como se muestra en la figura, la cual equivale a:

$$\Delta_{pc}h = 216\ 600 \left(\frac{J}{kg} \right)$$

Valor que difiere de lo estudiado en la literatura (236 kJ/kg) en un valor cercano al 8 %.

Los resultados de la medición del Calor específico en función de la temperatura se muestran en las columnas 2 y 6 de la **tabla 2.1**, estos datos han sido resumidos para facilitar su visualización en este documento, sin embargo la cantidad de valores obtenidos es más grande. En la tabla, en las columnas 3 y 7 se incluye el valor del calor específico calculado a través de la función que se describe más adelante, con el subíndice “f” que indica que es un valor calculado a través de la función y de acuerdo a la temperatura correspondiente. Finalmente se incluye un cálculo del error que compara el valor medido con el valor calculado a través de la función, lo que indica el nivel de precisión de la curva obtenida cuyo error promedio es de 2,76%.

Una comparación entre los resultados medidos versus los obtenidos a través de la función puede verse en la gráfica de la **figura 2.4**, en donde se muestra en azul los resultados de los valores medidos, mientras que en naranja se muestran los resultados obtenidos a través de la función.

Tabla 2.1. Valores de calor específico experimental y calculado para distintas temperaturas y error asociado del Hexadecano.

T (K)	c (J/kgK)	c_f (J/kgK)	error	T (K)	c (J/kgK)	c_f (J/kgK)	error
283.15	1863.61	1858.63	0.27%	296.17	1186.96	1109.92	6.49%
283.65	1914.13	1913.06	0.06%	296.66	1120.40	1053.42	5.98%
284.15	1962.52	1967.52	0.25%	297.17	1068.36	1029.64	3.62%
284.66	2009.45	2022.84	0.67%	297.67	1041.62	1036.59	0.48%
285.16	2089.82	2077.62	0.58%	298.17	1043.53	1069.82	2.52%
285.65	2178.11	2094.38	3.84%	298.66	1075.05	1124.83	4.63%
286.16	2337.99	2202.63	5.79%	299.16	1133.11	1198.91	5.81%
286.66	2613.06	2497.65	4.42%	299.66	1208.64	1287.03	6.49%
287.15	2928.99	2926.28	0.09%	300.16	1303.44	1386.83	6.40%
287.65	3330.86	3445.32	3.44%	300.65	1432.47	1492.38	4.18%
288.16	3890.77	4010.18	3.07%	301.16	1639.74	1603.30	2.22%
288.65	4425.96	4558.96	3.00%	301.65	1867.64	1710.57	8.41%
289.15	4819.74	5046.59	4.71%	302.16	1969.45	1815.43	7.82%
289.65	5436.35	5425.27	0.20%	302.66	1921.86	1909.49	0.64%
290.15	6039.93	5644.04	6.55%	303.16	1844.82	1840.15	0.25%
290.65	5917.66	5652.36	4.48%	303.66	1811.85	1820.48	0.48%
291.15	5565.64	5397.02	3.03%	304.16	1817.45	1818.09	0.03%
291.65	4491.98	4827.32	7.47%	304.65	1831.44	1825.42	0.33%
292.16	3447.58	3265.51	5.28%	305.15	1837.71	1835.60	0.11%
292.66	2868.30	2798.93	2.42%	305.66	1836.51	1841.09	0.25%
293.15	2368.10	2395.92	1.17%	306.15	1835.67	1836.27	0.03%
293.66	1972.21	2048.21	3.85%	306.66	1835.59	1835.36	0.01%
294.16	1696.91	1759.86	3.71%	307.15	1835.20	1834.46	0.04%
294.66	1506.14	1529.34	1.54%	307.66	1833.57	1833.53	0.00%
295.17	1365.59	1342.74	1.67%	308.16	1832.30	1832.58	0.02%
295.66	1267.01	1207.10	4.73%	308.65	1831.50	1831.65	0.01%
						Promedio Error	2.76%

Es posible entonces obtener a partir de ésta tabla, una gráfica que esquematice el comportamiento de la conductividad térmica del Hexadecano en función de su temperatura, la **figura 2.4** muestra a continuación un gráfico que esquematiza ésta relación.

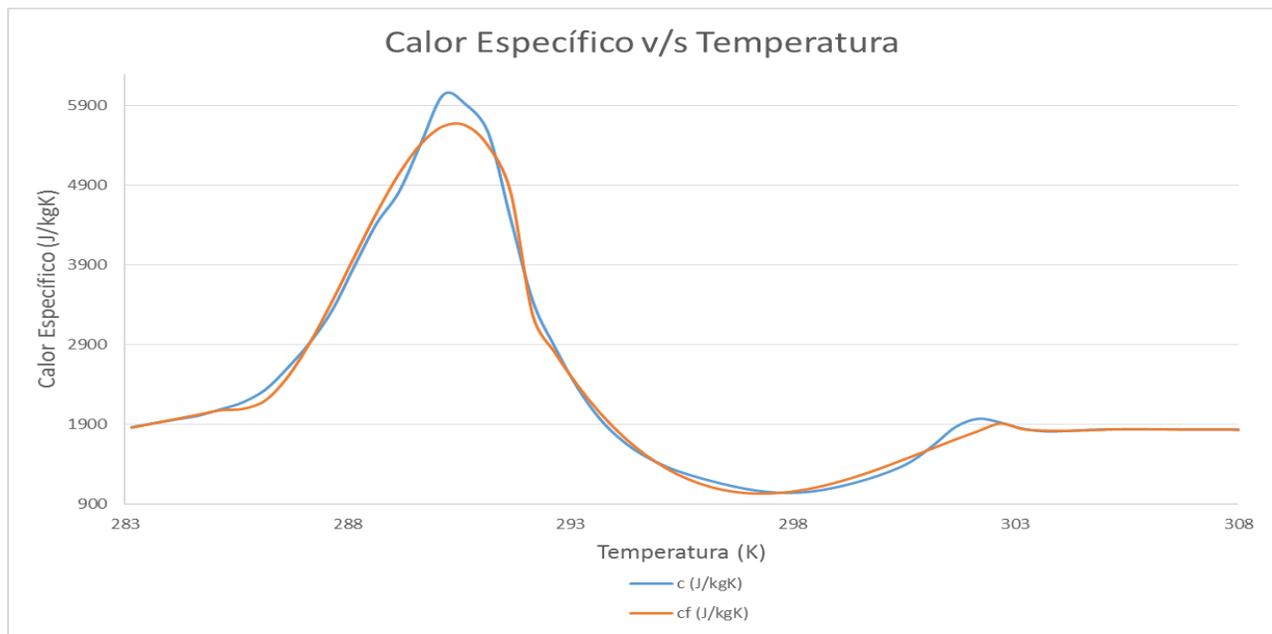


Figura 2.4. Gráfica de Calor específico ^v/s Temperatura del Hexadecano y comparación de la gráfica original respecto de la función obtenida.

Si bien es cierto, el calor específico a la temperatura de cambio de fase teóricamente debiera mostrar una tendencia al infinito, esto no está esquematizado en el gráfico de la **figura 2.4**, dado que se ha medido el calor específico justo antes y después del cambio de fase, pero no es posible hacerlo experimentalmente justo al momento del cambio de fase. La gráfica se presenta entonces como si fuera continua, de manera que pueda ser ocupada su función en la simulación computacional mostrada en el capítulo 4.

De la gráfica y usando el software CurveExpert 14.0 es posible extraer una función matemática que relaciona la temperatura con el calor específico de la muestra, la cual se presenta a continuación dividida en tramos para asegurar una mayor exactitud.

$$c(T) = a + bT + cT^2, \text{ para } 283 \leq T \leq 285 \quad (2.3)$$

$$c(T) = d + eT + fT^2 + gT^3 + hT^4, \text{ para } 285 \leq T \leq 292 \quad (2.4)$$

$$c(T) = i + jT + kT^2 + lT^3 + mT^4, \text{ para } 292 \leq T \leq 303 \quad (2.5)$$

$$c(T) = n + oT + pT^2 + qT^3 + rT^4 + sT^5, \text{ para } 303 \leq T \leq 306 \quad (2.6)$$

$$c(T) = t + uT + vT^2, \text{ para } 306 \leq T \leq 308,5 \tag{2.7}$$

Los valores de los coeficientes que acompañan éstas ecuaciones se indican en la **tabla 2.2**.

Tabla 2.2. Valores de coeficientes de la función de calor específico v/s temperatura

a	$1.76596137763 \times 10^{-4}$	i	$7.31281050427 \times 10^7$	p	$-7.99290124566 \times 10^2$
b	$-9.51658326556 \times 10^1$	j	$-4.92930037649 \times 10^5$	q	$-4.03831357041 \times 10^{-1}$
c	$3.59278880559 \times 10^{-1}$	k	$6.84082265794 \times 10^1$	r	$2.16143070257 \times 10^{-2}$
d	$7.55241072854 \times 10^8$	l	5.13910053852	s	$-3.84171950754 \times 10^{-5}$
e	$-4.97767771056 \times 10^6$	m	$-8.66175232887 \times 10^{-3}$	t	$-1.20183000604 \times 10^{-5}$
f	$-2.78338553437 \times 10^3$	n	$5.82664180407 \times 10^7$	u	$1.37798456713 \times 10^1$
g	$7.28892794435 \times 10^1$	n	$5.82664180407 \times 10^7$	v	$-2.541858866 \times 10^{-2}$
h	$-1.20931122443 \times 10^{-1}$	o	$-1.90487171276 \times 10^5$		

En la **tabla 2.1** es posible apreciar en la tercera y séptima columnas los valores del calor específico calculados a través de la función encontrada, de donde se puede calcular el error en comparación con los valores medidos, y cuyo promedio no excede el 2.76 %.

Los valores residuales, de cada una de las secciones de la función encontrada se muestran a continuación.

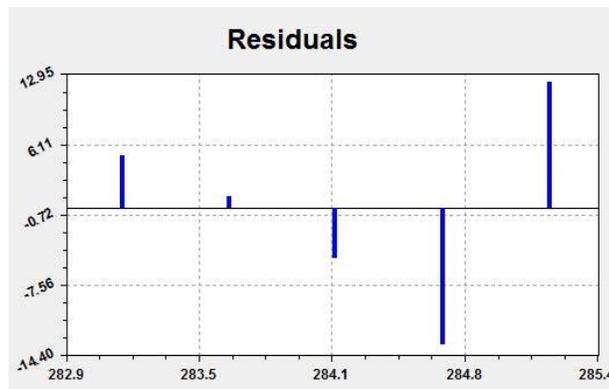


Figura 2.5. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.3

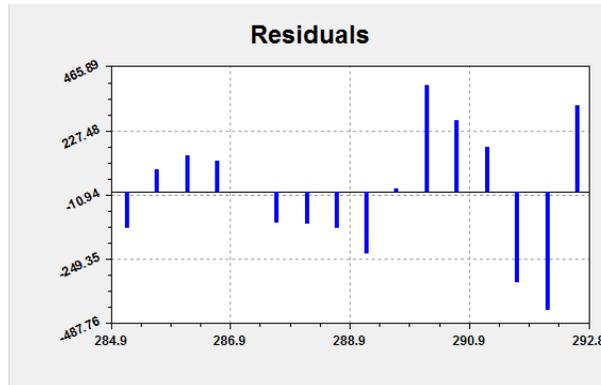


Figura 2.6. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.4

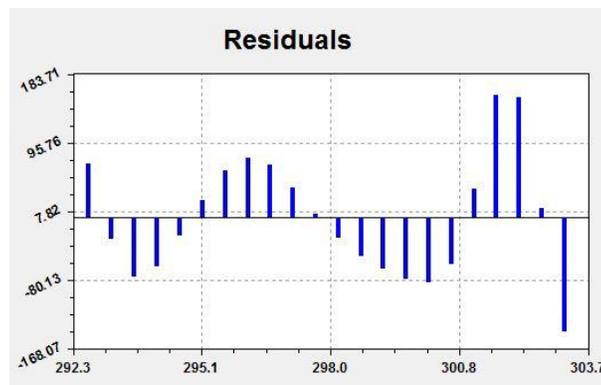


Figura 2.7. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.5

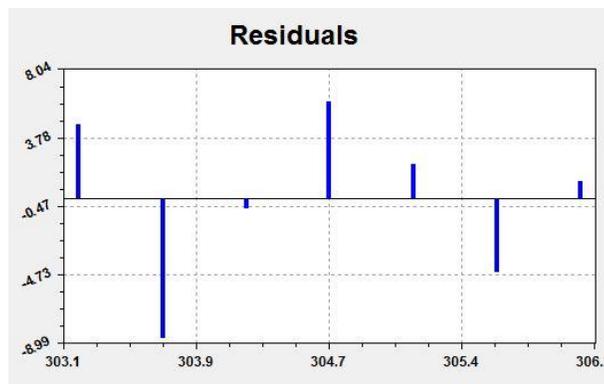


Figura 2.8. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.6

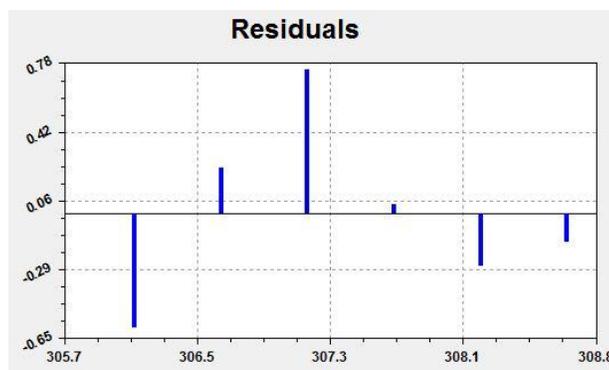


Figura 2.9. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.7

Los valores de la desviación estándar y el coeficiente de correlación de cada una de las ecuaciones que componen la función de calor específico encontrada se muestran en la **tabla 2.3**.

Tabla 2.3. Desviación estándar y coeficiente de correlación asociado a cada una de las ecuaciones que componen la función de calor específico.

Ecuación	Desviación estándar (s)	Coficiente de correlación (r)
2.3	11.2385508	0.9999418
2.4	272.7415019	0.9853491
2.5	86.4959070	0.9868965
2.6	12.6241552	0.8999465
2.7	0.5143885	0.9999998

2.1.4 Conclusiones:

La entalpía de cambio de fase se encuentra cercana a los 216,6 (J/g) lo que coincide con el valor de referencia con una diferencia aproximada de 8.47 %.

El calor específico del hexadecano oscila entre los 1 040 y los 6 040 (J/kgK) cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 308 K, ésta variación no es lineal, ya que presenta ciertas oscilaciones a lo largo del rango de temperaturas mencionado, mostrando un incremento en la región sólida llegando a un máximo en la zona de cambio de fase y luego un decremento en la región líquida, finalmente a partir de los 302 K el calor específico del hexadecano muestra un comportamiento prácticamente constante.

El hecho de que el calor específico presente un peak justo en una vecindad cercana a la temperatura de cambio de fase es una buena noticia, ya que se infiere que la capacidad de almacenamiento de energía del fluido es mayor justo en la zona de interés, por lo que la energía almacenada también tendrá un peak en esa zona.

Se ha podido establecer una función que describe el comportamiento del calor específico del hexadecano cuyo parámetro es su temperatura, ésta función está dividida por tramos para asegurar una mayor exactitud de los datos. La **tabla 2.1** en la cuarta y octava columnas, muestra el porcentaje de error que corresponde a los valores residuales entre los datos obtenidos de las mediciones y los valores que pueden obtenerse a través del uso de la función encontrada a la misma temperatura, el cual es en promedio de un 2.76 % lo que permite usar la función encontrada con un grado óptimo de seguridad. Esta función se presenta de forma continua en la zona de cambio de fase, para asegurar que pueda servir para la simulación computacional que se muestra en el capítulo 4, sin embargo se debe notar que en la zona de cambio de fase, el calor específico es teóricamente infinito.

Las desviaciones estándar de las ecuaciones que componen la función presentan valores pequeños en comparación con la dimensión de los valores totales de calor específico, si bien es cierto, para el rango de temperaturas en que se encuentra la **ecuación 2.4** el valor parece grande, pero éste se considera aceptable para los objetivos de éste proyecto. Por otro lado el coeficiente de correlación de todas las funciones se encuentra cercano a la unidad, lo que permite concluir que las variables temperatura y calor específico presentan una dependencia casi total, es decir, que ambas variables son dependientes una de la otra.

2.2 Conductividad Térmica del Hexadecano

2.2.1 Definición:

La Conductividad Térmica se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor y puede calcularse de la siguiente forma:

$$k = \frac{\dot{Q}_{cond}}{A} \times \frac{\Delta x}{T_2 - T_1} \quad (2.8)$$

Donde:

k : conductividad termica

\dot{Q}_{cond} : calor de conducción

A : area de transferencia de calor

Δx : longitud o espesor del material

$T_2 - T_1$: diferencia de temperaturas

Las conductividades térmicas de los líquidos suelen encontrarse entre las de los sólidos y las de los gases, normalmente, alcanza su valor máximo en la fase sólida y el mínimo en la fase gaseosa. Las conductividades térmicas de la mayor parte de los líquidos decrecen al incrementarse la temperatura y disminuyen al aumentarse la masa molar. (Cengel, 2007)

La conductividad térmica se expresa en las unidades W/mK y su valor de referencia para el hexadecano a 293 K (20 °C) es de 0.135 W/mK lo que entrega una orientación sobre el experimento que se llevará a cabo. Esta propiedad ha sido medido por (Mustafaev, 1973) en un amplio rango de temperaturas (313 a 473 K) en intervalos de 20 K, sin embargo interesa obtener datos en intervalos más pequeños y en un rango de 283 a 313 K.

2.2.2 Metodología:

Para obtener la conductividad térmica se ha utilizado un equipo KD2-Pro que se muestra en la **figura 2.10**. Como es necesario regular la temperatura, el fluido es sumergido en un baño termo regulado que se muestra en la **figura 2.11**. El KD2-Pro realiza la medición de conductividad térmica adicionando un flujo de calor conocido a intervalos de tiempo regulados a través de una sonda que es sumergida en el material, luego calcula la conductividad térmica usando la **fórmula 2.9**.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x} (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

Donde:

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$: calor transmitido por unidad de tiempo

A : área de transferencia de calor

x : espesor del material

$(T_1 - T_2)$: diferencia de temperaturas

k : conductividad térmica

Luego, conocidos el flujo de calor, las dimensiones de la sonda, solo resta medir la temperatura del compuesto en los intervalos de tiempo establecidos y el equipo calcula de forma análoga la conductividad térmica.



Figura 2.10. Equipo KD2-Pro



Figura 2.11. Baño termo regulado

2.2.3 Procedimiento:

2.2.3.1 Objetivo:

Establecer el procedimiento experimental de medición de la conductividad térmica en un fluido de acuerdo a la variación de temperatura usando un equipo KD2-Pro y un baño termo regulado Lab-Tec BL-20.

2.2.3.2 Método:

El fluido a utilizar es hexadecano, el cual tiene una temperatura de cambio de fase Sólido – Líquido de 291 K (18 °C), por lo tanto y dado que el sensor a utilizar por el equipo es distinto para cada una de las fases sólida y líquida, es que la medición se dividirá en dos procedimientos. El primero haciendo variar la temperatura en forma descendiente desde los 313 K (40 °C) hasta los 291 K (18 °C) (líquido) y el segundo en forma creciente desde los 283 K (10 °C) hasta los 289 K (16 °C) (sólido).

2.2.3.3 Equipos:

- KD2-Pro (sensores *KS-1* para líquidos y *SH-1* para sólidos)

- Baño termo regulado Lab-Tec BL-20
- Tubo de ensayo (\varnothing 30 mm largo 80 mm)
- Soporte universal
- 2 Pinzas o tenazas
- Piseta con agua destilada
- Pipeta
- Pipeteador
- Toallas de papel
- Acetona
- Fluido (Hexadecano)

2.2.3.4 Montaje experimental 313 – 291 K (18 – 40 °C):

1. Limpiar material a utilizar usando acetona y poniendo énfasis en tubos de ensayo y pipeta que estarán en contacto con el fluido. Lavar con agua destilada y dejar estilar (no secar).
2. Montar el equipo como se indica en la **figura 2.12**, procurando que el borde superior del tubo de ensayo quede por debajo del borde superior del baño termo regulado y que la resistencia térmica no esté en contacto con las paredes del tubo de ensayo.
3. El sensor **KS-1** debe quedar fijo, completamente concéntrico con el tubo de ensayo y sumergido completamente en el fluido a medir. Utilizar cinta adhesiva para fijar el cable a la superficie del baño e impedir su movimiento.
4. Llenar el baño termo regulado con agua destilada hasta aproximadamente 2 mm por debajo del borde superior del tubo de ensayo utilizando una piseta (evitar salpicaduras de agua).
5. Setear la temperatura del agua a 313 K (40 °C).
6. Verter el fluido dentro del tubo de ensayo hasta llenarlo completamente utilizando una pipeta. (56,5 mL aproximadamente).

2.2.3.5 Montaje experimental 283 – 289 K (10 – 16 °C):

1. Limpiar material a utilizar usando acetona y poniendo énfasis en tubos de ensayo y pipeta que estarán en contacto con el fluido. Lavar con agua destilada y dejar estilar (no secar).

2. Montar el equipo como se indica en la **figura 2.12**, procurando que el borde superior del tubo de ensayo quede por debajo del borde superior del baño termo regulado y que la resistencia térmica no esté en contacto con las paredes del tubo de ensayo.
3. El sensor **SH-1** debe quedar fijo, completamente concéntrico con el tubo de ensayo y sumergido completamente en el fluido a medir.
4. Llenar el baño termo regulado con agua destilada hasta aproximadamente 2 mm por debajo del borde superior del tubo de ensayo utilizando una pipeta (evitar salpicaduras de agua).
5. Setear la temperatura del agua a 283 K (10 °C).
6. Verter el fluido dentro del tubo de ensayo hasta llenarlo completamente utilizando una pipeta. (80 mL aproximadamente).
7. Rellenar con fluido por un costado y con el sensor instalado el tubo de ensayo para compensar la contracción del fluido producto de la solidificación.
8. Repetir éste procedimiento hasta que se observe que la contracción del fluido es nula y que el tubo de ensayo se encuentra lleno y el sensor sumergido completamente en el fluido.

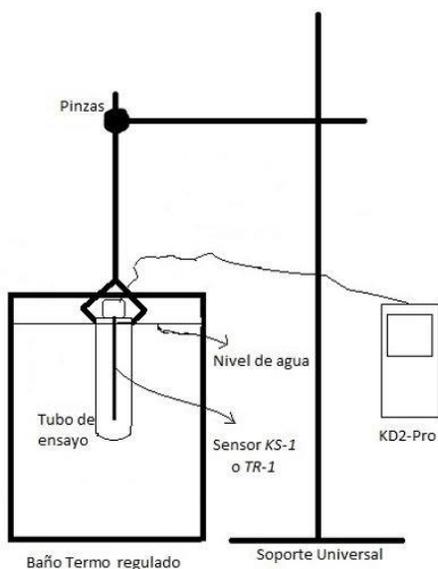


Figura 2.12. Montaje experimental para medición de conductividad

2.2.3.6 Secuencia de medición 291 – 313 K (18 – 40 °C):

1. Rellenar el baño termo regulado con agua muy lentamente hasta que el nivel quede aproximadamente 0,5 mm por debajo del borde superior del tubo de ensayo (se debe evitar una mezcla del agua con el fluido).
2. Encender termorregulador y programar a 313 K (40 °C).
3. Esperar hasta que la temperatura registrada en la termocupla del baño termo regulado se estabilice en un valor igual al programado. (25 min aprox.).
4. Iniciar la medición del KD2-Pro (1 min).
5. Verificar que la primera temperatura registrada por el instrumento sea cercana al valor programado ($\pm 0,5$ °C), de ser así continuar al punto 6, en caso contrario, cancelar medición y esperar 5 min más antes de volver al punto 4.
6. Finalizada la medición, guardar datos en el equipo.
7. Reprogramar el baño termo regulado bajando 2 K (6 °C).
8. Esperar 25 min
9. Repetir pasos 4 al 8 hasta registrar la medición de 291 K (18 °C).
10. Desmontar equipos procurando no contaminar la muestra (ver sección de desmontaje)

Nota: Se debe verificar constantemente el nivel de agua y el nivel del fluido dentro del tubo de ensayo ya que al descender la temperatura se espera que desciendan también éstos niveles por lo que se deberá rellenar periódicamente los fluidos para mantener el desarrollo del experimento en buenas condiciones.

2.2.3.7 Secuencia de medición 283 – 289 K (10 – 16 °C):

1. Rellenar el baño termo regulado con agua muy lentamente hasta que el nivel quede aproximadamente 0,5 mm por debajo del borde superior del tubo de ensayo (se debe evitar una mezcla del agua con el fluido).
2. Encender termorregulador y programar a 283 K (10 °C).
3. Esperar hasta que la temperatura registrada en la termocupla del baño termo regulado se estabilice en un valor igual al programado. (25 min aprox.).
4. Iniciar la medición del KD2-Pro (2 min).

5. Verificar que la primera temperatura registrada por el instrumento sea cercana al valor programado ($\pm 0,5$ °C), de ser así continuar al punto 6, en caso contrario, cancelar medición y esperar 5 min más antes de volver al punto 4.
6. Finalizada la medición, guardar datos en el equipo.
7. Reprogramar el baño termo regulado incrementando 2 K.
8. Esperar 25 min.
9. Repetir pasos 4 al 8 hasta registrar la medición de 298 K (16 °C).
10. Desmontar equipos procurando no contaminar la muestra.

Nota: Se debe verificar constantemente el nivel de agua y el nivel del fluido dentro del tubo de ensayo ya que al ascender la temperatura se espera que asciendan también éstos niveles por lo que se deberá retirar agua en caso de que el nivel se acerque peligrosamente al borde superior del tubo de ensayo. Por otro lado aumento del nivel del fluido no preocupa debido a que solo se derrama el exceso.

2.2.3.8 Desmontaje:

1. Apagar el KD2-Pro y el baño termo regulado y esperar 1 minuto.
2. Retirar cuidadosamente el sensor KS-1 dejando escurrir el fluido en el tubo de ensayo durante un minuto.
3. Vaciar el baño termo regulado utilizando el drenaje posterior.
4. Retirar con pipeta el fluido del tubo de ensayo y guardarlo en un recipiente distinto del de su origen.
5. Desmontar el tubo de ensayo y dejar escurrir fluido restante en el recipiente de origen durante 5 min.
6. Secar con toallas de papel el interior del baño.
7. El resto del equipo se desmonta de forma natural procurando un correcto aseo y guardado.

2.2.4 Resultados:

Los datos obtenidos se agrupan en la **tabla 2.4** que se presenta a continuación. Notar que el procedimiento ha sido repetido tres veces para asegurar una confiabilidad en la medición y que al

final de la tabla se ha agregado una columna que muestra el promedio de las mediciones, tanto de la temperatura como de su conductividad asociada.

Tabla 2.4. Conductividad térmica a distintas temperaturas para el Hexadecano

Set (°C)	Set (K)	T° ₁ (K)	K ₁ (W/mK)	T° ₂ (K)	K ₂ (W/mK)	T° ₃ (K)	K ₃ (W/mK)	T° _{Prom} (K)	K _{Prom} (W/mK)
10	283	283.60	0.305	283.63	0,282	10,48	0,281	283.62	0,289
13	286	286.58	0.302	286.64	0,265	13,49	0,273	286.60	0,280
16	289	289.52	0.511	289.61	0,457	16,46	0,494	289.54	0,487
17	290	290.48	0.880	290.61	1,226	17,46	1,154	290.49	1,087
18	291	291.11	0.988	291.05	1,196	17,90	1,068	291.12	1,084
19	292	292.52	0.136	292.57	0,137	19,42	0,139	292.53	0,137
20	293	293.52	0.136	293.55	0,136	20,40	0,138	293.52	0,137
22	295	295.48	0.135	295.54	0,137	22,39	0,136	295.49	0,136
24	297	297.39	0.136	297.47	0,136	24,32	0,134	297.41	0,135
26	299	299.38	0.137	299.45	0,135	26,30	0,133	299.39	0,135
28	301	301.33	0.134	301.27	0,136	28,12	0,135	301.28	0,135
30	303	303.25	0.151	303.26	0,149	30,11	0,130	303.20	0,143
32	305	305.15	0.135	305.17	0,161	32,02	0,158	305.15	0,151
34	307	306.99	0.139	307.10	0,144	33,95	0,135	307.02	0,139
36	309	308.96	0.158	309.01	0,164	35,86	0,157	308.95	0,160
38	311	310.99	0.161	310.90	0,139	37,75	0,160	310.90	0,153
40	313	312.91	0.161	312.83	0,153	39,68	0,163	312.80	0,159

De ésta tabla es posible extraer el gráfico de Conductividad Térmica v/s Temperatura que se muestra en la **figura 2.13**, que relaciona ambas variables. La curva que se muestra, corresponde a los valores promedio de cada medición, sin embargo para extraer la función que caracteriza a la gráfica, se han usado todos los valores medidos. También se incluye en la gráfica, la curva de conductividad térmica calculada a partir de la función que se describe más adelante y es posible comparar la diferencia que presentan ambas gráficas.

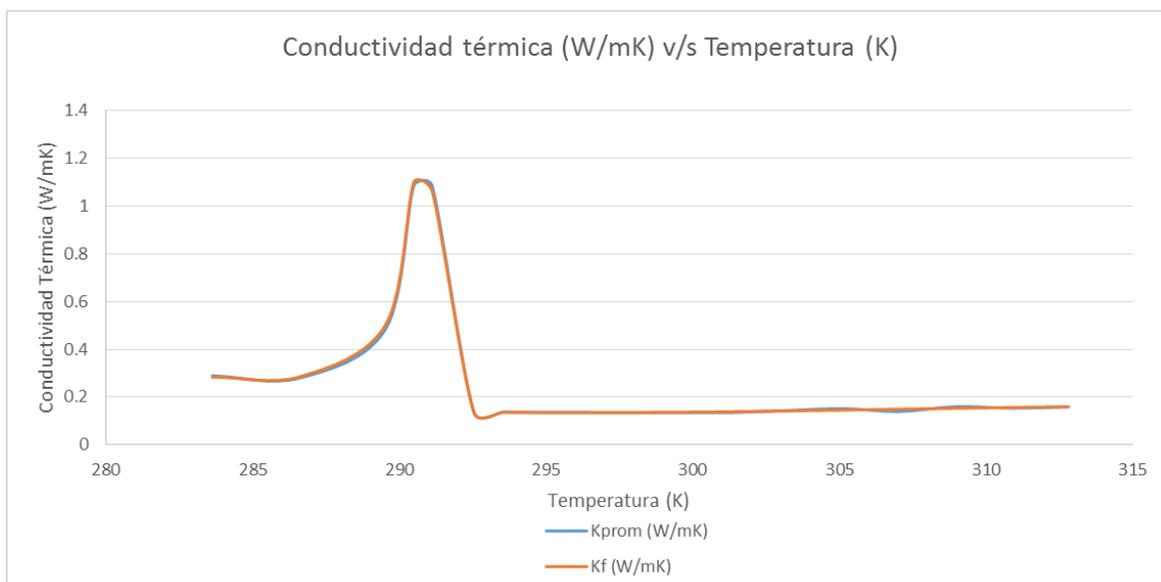


Figura 2.13. Gráfica de Conductividad Térmica v/s Temperatura del hexadecano y comparación de la gráfica original respecto de la función obtenida.

En el gráfico es posible distinguir distintas fases de acuerdo a la forma de la curva, por lo tanto, se presentan a continuación la función que describe el comportamiento de ésta curva dividida en tramos para asegurar exactitud, las que se han calculado con el software Curve Expert 14.0.

$$k(T) = a + bT + cT^2 + dT^3, \text{ para } 283 \leq T \leq 289 \quad (2.10)$$

$$k(T) = e + fT + gT^2 + hT^3, \text{ para } 289 \leq T \leq 292 \quad (2.11)$$

$$k(T) = i + jT + lT^2 + mT^3 + nT^4, \text{ para } 292 \leq T \leq 313 \quad (2.12)$$

Los valores de los coeficientes que acompañan éstas ecuaciones se indican en **la tabla 2.5**

Tabla 2.5. Valores de coeficientes de la función de conductividad térmica v/s temperatura

A	$-4.93583229562 \times 10^{-10}$	f	$-1.02269425983 \times 10^2$	j	$6.37447995719 \times 10^{-1}$
B	3.52347723425	g	$7.03603646660 \times 10^{-1}$	l	$-6.25039327182 \times 10^{-3}$
C	$-2.47081322855 \times 10^{-2}$	h	$-1.21013553111 \times 10^{-3}$	m	$2.04282531760 \times 10^{-5}$
D	$4.33270837684 \times 10^{-5}$	i	$-4.99809479379 \times 10^{-10}$	n	$-2.22376488586 \times 10^{-8}$
E	$-2.02256920217 \times 10^{-9}$				

Las funciones que describen el comportamiento de la conductividad térmica del hexadecano lógicamente cuentan con un grado de error que se indica en la **tabla 2.6**; en la tercera columna se muestran los resultados de la conductividad térmica calculada a partir de las funciones encontradas, se utiliza el subíndice “f” para indicar que los valores provienen de la función. Luego en la cuarta columna es indicado el porcentaje de error asociado al cálculo, en donde puede verse que el error promedio es de un 2%.

Tabla 2.6. Calculo de la conductividad térmica a partir de la función encontrada y error asociado al mismo.

T(K)	K_{prom} (W/mK)	K_f (W)	Error
283.62	0.289	0.284	1.92%
286.60	0.280	0.285	1.80%
289.54	0.487	0.504	3.41%
290.49	1.087	1.100	1.26%
291.12	1.084	1.063	1.96%
292.53	0.137	0.138	0.28%
293.52	0.137	0.136	0.30%
295.49	0.136	0.135	0.93%
297.41	0.135	0.135	0.39%
299.39	0.135	0.136	0.90%
301.28	0.135	0.138	2.65%
303.20	0.143	0.142	1.11%
305.15	0.151	0.145	3.91%
307.02	0.139	0.149	7.05%
308.95	0.160	0.153	4.22%
310.90	0.153	0.156	1.95%
312.80	0.159	0.159	0.03%
Promedio error			2.00%

Los valores residuales, de cada una de las secciones de la función encontrada se muestran a continuación.

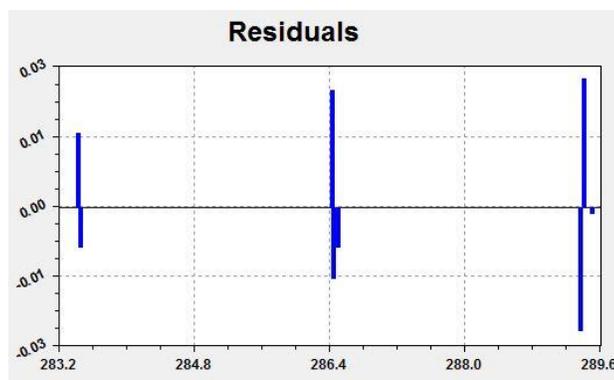


Figura 2.14. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.10

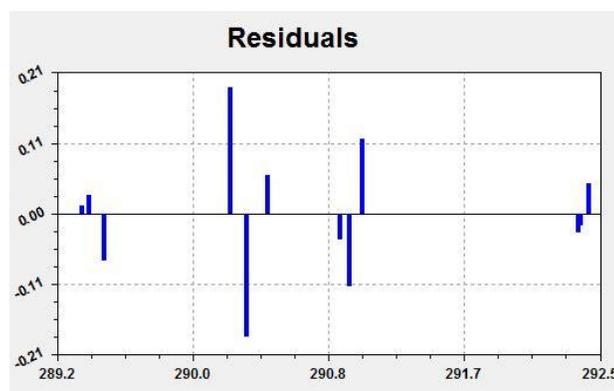


Figura 2.15. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.11

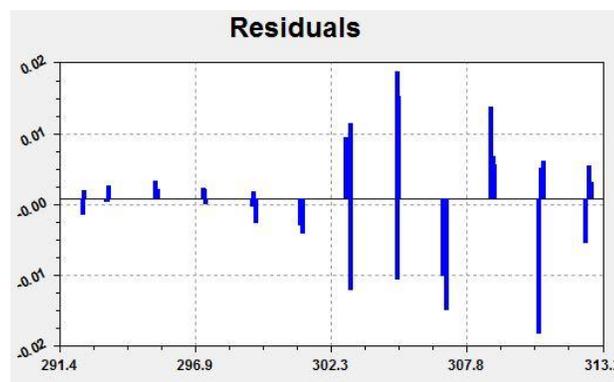


Figura 2.16. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.12

Los valores de la desviación estándar y el coeficiente de correlación de cada una de las ecuaciones que componen la función de conductividad térmica encontrada se muestran en la **tabla 2.7**.

Tabla 2.7. Desviación estándar y coeficiente de correlación asociado a cada una de las ecuaciones que componen la función de conductividad térmica.

Ecuación	Desviación estándar (s)	Coeficiente de correlación (r)
2.10	0.0198708	0.9939561
2.11	0.1105957	0.9778908
2.12	0.0073772	0.9634035

2.2.5 Conclusión:

Se ha estudiado el comportamiento de la conductividad térmica del hexadecano respecto de la temperatura.

La conductividad térmica del hexadecano oscila entre los 0.135 y los 1.087 (W/mK) cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 313 K, ésta variación no es lineal, ya que presenta ciertas oscilaciones a lo largo del rango de temperaturas mencionado, mostrando un incremento en la región sólida llegando a un máximo en la zona de cambio de fase y luego un intenso descenso en la región líquida, para mantenerse prácticamente constante a partir de los 293 K.

El hecho de que la conductividad térmica presente un peak justo en una vecindad cercana a la temperatura de cambio de fase indica que la capacidad de conducir el calor del fluido es mayor justo en la zona de interés, lo que facilita el proceso de carga y descarga de energía desde y hacia el fluido.

Se ha podido establecer una función que describe el comportamiento de la conductividad térmica del hexadecano cuyo parámetro es su temperatura, ésta función está dividida por tramos para asegurar una mayor exactitud de los datos, los cuales poseen un error promedio de un 2 % entre los datos obtenidos de las mediciones y los valores que pueden obtenerse a través del uso de la función encontrada a la misma temperatura, lo que permite usar la función encontrada con un grado óptimo de seguridad.

La desviación estándar de las ecuaciones que componen la función presentan valores pequeños en comparación con la dimensión de los valores totales de conductividad térmica, estos valores se consideran aceptables para los objetivos de éste proyecto. Por otro lado el coeficiente de

correlación de todas las funciones se encuentra cercano a la unidad, lo que permite concluir que las variables temperatura y conductividad térmica presentan una dependencia casi total, es decir, que ambas variables son dependientes una de la otra.

2.3 Densidad del Hexadecano

2.3.1 Definición:

La Densidad se define como la masa por unidad de volumen

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.13)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

m : masa del fluido

V : volumen del recipiente contenedor

En general, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y la presión, no obstante los líquidos y sólidos son en esencia sustancias no compresibles y la variación de su densidad con la presión es por lo general insignificante (alrededor de un 0.5%) (Cengel A. Yunes, 2009) por lo que es posible considerar para el Hexadecano las mediciones a presión constante de 1 atm, sin temor a obtener errores significativos.

Según la bibliografía un valor de referencia para la densidad del Hexadecano es 770 kg/m³ ó 0.770 g/mL a 293 K (20 °C) lo que entrega una orientación sobre el experimento que se ha llevado a cabo. Esta propiedad ha sido medido por (Rossini, 1953) en un amplio rango de temperaturas (293 a 563 K) en intervalos de 50 K, sin embargo interesa obtener datos en intervalos más pequeños y en un rango de 283 a 307 K.

2.3.2 Metodología

Para obtener la densidad del compuesto en función de la temperatura se ha utilizado un picnómetro **figura 2.17**, que no es más que un recipiente de volumen conocido el cual al ser pesado con el compuesto dentro permite calcular la densidad de éste. Ahora bien, para regular la temperatura a la cual se mide la densidad es necesario sumergir el picnómetro en un baño termo regulado.



Figura 2.17. Picnómetro

El cálculo de la densidad del compuesto puede hacerse fácilmente con la **fórmula 2.14**, en la cual intervienen todas las variables que permiten determinar la densidad del compuesto.

$$\rho = \frac{m_T - m_P}{V} \quad (2.14)$$

Donde:

ρ : densidad

m_T : masa total (picnómetro + muestra)

m_p : masa picnómetro

V : volumen picnómetro

2.3.3 Procedimiento

2.3.3.1 Objetivo:

Establecer el procedimiento experimental de medición de la densidad en un fluido de acuerdo a la variación de temperatura desde los 283 hasta los 307 K (10 - 34 °C) usando un “picnómetro” y un baño termo regulado.

2.3.3.2 Equipo:

- Fluido Hexadecano
- Picnómetro de 10 mL con termómetro (ver **figura 2.11**)
- Pipeta
- Jeringa
- Pipeteador
- Acetona
- Pinzas
- Balanza
- Baño termo regulado
- Toallas de papel

2.3.3.3 Secuencia de medición 283 – 307 K (10 – 34 °C):

1. Limpiar material a utilizar poniendo énfasis en, picnómetro y pipeta que estarán en contacto con el fluido. Lavar con acetona y dejar estilar (no secar).
2. Instalar el montaje experimental como lo indica la **figura 2.18**.

3. Setear la temperatura del baño termo regulado a 283 (10 °C).
4. Llenar con pipeta y pipeteador el picnómetro hasta el tope e introducir el termómetro.
5. Instalar el picnómetro en el montaje.
6. Rellenar el picnómetro con una jeringa a través de la abertura lateral reiteradas veces hasta que se haya compensado completamente la contracción del fluido producto de su solidificación y el termómetro indique la temperatura seteada de 283 K (10 °C).
7. Un vez que a temperatura sea estable (e igual a la temperatura seteada) y ya no se observe más contracciones del fluido, retirar el picnómetro, limpiar con toalla de papel untada en acetona y pesar rápidamente en la balanza.
8. Registrar temperatura y peso medidos.
9. Aumentar la temperatura seteada en 2 K.
10. Volver a montar el picnómetro en baño termo regulado.
11. Retirar excedentes de fluido que salen a través de la abertura lateral del picnómetro a medida que el fluido se va dilatando producto del aumento de temperatura.
12. Volver al punto 7 hasta que se haya efectuado la medición a 307 K (34 °C).

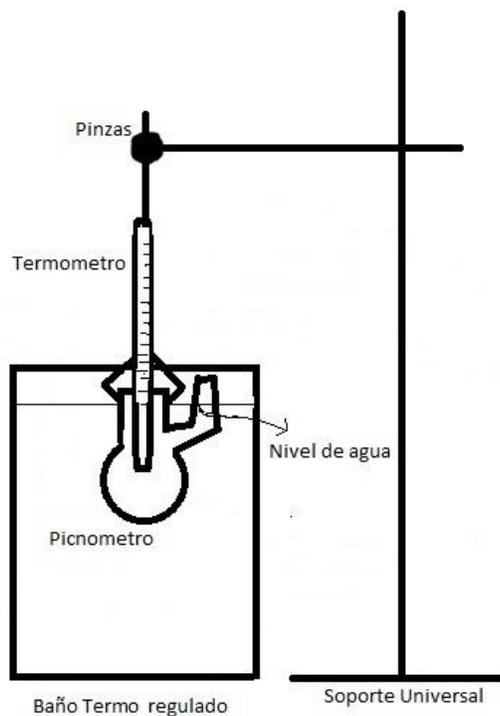


Figura 2.18. Montaje experimental para medición de densidad.

2.3.4 Resultados:

Los resultados de las mediciones se agrupan en la **tabla 2.8**, note que la medición se ha repetido tres veces para asegurar su confiabilidad. Además se ha incluido el cálculo de la densidad promedio.

Tabla 2.8. Densidad de Hexadecano a distintas temperaturas

T (K)	ρ_1 (kg/m ³)	ρ_2 (kg/m ³)	ρ_3 (kg/m ³)	ρ_{prom} (kg/m ³)
283.15	799.526	799.546	799.435	799.502
285.15	797.719	797.941	797.830	797.830
287.15	795.952	795.589	796.285	795.942
289.15	792.277	791.460	792.197	791.978
291.15	771.785	774.753	773.299	773.279
293.15	773.370	774.056	774.722	774.049
295.15	772.057	772.774	772.047	772.293
297.15	770.099	771.088	770.018	770.402
299.15	769.211	769.816	770.180	769.736
301.15	768.070	767.727	768.151	767.982
303.15	766.848	766.717	766.434	766.667
305.15	765.173	765.425	766.233	765.610
307.15	763.850	764.103	764.809	764.254

De ésta tabla es posible extraer el gráfico de Densidad v/s Temperatura que se muestra en la **figura 2.19**, que relaciona ambas variables. La curva que se muestra, corresponde a los valores promedio de cada medición, sin embargo para extraer la función que caracteriza a la gráfica, se han usado todos los valores medidos. También se incluye en la gráfica, la curva de densidad calculada a partir de la función que se describe más adelante y es posible comparar la diferencia que presentan ambas gráficas.

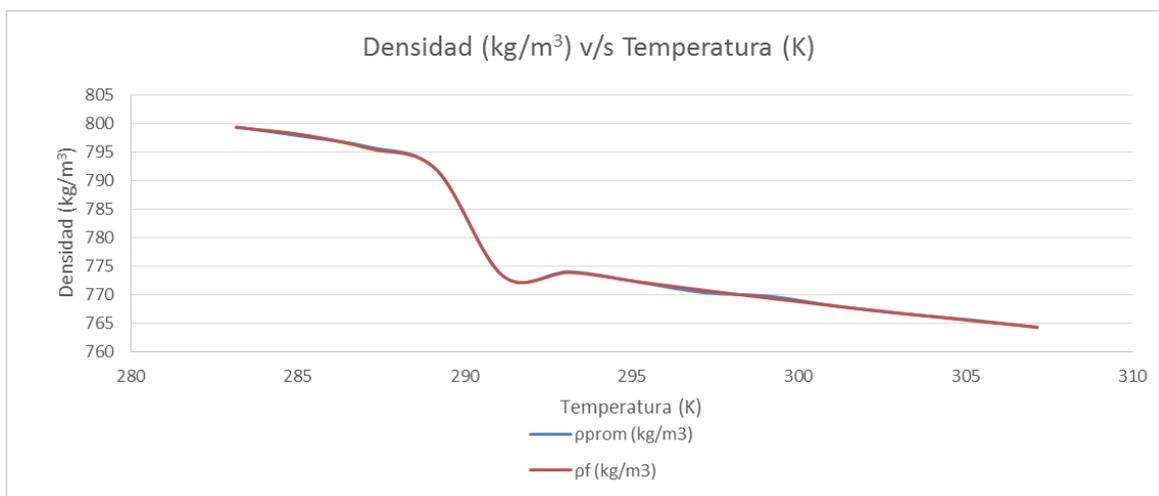


Figura 2.19. Gráfico de Densidad v/s Temperatura del hexadecano

En el gráfico es posible distinguir distintas fases de acuerdo a la forma de la curva, por lo tanto, se presenta la función que describe el comportamiento de ésta curva dividida en tramos para asegurar exactitud, los cuales se han calculado con el software Curve Expert 14.0 y se entregan a continuación.

$$\rho(T) = a + bT + cT^2 + dT^3, \text{ para } 283 \leq T \leq 289 \quad (2.15)$$

$$\rho(T) = e + fT + gT^2 + hT^3, \text{ para } 289 \leq T \leq 293 \quad (2.16)$$

$$\rho(T) = i + jT + kT^2 + lT^3, \text{ para } 293 \leq T \leq 307 \quad (2.17)$$

Los valores de los coeficientes que acompañan éstas ecuaciones se indican en la **tabla 2.9**

Tabla 2.9. Valores de coeficientes de la función de densidad v/s temperatura

a	$5.65172067321 \times 10^{-7}$	e	$-1.42518746934 \times 10^{-9}$	i	$5.27539830027 \times 10^{-6}$
b	$-3.02592313525 \times 10^1$	f	$7.25562591671 \times 10^2$	j	$1.18214598344 \times 10^1$
c	$2.44955010549 \times 10^{-1}$	g	-4.94123785583	k	$-5.08856704245 \times 10^{-2}$
d	$-4.52472660476 \times 10^{-4}$	h	$8.44342244870 \times 10^{-3}$	l	$6.67428220358 \times 10^{-5}$

La función que describe el comportamiento de la densidad del hexadecano lógicamente cuenta con un grado de error que se indica en la **tabla 2.10**; en la tercera columna se muestran los resultados de la densidad calculada a partir de la función encontrada, se utiliza el subíndice “f” para

indicar que los valores provienen de la función. Luego en la cuarta columna es indicado el porcentaje de error asociado al cálculo, en donde puede verse que el error promedio es de un 0.02%.

Tabla 2.10. Calculo de la densidad a partir de la función encontrada y error asociado al mismo.

T (K)	ρ_{prom} (kg/m ³)	ρ_f (kg/m ³)	Error
283.15	799.502	799.409	0.01%
285.15	797.830	798.107	0.03%
287.15	795.942	795.667	0.03%
289.15	791.978	791.978	0.00%
291.15	773.279	773.279	0.00%
293.15	774.049	773.915	0.02%
295.15	772.293	772.336	0.01%
297.15	770.402	770.822	0.05%
299.15	769.736	769.376	0.05%
301.15	767.982	768.003	0.00%
303.15	766.667	766.705	0.01%
305.15	765.610	765.486	0.02%
307.15	764.254	764.349	0.01%
Error promedio			0.02%

Los valores residuales, de cada una de las secciones de la función encontrada se muestran a continuación.

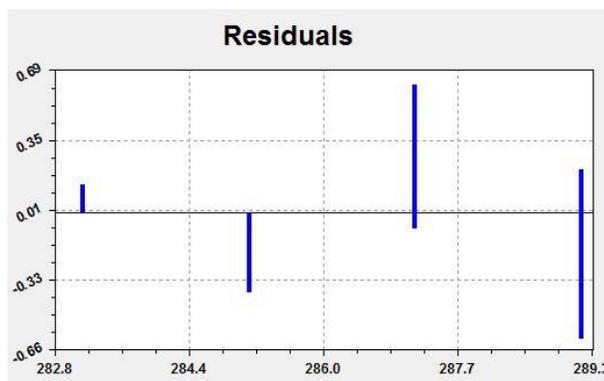


Figura 2.20. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.15

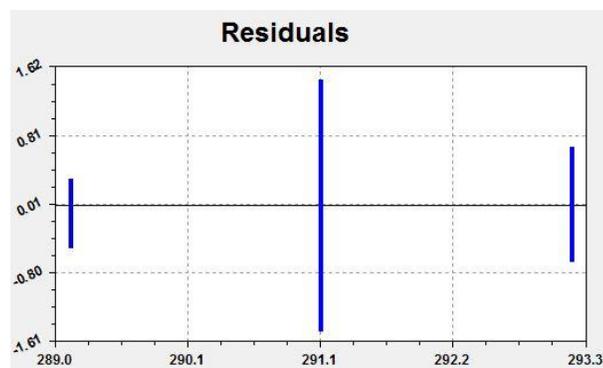


Figura 2.21. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.16

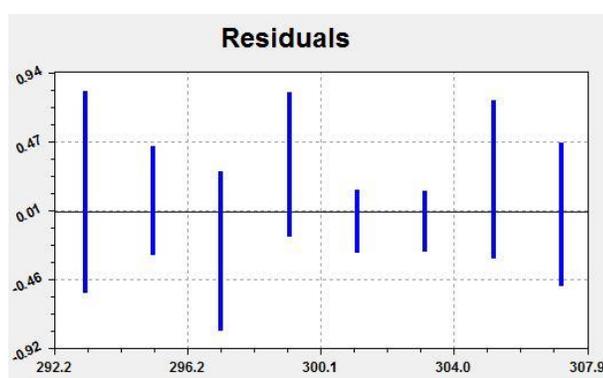


Figura 2.22. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.17

Los valores de la desviación estándar y el coeficiente de correlación de cada una de las ecuaciones que componen la función de densidad encontrada se muestran en la **tabla 2.11**.

Tabla 2.11. Desviación estándar y coeficiente de correlación asociado a cada una de las ecuaciones que componen la función de densidad.

Ecuación	Desviación estándar (s)	Coefficiente de correlación (r)
2.15	0.3631304	0.9999990
2.16	0.9767989	0.9999948
2.17	0.4782592	0.9999958

2.3.5 Conclusión:

Se ha estudiado el comportamiento de la densidad del hexadecano respecto de la temperatura.

La densidad del hexadecano oscila entre los 764.25 y los 799.50 (kg/m³) cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 301.15 K, ésta variación no es lineal, ya que presenta ciertas oscilaciones a lo largo del rango de temperaturas mencionado, mostrando una clara tendencia decreciente con una leve concavidad en la zona de cambio de fase.

El hecho de que la densidad solo presente una variación de aproximadamente un 4.5% en el rango de temperaturas indicado y considerando que este porcentaje es menor en el rango de temperaturas de trabajo (tomando en cuenta que el rango de trabajo, justo en una vecindad cercana a la temperatura de cambio de fase, es menor), permite considerar que el proceso de carga y descarga de energía desde y hacia el fluido de masa constante de hexadecano, se efectúa a un volumen constante, o que su variación de volumen del fluido es despreciable.

Se ha podido establecer una función que describe el comportamiento de la densidad del hexadecano cuyo parámetro es su temperatura, ésta función está dividida por tramos para asegurar una mayor exactitud de los datos, los cuales poseen un error promedio de un 0.02 % entre los datos obtenidos de las mediciones y los valores que pueden obtenerse a través del uso de la función encontrada a la misma temperatura, lo que permite usar la función encontrada con un grado óptimo de seguridad.

La desviación estándar de las ecuaciones que componen la función presentan valores pequeños en comparación con la dimensión de los valores totales de densidad, estos valores se consideran aceptables para los objetivos de éste proyecto. Por otro lado el coeficiente de correlación de todas las funciones se encuentra cercano a la unidad, lo que permite concluir que las variables temperatura y densidad presentan una dependencia casi total, es decir, que ambas variables son dependientes una de la otra.

2.4 Viscosidad dinámica del hexadecano

2.4.1 Definición:

La viscosidad dinámica (en adelante solo viscosidad) de un fluido es una medida de su “resistencia a la deformación”. Ésta se debe a la fuerza de fricción interna que se desarrolla entre las diferentes capas de los fluidos a medida que se obligan a moverse una con relación a las otras.

Teóricamente es la constante de proporcionalidad que interviene en la relación del esfuerzo cortante que actúa sobre un fluido y su razón de deformación o gradiente de velocidad (fluidos newtonianos), ésta relación puede verse en la **ecuación 2.18**:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.18)$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante

μ : viscosidad dinámica

$\frac{dv}{dy}$: gradiente de velocidad

En los líquidos, la viscosidad se origina por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, además, ésta varía mucho con la temperatura, decreciendo a medida que T aumenta. Esto se produce debido a que, en un líquido, las moléculas tienen más energía a temperaturas más elevadas y se pueden oponer con mayor ímpetu a las fuerzas de cohesión intermoleculares lo que produce que las moléculas de los líquidos se puedan mover con mayor facilidad. En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura como de la presión, sin embargo esta dependencia es más bien insignificante para presiones bajas, por lo que en este estudio se desprecia ese resultado. (Cengel A. Yunes, 2009)

La viscosidad tiene unidades de $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ o bien $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) y su valor de referencia a 293 K (20 °C) es de $3.10 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ lo que entrega una orientación sobre el experimento que se ha llevado a cabo.

2.4.2 Metodología:

Los datos de viscosidad han sido extraídos de una revisión bibliográfica a partir del documento de (Permutt, 1960) en el cual se ha estudiado la viscosidad de diferentes parafinas a diferentes temperaturas.

2.4.3 Resultados:

Se han extraído entonces los datos para el rango de 291 – 313 K a un gradiente de velocidad de $dv/dy = 1575$ (1/s) éstos se presentan en la **tabla 2.12**.

Tabla 2.12: viscosidad v/s temperatura (Permutt, 1960)

T (K)	μ (Pa·s)
293.15	0.00348
298.15	0.0031
303.15	0.00277
308.15	0.00249
313.15	0.00225

De los datos de la tabla, es posible extraer la gráfica que se presenta en la **figura 2.23**. en la cual también se muestra la curva de la viscosidad del hexadecano calculada a partir de la función que se describe más adelante.

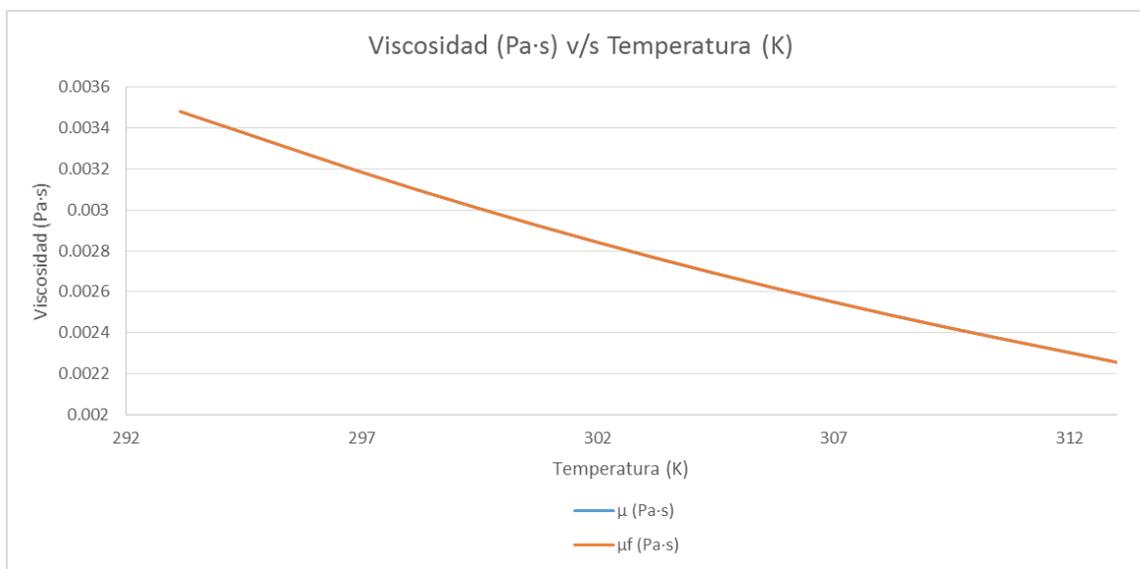


Figura 2.23. Gráfica de Viscosidad v/s Temperatura para el hexadecano

En el gráfico es posible distinguir una línea continua de variación de la viscosidad, lo que facilita la extracción de la función que representa el comportamiento de ésta propiedad ya que la ecuación estará definida en un solo tramo. La función que describe el comportamiento de ésta curva se ha calculado con el software Curve Expert 14.0 y se entrega a continuación.

$$\mu(T) = a + bT + cT^2 + dT^3, \text{ para } 291 \leq T \leq 323 \quad (2.19)$$

Cuyos coeficientes se presentan en la **tabla 2.13**

Tabla 2.13. Coeficientes de la ecuación 2.19

a	$2.93603827812 \times 10^{-1}$
b	$-2.47061582067 \times 10^{-3}$
c	$7.00628526573 \times 10^{-6}$
d	$-6.66713739343 \times 10^{-9}$

La función que describe el comportamiento de la viscosidad del hexadecano lógicamente cuenta con un grado de error que se indica en la **tabla 2.14**; en la tercera columna se muestran los resultados de la densidad calculada a partir de la función encontrada, se utiliza el subíndice “f” para

indicar que los valores provienen de la función. Luego en la cuarta columna es indicado el porcentaje de error asociado al cálculo, en donde puede verse que el error promedio es de un 0.02%.

Tabla 2.14. Cálculo de la viscosidad a partir de la función encontrada y error asociado al mismo.

T (K)	μ (Pa·s)	μ_f (Pa·s)	error
293.15	0.00348	0.00348	0.00%
298.15	0.0031	0.00310	0.02%
303.15	0.00277	0.00277	0.03%
308.15	0.00249	0.00249	0.02%
313.15	0.00225	0.00225	0.01%
Error promedio			0.02%

Los valores residuales, de la función encontrada se muestran a continuación.

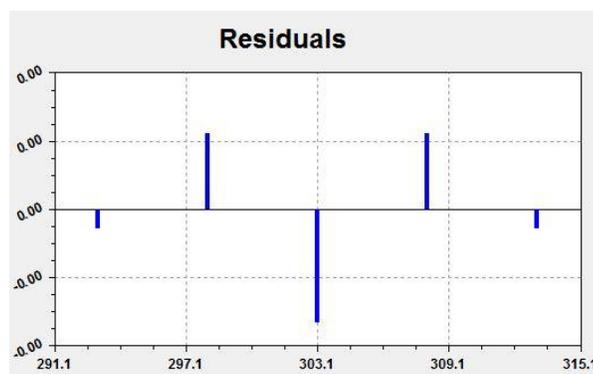


Figura 2.24. Gráfica de valores residuales para la ecuación 2.19

Los valores de la desviación estándar y el coeficiente de correlación de la función de viscosidad encontrada se muestran en la **tabla 2.15**.

Tabla 2.15. Desviación estándar y coeficiente de correlación asociado a la función de viscosidad.

Ecuación	Desviación estándar (s)	Coficiente de correlación (r)
2.19	0.0000012	0.9999992

2.4.4 Conclusión:

Se ha estudiado el comportamiento de la viscosidad del hexadecano respecto de la temperatura.

La viscosidad del Hexadecano oscila entre los 0.00225 y los 0.00348 (Pa·s) cuando la temperatura se hace variar entre 293.15 y 313.15 K.

El hecho de que la viscosidad sea continua en el rango de temperaturas y al gradiente de velocidad establecido, permite que el fluido pueda ser considerado como newtoniano para bajos esfuerzos.

Se ha podido establecer una función que describe el comportamiento de la viscosidad del hexadecano cuyo parámetro es su temperatura y cuyo error promedio es de un 0.02 % entre los datos obtenidos de las mediciones y los valores que pueden obtenerse a través del uso de la función encontrada a la misma temperatura, lo que permite usar la función encontrada con un grado óptimo de seguridad.

La desviación estándar de la función presenta un valor pequeño en comparación con la dimensión de valores total de viscosidad, este valor se considera aceptable para los objetivos de este proyecto. Por otro lado el coeficiente de correlación de la función se encuentra cercano a la unidad, lo que permite concluir que las variables temperatura y densidad presentan una dependencia casi total, es decir, que ambas variables son dependientes una de la otra.

2.5 Variación de las propiedades según concentración de nano partículas

Las propiedades térmicas del fluido base serán modificadas a partir de la adición de nanopartículas. El comportamiento de las propiedades térmicas viene dado entonces según una modificación de las funciones ya encontradas en las secciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Estas funciones son de tipo general y describen el comportamiento de las propiedades térmicas de un fluido cualquiera respecto de la concentración volumétrica de nanopartículas de cualquier tipo, por lo

tanto, entregan una aproximación cercana a la realidad, pero no es posible conocer ésta variación de otra forma que no sea a través de un desarrollo experimental.

2.5.1 Variación de la viscosidad en función de la concentración de nano partículas

La viscosidad entonces, puede ser calculada a partir de un modelo propuesto por Brinkman (Brinkman, 1952) cuya ecuación se presenta a continuación:

$$\mu_{nf}(\phi) = \frac{\mu(T)}{(1-\phi)^{2.551}} \quad (2.20)$$

Donde:

μ_{nf} : Viscosidad del nanofluido (Hexadecano y nanoparticulas)

$\mu(T)$: Viscosidad del Hexadecano en función de la Temperatura

ϕ : Concentración de nano partículas

Una gráfica que esquematiza la variación de la función de viscosidad en función de la concentración de nanopartículas se muestra en la **figura 2.25**, en donde se han incluido líneas que muestran la variación de viscosidad en función de la temperatura a una concentración de 2 y 4 % la cual muestra un incremento de 5.20 y 10.79 % respectivamente.

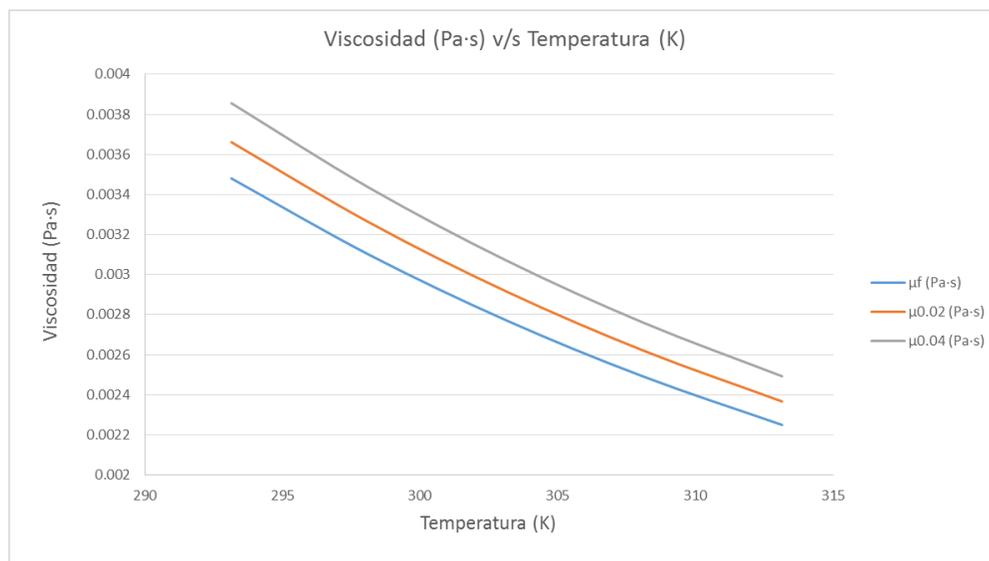


Figura 2.25. Gráfica de viscosidad v/s temperatura en donde se muestra la influencia de la concentración de nanopartículas en la propiedad analizada.

2.5.2 Conductividad térmica en función de la concentración de nano partículas

La conductividad térmica entonces, puede ser calculada a partir del modelo de Maxwell (Maxwell, 1891) cuya ecuación se presenta a continuación:

$$k_{nf}(\emptyset) = \frac{k_s + 2k(T) - 2\emptyset \cdot (k(T) - k_s)}{k_s + 2k(T) + \emptyset \cdot (k(T) - k_s)} \cdot k(T) \quad (2.21)$$

Donde:

k_{nf} : Conductividad térmica del nano fluido (Hexadecano)

$k(T)$: Conductividad térmica del Hexadecano en función de la Temperatura

k_s : Valor constante igual a $400 (W/mK)$

\emptyset : Concentración de nano partículas

Una gráfica que esquematiza la variación de la función de conductividad térmica en función de la concentración de nanopartículas, se muestra en la **figura 2.26** en donde se han incluido líneas que muestran la variación de la conductividad térmica en función de la temperatura a una concentración de 2 y 4 %, la cual muestra un incremento de 6.12 y 12.49 % respectivamente.

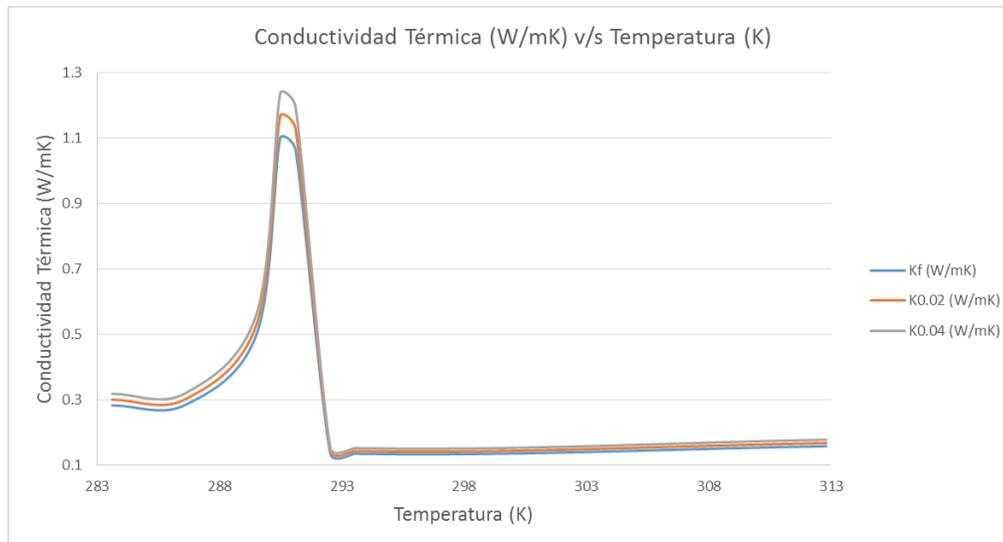


Figura 2.26. Gráfica de conductividad térmica v/s temperatura, en donde se muestra la influencia de la concentración de nanopartículas en la propiedad analizada.

2.5.3 Densidad en función de la concentración de nano partículas

La densidad entonces, puede ser calculada a partir la ecuación dada por Zeinali Heris (Zeinali Heris, 2013) que se presenta a continuación:

$$\rho_{nf}(\phi) = (1 - \phi) \cdot \rho(T) + \phi \cdot \rho_s \quad (2.22)$$

Donde:

ρ_{nf} : Densidad del nano fluido (Hexadecano)

$\rho(T)$: Densidad del Hexadecano en función de la Temperatura

ρ_s : Valor constante igual a $8954 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$

ϕ : Concentración de nano partículas

Una gráfica que esquematiza la variación de la función de densidad en función de la concentración de nanopartículas se muestra en la **figura 2.27**, en donde se han incluido líneas que muestran la variación de la densidad en función de la temperatura, a una concentración de 2 y 4 % la cual muestra un incremento de 21.5 y 43.5 % respectivamente.

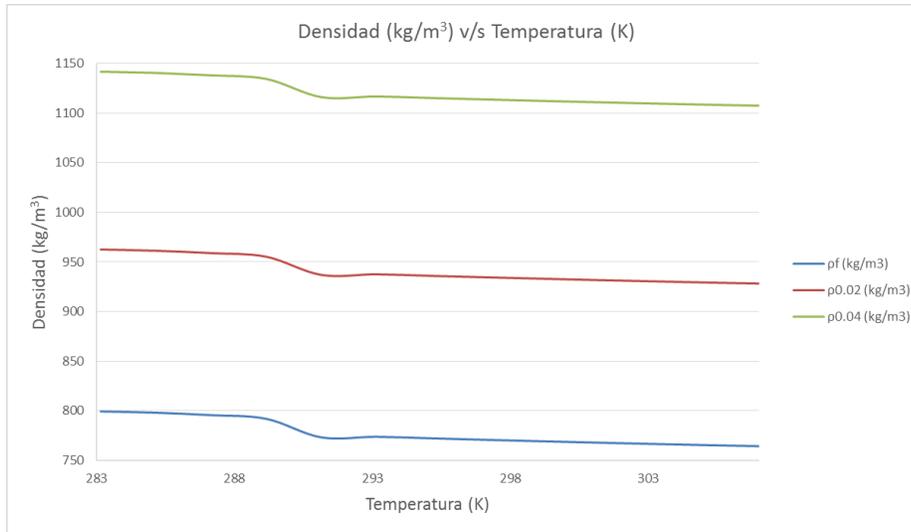


Figura 2.27. Gráfica de densidad v/s temperatura en donde se muestra la influencia de la concentración de nanopartículas en la propiedad analizada.

2.5.3 Calor específico en función de la concentración de nano partículas

El calor específico entonces, puede ser calculado a partir la ecuación dada por Zeinali Heris (Zeinali Heris, 2013) que se presenta a continuación

$$C_{p_{nf}}(\phi) = \frac{\phi \rho_s \cdot C_{p_s} + (1-\phi) \cdot \rho(T) \cdot C_p(T)}{\phi \rho_s + (1-\phi) \cdot \rho(T)} \quad (2.23)$$

Donde:

$C_{p_{nf}}$: Calor específico del nano fluido (Hexadecano)

$C_p(T)$: Calor específico del Hexadecano en función de la Temperatura

ρ_s : Valor constante igual a $8954 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

C_{p_s} : Valor constante igual a 383 (J/kgK)

$\rho(T)$: Densidad del Hexadecano en función de la temperatura

ϕ : Concentración de nano partículas

Una gráfica que esquematiza la variación de la función de calor específico en función de la concentración de nanopartículas, se muestra en la **figura 2.28** en donde se han incluido líneas que

muestran la variación del calor específico en función de la temperatura, a una concentración de 2 y 4% las cuales muestran un decremento promedio de 15.13 y 11.39 %.

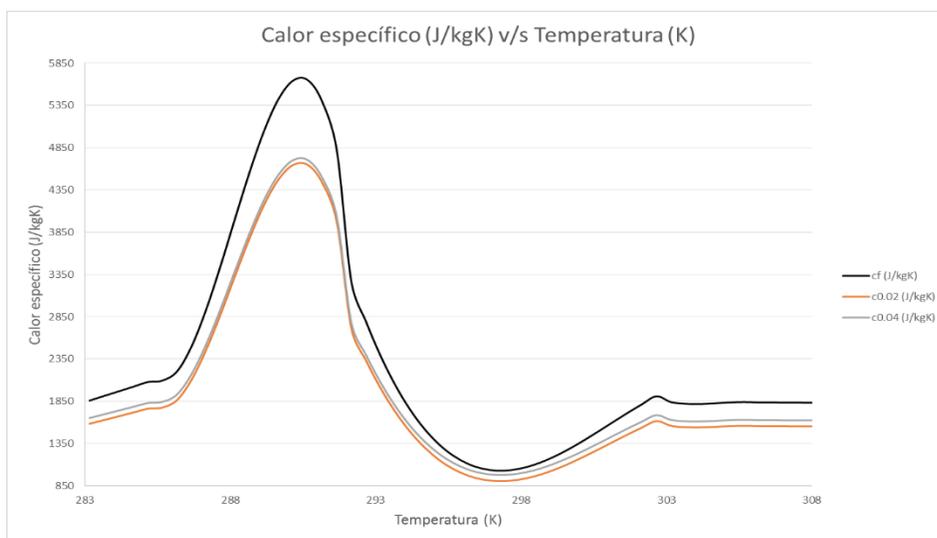


Figura 2.28. Gráfica de calor específico v/s temperatura en donde se muestra la influencia de la concentración de nanopartículas en la propiedad.

CAPITULO 3: Propiedades Térmicas del Agua

Para determinar las propiedades termo físicas del agua (viscosidad, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica) se ha considerado un estudio experimental (Zografos et al.,1987) en el cual se ha encontrado experimentalmente, funciones que describen el comportamiento del agua considerando sus propiedades como variables con la temperatura en el intervalo 273 – 283 K (0 – 10 °C), sin embargo al hacer un estudio detallado de éstas funciones constitutivas, se ha llegado a la conclusión de que, con excepción de la viscosidad, éstas funciones son válidas también para intervalos de temperatura de los 283 a los 313 K (10 a los 40 °C).

3.1 Densidad del Agua

Así, para la densidad se ha determinado la siguiente función que describe su comportamiento de acuerdo a la temperatura:

$$\rho(T) = 1022.4 - 0.1105T + 9.63 \times 10^{-4}T^2 - 3.011 \times 10^{-6}T^3, 283 \leq T \leq 313 \text{ (K)} \quad (3.1)$$

Los resultados obtenidos usando la **función (3.1)** versus los valores reales (Cengel, 2007) en el intervalo de 273 a 313 K (0 a 40 °C) se muestran en la **tabla 3.1** que se muestra a continuación.

Tabla 3.1. Densidad experimental y calculada del agua y su error asociado.

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	ρ_f (kg/m ³)	Error
0	273	999.8	1002.7	0.29%
5	278	999.9	1001.4	0.15%
10	283	999.7	1000.0	0.03%
15	288	999.1	998.5	0.06%
20	293	998.0	997.0	0.11%
25	298	997.0	995.2	0.17%
30	303	996.0	993.5	0.25%
35	308	994.0	991.7	0.23%
40	313	992.1	989.8	0.23%

Error promedio	0.17%
Error máximo	0.29%

De donde es posible apreciar que su error promedio es de 0.17 % y cuyo máximo no supera el 0.29%, de donde se puede concluir que es una solución aceptable para las consideraciones de la simulación.

3.2 Conductividad Térmica del Agua

Luego, para la conductividad térmica se ha determinado la siguiente función que describe su comportamiento de acuerdo a la temperatura:

$$k(T) = -0.633 + 0.0072T - 1.14 \times 10^{-5}T^2 + 4.24 \times 10^{-9}T^3, 283 \leq T \leq 313 \text{ (K)} \quad (3.2)$$

Los resultados obtenidos usando la **función (3.2)** versus los valores reales (Cengel, 2007) en el intervalo de 273 a 313 K (0 a 40 °C) se muestran en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2. Densidad experimental y calculada del agua y su error asociado.

T (°C)	T (K)	K (W/mK)	K _f (W/mK)	Error
0	273	0.561	0.565	0.80%
5	278	0.571	0.575	0.66%
10	283	0.580	0.584	0.63%
15	288	0.589	0.592	0.54%
20	293	0.598	0.600	0.38%
25	298	0.607	0.608	0.17%
30	303	0.615	0.615	0.06%
35	308	0.623	0.622	0.11%
40	313	0.631	0.629	0.33%
Error promedio				0.41%
Error máximo				0.80%

De donde es posible apreciar que su error promedio es de 0.41 % y cuyo máximo no supera el 0.80%, por lo tanto se puede concluir que es una solución aceptable para las consideraciones de la simulación.

3.3 Calor específico del Agua

Por otro lado, para el calor específico se ha determinado la siguiente función que describe su comportamiento de acuerdo a la temperatura:

$$C_p(T) = -3755.9 + 67.95T - 0.1915T^2 + 0.0001785T^3, 283 \leq T \leq 313 (K) \quad (3.3)$$

Los resultados obtenidos usando la **función (3.3)** versus los valores reales (Cengel, 2007) en el intervalo de 273 a 313 K (0 a 40 °C), se muestran en la **tabla 3.3** a continuación.

Tabla 3.3. Calor específico experimental y calculado del Agua y su error asociado.

T (°C)	T (K)	C (J/kgK)	C _f (J/kgK)	Error
0	273	4217.0	4154.0	1.49%
5	278	4205.0	4169.4	0.85%
10	283	4194.0	4182.6	0.27%
15	288	4186.0	4193.9	0.19%
20	293	4182.0	4203.3	0.51%
25	298	4180.0	4211.0	0.74%
30	303	4178.0	4217.0	0.93%
35	308	4178.0	4221.7	1.05%
40	313	4179.0	4225.0	1.10%
Error promedio				0.79%
Error máximo				1.49%

Es posible apreciar que su error promedio es de 0.79 % y su máximo no supera el 1.49%, de donde se puede concluir que es una solución aceptable para las consideraciones de la simulación.

3.4 Viscosidad del Agua

Finalmente la viscosidad ha sido estudiada por (F. Gutmann, 1952) en donde se ha determinado la siguiente función que describe su comportamiento de acuerdo a la temperatura:

$$\log \mu(T) = A + \frac{B}{T+c}, 283 \leq T \leq 313 (K) \tag{3.4}$$

Con

$$A = -3.540$$

$$B = 222.21$$

$$C = -149.37$$

Los resultados obtenidos usando la función (3.4) versus los valores reales (Cengel, 2007) en el intervalo de 273 a 313 K (0 a 40 °C) se muestran en la tabla 3.4 a continuación.

Tabla 3.4. Viscosidad experimental y calculada del agua y su error asociado.

T (°C)	T (K)	μ (Pa·s)	μ_f (Pa·s)	Error
0	273	$1.792e^{-3}$	$1.809e^{-3}$	0.93%
5	278	$1.519e^{-3}$	$1.540e^{-3}$	1.38%
10	283	$1.307e^{-3}$	$1.327e^{-3}$	1.53%
15	288	$1.138e^{-3}$	$1.156e^{-3}$	1.57%
20	293	$1.002e^{-3}$	$1.016e^{-3}$	1.45%
25	298	$8.910e^{-4}$	$9.017e^{-4}$	1.20%
30	303	$7.980e^{-4}$	$8.061e^{-4}$	1.02%
35	308	$7.200e^{-4}$	$7.258e^{-4}$	0.80%
40	313	$6.530e^{-4}$	$6.577e^{-4}$	0.71%
Error promedio				1.18%
Error máximo				1.57%

Es posible apreciar que su error promedio es de 1.18 % y su máximo no supera el 1.57%, de donde se puede concluir que es una solución aceptable para las consideraciones de la simulación.

CAPITULO 4: Simulación computacional

Una vez conseguidos los datos de la variación de las propiedades térmicas del Hexadecano en función de su temperatura, la variación de éstas propiedades según su concentración de nanopartículas y la variación de las propiedades térmicas del agua en función de su temperatura, es posible proceder a realizar el segundo objetivo de éste estudio, el cual trata sobre simular computacionalmente en el software Ansys/Fluent con licencia educacional, una situación física particular que muestre el comportamiento del material de cambio de fase modificado con nanopartículas o nanofluido.

4.1 Modelo físico

El modelo físico simulado computacionalmente corresponde a un par de ductos de sección circular dispuestos concéntricamente como se muestra en la **figura 4.1** y por cuyo tubo interior circula agua, mientras que en el espacio anular entre ambas tuberías se encuentra encapsulado un nanofluido sintetizado a base de hexadecano y distintas concentraciones de nanopartículas.

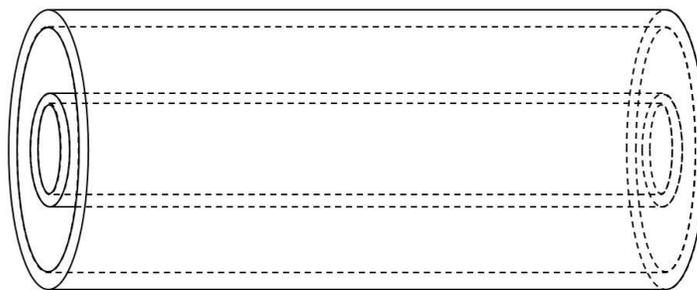


Figura 4.1. Disposición concéntrica de tubos.

Los tubos utilizados corresponden a tuberías de cobre standard de tipo “L”, Aleación C 12200 (contenido de cobre 99.9%), según norma ASTM B88. Éstos se encuentran disponibles comercialmente y sus diámetros en metros se muestran en la **figura 4.2**, el largo considerado para la simulación es de 0.25 (m).

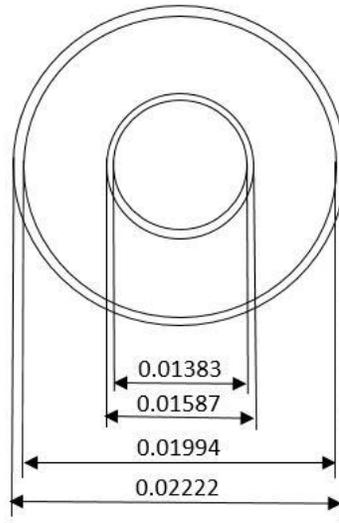


Figura 4.2. Dimensiones (m) de tuberías de cobre.

4.2 Modelo geométrico

En la simulación computacional se ha considerado solo la mitad de una sección de la tubería, imponiendo condiciones de borde de axisimetría en la superficie de corte, como se muestra en la **figura 4.3**, de ésta forma se consigue un ahorro de recursos y tiempos de cálculo.

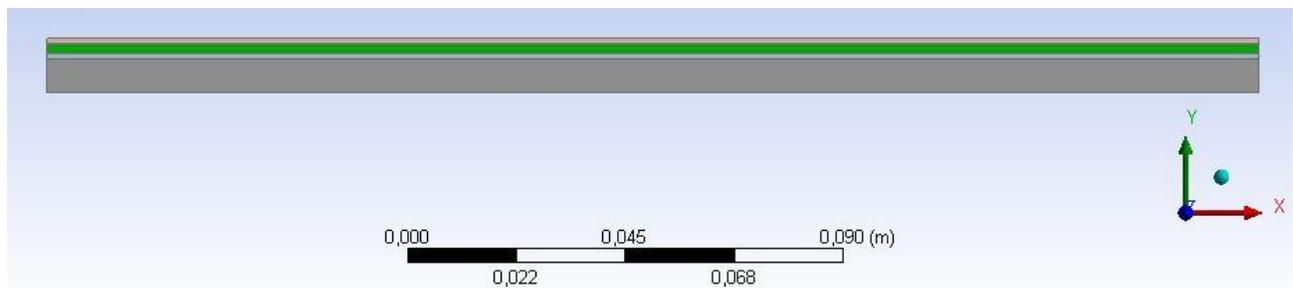


Figura 4.3. Muestra de diseño de media sección de la doble tubería, en verde el PCM y gris el agua.

4.3 Mallado

La malla utilizada para el cálculo contiene 3.35×10^4 volúmenes de control de tamaño del orden de los $1.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ aproximadamente, y su distribución puede ser apreciada en la **figura 4.4**, en la que se puede notar que en las zonas de contacto de los fluidos con las paredes de los ductos la malla es más fina, lo que permite una mayor precisión de cálculo en las zonas críticas.

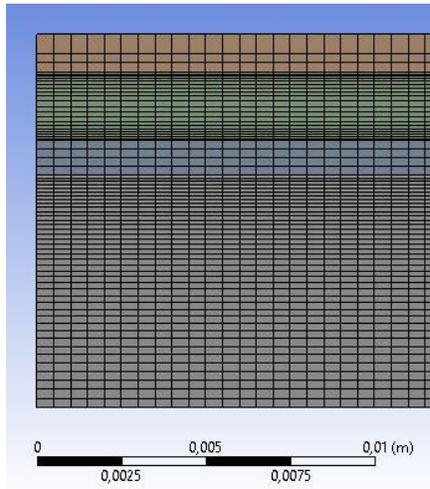


Figura 4.4. Disposición de mallado

4.4 Situación física

El caso que se estudia en la simulación contiene en la cavidad exterior un nanofluido a base de hexadecano y nanopartículas de Al_2O_3 de forma estacionaria ($\vec{v} = 0$) a una temperatura inicial de 292 K (19°C), mientras que en la cavidad interior circula agua con una temperatura de entrada constante de 283 K (10°C) como se muestra en la **figura 4.5**. La velocidad media de entrada del agua es calculada a partir del número de Reynolds. Al O-PCM encapsulado se le irá variando su concentración volumétrica de nanopartículas convirtiéndose en un nanofluido, para poder establecer la influencia que ejerce el contenido de éstas en la transferencia de calor y los tiempos de solidificación.

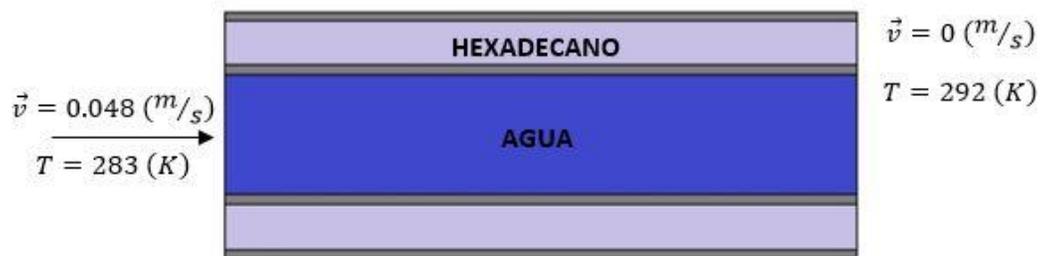


Figura 4.5. Disposición de fluidos en la situación.

La pared de la superficie del ducto exterior se considera adiabática y el agua ingresa a una temperatura constante y bajo la condición de flujo desarrollado laminar. Para lograr la condición de

flujo completamente desarrollado a la entrada del ducto se ha incluido una subrutina en el software ansys/fluent en lenguaje C++ en un archivo .udf que puede ser apreciado en el **anexo 2**. El cálculo del número de Reynolds está basado en el diámetro hidráulico, la velocidad media de entrada y las propiedades del fluido obtenidas a la temperatura de entrada del agua. El modelo matemático para el flujo transiente, considerado incompresible y Newtoniano está comprendido por las ecuaciones de continuidad **ecuación 4.1**, Navier-Stokes **ecuación 4.2** y energía **ecuación 4.3**, para el agua y la ecuación de energía que incluye el cambio de fase **ecuación 4.4 y 4.5** para el nanofluido. Complementado por condiciones de borde de primera clase para la temperatura a la entrada del agua y de segunda clase (adiabático) en el manto exterior del tubo exterior. Se considera la condición de no deslizamiento en las paredes del ducto ($v=0$), además de axisimetría en el plano medio. La temperatura inicial de todo el sistema es de 292 K mientras que el agua ingresa a temperatura de 283 K lo que significa que el nanofluido inicialmente en estado líquido libera calor latente a medida que el tiempo avanza e irá cambiando a la fase sólida.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + (\vec{v} \nabla) \rho v = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (4.2)$$

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) T \right] = -(\nabla q) \quad (4.3)$$

$$\rho \left[C_p + \Delta_{pc} h \cdot \frac{\partial f_{pc}}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \cdot q) \quad (4.4)$$

$$f_{pc} = \begin{cases} 0, & T < T_{pc} \\ 1, & T \geq T_{pc} \end{cases} \quad (4.5)$$

4.5 Cálculo de velocidad media de entrada del Agua y número de Prandtl

Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{\rho \vec{v}_s D}{\mu} = \frac{\vec{v}_s D}{\nu} \quad (4.6)$$

Con:

Re : número de Reynolds

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

\vec{v}_s : velocidad característica del fluido (m/s)

D : diámetro de la tubería o longitud característica (m)

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($Pa \cdot s$)

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s)

Para la temperatura de ingreso del agua, que es 283 K (10°C) se tienen las propiedades térmicas que se muestran en la **tabla 4.1** y que permiten calcular, mediante la **ecuación 4.6**, la velocidad de entrada del agua para distintos números de Reynolds, que para este estudio se han considerado $Re=200, 500, 1000$ y 2000 y cuyo resultado se indica en la **tabla 4.2**.

Tabla 4.1. Propiedades del agua a 283 K

Propiedad (283 K)	Valor
C_{pH_2O}	4182.64 (J/kgK)
k_{H_2O}	$5.837 \cdot 10^{-1} \text{ (W/mK)}$
μ_{H_2O}	$1.327 \cdot 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$
ρ_{H_2O}	$999.970 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
$\mu_w _{T=292K}$	$1.069 \cdot 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$

Tabla 4.2. Velocidad de entrada del agua para distintos números de Reynolds

Re	$V_{H_2O} \text{ (m/s)}$
200	0.019
500	0.048
1000	0.096
2000	0.192

También, usando los datos de la **tabla 4.1**, es posible calcular el número de Prandtl (Cengel, 2007) para la misma temperatura como sigue:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4.7)$$

Donde:

Pr : Numero de Prandlt

De donde se obtiene que:

$$Pr_{H_2O} \Big|_{T=283 \text{ K}} = \frac{4191.809186 \text{ (J/kgK)} \cdot 1.327013 \cdot 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}}{5.8367 \cdot 10^{-1} \text{ (W/mK)}} = 9.51$$

4.6 Consideraciones de la simulación

Para llevar a cabo la simulación computacional se debe establecer una serie de parámetros al software para que éste pueda realizar los cálculos. Para un modelo transiente se han activado las ecuaciones de momentum, energía y los parámetros de solidificación y fusión. Se ha incluido una subrutina en lenguaje C++ como un archivo .udf que contiene las propiedades tanto del hexadecano como del agua en función de la temperatura, la variación de las propiedades térmicas del nanofluido según si concentración de nanopartículas y las condiciones de entrada de velocidad para un flujo laminar desarrollado. Los detalles de la programación se pueden apreciar en el **anexo 2**. Para el hexadecano se ha establecido experimentalmente una temperatura de cambio de fase de 291 K. El sistema inicia en el tiempo cero con una temperatura de 292 K, así se tiene certeza de que todo el fluido se encuentra inicialmente en estado líquido. La temperatura de entrada del agua es constante a

283 K, mientras que la salida es de una condición de presión relativa nula. La pared exterior se considera adiabática, por lo tanto no habrá intercambio de calor con el ambiente.

Los criterios de convergencia se han establecido del orden de 10^{-3} para la velocidad, 10^{-4} para la ecuación de continuidad y 10^{-6} para la ecuación de la energía. Se ha establecido la formulación transiente a una aproximación de segundo orden y se han fijado los parámetros de subrelajación de la presión a 0.1, momentum a 0.3, energía a 0.5 y fracción líquida a 0.5, mientras que el algoritmo de acoplamiento se ha establecido en PISO. Finalmente se ha cambiado la discretización espacial del término convectivo al modelo de interpolación QUICK.

4.7 Validación

La implementación del software, los modelos físicos y matemáticos son validados mediante comparación de los números de Nusselt obtenidos numéricamente a través de la simulación computacional con valores predichos por el modelo empírico de Sieder and Tate (Mehling H., 2008).

Luego para encontrar los valores del número de Nusselt se utiliza la **ecuación 4.8**.

$$\overline{Nu} = 1.86 \left(Re \cdot Pr \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.8)$$

Para:

- Temperatura superficial uniforme
 - $0.0044 < \frac{\mu}{\mu_w} < 9.75$
 - $0.48 < Pr < 16\ 700$
 - $\left(Re \cdot Pr \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} > 2$

Con:

\overline{Nu} : Número de Nusselt promedio (en toda la superficie de transferencia de calor)

Re : Número de Reynolds

Pr : Número de Prandtl a la temperatura de entrada del Agua

D_h : Diámetro Hidraulico del ducto (m)

L : Longitud del ducto (m)

μ : Viscosidad del fluido a la temperatura de entrada del Agua (Pa · s)

μ_w : Viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del ducto (Pa · s). Tabla 4.1

En la **tabla 4.3** se presentan los resultados de la validación, observándose porcentajes de error menores al 7.06%. De acuerdo a los resultados de la validación se seleccionó el número de Reynolds de 500 para el análisis realizado en la sección 4.7.

Tabla 4.3. Comparación de los números de Nusselt obtenidos numéricamente y calculados a partir del modelo de Sieder and Tate (1936)

Re	Nu (Numérico)	Nu (Sieder & Tate)	Error %
200	9.633	8.952	7.06%
500	12.525	12.150	3.00%
1000	16.353	15.308	6.39%
2000	18.398	19.287	4.83%

4.8. Análisis del tamaño de malla

La selección del número de volúmenes de control apropiado, para garantizar que los resultados son independientes del tamaño de la malla, se basa en el estudio especificado en la **tabla 4.4**, donde los valores entre paréntesis representan los errores relativos al tamaño de malla anterior. De acuerdo a los errores relativos consecutivos para los resultados obtenidos del número de Nusselt, se selecciona una malla con 33500 volúmenes finitos para realizar todas las simulaciones.

Tabla 4.4. Estudio del tamaño de malla realizado para el caso con $Re=500$ y $\theta = 0^\circ$

Malla	Nu	error %
8 375	10.556	-
12 529	11.705	10.88%
16 750	12.525	7.01%
20 904	13.152	5.00%

25 125	13.674	3.97%
29 279	14.054	2.77%
33 500	14.344	2.06%

4.9 Resultados

4.9.1 Tiempo de solidificación

Un resultado importante de obtener a partir de la simulación es el tiempo que demora el PCM en pasar de fase líquida a sólida. Dadas las temperaturas planteadas por el problema, es claro que el fluido exterior (hexadecano sin nanopartículas) comienza la simulación en estado líquido, mientras que el fluido interior (agua) fluye a una temperatura más baja y por lo tanto extrae el calor latente del hexadecano, lo cual se refleja en un cambio de fase de estado líquido a sólido. La temperatura de cambio de fase del hexadecano es de 291 K, sin embargo se ha comenzado la simulación con una temperatura inicial de 292 K, lo que significa que parte del calor transferido hacia el agua, corresponde al calor sensible del fluido que abarca el intervalo de 292 hasta 291 K, sin embargo y dado que éste intervalo es pequeño, y que la fracción de calor sensible es pequeña en comparación con el calor latente, se considera despreciable la influencia de éste en el tiempo de solidificación encontrado.

Para analizar el tiempo de solidificación se han extraído perfiles de fracción líquida en 5 líneas creadas en el espacio anular donde se encuentra el PCM, cuyas disposiciones pueden ser apreciadas en la **figura 4.6**.

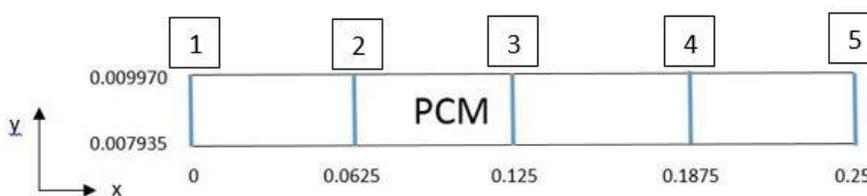


Figura 4.6. Líneas hipotéticas de donde se extraen los datos de solidificación y fusión.

Es posible apreciar en diferentes tiempos como el PCM va solidificando en tramos hasta que finalmente todo el PCM se encuentra en estado sólido. Las **figuras 4.7 a 4.11** muestran gráficas que esquematizan éste proceso, en donde en el eje de las ordenadas se muestra la fracción líquida

presente mientras que en el eje de las abscisas se muestra la distancia radial entre los 0.007935 y los 0.009970 m, donde está encapsulado el PCM. (**figura 4.6**). Las líneas 1, 2, 3, 4 y 5 indican la ubicación de donde se han extraído los datos, siendo la línea 1 la primera sección del PCM encapsulado.

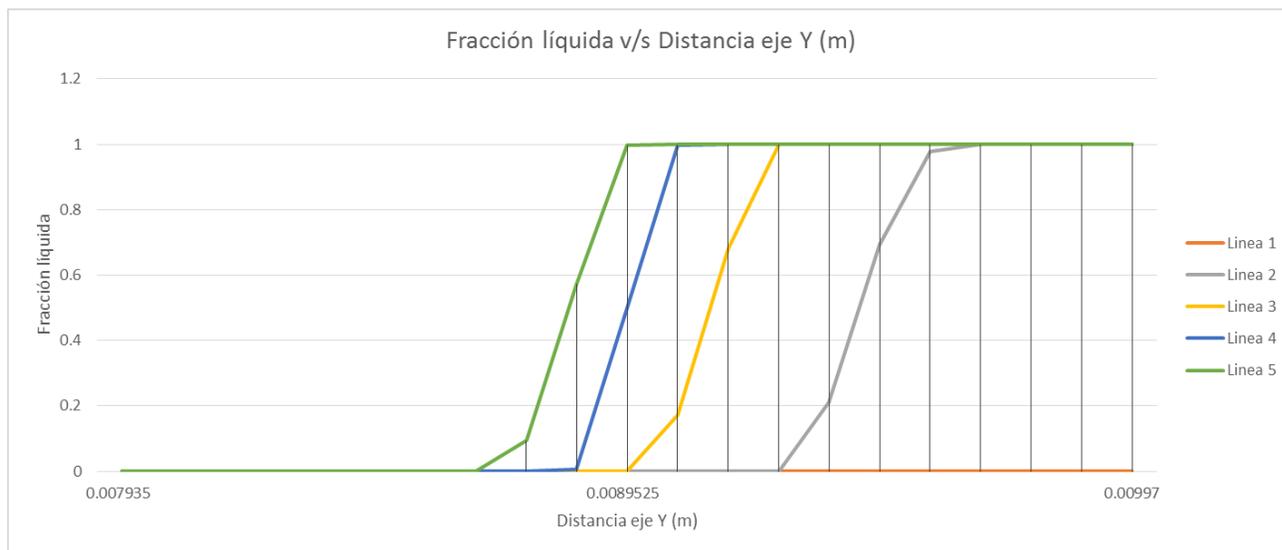


Figura 4.7. Grafica de fracción líquida de las líneas hipotéticas en el tiempo de 3 h 29 min y 30 s.

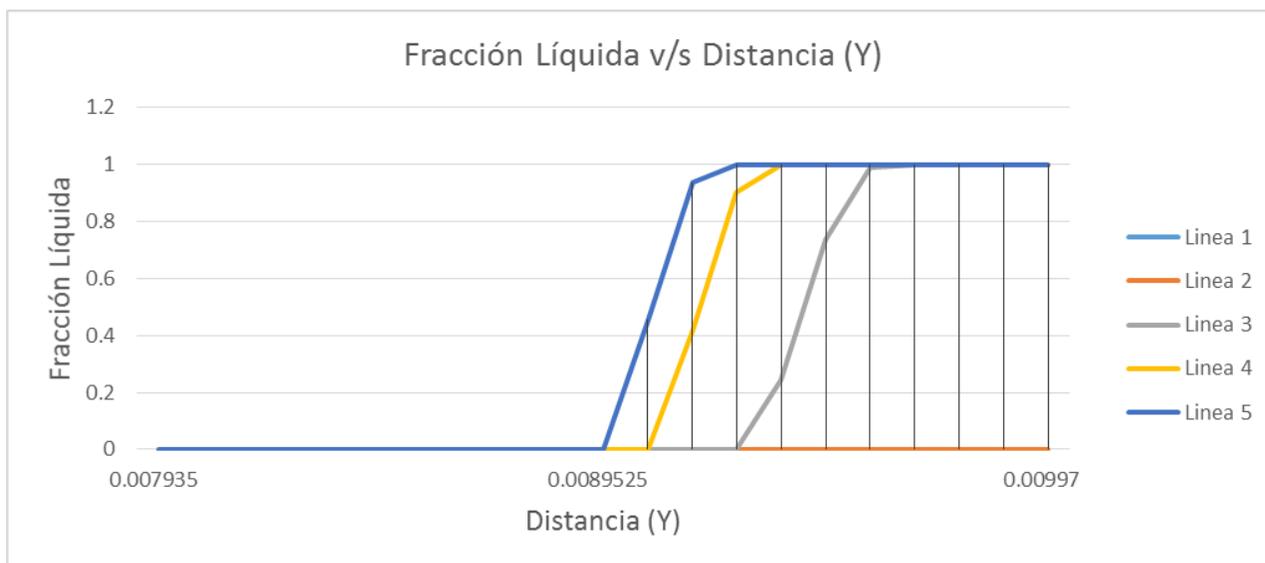


Figura 4.8. Grafica de fracción líquida de las líneas hipotéticas en el tiempo de 4 h 22 min y 30 s.

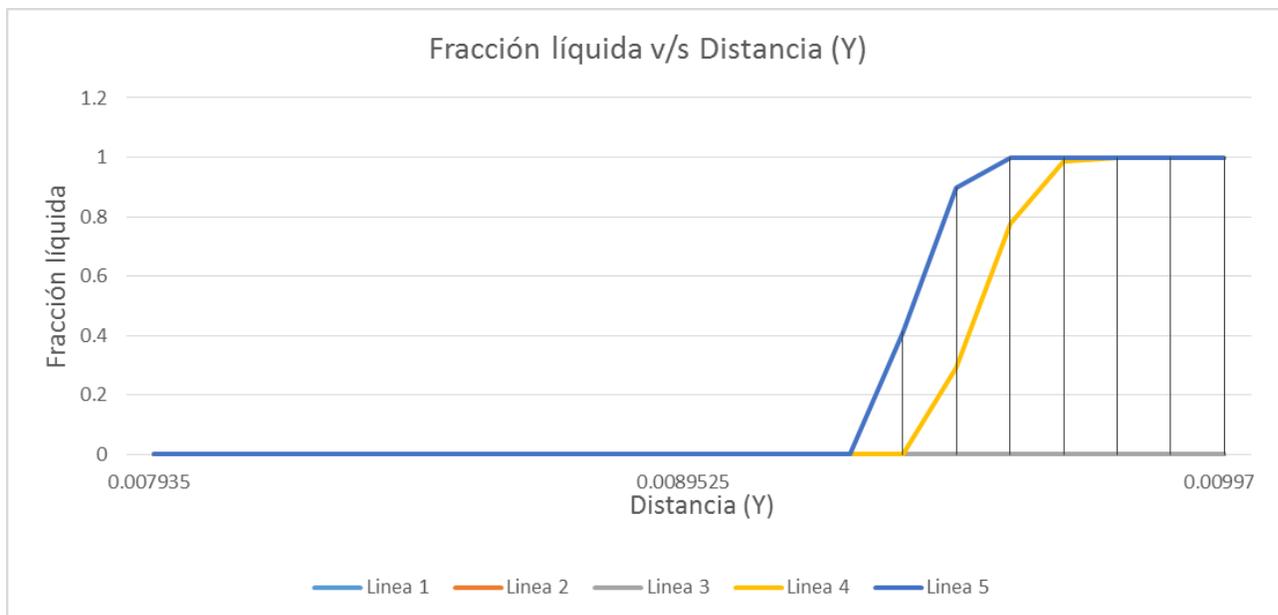


Figura 4.9. Grafica de fracción líquida de las líneas hipotéticas en el tiempo de 5 h 22 min

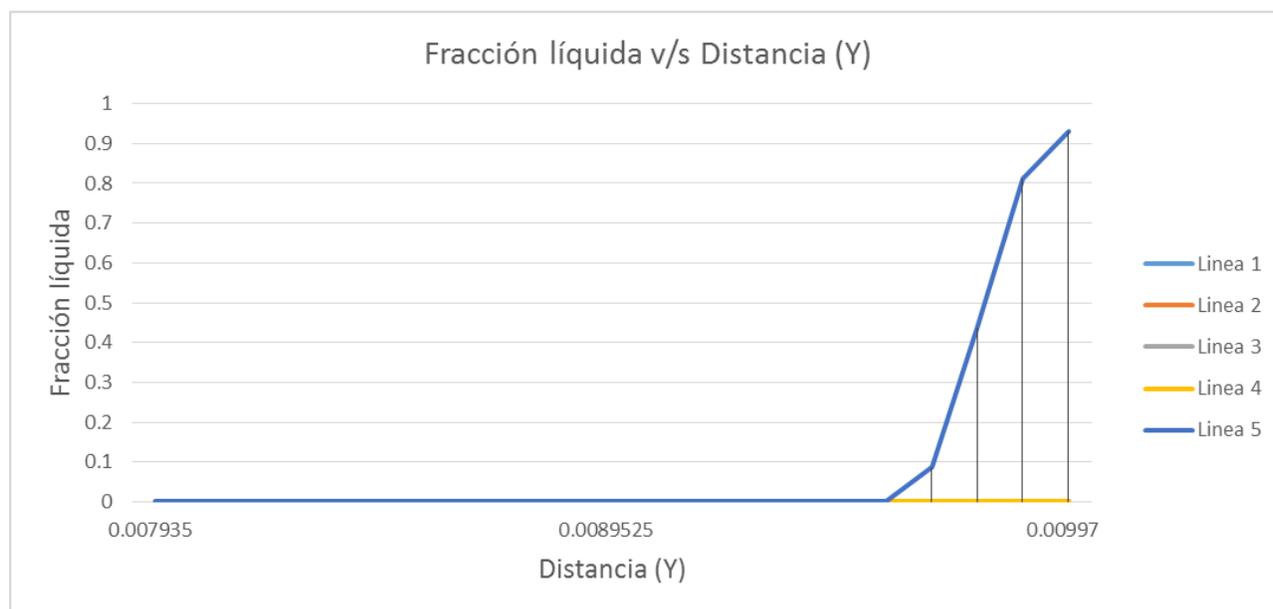


Figura 4.10. Grafica de fracción líquida de las líneas hipotéticas en el tiempo de 6 h 11 min y 30 s.

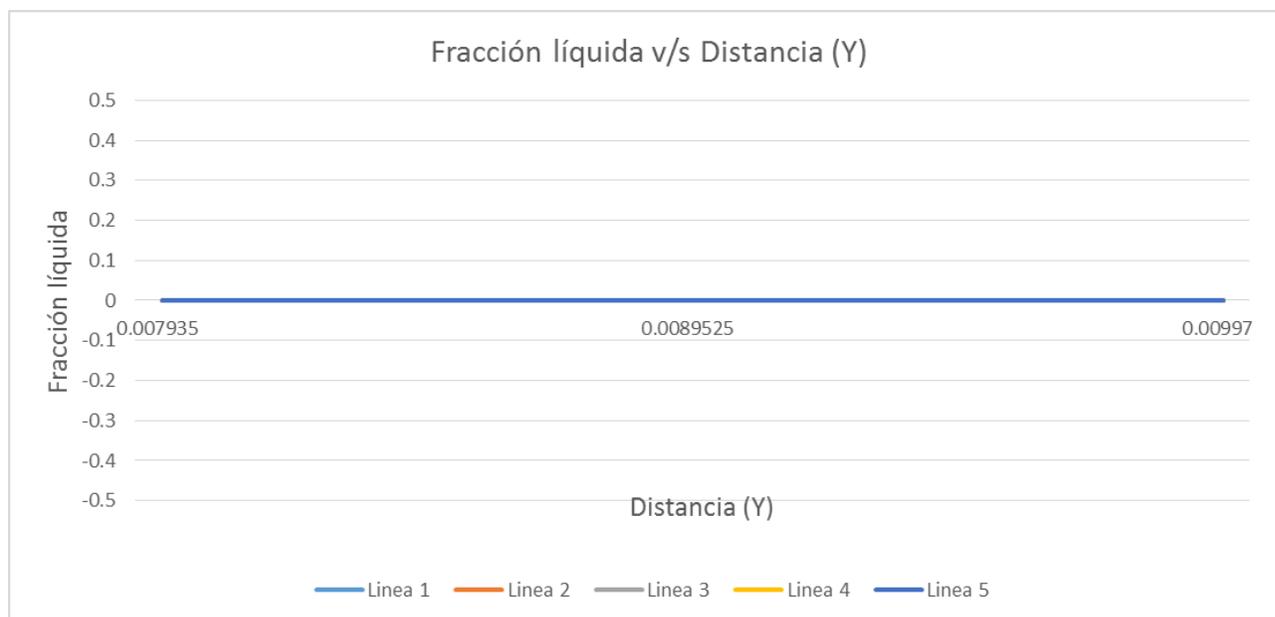


Figura 4.11. Grafica de fracción líquida de las líneas hipotéticas en el tiempo de 6 h 31 min.

A partir de los resultados numéricos se puede concluir que el tiempo de solidificación total del PCM (hexadecano sin nanopartículas) es de 6 horas con 31 minutos.

4.9.2 Influencia de la concentración de nanopartículas en el tiempo de solidificación

De acuerdo a lo estudiado en la sección 2.5 es claro que las propiedades térmicas de un fluido se ven potenciadas por la presencia de nanopartículas, por lo tanto, otro estudio de interés es analizar la influencia que ejerce la concentración volumétrica de nanopartículas en la síntesis del PCM hexadecano con nanopartículas del Al_2O_3 , lo que se denomina nanofluido.

De la misma forma en que se ha determinado el tiempo de solidificación del PCM en la sección 4.9.1 se calcula el tiempo de solidificación del hexadecano modificado con nanopartículas (nanofluido). Para lograr esto, se ha considerado las propiedades del nanofluido en función de la concentración de nanopartículas de acuerdo a los modelos presentados en la sección 2.5. La subrutina programada para las propiedades del nanofluido consideran la concentración de nanopartículas modificando la propiedad “real conc” en el archivo .udf (anexo 2). Las

concentraciones analizadas son de 1, 2, 3, 4 y 5% en volumen. Los resultados obtenidos para los tiempos de solidificación se muestran en la **tabla 4.5**.

Tabla 4.5. Tiempos de solidificación para distintas concentraciones de nanopartículas

Concentración (%)	Tiempo de solidificación (h:min:s)	Porcentaje de error referido al tiempo anterior	Porcentaje de error referido a la concentración 0%
0	6:31:00	-	-
1	6:28:30	0.64%	0.64%
2	6:23:30	1.29%	1.92%
3	6:21:00	0.65%	2.56%
4	6:18:30	0.66%	3.20%
5	6:15:30	0.79%	3.96%

De los resultados se puede concluir de forma general que la influencia de la concentración de nanopartículas en el tiempo de solidificación es baja ya que para una concentración del 5% el tiempo de solidificación disminuye en un 4% aproximadamente.

4.9.3 Cantidad de calor transferido

Tal como se muestra en la sección 1.3 es posible calcular la cantidad de calor latente que el O-PCM hexadecano transfiere al agua usando la **ecuación 1.6** como sigue:

$$Q = m\Delta_{pc}h = V \cdot \rho \cdot \Delta_{pc}h = \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \cdot L \cdot \rho \cdot \Delta_{pc}h$$

Donde:

r_2 : Radio interior de la tubería exterior = 0.007935 (m)

r_3 : Radio exterior de la tubería interior = 0.009970 (m)

L : Longitud de la tubería = 0.250 (m)

ρ : Densidad del Hexadecano a la temperatura de cambio de fase

Así

$$\Delta Q = \pi \cdot (0.00997^2 - 0.007935^2) \cdot 0.25 \cdot 773,2788 \cdot 216\,600 = 4\,793.17(J)$$

Este valor es consistente dado que la cantidad de Hexadecano presente en el espacio anular de la tubería es pequeño ($2.86 \times 10^{-5} \text{ m}^3$). Notar que éste cálculo se ha hecho para una concentración nula de nanopartículas en el fluido.

Para obtener el calor latente entregado por el nanofluido en la simulación computacional, se debe extraer el valor del calor transferido a través de la superficie 2 y restarle el calor transferido a través de la superficie 3. Tales superficies pueden ser apreciadas en la **figura 4.12**.

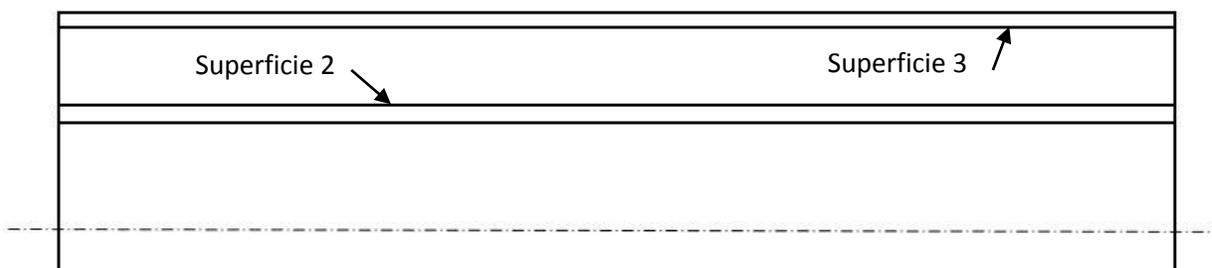


Figura 4.12. Superficies de transferencia de calor.

Luego, para observar la influencia de las nanopartículas en la cantidad de calor transferido se ha construido la **tabla 4.6** que muestra los resultados de la tasa total de transferencia de calor en las superficies descritas en la **figura 4.12**.

Tabla 4.6. Transferencia de calor del PCM

Concentración de nanopartículas (%)	Tiempo (s)	Tasa total de transferencia de calor en la superficie 2 (W)	Tasa total de transferencia de calor en la superficie 3 (W)	Total de calor transferido (J)	Porcentaje de aumento respecto a la concentración anterior	Porcentaje de aumento respecto a la concentración nula
0	23460	4.509	4.311	4649.01		
1	23310	4.568	4.350	5099.35	9.69%	9.69%
2	23010	4.634	4.393	5537.53	8.59%	19.11%
3	22860	4.685	4.435	5715.95	3.22%	22.95%
4	22710	4.747	4.482	6030.78	5.51%	29.72%
5	22530	4.798	4.526	6139.45	1.80%	32.06%

De la **tabla 4.6** se puede concluir que el valor calculado del total de calor transferido para la concentración nula (4.793 kJ) y el mismo valor obtenido a través de la simulación computacional (4.649 kJ) difieren en un porcentaje de 3%, dicha diferencia se debe al calor sensible administrado ya que la simulación parte desde un punto ligeramente superior a la temperatura de cambio de fase.

Se puede concluir además de forma general, que el porcentaje de aumento de la cantidad de calor transferido alcanza un 32% cuando la concentración de nanopartículas se aumenta en un 5% en el nanofluido.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la presente tesis se ha hecho una exploración acerca de los distintos métodos de almacenamiento de energía, centrándose en el almacenamiento de calor latente del cambio de fase sólido-líquido, estableciendo que el calor latente que puede almacenar un O-PCM como el hexadecano es de 216 600 (J/kg). Este valor resulta especialmente alto en comparación con la densidad de almacenamiento de otros materiales como los vistos en la sección 1.5.

Por otro lado, se ha estudiado experimentalmente el comportamiento de las propiedades térmicas del hexadecano como el calor específico, conductividad térmica, densidad y viscosidad, en función de su temperatura, en un rango aproximado entre los 283 K a los 313 K.

El calor específico del hexadecano, oscila entre los 1040 y los 6040 (J/kgK), cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 308 K, su valor muestra un máximo local en un pequeño contorno alrededor de la zona de cambio de fase, lo que representa un resultado óptimo dado que significa que la capacidad de absorción de calor se ve aumentada justo en la zona de interés. Se ha construido además una función que caracteriza el comportamiento del calor específico en función de la temperatura, la cual tiene un error promedio de 2.76 %.

La conductividad térmica del hexadecano, oscila entre los 0.135 y los 1.087 (W/mK), cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 313 K, su valor muestra un máximo local en un pequeño contorno alrededor de la zona de cambio de fase, lo que representa un resultado óptimo dado que significa que la capacidad de conducción de calor se ve aumentada justo en la zona de interés. Se ha construido además una función que caracteriza el comportamiento de la conductividad térmica en función de la temperatura, la cual tiene un error promedio de 2 %.

La densidad del hexadecano, varía entre los 764.25 y los 799.50 (kg/m³), cuando la temperatura se hace variar entre 283 y 301.15 K, su valor muestra una variación sólo de un 4.5 % en el rango de temperaturas indicado, y éste porcentaje es menor si se considera solo un pequeño rango de temperaturas alrededor de la temperatura de cambio de fase (2.27 % entre los 289 y 293 K), lo que permite considerar que el proceso de carga y descarga de energía del O-PCM ocurre a una densidad prácticamente constante, lo cual resulta ser una ventaja considerable respecto de otros O-

PCM, los cuales cuentan con una variación de densidad cercana al 10% (Mehling H., 2008). Se ha construido además una función que caracteriza el comportamiento de la densidad en función de la temperatura, la cual tiene un error promedio de 0.02 %.

La viscosidad dinámica del hexadecano, varía entre los 0.00225 y los 0.00348 (Pa·s), cuando la temperatura se hace variar entre 293.15 y 313.15 K. El hecho de que la viscosidad sea continua en el rango de temperaturas y al gradiente de velocidad establecido permite que el fluido pueda ser considerado como newtoniano para bajos esfuerzos. Se ha construido además una función que caracteriza el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura, la cual tiene un error promedio de 0.02 %.

Se han estudiado las ecuaciones que caracterizan la variación de las propiedades térmicas de un nanofluido de acuerdo a su concentración volumétrica de nanopartículas. Se ha encontrado que la viscosidad presenta un aumento de 5.2 y 10.8 %, la conductividad térmica aumenta en un 6.1 y 12.5 %, la densidad aumenta un 21.5 y 43.5 y el calor específico disminuye en promedio un 15.3 y 11.39% cuando la concentración volumétrica de nanopartículas en el nanofluido aumenta en 2 y 4 % respectivamente.

Se ha simulado computacionalmente con el software Ansys/Fluent con licencia académica, el proceso de descarga de energía de un nanofluido a base hexadecano y nanopartículas de Al_2O_3 en un sistema comprendido por dos tuberías concéntricas usando agua como sumidero del calor latente del nanofluido. Se consideraron las propiedades termo físicas de los fluidos variables con la temperatura según previo estudio experimental y bibliográfico de los fluidos involucrados.

Se ha estudiado además el efecto de la concentración de nanopartículas en el proceso de descarga de energía del O-PCM encontrándose que el tiempo de solidificación disminuye en aproximadamente un 4 % y la cantidad de calor almacenado aumenta en un 32 % cuando la concentración volumétrica de nanopartículas de Al_2O_3 aumenta en un 5 %.

BIBLIOGRAFÍA

- Brinkman, H. C. (1952). *The Viscosity of concentrated suspensions and solutions*.
- Cengel A. Yunes, B. A. (2009). *Termodinamica*. Mexico: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGraw-Hill.
- Dominguez M., G. C. (2012). *Algunas posibilidades de aplicación de los acumuladores de cambio de fase de energías renovables*. Santiago: Instituto del Frío.
- F. Gutmann, L. M. (1952). *The temperature dependence of the viscosity of liquids*. Sydney.
- Kreith, F. (2007). *Principios de transferencia de calor*. Denver, Colorado.
- Maxwell, J. (1891). *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford.
- Mehling H., C. L. (2008). *Heat and cold storage with PCM*. California: Springer.
- Murshed, S. L. (2008). *Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids*.
- Mustafaev, R. (1973). *Thermal Conductivity of Higher Saturated n-Hydrocarbons*.
- Neila, J. (2008). *Los materiales de cambio de fase*. Madrid.
- Oliver A., N. F.-S. (2007). *PCM choolsing and classification acording ti their characteristics fot their application for thermal energy storage systems*. California.
- Permutt, G. (1960). *Absolute viscosity of the n - Praffin liquids*. New Jersey.
- Rossini, F. P. (1953). *Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds* Carnegie Press.
- Stefan. (1981). *Über die theorie der eisbildung, insbesondere die eisbildung im polarmeere*.
- Todd, S. M. (1967). *Low-Temperature Thermal Data for n-Pentane, n-Heptadecane and n-Octadecane*.
- Vasco D., C. D. (2013). *Estudio computacional de convección de calor en régimen laminar de un nanofluido en ducto cuadrado*. Santiago.
- Wu, S. Z. (2010). *Preparation and Melting / Freezing Characteristics of Cu / Paraffin Nanofluid as Phase-*
- Zeinali Heris, S. N. (2013). *International Journal of heat and fluid flow laminar convective heat transfer of Al2O3 / water nanofluid through square cross-sectional duct. .*
- Zhu, H. L. (2004). *A novel one-step chemical method for preparation of cooper nanofluids*.

ANEXOS

Anexo 1: Propiedades del Agua a distintas temperaturas

Propiedades del agua saturada													
Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _g , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Anexo 2: Programación de archivo .udf

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity,c,t)
{
  real mu;
  real munf = C_MU_L(c,t);
  real temp = C_T(c,t);
  real conc = 0.0;
  if (temp < 291)
  {
    mu =0.00366112685491565;
  }
  else if (temp >= 291 && temp <= 323)
  {
    mu = 2.93603827812e-1-2.47061582067e-3*temp+7.00628526573e-6*(pow(temp,2))-
6.66713739343e-9*(pow(temp,3));
  }
  else
  {
    mu = 0.00225014278848851;
  }
  munf = mu/(pow((1-conc),2.5));
  return munf;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_density,c,t)
{
  real rhof;
  real temp = C_T(c,t);
  real conc = 0.0;
  real rhos = 8954.0;
  real rhonf = C_R(c,t);
  if (temp < 283)

```

```

{
  rhof = 799.4619056;
}
else if (temp >= 283 && temp < 289)
{
  rhof = 5.65172067321e-7-3.02592313525e1*temp+2.44955010549e-1*(pow(temp,2))-
4.52472660476e-4*(pow(temp,3));
}
else if (temp >= 289 && temp < 293)
{
  rhof = -1.42518746934e-9+7.25562591671e2*temp-
4.94123785583*(pow(temp,2))+8.44342244870e-3*(pow(temp,3));
}
else if (temp >= 293 && temp < 307)
{
  rhof = 5.27539830027e-6+1.18214598344e1*temp-5.08856704245e-
2*(pow(temp,2))+6.67428220358e-5*(pow(temp,3));
}
else
{
  rhof = 764.3485895;
}
  rhonf = (1-conc)*rhof+conc*rhos;
  return rhonf;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_thermal_conductivity,c,t)
{
  real kf;
  real temp = C_T(c,t);
  real conc = 0.0;
  real ks = 400;
  real knf = C_K_L(c,t);

```

```

if (temp < 283)
{
    kf = 2.83779544516e-1;
}
else if (temp >= 283 && temp < 290)
{
    kf = -4.93583229562e-10+3.52347723425*temp-2.47081322855e-
2*(pow(temp,2))+4.33270837684e-5*(pow(temp,3));
}
else if (temp >= 290 && temp < 292)
{
    kf = -2.02256920217e-9-1.02269425983e+2*temp+7.03603646660e-1*(pow(temp,2))-
1.21013553111e-3*(pow(temp,3));
}
else if (temp >= 292 && temp < 313)
{
    kf = -4.99809479379e-10+6.37447995719e-1*temp-6.25039327182e-
3*(pow(temp,2))+2.04282531760e-5*(pow(temp,3))-2.22376488586e-8*(pow(temp,4));
}
else
{
    kf = 1.59181738761e-1;
}
knf = ((ks+2*kf-2*conc*(kf-ks))/(ks+2*kf+conc*(kf-ks))*kf;
    return knf;
}
DEFINE_SPECIFIC_HEAT(my_user_cp,T,Tref,h,yi)
{
    real cpf;
    real conc = 0.0;
    real cps = 383.0;

```

```

real cpnf;
real rhof;
real rhos = 8954.0;
real aux_rho;
real nanof_rho;
  if (T < 283)
  {
    aux_rho = 799.4619056;
  }
  else if (T >= 283 && T < 289)
  {
    aux_rho = 5.65172067321e-7-3.02592313525e1*T+2.44955010549e-1*(pow(T,2))-
4.52472660476e-4*(pow(T,3));
  }
  else if (T >= 289 && T < 293)
  {
    aux_rho = -1.42518746934e-9+7.25562591671e2*T-
4.94123785583*(pow(T,2))+8.44342244870e-3*(pow(T,3));
  }
  else if (T >= 293 && T < 307)
  {
    aux_rho = 5.27539830027e-6+1.18214598344e1*T-5.08856704245e-
2*(pow(T,2))+6.67428220358e-5*(pow(T,3));
  }
  else
  {
    aux_rho = 764.3485895;
  }

nanof_rho = (1.0-conc)*aux_rho+conc*rhos;
if (T < 283)
{

```

```

    cpf = 2.07762166163e+3;
}
else if (T >= 283 && T < 285.5)
{
    cpf = 1.76596137763e-4-9.51658326556e+1*T+3.59278880559e-1*(pow(T,2));
}
else if (T >= 285.5 && T < 292)
{
    cpf = 7.55241072854e+8-4.97767771056e+6*T-
2.78338553437e+3*(pow(T,2))+7.28892794435e+1*(pow(T,3))-1.20931122443e-1*(pow(T,4));
}
else if (T >= 292 && T < 303)
{
    cpf = 7.31281050427e+7-
4.92930037649e+5*T+6.84082265794e+1*(pow(T,2))+5.13910053852*(pow(T,3))-
8.66175232887e-3*(pow(T,4));
}
else if (T >= 303 && T < 306)
{
    cpf = 5.82664180407e+7-1.90487171276e+5*T-7.99290124566e+2*(pow(T,2))-
4.03831357041e-1*(pow(T,3))+2.16143070257e-2*(pow(T,4))-3.84171950754e-5*(pow(T,5));
}
else if (T >= 306 && T < 309)
{
    cpf = -1.20183000604e-5+1.37800279955e+1*T-2.54191718609e-2*(pow(T,2));
}
else
{
    cpf = 1.83164923574e+3;
}
cpnf = (conc *rhos*cps+(1.0-conc)*aux_rho*cpf)/((1.0-conc)*aux_rho+conc*rhos);
*h = cpnf*(T-Tref);

```

```

    return cpnf;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity_water,c,t)
{
    real mu;
    real munf = C_MU_L(c,t);
    real temp = C_T(c,t);
    real conc = 0.0;
    real A = -3.540;
    real B = 222.21;
    real C = -149.37;
    mu = (pow(10,(A+B/(temp+C))))*0.1;
    munf = mu/(pow((1-conc),2.5));
    return munf;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_density_water,c,t)
{
    real rhof;
    real temp = C_T(c,t);
    real conc = 0.0;
    real rhos = 8954.0;
    real rhonf = C_R(c,t);
    rhof = 1022.4-0.11052*temp+0.00096272*(pow(temp,2))-3.0115e-6*(pow(temp,3));
    rhonf = (1-conc)*rhof+conc*rhos;

    return rhonf;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_thermal_conductivity_water,c,t)
{
    real kf;
    real temp = C_T(c,t);
    real conc = 0.0;

```

```

real ks = 400;
real knf = C_K_L(c,t);
  kf = -0.6326+0.007196*temp-1.144e-5*(pow(temp,2))+4.2365e-9*(pow(temp,3));
  knf = ((ks+2*kf-2*conc*(kf-ks))/(ks+2*kf+conc*(kf-ks)))*kf;
  return knf;
}
DEFINE_SPECIFIC_HEAT(my_user_cp_water,T,Tref,h,yi)
{
  real cpf;
  real conc = 0.0;
  real cps = 383.0;
  real cpnf;
  real rhof;
  real rhos = 8954.0;
  real aux_rho;
  real nanof_rho;
  aux_rho= 1022.4-0.11052*T+0.00096272*(pow(T,2))-3.0115e-6*(pow(T,3));
  nanof_rho = (1.0-conc)*aux_rho+conc*rhos;
  cpf=-3755.9+67.95*T-0.1915*pow(T,2)+0.0001785*pow(T,3);

  cpnf = (conc *rhos*cps+(1.0-conc)*aux_rho*cpf)/((1.0-conc)*aux_rho+conc*rhos);
  *h = cpnf*(T-Tref);
  return cpnf;
}
DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,nv)
{
  real x[ND_ND];
  real y;
  face_t f;
  begin_f_loop(f,thread)
  {

```

```
F_CENTROID(x,f,thread);  
y=x[1];  
F_PROFILE(f,thread,nv)=2*0.0293336716479496*(1.-y*y/(0.006915*0.006915));  
}  
end_f_loop(f,thread)  
}
```