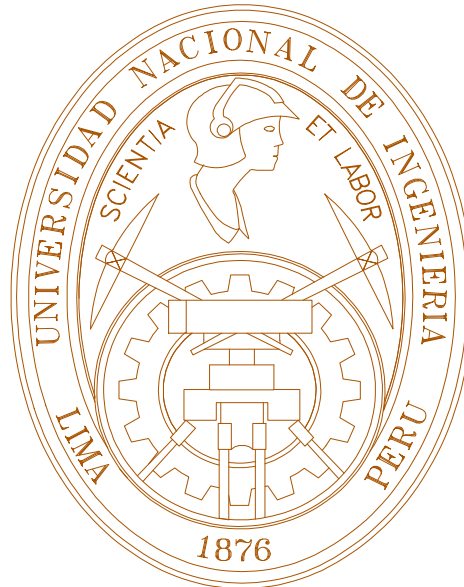


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“OBSTRUCCIÓN DE DUCTOS SUBMARINOS
DE PETRÓLEO CAUSADO POR LA
DEPOSICIÓN DE PARAFINAS”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO NAVAL**

MAO ILICH ROMERO VELÁSQUEZ

PROMOCIÓN 2003–II

LIMA – PERÚ

2007

INDICE TEMÁTICO

PROLOGO	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.2. Algunos Métodos Para Prevenir y Solucionar el Problema.	6
1.2. Antecedentes.....	7
1.2.1. Mecanismos de Deposición de Parafina.....	8
a).- Difusión Molecular.....	8
b).- Difusión Browniana.....	9
c).- Dispersión por Cisallamiento.....	9
d).- Deposición por Gravedad.....	10
1.2.2. Modelos de Deposición de Parafinas.....	10
1.3. Objetivos del Trabajo.....	12
1.4. Justificación del trabajo.....	13
1.5. Descripción General.....	14
2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA	17
2.1. Descripción del Experimento Realizado.....	18
2.1.1. Bancada Experimental utilizada.....	18
2.1.2. Descripción del Ducto de Sección rectangular.....	20
a).- Región de Entrada	21
b).- Región de Prueba	21
2.1.3. Obtención de los Datos Experimentales.....	22
a).- Condición de Fluido Bajo Diferentes Caudales	22

b).- Condición de Fluido Estacionario.....	23
2.1.4. Medición de Diversas propiedades Termo-físicas.....	23
a).- Masa específica de la Mixtura Óleo Spindle / parafina..	23
b).- Viscosidad de la Mixtura Óleo Spindle / parafina.....	24
c).- Solubilidad de la Mixtura Óleo Spindle / parafina.....	25
d).- Peso Molecular de la Mixtura Óleo Spindle / parafina...	26
2.2. Modelo Físico.....	27
2.2.1. Hipótesis.....	28
2.2.2. Modelamiento del Crecimiento del Depósito de Parafina..	29
2.3. Modelo Difusivo Bi-dimensional.....	31
2.3.1. Principio de Conservación de Masa.....	32
2.3.2. Principio de Conservación de Energía.....	33
2.3.3. Principio de Conservación de la Fracción Volumétrica...	33
2.4. Formulación en Coordenadas Móviles.....	34
2.4.1. Ecuación de Conservación de Masa.....	36
2.4.2. Ecuación de Conservación de Energía.....	38
a).- Para la Región del Fluido.....	38
b).-Para la Región de la Parafina.....	39
c).-Para la Región del Cobre.....	40
2.4.3. Ecuación de Conservación de la Fracción Volumétrica..	41
2.5. Condiciones Iniciales y de Contorno.....	41
3. METODO NUMÉRICO.....	43
3.1. Discretización de las ecuaciones.....	44
3.1.1. Ecuación de Continuidad.....	45
3.1.2. Ecuación de conservación de una Grandezza Escalar....	47

3.2. Esquema de Interpolación.....	50
3.3. Temperatura de la Interfase y Espesura de Deposición.....	52
3.4. Solución del Sistema Algebraico.....	53
3.5. Criterio de Convergencia.....	54
3.6. Algoritmo de Solución.....	55
4. ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS.....	58
4.1. Propiedades Usadas en la Solución del Problema.....	59
4.1.1. Propiedades Termo físicas.....	59
4.1.2. Coeficiente de Difusión Molecular.....	60
4.2. Resultados del Modelo Bi-dimensional.....	61
4.2.1. Resultados para Fluido a Diferentes Caudales.....	62
4.2.2. Resultados para Fluido Estacionario.....	68
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.1. Conclusiones.....	72
5.2. Recomendaciones.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75

PROLOGO

Uno de los problemas críticos encontrados por la industria del petróleo, en la producción de petróleo del fondo marino, es la deposición de parafinas con alto peso molecular en la pared interna de las líneas submarinas. Una previsión exacta del índice de deposición y de la distribución espacial de la parafina depositada, es una información fundamental para el proyecto de estas líneas.

Una minuciosa revisión bibliográfica mostró que no existen suficientes informaciones para determinar cuales son los mecanismos más relevantes, responsables por la deposición de parafinas. Siendo que, la mayoría de simulaciones numéricas disponibles en la bibliografía, utilizan el mecanismo de difusión molecular como único responsable por la deposición.

En el presente trabajo se realiza un análisis numérico del proceso de deposición de parafinas utilizando el modelo de difusión molecular y se compara con datos experimentales obtenidos de un experimento simple y básico en un ducto de sección rectangular. La formulación matemática

utilizada es bi-dimensional y transiente, la cual determina el índice de deposición en función del gradiente de concentración de la parafina en el petróleo. Para resolver las ecuaciones de conservación de masa, energía y de la fracción de masa juntamente con la ecuación difusiva que describe el crecimiento del depósito de parafina, se utilizó el método de volúmenes finitos.

Los resultados obtenidos presentaron diferencias significativas con relación a los datos experimentales, indicando que la difusión molecular no puede ser el único mecanismo responsable por la deposición de parafina. Se verificó también que la consideración del calor latente en el balance de energía, acelera el proceso de deposición pero no influencia en la espesura final depositada, después de alcanzar el régimen permanente.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El petróleo continuará siendo una de las fuentes de energía más importantes de nuestra sociedad, proporcionándonos una variedad de productos derivados de gran utilización, volviéndolo uno de los insumos fundamentales para el desenvolvimiento económico del mundo; es evidente también, que el precio del petróleo tiene vital importancia para el desarrollo de la exploración y producción del mismo, cuando el precio experimenta incrementos se revitalizan yacimientos cuyos costos de extracción son también altos y muchas veces considerados como no económicos; a su vez, posibilita que se invierta cada vez más en su exploración, permitiendo que la misma avance hacia las costosas pero cada vez más importantes áreas marginales, tanto desde el punto de vista geológico como tecnológico.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, una significativa parte de las reservas de petróleo están localizadas a grandes distancias de la costa y las áreas de mayor

actividad en la producción “*offshore*” son el Golfo de México, el Mar del Norte, el Mar de China, el Oeste de África y la Costa de Brasil. La producción de petróleo en aguas profundas, involucra el uso de equipamientos especialmente diseñados, la realización de operaciones complejas y por tanto, mayor inversión de capital.

En este contexto, uno de los problemas encontrados por la industria del petróleo es la deposición de parafina, en el interior de las líneas de producción y transporte. El petróleo fluye de los pozos para las líneas de transporte a altas temperaturas, estas líneas transportan el petróleo para las plataformas, como se muestra en la figura 1.1.

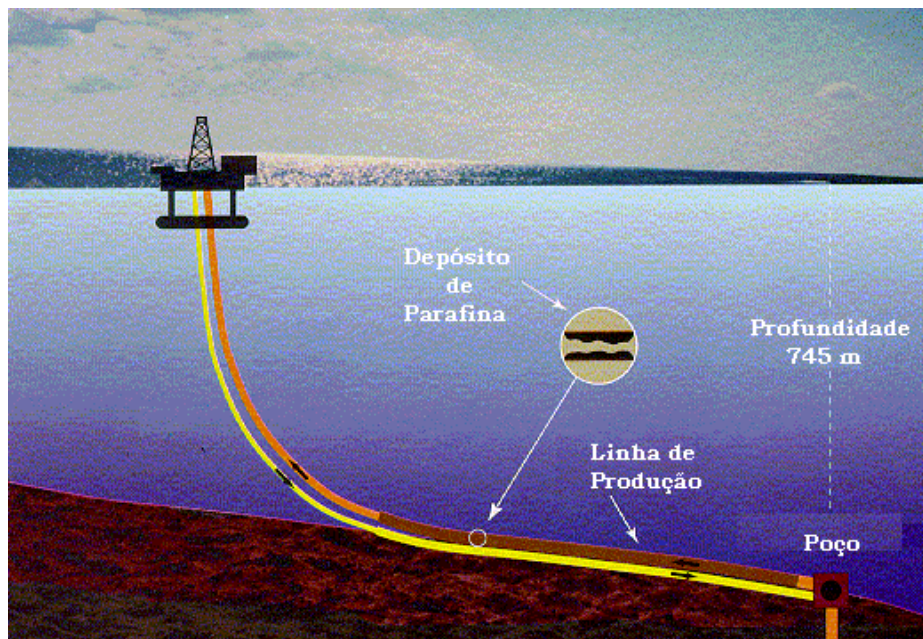


Figura 1.1 - “*Línea de transporte de petróleo*”

La temperatura del agua de mar en aguas profundas es del orden de 5°C; a la medida que el petróleo deja el pozo y fluye a través de las líneas

de transporte, su temperatura decrece debido a la interacción con el ambiente mas frío, tornándose menos soluble hasta que la deposición de parafina comienza por los componentes de alto peso molecular.

La solubilidad de la parafina, contenida en el petróleo, es una función decreciente de la temperatura, es decir, existe mayor porcentaje en peso de parafina para menores temperaturas.

La acumulación de la parafina depositada lleva a un aumento de la potencia de bombeamiento y a la disminución del flujo, pudiendo causar la obstrucción parcial o total de la línea con pérdidas de producción e inversión de capital, como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2 - “Línea parcialmente bloqueada por la deposición de parafina”

1.1.1. Algunos Métodos Para Prevenir y Solucionar el Problema

Existen algunos métodos tradicionales de prevenir y solucionar la deposición de parafina que son empleados por la industria del petróleo; estos métodos incluyen, entre otros, el uso de inhibidores químicos, el calentamiento de líneas por medio eléctrico, aislamiento térmico, remoción termoquímica, disolución química, exposición magnética y por remoción mecánica o pasaje de *pig*. El costo de utilización de estos métodos, sin embargo, aumenta proporcionalmente con la profundidad del agua, siendo crucial para la viabilidad económica para la producción de petróleo “*offshore*”. Actualmente, el método mas utilizado para la remoción de depósitos de parafina del interior de las líneas, ha sido el de pasaje de *pigs*; esta operación es muy peligrosa debido a que existe la posibilidad de que el *Pig* se quede preso en la línea, esto puede ocurrir por que la fuerza necesaria para mover el *pig* y para remover el deposito de parafina puede ser muy superior a aquella fuerza que es generada por el fluido.

Los Pigs, son equipamientos que inseridos dentro de un tubo, viajan por toda su extensión empujados por el propio flujo del fluido; estos *Pigs* son clasificados en dos categorías: “*Utility Pigs*” que realizan la función de limpieza, separación de productos e

remoción de agua, e “*In-Line Inspection Tools*” que proporcionan informaciones de las condiciones de la línea, así también, como de la extensión y ubicación de algún problema.

1.2. ANTECEDENTES

Una detallada revisión crítica de la bibliografía fue preparada como parte de un proyecto de pesquisa en el área de deposición de parafina realizada por “Azavedo y Teixeira, (2003)”; donde uno de los principales trabajos analizados en esta revisión fue el trabajo de “Burger *et al.* (1981)”, quienes definieron que los posibles mecanismos responsables por la deposición de parafina eran : la difusión molecular, la difusión Browniana, la dispersión por cisallamiento y la deposición gravitacional; después de una serie de experimentos llegaron a concluir que la de difusión molecular es el mecanismo de deposición dominante, siendo por eso incluido en la mayoría de los modelos disponibles en la bibliografía. En esta revisión crítica mencionada anteriormente, los investigadores concluyen que no hay evidencia experimental suficiente para confirmar que la difusión molecular es el único mecanismo de deposición de parafina.

Recientemente “Fusi (2003)”, presento un modelo matemático para la deposición de parafina que considera los mecanismos de difusión molecular y dispersión por cisallamiento.

Un análisis de los modelos numéricos de deposición disponibles en la literatura, muestra que todos hacen uso de la metodología del ajuste de

constantes para obtener una buena concordancia entre los resultados obtenidos numéricamente y los datos de laboratorio o de campo.

1.2.1. Mecanismos de Deposición de Parafina

Burger *et al.* (1981), realizaron un estudio bastante completo sobre los mecanismos de deposición, siendo la referencia mas citada en esta área; ellos realizaron experimentos en tubos verticales y horizontales, mostrando que los efectos gravitacionales no deben ser considerados en el proceso de obstrucción del ducto; también modelaron numéricamente las contribuciones de la difusión molecular, difusión Browniana y dispersión por cisallamiento, concluyendo que el primer mecanismo domina para mayores temperaturas y flujo de calor, lo contrario ocurre para la dispersión por cisallamiento. Los autores también concluyeron que la difusión Browniana es despreciable comparada con los otros mecanismos. Tales mecanismos son presentados resumidamente a seguir:

a) Difusión Molecular

Durante el flujo de petróleo, cuando la temperatura de la superficie interna del ducto es menor que la temperatura del fluido, se origina un gradiente térmico. Independientemente del régimen del flujo, este gradiente térmico genera otro gradiente de concentración de parafina en la fase líquida, decreciente en la dirección radial, alcanzando su menor valor en la interfase sólido-líquido. Las

moléculas de parafina precipitaran de la solución hasta que la fase líquida entre en equilibrio con la fase sólida. La región mas fría junto a la pared presentará una menor concentración, induciendo el transporte de parafina desde el centro para la pared del ducto por difusión molecular.

b) Difusión Browniana

Es posible que algunas regiones del fluido estén a una temperatura, en la cual, moléculas de parafinas están precipitando de la solución y permanecen suspensos en el fluido, éstas chocaran con moléculas del fluido térmicamente agitadas produciendo un movimiento aleatorio. En el caso de que exista un gradiente de concentración de moléculas de parafinas sólidas, estas tenderán a dislocarse en el sentido decreciente del perfil de concentración, depositándose al chocar con la pared del ducto.

c) Dispersión por Cisallamiento

Así como la difusión Browniana, la difusión por cisallamiento es un mecanismo de transporte lateral de partículas sólidas en suspensión; el movimiento de estas partículas dependen de su tamaño, densidad relativa y concentración. Varios estudios sobre suspensiones concentradas indican que el transporte lateral de partículas inmersas en un fluido cisallante se da en la dirección opuesta al gradiente del índice de cisallamiento "Hampton *et al.*

(1997)” y “Tetlow *et al.* (1998)”. Esto llevaría a un movimiento de las moléculas de parafinas sólidas para lejos de la pared del ducto, donde el cisallamiento es máximo.

d) Deposición por Gravedad

Las moléculas de parafinas sólidas tenderían a depositarse en el fondo del ducto, por ser más densos que el petróleo. Burger *et al.* (1981) observó experimentalmente que la deposición por gravedad puede ser despreciable.

1.2.2. Modelos de Deposición de Parafinas

Son varios los autores que consideran la difusión molecular como único mecanismo responsable por la deposición de parafinas, entre los cuales mencionamos a algunos. Hamouda y Ravnoy (1992) compararon sus resultados numéricos con datos de campo, objetivando explicar el comportamiento de la pérdida de carga en las líneas de transporte de petróleo; sus resultados obtenidos presentaron una significativa diferencia en magnitud, pero la evolución temporal de la presión mostró el mismo comportamiento. Ribeiro *et al.* (1997) utilizaron un modelo unidimensional en régimen laminar y permanente para estudiar la deposición de parafinas en un ducto circular; ellos ajustaron sus resultados con un coeficiente de solubilidad para obtener cierta concordancia con datos experimentales, para diferentes petróleos.

Otros autores consideran además de la difusión molecular como mecanismo controlador de la deposición de parafina, los efectos de cisallamiento como mecanismo de remoción. Brown *et al.* (1993) desarrollaron un modelo numérico para predecir el índice de deposición de parafinas, concluyendo que el aumento del índice de cisallamiento disminuí el índice de deposición y aumenta la cantidad de parafina sólida en el depósito (i. e., disminuí la porosidad).

Banki y Firoozabadi (2002) afirmaron que la deposición de parafinas en las líneas de petróleo es resultado del gradiente de temperatura radial y subsiguiente difusión de flujo de masa de especies en esta dirección; ellos utilizaron la expresión para flujo difusivo en términos de difusión molecular y difusión térmica, un ejemplo numérico para una mixtura binaria muestra que ambas difusividades llevan las especies de parafina para la pared y que para largos periodos de tiempo afectan el endurecimiento de la camada en la cual la parafina es formada.

Leiroz (2004) realizó una serie de experiencias de deposición de parafinas en una cavidad rectangular, conteniendo fluido estacionario y en un canal sobre régimen de flujo laminar, ambos sujetos a gradientes transversales de temperaturas; ella

obtuvo resultados para la evolución temporal y espacial de los depósitos de parafina. Los resultados de las experiencias en canales revelan una perfecta simetría entre los depósitos obtenidos en las paredes superior e inferior del canal, lo que fue tomado como una indicación de la insignificancia del mecanismo de deposición gravitacional.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene como objetivo general, la realización de un software para simular la distribución temporal y espacial de la deposición de parafinas a lo largo de las líneas submarinas de transporte de petróleo, esa previsión de deposición sería una información valiosa que auxiliaría en la fase del proyecto de desenvolvimiento de la producción de campos submarinos (espesura e aislamiento de las líneas), así como en la determinación del programa de intervenciones en la línea (pasaje de *pigs*) de modo a mantener el flujo de petróleo en los índices deseados.

El objetivo específico de este trabajo es evaluar la importancia relativa del mecanismo de difusión molecular en la deposición de parafinas, a través de la comparación de los resultados numéricos con datos experimentales de laboratorio, para la cual se simula numéricamente el proceso de deposición de parafina en un ducto de sección rectangular.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En el Perú, así como en los países que poseen una gran extensión marítima, existe la probabilidad de encontrar reservas de petróleo a grandes distancias de la costa, esto llevaría a la producción de petróleo en aguas cada vez más profundas. En el norte de Perú, en los departamentos de Piura y Tumbes, ya existe la explotación de campos de petróleo en aguas profundas.

Diversos problemas pueden surgir cuando bajas temperaturas son alcanzadas, entre estos se pueden mencionar: el problema de formación de hidratos y el problema de formación de parafinas.

El problema de formación de parafinas, que es nuestro tema de trabajo involucra el conocimiento de varias disciplinas tales como: termodinámica, transferencia de calor, transferencia de masa, dinámica de los fluidos y métodos numéricos. Además, este trabajo cuenta con una parte experimental, para la cual es necesario tener conocimiento de métodos experimentales y cálculo de incertezas.

1.5. DESCRIPCIÓN GENERAL

Este trabajo se desarrolla en 5 capítulos, los cuales tratan los siguientes temas:

En el *Capítulo I, Introducción*, se realiza el planteamiento del problema teniendo como punto de partida la realidad nacional e internacional, indicamos también los métodos de prevención así como los

mecanismos responsables por la deposición de parafinas y mencionamos los modelos matemáticos utilizados por varios investigadores, todos con el objetivo común de simular el crecimiento de parafinas en ductos de petróleo.

En el *Capítulo II, Formulación matemática*, iniciamos este capítulo con una breve descripción de la bancada experimental utilizada y del procedimiento para la obtención de datos experimentales, tanto para fluido estacionario como para un fluido bajo diferentes caudales. Se menciona las hipótesis utilizadas para simplificar el modelo físico utilizado y se plantean las ecuaciones que gobiernan el problema.

En el *Capítulo III, Método Numérico*, Se escogió el método de los volúmenes finitos para solucionar problemas de flujo de fluidos, La principal ventaja de este modelamiento es garantizar la conservación global de las grandezas físicas. La integración temporal con el esquema de Euler totalmente implícito fue realizada para todas las ecuaciones de conservación, con relación a la integración espacial, se utilizó diferencias centrales para los términos de difusión, y aproximación *upwind* para todos los términos de convección. El sistema de ecuaciones algebraicas generadas fue resuelto utilizando el algoritmo TDMA línea por línea. Fue necesario utilizar un proceso iterativo de solución a cada paso de tiempo, siendo controladas dos grandezas: la temperatura de la interfase y la espesura de deposición. Cabe destacar que la modelación matemática fue

desarrollada íntegramente mediante el programa Matlab® versión 6.5, el cual nos ofrece soluciones más compactas al análisis numérico y una visualización gráfica más adecuada en el área de la ingeniería /20/. Este programa fue elegido por las características notables para los análisis numéricos debido a: (1) la programación más sencilla, (2) la existencia de continuidad entre valores enteros, reales y complejos, (3) la amplitud de intervalo y la exactitud de los números son mayores, (4) cuenta con una biblioteca matemática amplia, y (5) abundantes herramientas gráficas, incluidas funciones de interfaz gráfica con el usuario.

Finalmente, para un mayor entendimiento presentamos el algoritmo de cálculo y diagrama de flujo del programa, los cuales muestran los pasos secuenciales que sigue el programa del modelamiento matemático, es decir, la manera como se ha razonado para resolver el problema.

El *Capítulo IV, Análisis e interpretación de resultados*, se compara los resultados numéricos obtenidos por el programa con los datos experimentales, tanto par el fluido estacionario como para el fluido a diferentes caudales. Se analiza la influencia del calor latente, del coeficiente de difusión y del número de Reynolds en la espesura de parafina depositada en el régimen transiente y permanente.

En el *Capítulo VI, Conclusiones y Recomendaciones*, luego de realizar el análisis y discusión de resultados finalmente planteamos algunas

conclusiones y recomendaciones a la que llegamos para realizar algunas modificaciones en futuros trabajos.

CAPITULO II

FORMULACIÓN MATEMATICA

En este capítulo se presenta una breve descripción de la bancada experimental utilizada, así como el procedimiento para la obtención de los datos experimentales y el cálculo de las propiedades del fluido utilizado; en seguida se presenta el modelo matemático bi-dimensional y transiente que es utilizado para prever la deposición de parafinas utilizando únicamente el mecanismo de difusión molecular, la cual es gobernada por la ley de Fick.

La comparación de resultados numéricos y experimentales se realizará para dos condiciones diferentes, la primera condición es para el fluido bajo diferentes caudales y la segunda condición es para el fluido estacionario. La diferencia en la formulación matemática, de una condición para otra, es la consideración del campo de velocidad del fluido en el ducto rectangular.

Ambos procesos de deposición, envuelven una dificultad inherente que es el movimiento de la interfase entre la fase sólida y líquida, la

localización de esta interfase no es conocida a priori, tornándose parte de la solución.

2.6. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO REALIZADO

Para garantizar la comparación de los resultados numéricos con los datos experimentales, es necesario conocer la geometría y las dimensiones de la sección de prueba, las condiciones iniciales y de contorno, el procedimiento para la obtención de los datos experimentales y las propiedades termo-físicas del fluido; los cuales son descritos a continuación.

2.6.1. Bancada Experimental utilizada

El canal rectangular, donde fue realizada las experiencias, está conectado a dos reservorios que están conteniendo una mixtura de óleo mineral con parafina, como se muestra en la figura 2.1.

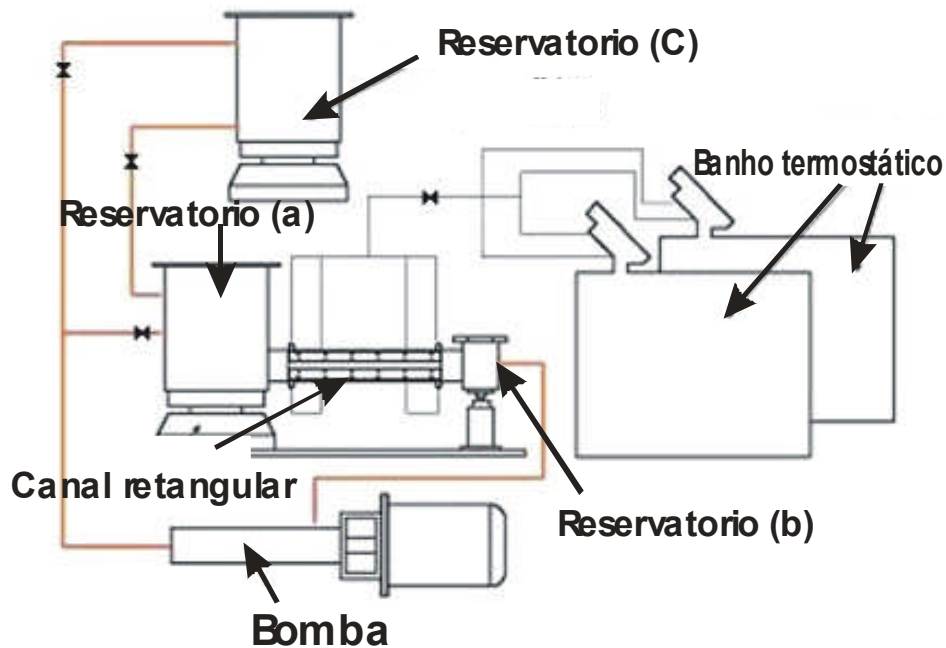


Figura 2.1 – Vista Esquemática de la bancada Experimental.

Un reservorio (a) y un reservorio (b) están ubicados antes y después del canal rectangular, respectivamente. Una bomba de cavidad progresiva succiona el fluido del reservorio (b) y lo entrega a otro reservorio (c).

La experiencia es realizada en un circuito abierto para garantizar que la concentración de la parafina en la entrada del canal sea constante, el recorrido en este circuito abierto comienza en el reservorio (c), donde el fluido cae por gravedad al reservorio (a) entrando al canal rectangular y llegando al reservorio (b) que luego es dirigido al reservorio (c) por medio de la bomba y así continúa el

ciclo abierto. En un circuito cerrado, el retorno del fluido es dirigido al reservorio (a) que está en la entrada del canal, lo que puede causar una reducción de la concentración de parafina en el fluido, en la entrada del canal.

La mixtura del óleo (solvente) y de la parafina (solute), es mantenida constante en el reservorio (a) a la temperatura de 40 °C, que es superior a la temperatura en la cual comienzan a precipitar los primeros cristales de parafina, esta temperatura es conocida como la TIAC, que es igual a 36.6°C. La mixtura entra en el ducto de sección rectangular a una temperatura aproximadamente uniforme y con flujo de masa constante.

¿Qué es la TIAC?

Es la temperatura donde se inicia la cristalización de parafina y es conocido también como punto de nieve o temperatura inicial de apareamiento de cristales

2.6.2. Descripción del Ducto de Sección rectangular

El ducto está formado por dos regiones, denominadas región de entrada y región de prueba, tal como es mostrado en la figura 2.2.

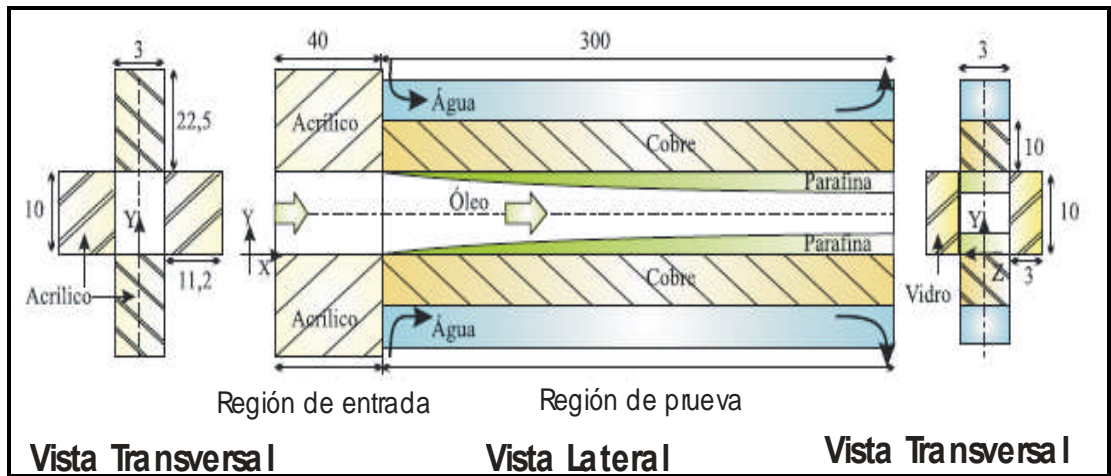


Figura 2.2 – Vista Lateral y Transversal del Ducto, dimensiones en mm.

a) Región de Entrada

En esta región, el canal es de acrílico y se encuentra entre el reservorio (a) y la región de prueba. La pérdida de calor en esta región es solamente para el medio ambiente, siendo relativamente poco, debido a la pequeña longitud del canal y a la baja conductividad térmica del acrílico.

b) Región de Prueba

En esta región, las paredes laterales del canal son de vidrio, de forma que permite una buena visualización del proceso de deposición de parafina; nuevamente, La pérdida de calor para el medio ambiente es poco, debido a la baja conductividad térmica del vidrio. Las superficies inferior y superior de la región de prueba son

de cobre, por donde externamente circula agua proveniente de un baño termo-estático; en estas superficies la pérdida de calor es alta debido a la alta conductividad térmica del cobre y a la grande diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie externa del cobre.

2.6.3. Obtención de los Datos Experimentales

La experiencia comienza con la mixtura óleo/parafina fluyendo en régimen permanente y con temperatura aproximadamente constante e igual a la temperatura del reservorio (a). Esta temperatura es obtenida cuando se utiliza agua caliente (40 °C) proveniente del baño termo-estático que circula por la parte externa del cobre, pared superior e inferior (región de prueba, figura 2.2), que es la misma temperatura del óleo en el reservorio (a).

a).- Condición de Fluido Bajo Diferentes Caudales

Después de la condición de régimen permanente haber sido alcanzada, el agua que circula por la parte externa del cobre, pared superior e inferior del canal en la región de prueba, es enfriada a una temperatura inferior a la TIAC, igual a 15 °C, iniciándose el proceso de parafina en esta región.

b).- Condición de Fluido Estacionario.-

Después de la condición de régimen permanente haber sido alcanzada, el agua que circula por la parte externa de la pared superior del cobre es mantenida a 40 °C y el agua que circula por la parte externa de la pared inferior del cobre es enfriada a diferentes temperaturas inferiores a la TIAC.

2.6.4. Medición de Diversas propiedades Termo-físicas

Además de la medición de la espesura de parafina depositada, se midió experimentalmente algunas propiedades termo-físicas de la mixtura óleo/parafina, como por ejemplo: Viscosidad, densidad, solubilidad y peso molecular, las tres primeras propiedades son funciones de la temperatura y son presentadas a continuación.

a) Masa específica de la Mixtura Óleo Spindle / parafina.-

La mixtura Óleo Spindle / parafina utilizada es compuesta de 90% de Óleo Spindle e 10% de parafina. La variación de la masa específica con la temperatura es mostrada en la figura 2.3. La ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales es:

$$\rho_m = 862 - 0.495T(^{\circ}C) \quad (2.1)$$

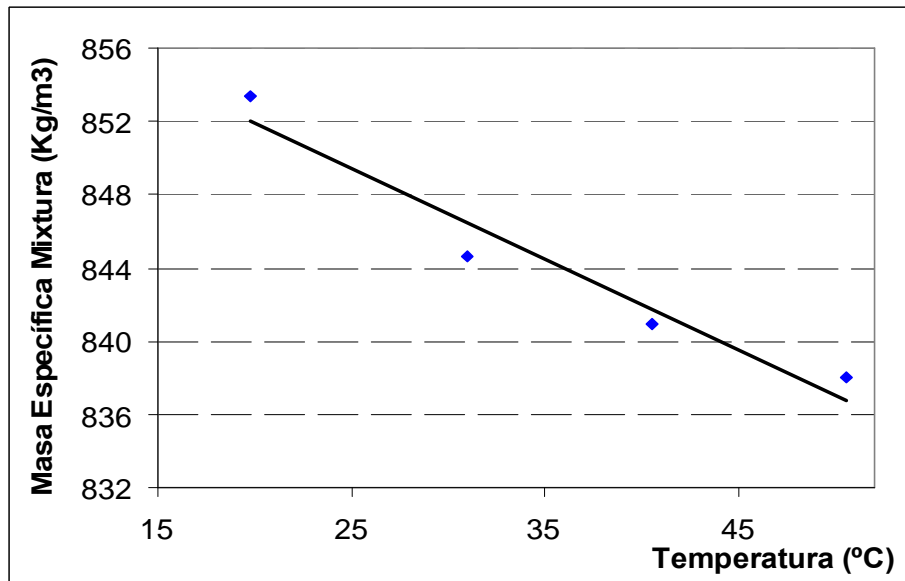


Figura 2.2 – Curva de la masa específica de la mixtura.

b) Viscosidad de la Mixtura Óleo Spindle / parafina

La viscosidad dinámica de la mixtura presenta una fuerte dependencia con la temperatura. La ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales mostrados en la figura 2.3, es:

$$\mu_m = 1.031 T^{-1.28} (^\circ C) \quad (2.2)$$

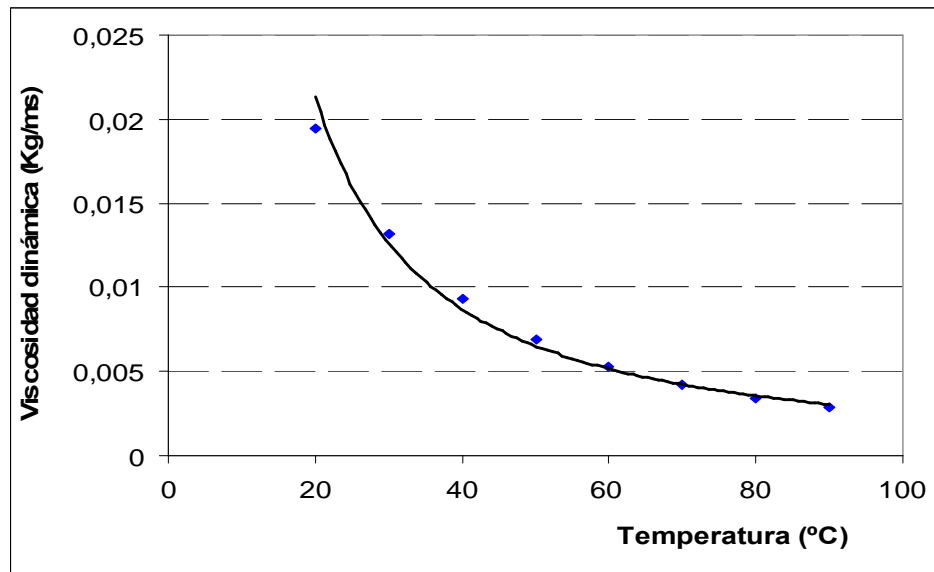


Figura 2.3 – Curva de la viscosidad dinámica de la mixtura.

c) Solubilidad de la Mixtura Óleo Spindle / parafina

La solubilidad es un parámetro muy importante en el análisis de deposición de parafina en el óleo. Se midió experimentalmente la concentración de la saturación óleo / parafina dado en gramos de soluto por gramos de solución en función de la temperatura. La ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales mostrados en la figura 2.4, es:

$$\omega = 1.021 \times 10^{-9} \times T^{5.133} (\text{°C}) \quad (2.3)$$

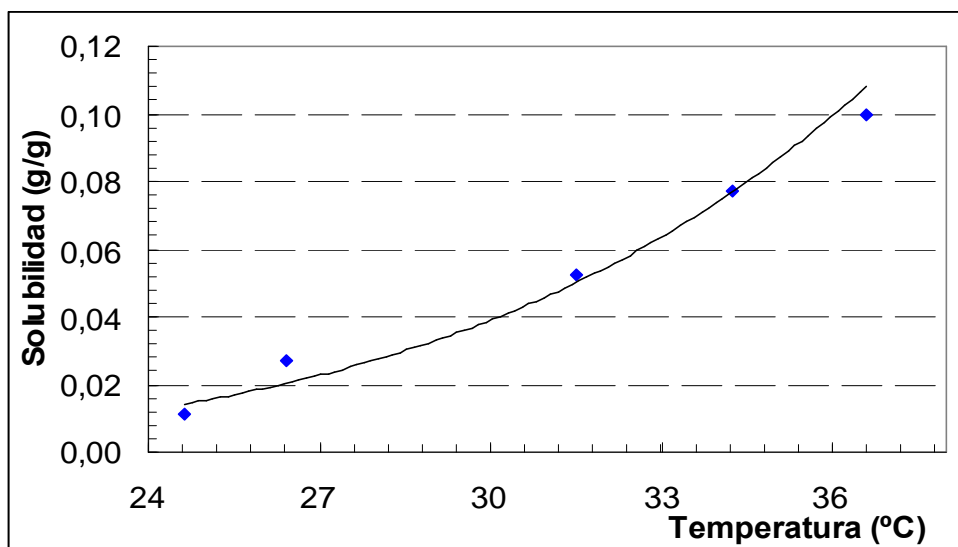


Figura 2.4 – Curva de solubilidad de la mixtura.

d) Peso Molecular de la Mixtura Óleo Spindle / parafina

El peso molecular medio de la mixtura fue medido en un espectrómetro de masa utilizado el método de Resonancia Magnética Nuclear de 1H y ^{13}CO , la siguiente composición fue encontrada:

- a. $C_{40} H_{82}$ para el óleo Spindle
- b. $C_{13} H_{28}$ para la parafina

Con el peso molecular medio de cada componente y la composición de la mixtura, se obtuvo el peso molecular de la mixtura igual a 218 g/mol.

2.7. MODELO FÍSICO

En el presente trabajo se considera que el mecanismo responsable por la deposición de parafina es la difusión molecular. Este fenómeno depende del campo de velocidades, temperatura y concentración de la parafina en el óleo. La figura 2.5, presenta una vista lateral y transversal del volumen de control elemental en el cual estará centralizado el presente análisis.

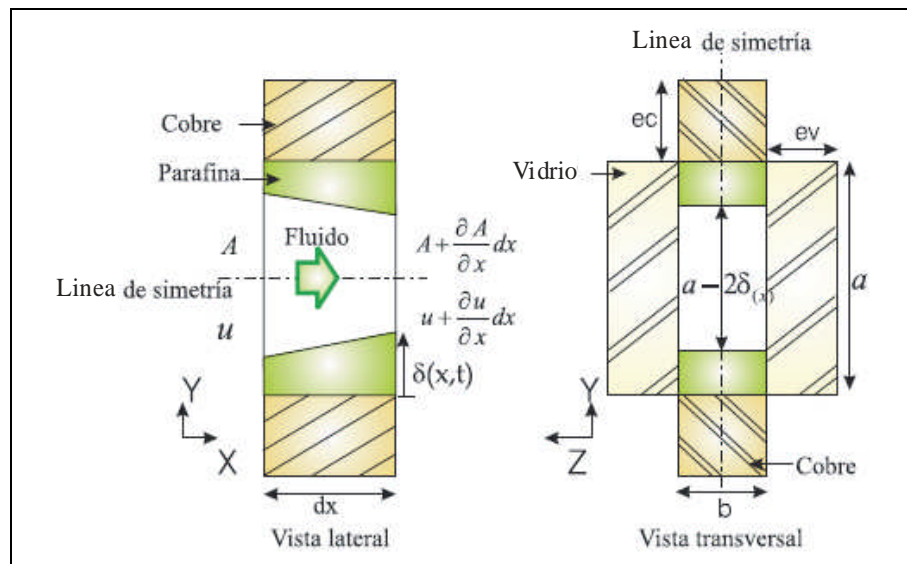


Figura 2.5 – Vista Lateral y Transversal del volumen de control elemental.

El fenómeno de deposición de parafina pertenece a una clase de problemas denominado cambio de fase, la cual presenta frontera móvil. La solución de esta clase de problemas envuelve una dificultad inherente al proceso que es el movimiento de la interfase entre las fases sólido y líquido; como consecuencia, la localización de la interfase no es conocido a priori, tornándose parte de la solución.

2.7.1. **Hipótesis**

Para escribir las ecuaciones de conservación que gobiernan este fenómeno, diversas hipótesis fueron utilizadas de manera a facilitar la obtención de la solución.

- Deposición de parafina gobernada por difusión molecular.
- Fluido Newtoniano.
- Fluido incompresible, con viscosidad absoluta constante.
- Conductividad térmica y calor específico a presión constante del fluido y de la parafina, iguales y constantes.
- Coeficiente de difusión molecular de la parafina constante.
- Solubilidad de la parafina depende de la temperatura.
- Flujo laminar, bi-dimensional.
- Variaciones en la dirección transversal al flujo "z", despreciable.
- Sin generación de energía.
- El proceso de deposición de parafina solamente ocurre para temperaturas inferiores a la TIAC.
- Depósito de parafina sólida con porosidad constante.
- Difusión de masa en la fase sólida, despreciable.

A medida que el tiempo pasa, el aumento del depósito de parafina disminuí el área transversal del ducto rectangular, aumentando la velocidad media del flujo.

2.7.2. Modelamiento del Crecimiento del Depósito de Parafina.-

El objetivo del trabajo es evaluar el modelo de difusión molecular, y la ecuación que modela el índice de transporte por difusión molecular, de la parafina para la pared del ducto, es la ley de Fick, que evaluada en la interfase entre la parafina y el óleo es:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\rho_m D_m A_d \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_{\text{int}}, \quad (2.4)$$

Donde:

m_p : Masa de parafina depositada [Kg].

t : Tempo [s].

ρ_m : Masa específica de la mixtura [Kg/m³].

A_d : Área de deposición de parafina [m²].

D_m : Coeficiente de difusión de la parafina líquida en la mixtura [m²/s].

ω : Fracción volumétrica de la parafina en la solución [g/g].

y : Coordenada vertical. [m].

Para un volumen de parafina depositada dv [m³], la masa es dada por:

$$dm_p = \rho_p (1 - \phi) dv \quad (2.5)$$

Donde:

m_p : Masa de parafina depositada [Kg].

ρ_p : Masa específica de la parafina [Kg/m³].

ϕ : Porosidad, definido como la proporción del volumen ocupado por el líquido en el depósito sólido entre el volumen del depósito sólido.

ρ_p : Masa específica de la parafina [Kg/m³].

La utilización de la ecuación 2.5, considera la hipótesis de que el flujo líquido difusivo de parafina en la pared se transforma en el depósito sólido.

La variación del volumen de parafina depositada dv es proporcional a la velocidad del crecimiento de la espesura de parafina $\partial\delta/\partial t$, como:

$$dv = A_d \frac{\partial\delta}{\partial t} dt \quad (2.6)$$

Reemplazando la ecuación 2.6 en la ecuación 2.5, se obtiene:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\rho_p A_d (1-\phi) \frac{\partial\delta}{\partial t}, \quad (2.7)$$

Luego, Igualando la ecuación 2.7 con la ecuación 2.4, se tiene que la variación de la camada de parafina depositada con el tiempo $\partial\delta/\partial t$, depende del Coeficiente de difusión de la parafina líquida en la mixtura D_m , de la porosidad ϕ , de la razón de masas específicas entre la mixtura y la parafina ρ_m/ρ_p y del gradiente de la fracción volumétrica de la parafina en la interfase $(\partial\omega/\partial y)_{\text{int}}$; como se indica en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial\delta}{\partial t} = \frac{-D_m \rho_m}{(1-\phi) \rho_p} \left(\frac{\partial\omega}{\partial y} \right)_{\text{int}}, \quad (2.8)$$

2.8. MODELO DIFUSIVO BI-DIMENSIONAL

El crecimiento del depósito de parafina es dado por la ecuación 2.8, la cual depende únicamente de la variación de la fracción volumétrica en la interfase, ya que los otros parámetros son considerados constantes.

Buscando un análisis simplificado del problema, se considera el campo de velocidad del fluido con solamente una componente de velocidad, por lo que se especifica un perfil correspondiente a un flujo laminar y a un flujo hidrodinámicamente desarrollado en la entrada del canal rectangular, siendo este, un perfil parabólico. Debido a la variación del área transversal, es necesario considerar la variación de la velocidad con la dirección axial, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\rho = \rho_i \quad ; \quad u = \frac{3}{2} u_m \left[1 - \left(\frac{y}{a/2 - \delta} \right)^2 \right]. \quad (2.9)$$

Los resultados experimentales muestran que existe simetría en la deposición de parafina, es decir, la misma cantidad de parafina es depositada en la parte superior e inferior de la pared de cobre, como se muestra en la figura 2.2. Debido a esta simetría, la figura 2.6 representa la parte inferior del volumen de control infinitesimal mostrado en la figura 2.5.

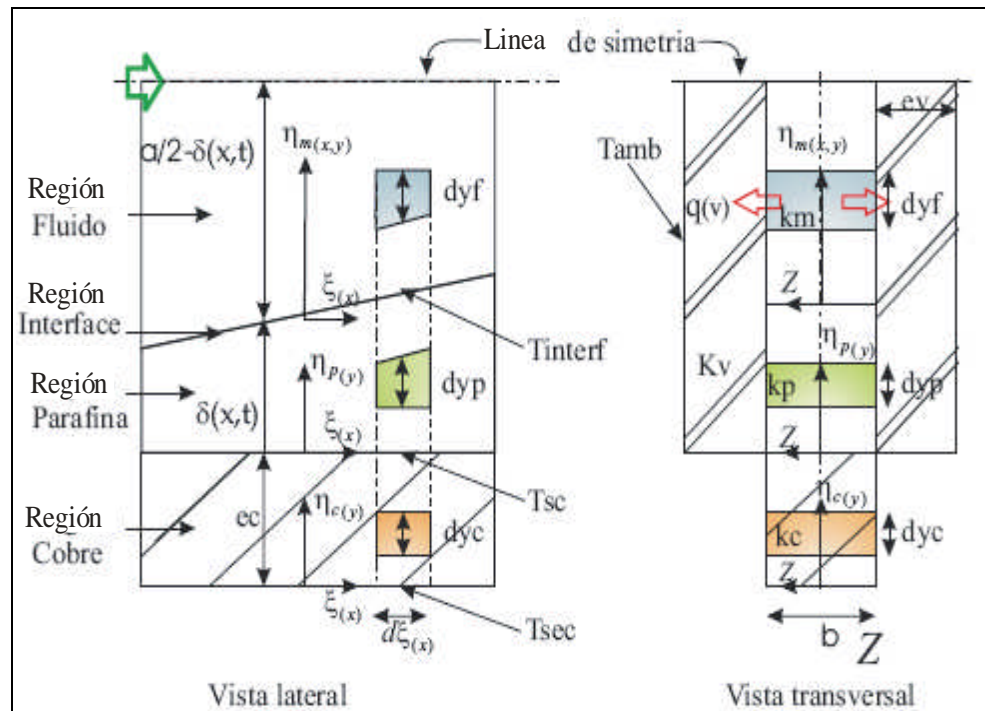


Figura 2.6 – Vista Lateral y Transversal de los volúmenes de control elemental, para la región del fluido, parafina y cobre.

Para cada región mostrada en la figura 2.6, se presenta un volumen de control infinitesimal, los cuales poseen un mismo dx y donde son aplicadas las ecuaciones de conservación de masa, conservación de energía y de conservación de la fracción volumétrica; estas son mostradas a seguir.

2.8.1. Principio de Conservación de Masa

El principio de conservación de masa exige que la variación de masa con el tiempo en el interior del volumen de control sumada al flujo líquido de masa que cruza la superficie de control, sea nula.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dA_t = 0,$$

(2.10)

Donde:

- ρ : Masa específica del fluido [kg/m³].
- \vec{u} : Vector velocidad [m/s].
- A_t : Área de la sección transversal del ducto [m²].
- dV : Diferencial de volumen [m³].
- \vec{n} : Vector unitario normal a la superficie de control.
- t : Tiempo [s].

2.8.2. Principio de Conservación de Energía

La variación en el tiempo de la energía interna almacenada en el volumen de control es igual a la variación líquida de energía transferida por el flujo del fluido más la variación líquida del calor transferido a través de la superficie de control.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho C_p T dV + \int_{SC} \rho C_p T \vec{u} \cdot \vec{n} dA_t = \int_{SC} \vec{q}'' \cdot \vec{n} dA_t + \int_{VC} S_T dV,$$

(2.11)

Donde:

- T : Temperatura [del fluido [K].
- C_p : Calor específico a presión constante [J/Kg K].
- \vec{q}'' : Flujo de calor difusivo [W/m²].
- S_T : Generación de calor [W/m³].

2.8.3. Principio de Conservación de la Fracción Volumétrica.-

La variación en el tiempo de la fracción de masa interna almacenada en el volumen de control es igual a la variación líquida de la fracción masa transferida por el flujo del fluido más la variación líquida de la masa transferida a través de la superficie de control.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \omega dV + \int_{SC} \rho \omega \vec{u} \cdot \vec{n} dA_t = \int_{SC} \dot{m}'' \cdot \vec{n} dA_t + \int_{VC} S_\omega dV, \quad (2.12)$$

Donde:

ω : Fracción de masa de la parafina [g/g].

\dot{m}'' : Flujo difusivo de la fracción volumétrica [Kg/m²s].

S_ω : Fuente de la fracción volumétrica [Kg m³/s].

2.9. FORMULACIÓN EN COORDENADAS MÓVILES

Debido a la deposición de parafina, el dominio de calculo del fluido, figura 2.6, presenta un tamaño variable en el tiempo, lo que dificulta el análisis. A medida que la espesura de parafina depositada crece, el tamaño del dominio para la solución de la ecuación de conducción de calor para la parafina crece, mientras que el tamaño del dominio del fluido disminuí.

El sistema de coordenadas adoptado es tal, que sus coordenadas se adaptan al contorno de la geometría y a la velocidad de desplazamiento, cuando existe movimiento de interfase. Este sistema de coordenadas móvil está relacionado con el sistema cartesiano y con el tiempo, a través de:

$$\xi = \xi(x) = x \quad ; \quad \eta = \eta(x, y, t) \quad ; \quad \tau = \tau(t) = t \quad (2.13)$$

Las ecuaciones de conservación pueden ser escritas en el nuevo sistema de coordenadas, utilizando las siguientes correlaciones:

$$(2.14) \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$(2.15) \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$(2.16) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial \tau}$$

$$(2.17) \quad \begin{aligned} Ja = & \frac{\partial x}{\partial \xi} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial x}{\partial \eta} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \\ & + \frac{\partial x}{\partial \tau} \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial t}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial t}{\partial \xi} \right) = \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{aligned}$$

Ja es el jacobiano de la transformación.

Como es mencionado, el movimiento del fluido solamente acontece en la dirección axial x, por lo que la componente vertical de la velocidad en la dirección vertical v, es nula, como se muestra en la ecuación 2.18. Por otro lado, las coordenadas solamente se mueven en la dirección vertical, esto es, el vector velocidad del sistema de coordenadas solamente presenta componente vertical, como se muestra en la ecuación 2.19.

$$(2.18) \quad \vec{u}^{\rho} = u_i^{\rho} \vec{i}^{\rho} + v_j^{\rho} \vec{j}^{\rho} \quad ; \quad v = 0$$

$$(2.19) \quad \vec{u}_g^{\rho} = u_g^{\rho} \vec{i}^{\rho} + v_g^{\rho} \vec{j}^{\rho} \quad ; \quad u_g^{\rho} = \frac{\partial x}{\partial \tau} = 0 \quad ; \quad v_g^{\rho} = \frac{\partial y}{\partial \tau}$$

A continuación son presentadas las ecuaciones de conservación para el nuevo sistema de coordenadas.

2.9.1. Ecuación de Conservación de Masa

La ecuación 2.10 de conservación de masa, aplicada al volumen de control infinitesimal mostrado en la figura 2.6, considerando el fluido incompresible y utilizando el sistema de coordenadas curvilíneas y móviles es presentada a seguir:

$$\frac{\partial Ja}{\partial t} + \frac{\partial(h_\eta \tilde{U})}{\partial \xi} + \frac{\partial(h_\xi \tilde{V})}{\partial \eta} = 0 \quad (2.20)$$

Donde h_ξ y h_η son métricas resultantes de la mudanza del sistema de coordenadas, que de acuerdo a la relación 2.13, son dados por:

$$h_\xi = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[1 + \left(Ja \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$h_\eta = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{1/2} = Ja = \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right) \quad (2.22)$$

\tilde{U} y \tilde{V} representan los componentes contra variantes de la velocidad relativa en las direcciones ξ y η , respectivamente y, son dados por:

$$\tilde{U} = U - U_g \quad (2.23)$$

$$\tilde{V} = V - V_g \quad (2.24)$$

U y V representan los componentes contra variantes de la velocidad absoluta, y son relacionados con los componentes cartesianos por las siguientes relaciones:

$$U = \frac{1}{h_\eta} \left(u \frac{\partial y}{\partial \eta} - v \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = u \quad (2.25)$$

$$V = \frac{1}{h_\xi} \left(-u \frac{\partial y}{\partial \xi} + v \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) = -u \frac{Ja}{h_\xi} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.26)$$

U_g y V_g son los componentes contra variantes de la velocidad debido al movimiento de las coordenadas, que de acuerdo a las relaciones de la ecuación 2.19, son dados por las siguientes relaciones:

$$U_g = \frac{1}{h_\eta} \left(u_g \frac{\partial y}{\partial \eta} - v_g \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (2.27)$$

$$V_g = \frac{1}{h_\xi} \left(-u_g \frac{\partial y}{\partial \xi} + v_g \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) = -\frac{1}{h_\xi} \frac{\partial y}{\partial \tau} \quad (2.28)$$

Remplazando las ecuaciones 2.25, 2.27 en la ecuación 2.23 y las ecuaciones 2.26, 2.28 en la ecuación 2.24, las nuevas componentes contra variantes de la velocidad relativa son:

$$\tilde{U} = u \quad (2.29)$$

$$\tilde{V} = -\frac{1}{h_\xi} \left(u Ja \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \tau} \right) \quad (2.30)$$

2.9.2. Ecuación de Conservación de Energía

A seguir la ecuación 2.11 de conservación de energía, es integrada en un volumen de control correspondiente a cada región, como mostrado en la figura 2.6.

a) Para la Región del Fluido

La ecuación 2.11 de conservación de energía, en el nuevo sistema de coordenadas y las hipótesis adoptadas, puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(JaT_m)}{\partial\tau} + \frac{\partial(h_\eta UT_m)}{\partial\xi} + \frac{\partial(h_\xi VT_m)}{\partial\eta} = \alpha_m \frac{\partial}{\partial\xi} \left(\frac{\mathcal{G}_\xi}{h_\xi} \frac{\partial T_m}{\partial\xi} - \frac{\beta_\xi}{h_\eta} \frac{\partial T_m}{\partial\eta} \right) \\ + \alpha_m \frac{\partial}{\partial\eta} \left(\frac{\mathcal{G}_\eta}{h_\eta} \frac{\partial T_m}{\partial\eta} - \frac{\beta_\eta}{h_\xi} \frac{\partial T_m}{\partial\xi} \right) + \frac{q_v''}{\rho_m C_{pm}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Donde:

$\alpha_m = k_m / (\rho_m C_{pm})$: Coeficiente de difusión térmica del fluido [m²/s].

$q_v'' = U_v (T_m - T_\infty)$: Flujo por unidad de área a través del vidrio [W/m²].

\mathcal{G}_ξ , β_ξ y \mathcal{G}_η , β_η ; son parámetros geométricos dados por:

$$\mathcal{G}_\eta = \frac{h_\xi^2 h_\eta}{Ja} \quad ; \quad \mathcal{G}_\xi = \frac{h_\eta^2 h_\xi}{Ja} \quad (2.32)$$

$$\beta_\eta = \mathcal{G}_\eta (\mathcal{E}_\xi \cdot \mathcal{E}_\eta) \quad ; \quad \beta_\xi = \mathcal{G}_\xi (\mathcal{E}_\xi \cdot \mathcal{E}_\eta) \quad (2.33)$$

$$(\mathcal{E}_\xi \cdot \mathcal{E}_\eta) = \frac{1}{h_\xi h_\eta} \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = - \frac{Ja}{h_\xi} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.34)$$

La función que relaciona la coordenada móvil en η , con la coordenada cartesiana en y , para la región del fluido, esta dada por:

$$\eta = \eta_m = \frac{y - \delta(x, t)}{a/2 - \delta(x, t)} \quad (2.35)$$

b) Para la Región de la Parafina

Como no hay movimiento de fluido en la región de la parafina depositada, el vector de velocidad absoluta es nulo ($V = 0$), pero debido al movimiento de la malla (interfase), existe un componente contra-variante no nula en la dirección η . La ecuación 2.11 de conservación de energía, en el nuevo sistema de coordenadas, puede ser escrito como:

$$\frac{\partial(JaT_p)}{\partial\tau} - \frac{\partial(h_\xi V_g T_p)}{\partial\eta} = \frac{k_v}{k_p} \frac{\alpha_p}{e_v} Ja(T_p - T_\infty) + \alpha_p \frac{\partial}{\partial\xi} \left(\frac{\mathfrak{G}_\xi}{h_\xi} \frac{\partial T_p}{\partial\xi} - \frac{\beta_\xi}{h_\eta} \frac{\partial T_p}{\partial\eta} \right) + \alpha_p \frac{\partial}{\partial\eta} \left(\frac{\mathfrak{G}_\eta}{h_\eta} \frac{\partial T_p}{\partial\eta} - \frac{\beta_\eta}{h_\xi} \frac{\partial T_p}{\partial\xi} \right) \quad (2.36)$$

Donde:

$\alpha_p = k_p / (\rho_p C_{pp})$: **Coficiente de difusión térmica de la parafina**
[m²/s].

\mathfrak{G}_ξ , β_ξ y \mathfrak{G}_η , β_η ; son parámetros geométricos definidos por las ecuaciones 2.32, 2.33 y 2.34. La función que relaciona la coordenada móvil en η , con la coordenada cartesiana en y , para la región de la parafina, esta dada por:

$$\eta = \eta_p = \frac{y}{\delta(x,t)} \quad (2.37)$$

c) Para la Región del Cobre

En esta región no hay velocidad relativa ($\tilde{U} = 0$ y $\tilde{V} = 0$) en las direcciones ξ y η , respectivamente. Vale la pena mencionar que cuando la malla es ortogonal, el producto escalar entre los vectores unitarios es nulo ($\hat{e}_\xi \cdot \hat{e}_\eta = 0$). La ecuación 2.11 de conservación de energía, en el nuevo sistema de coordenadas, puede ser escrito como:

$$\frac{\partial T_c}{\partial \tau} = \alpha_c \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial T_c}{\partial \xi} \right) + \alpha_c \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial T_c}{\partial \eta} \right) \quad (2.38)$$

Donde:

$\alpha_c = k_c / (\rho_c C_{pc})$: **Coefficiente de difusión térmica del cobre**

[m²/s].

\mathcal{G}_ξ , β_ξ y \mathcal{G}_η , β_η ; son parámetros geométricos definidos por las ecuaciones 2.32, 2.33 y 2.34. La función que relaciona la coordenada móvil en η , con la coordenada cartesiana en y , para la región del cobre, es:

$$\eta = \eta_c = \frac{y_c}{e_c} \quad (2.39)$$

2.9.3. Ecuación de Conservación de la Fracción Volumétrica

La ecuación 2.12 de conservación de la fracción de masa, aplicada al volumen de control infinitesimal mostrado en la figura 2.6, en el nuevo sistema de coordenadas, puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Ja\omega)}{\partial\tau} + \frac{\partial(h_{\eta}\tilde{U}\omega)}{\partial\xi} + \frac{\partial(h_{\xi}\tilde{V}\omega)}{\partial\eta} = D_m \frac{\partial}{\partial\xi} \left(\frac{\mathfrak{g}_{\xi}}{h_{\xi}} \frac{\partial\omega}{\partial\xi} - \frac{\beta_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial\omega}{\partial\eta} \right) \\ + D_m \frac{\partial}{\partial\eta} \left(\frac{\mathfrak{g}_{\eta}}{h_{\eta}} \frac{\partial\omega}{\partial\eta} - \frac{\beta_{\eta}}{h_{\xi}} \frac{\partial\omega}{\partial\xi} \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Donde:

D_m : Coeficiente de difusión de la parafina líquida en el óleo [m^2/s].

2.10. CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

La condición inicial, es la solución del problema después de haber alcanzado el régimen permanente, obtenida con el agua del baño termoestático caliente, igual a la temperatura de la mixtura óleo / parafina en la entrada del canal. En este caso, debido a las altas temperaturas involucradas no hay deposición de parafina.

En la entrada del canal se especifica el valor del caudal en masa constante, con temperatura uniforme en la sección transversal y constante con el tiempo y superior a la TIAC.

La condición de contorno para la ecuación de continuidad, consiste en un perfil parabólico en la entrada del canal, condición de no deslizamiento del fluido en contacto con la superficie sólida y de simetría en el centro del canal.

Con relación a la ecuación de energía, las condiciones de contorno entre cada dos regiones, son las condiciones de compatibilidad de flujos de calor, siendo que en la interfase parafina sólida y mixtura, el balance de energía debe considerar el calor utilizado para el cambio de fase; debe ser considerado también la simetría en el centro del canal. La temperatura de la superficie externa del cobre, tiene la misma temperatura del agua que circula por dicha superficie. La difusión axial en la salida de la sección de prueba es despreciable.

La concentración de la parafina disuelta en el óleo es constante en la sección de entrada. En el plano de simetría, el flujo de concentración es nula y en la interfase es exactamente el flujo que queremos determinar, dado por la ecuación 2.4.

CAPITULO III

METODO NUMERICO

El método numérico seleccionado para la solución de las ecuaciones de conservación, es el método de los volúmenes finitos, esto es, diferencias finitas con formulación en volúmenes finitos (Patankar, 1980). Este método consiste en dividir el dominio computacional en volúmenes de control, especificar un punto nodal en el centro de cada volumen de control e integrar las ecuaciones de conservación en el tiempo y en el espacio para cada volumen de control. La principal ventaja de este modelamiento es garantizar la conservación global de las grandezas físicas.

Se optó por utilizar una malla deslocada, esto es, todas las grandezas físicas son almacenadas en los puntos nodales principales, con excepción de las velocidades que son almacenadas en las fases de los volúmenes de control. Los valores no disponibles, tanto en las fases como en el centro del volumen de control, son obtenidos a través de interpolaciones. Adicionalmente, se definió la malla de acuerdo con el método B (Patankar, 1980), esto es, el punto nodal central se encuentra en el centro del

volumen de control y los volúmenes de espesura nula son especificados en las fronteras. Esta metodología facilita la implementación de las condiciones de contorno.

La integración temporal fue realizada con el esquema de Euler totalmente implícito para todas las ecuaciones de conservación. Con relación a la integración espacial, se utilizó diferencias centrales para los términos de difusión, y aproximación upwind para todos los términos de convección (Patankar, 1980).

3.1 DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES

Las ecuación de conservación de masa (2.10), conservación de energía (2.11) y de la conservación de la fracción de masa (2.12) son integrados en el tiempo y en el espacio a través del volumen de control mostrado en la figura 2.6.

La figura 3.1 presenta un volumen de control típico para el punto nodal P. Los puntos nodales vecinos, representados por las letras mayúsculas E, W, N y S son los puntos este, oeste, norte y sur, respectivamente. Las fases de los volúmenes de control, representados por las letras minúsculas e, w, n y s, corresponden a las líneas punteadas.

El número total de puntos nodales dentro de la región del fluido y de la región de la parafina son mantenidos constantes durante el proceso de deposición de parafina. Por eso como ya discutido, la malla es móvil, pues la

coordenada computacional es adimensional, variando siempre de 0 a 1, en cada región.

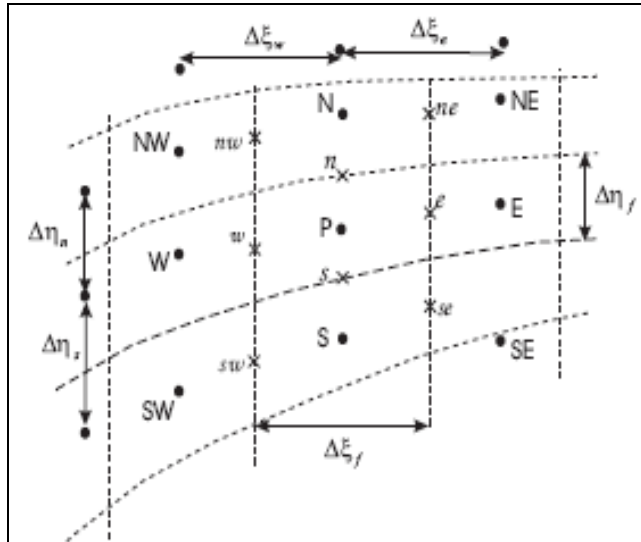


Figura 3.1 – Volumen de control bi-dimensional típico.

3.1.1 Ecuación de Continuidad

Integrándose la ecuación de conservación de masa (2.20), en el volumen de control $(\Delta\eta_j, \Delta\xi_j)$ presentado en la figura 3.1, se obtiene:

$$\frac{Ja_p - Ja^o_p}{\Delta t} \Delta\xi_i \Delta\eta_j + (h_\eta \tilde{U})_e \Delta\eta_j - (h_\eta \tilde{U})_w \Delta\eta_j + (h_\xi \tilde{V})_n \Delta\xi_i - (h_\xi \tilde{V})_s \Delta\xi_i = 0 \quad (3.1)$$

Donde los subscritos en letras minúsculas indican que los términos son evaluados en las fases del volumen de control. El índice superior "o", indica valores conocidos del instante de tiempo

τ . Los términos sin índice superior corresponden a valores desconocidos del instante de tiempo $\tau + \Delta\tau$.

Los flujos volumétricos a través de las fases del volumen de control pueden ser representados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} F_n &= (h_\xi \tilde{V})_n \Delta\xi_i \quad ; \quad F_s = (h_\xi \tilde{V})_s \Delta\xi_i \quad , \\ F_e &= (h_\eta \tilde{U})_e \Delta\eta_j \quad ; \quad F_w = (h_\eta \tilde{U})_w \Delta\eta_j. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Así la ecuación de la continuidad, discretizada, asume la siguiente forma:

$$F_e = F_w - (F_n - F_s) - \frac{Ja_p - Ja_p^o}{\Delta t} \Delta\xi_i \Delta\eta_j \quad (3.3)$$

Así como en el caso anterior, esta ecuación es utilizada para determinar el componente axial u de la velocidad. De acuerdo con las ecuaciones 2.29 y 2.30, el componente contra-variante en la dirección η , \tilde{V} , es responsable solamente por la curvatura y la velocidad de la malla. Los flujos norte y sur son aproximados por sus valores anteriores, esto es, las velocidades axiales en las fases norte y sur del volumen de control son interpoladas de los valores anteriores

$$u_n = \frac{u_w - u_{nw}}{2} \quad ; \quad u_s = \frac{u_w - u_{sw}}{2} \quad (3.4)$$

3.1.2 Ecuación de conservación de una Granda Escalar

La ecuación genérica que representa las ecuaciones de conservación de una grandeza escalar, escrita en coordenadas curvilíneas, es presentada a seguir. La ecuación de conservación de una grandeza escalar puede ser la ecuación de conservación de energía para diferentes regiones, y la conservación de la fracción de masa para la región del fluido.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Ja\Phi)}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial\xi} \left[h_\eta \tilde{U} \Phi - \Gamma \left(\frac{g_\xi}{h_\xi} \frac{\partial\Phi}{\partial\xi} - \frac{\beta_\xi}{h_\eta} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial\eta} \left[h_\xi \tilde{V} \Phi - \Gamma \left(\frac{g_\eta}{h_\eta} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta} - \frac{\beta_\eta}{h_\xi} \frac{\partial\Phi}{\partial\xi} \right) \right] = Ja S_\Phi \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde Φ es una variable dependiente, \tilde{U} y \tilde{V} son los componentes los componentes contra-variantes del vector velocidad relativa en las direcciones ξ y η , respectivamente. Γ es el coeficiente de difusión, siendo igual a α para la ecuación de energía e igual a D_m para la ecuación de la fracción volumétrica.

Para facilitar el análisis, se define el flujo total J como poseyendo dos contribuciones, una que sería denominada de principal J_p y otra denominada de flujo secundario J_s , pues sólo existe si la malla fuera no ortogonal.

$$J_\xi = J_{P\xi} - J_{S\xi} \quad ; \quad J_\eta = J_{P\eta} - J_{S\eta} \quad (3.6)$$

El flujo principal definido por:

$$J_{p\xi} = h_\eta \tilde{U} \Phi - \Gamma \frac{\mathcal{G}_\xi}{h_\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \quad (3.7)$$

$$J_{p\eta} = h_\xi \tilde{V} \Phi - \Gamma \frac{\mathcal{G}_\eta}{h_\eta} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \quad (3.8)$$

Estas ecuaciones 3.7 y 3.6, poseen una parcela convectiva y otra difusiva, mientras que el flujo secundario es todo difusivo,

$$J_{s\xi} = -\Gamma \frac{\beta_\xi}{h_\eta} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} ; \quad J_{s\eta} = -\Gamma \frac{\beta_\eta}{h_\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \quad (3.9)$$

El termino fuente, S_Φ , conforme Patankar (1980), puede ser línea-rizado de la siguiente manera:

$$S_\Phi = S_c + S_p \Phi_p \quad (3.10)$$

Donde S_p es obligatoriamente no positivo para garantizar resultados físicamente reales Patankar (1980).

La ecuación de conservación 3.5, de acuerdo a las ecuaciones 3.6 a 3.10, puede ser escrito como:

$$\frac{\partial Ja \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (J_{p\xi} - J_{s\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J_{p\eta} - J_{s\eta}) = (S_c + S_p \Phi_p) Ja. \quad (3.11)$$

Integrando en el tiempo de forma totalmente implícita y en el espacio, asumiendo flujos convectivos constantes a través de las fases del volumen de control y el término transiente y el de fuente constantes en el volumen de control, se tiene:

$$\begin{aligned} & \frac{(Ja\Phi)_p - (Ja\Phi)_p^0}{\Delta\tau} \Delta\xi_i \Delta\eta_j + (J_{p_{\xi e}} - J_{S_{\xi e}}) \Delta\eta_j - (J_{p_{\xi w}} - J_{S_{\xi w}}) \Delta\eta_j \\ & + (J_{p_{\eta n}} - J_{S_{\eta n}}) \Delta\xi_i - (J_{p_{\eta s}} - J_{S_{\eta s}}) \Delta\xi_i = (S_{cp} + S_{pp} \Phi_p) Ja_p \Delta\xi_i \Delta\eta_j. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Definiendo los flujos principales en las fases

$$J_e = J_{p_{\xi e}} \Delta\eta_j \quad ; \quad J_w = J_{p_{\xi w}} \Delta\eta_j \quad ; \quad J_n = J_{p_{\eta n}} \Delta\xi_i \quad ; \quad J_s = J_{p_{\eta s}} \Delta\xi_i \quad (3.12)$$

y definiendo los flujos secundarios en las fases

$$J_{Se} = J_{S_{\xi e}} \Delta\eta_j \quad ; \quad J_{Sw} = J_{S_{\xi w}} \Delta\eta_j \quad ; \quad J_{Sn} = J_{S_{\eta n}} \Delta\xi_i \quad ; \quad J_{Ss} = J_{S_{\eta s}} \Delta\xi_i \quad (3.13)$$

Substituyendo las ecuaciones 3.13 e 3.12, en la ecuación 3.11, y

sustrayendo de la ecuación 3.3 multiplicada por Φ_p , se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{(Ja\Phi)_p^0}{\Delta\tau} \Delta\xi_i \Delta\eta_j \Phi_p + (J_{pe} - F_e \Phi_p) - (J_{pw} - F_w \Phi_p) \\ & + (J_{pn} - F_n \Phi_p) - (J_{ps} - F_s \Phi_p) = B_p + B_{nop}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

donde los términos de fuente B_p e B_{nop} son:

$$B_p = \left[(S_{cp} + S_{pp} \Phi_p) Ja_p + \frac{(Ja\Phi)_p^0}{\Delta\tau} \right] \Delta\xi_i \Delta\eta_j. \quad (3.15)$$

$$B_{nop} = J_{Se} - J_{Sw} + J_{Sn} - J_{Ss}. \quad (3.16)$$

El término B_{nop} posee apenas los flujos secundarios debido a la no ortogonalidad de la malla. Estos son tratados explícitamente, para no acarrear inestabilidades numéricas, y simplificar el algoritmo de solución del sistema algebraico, pues envuelven vecinos más alejados y representan en coeficientes negativos.

Para finalizar la discretización de la ecuación 3.14, es necesario introducir un esquema de interpolación para evaluar tanto los flujos principales, como los flujos secundarios.

3.2 ESQUEMA DE INTERPOLACIÓN

Con la finalidad de completar a discretización de las ecuaciones de conservación, es necesario evaluar el flujo convectivo de la variable dependiente de interés en las fases del volumen de control. Este flujo es compuesto de un flujo convectivo y de un flujo difusivo.

Asumiendo que el flujo total en la fase puede ser calculado como función del valor de la variable dependiente en dos nodos adyacentes, se puede evaluar los flujos totales de acuerdo con:

$$\begin{aligned} J_n - F_n \Phi_p &= a_N (\Phi_P - \Phi_N) & ; & \quad J_S - F_S \Phi_p = a_S (\Phi_S - \Phi_P) \\ J_e - F_e \Phi_p &= a_E (\Phi_P - \Phi_E) & ; & \quad J_W - F_W \Phi_p = a_W (\Phi_W - \Phi_P) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Substituyendo las ecuaciones de la relación 3.17 en la ecuación 3.14 y reorganizando, se obtiene las ecuaciones bi-dimensionales discretizadas en la siguiente forma:

$$a_P \Phi_p = a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + b, \quad (3.18)$$

Donde

$$a_{P\ P}^0 = \frac{Ja_{P\ P}^0}{\Delta\tau} \Delta\xi_i \Delta\eta_j \quad ; \quad b = S_{cp} Ja_{P\ P} \Delta\xi_i \Delta\eta_j + B_{nop} + a_{P\ P}^0 \Phi^0 . \quad (3.19)$$

$$a_P = a_{P\ P}^0 + a_N + a_S + a_E + a_W - S_{PP} Ja \Delta\xi_i \Delta\eta_j \quad (3.20)$$

En la ecuación 3.18 discretizada, los coeficientes vecinos a_N , a_S , a_E , y a_W representan la influencia convectiva y difusiva en las cuatro fases del volumen de control. De acuerdo al esquema de interpolación upwind, los coeficientes de la ecuación discretizada pueden ser escritos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} a_N &= D_n + \left\| -F_w, 0 \right\| & ; & \quad a_S = D_s + \left\| -F_s, 0 \right\| \\ a_E &= D_e + \left\| -F_e, 0 \right\| & ; & \quad a_W = D_w + \left\| -F_w, 0 \right\| \end{aligned} \quad (3.21)$$

Donde el operador $\left\| A, B \right\|$ proporciona el mayor valor entre A e B.

Los flujos volumétricos que atraviesan la fase del volumen de control de la figura 3.6, son representados por F_n , F_s , F_e , F_w , y son calculados de acuerdo a la relación 3.2.

Las conductancias de difusión D_n , D_s , D_e , D_w que cruzan las fases del volumen de control de la figura 3.6, son dados por

$$\begin{aligned}
 D_n &= \Gamma \frac{g_{\eta n}}{h_{\eta n}} \frac{\Delta \xi_i}{\delta \eta_n} ; & D_s &= \Gamma \frac{g_{\eta s}}{h_{\eta s}} \frac{\Delta \xi_i}{\delta \eta_s} \\
 D_e &= \Gamma \frac{g_{\xi_e}}{h_{\xi_e}} \frac{\Delta \eta_j}{\delta \xi_e} ; & D_w &= \Gamma \frac{g_{\xi_e}}{h_{\xi_e}} \frac{\Delta \eta_j}{\delta \xi_w}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Donde $\delta \xi_e$ y $\delta \eta_n$ representan las distancias entre los puntos este - principal, y norte - principal, respectivamente; Γ es el coeficiente difusivo.

Los flujos secundarios son discretizados linealmente. Por ejemplo para la fase este

$$\begin{aligned}
 J_{Se} &= - \left\| \beta_{\xi_e}, 0 \right\| \Delta \eta_j \frac{J^+_{S\xi_{ea}} h_{\xi_E} + J^-_{S\xi_{ea}} h_{\xi_P}}{h_{\xi_E} + h_{\xi_P}} \\
 &+ \left\| -\beta_{\xi_e}, 0 \right\| \Delta \eta_j \frac{J^+_{S\xi_{eb}} h_{\xi_E} + J^-_{S\xi_{eb}} h_{\xi_P}}{h_{\xi_E} + h_{\xi_P}}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
 J^+_{S\xi_{ea}} &= \left[\frac{\Gamma(\Phi_{NE} - \Phi_E)}{h_{\eta E} \delta \eta_n} \right] ; & J^-_{S\xi_{ea}} &= \left[\frac{\Gamma(\Phi_N - \Phi_P)}{h_{\eta P} \delta \eta_n} \right] \\
 J^+_{S\xi_{eb}} &= \left[\frac{\Gamma(\Phi_E - \Phi_{SE})}{h_{\eta E} \delta \eta_s} \right] ; & J^-_{S\xi_{eb}} &= \left[\frac{\Gamma(\Phi_P - \Phi_S)}{h_{\eta P} \delta \eta_s} \right]
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Donde β_{ξ} es un parámetro geométrico mostrado en la ecuación 2.33.

3.3 TEMPERATURA DE LA INTERFASE Y ESPEURA DE DEPOSICIÓN

En este caso la temperatura da interfase es obtenida directamente a partir de la solución de la ecuación de la energía. Para determinar la

espesura de deposición es necesario que la temperatura de la interfase sea inferior a la TIAC. En este caso, δ es obtenida utilizando integración de Euler implícita de la ecuación 2.8, como

$$\delta_p = \delta^0_p + \frac{-D_m \rho_m}{(1-\phi) \rho_p} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_{\text{int}} \Delta t \quad (3.22)$$

Caso contrario, el valor de la espesura de deposición permanece constante, igual al valor del paso de tiempo anterior.

3.4 SOLUCIÓN DEL SISTEMA ALGEBRAICO

El sistema de ecuaciones algebraicas generadas fue resuelto utilizando el algoritmo TDMA línea por línea, recomendado por Patankar et al. (1980) para situaciones multi-dimensionales. En este método la información del contorno es transmitida de una vez para el interior del dominio; consecuentemente la convergencia es más rápida. Considere la siguiente figura 3.2, donde Φ es la variable a ser solucionada y P es la posición del nodo.

Para la solución del sistema algebraico, primeramente se resuelve todas las líneas en la dirección vertical de la malla, figura 3.1, aplicando el método directo TDMA, la cual es descrita en el apéndice (letra A).

Los valores de Φ a lo largo de las líneas vecinas son conocidos, a partir de sus últimos valores. La dirección de barradura es dada por el caudal.

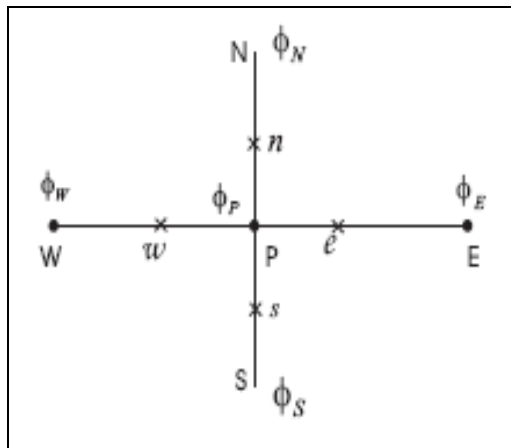


Figura 3.2 – Malla Genérica.

$$a_P \Phi_P = a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + \text{Phi}^* b, \quad (3.23)$$

El procedimiento es repetido para la solución de todas las líneas en la dirección horizontal

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + \text{Phi}^* b, \quad (3.24)$$

3.5 CRITERIO DE CONVERGENCIA

Debido a las no linealidades de las ecuaciones, fue necesario utilizar un proceso iterativo de solución a cada paso de tiempo. Dos grandezas críticas fueron controladas: la temperatura de la interfase T_{int} y la espesura de deposición δ . Se consideró la solución convergida cuando la máxima

variación absoluta de la grandeza calculada en todos los volúmenes de controle del dominio fuese inferior a una tolerancia “*tol*” especificada.

$$\max|\phi - \phi^*| \leq tol, \quad (3.25)$$

Donde ϕ^* corresponde al valor de la variable en iteración anterior y ϕ es calculada en la iteración actual. Se defino una tolerancia igual a 10^{-8} .

A fin de garantizar la convergencia del sistema de ecuaciones, también fue impuesto que los resultados de las ecuaciones de conservación fuesen inferiores a una tolerancia, de acuerdo con

$$\mathfrak{R}_P = [a_P \Phi_P - (a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b)], \quad (3.25)$$

$$\mathfrak{R}_{\max} = \max(\mathfrak{R}_P) \quad ; \quad \mathfrak{R}_{\max} \leq tol. \quad (3.26)$$

3.6 ALGORITMO DE SOLUCIÓN

El código computacional fue escrito en lenguaje MatLAB. En la figura 3.3, es presentado un diagrama de flujo, que resume la secuencia empleada durante el proceso de solución. El procedimiento puede ser descrito por los siguientes pasos.

1. Se lee los datos de entrada: parámetros geométricos, número de volúmenes de control, tipo de fluido, propiedades físicas, condiciones de contorno etc.

2. Se inicializa las variables con sus valores característicos y se calcula las condiciones iniciales de teste, partiendo de los datos de entrada.
3. Se estima todas las propiedades y variables utilizando los valores disponibles del paso de tiempo anterior
4. Se determina el campo de velocidad resolviendo la ecuación 2.20 de la conservación de masa, la distribución de temperatura en la mixtura resolviendo la ecuación 2.31, la distribución de temperatura en la parafina resolviendo la ecuación 2.36, la distribución de temperatura en el cobre resolviendo la ecuación 2.38 y el campo de la concentración volumétrica resolviendo la ecuación 2.40.
5. Se calcula la espesura del depósito cuando la temperatura en la interfase es menor a la temperatura de la TIAC resolviendo la ecuación 2.8.
6. Si la variación máxima de la temperatura en la mixtura de la superficie de la interfase y la espesura de deposición fueran inferiores a la tolerancia deseada, así como los residuos máximos, se puede avanzar un paso de tiempo, retornando al paso 3. Caso contrario, repetir el procedimiento hasta convergir, retornando al paso 4.
7. La deposición de parafina termina cuando la temperatura de interfase es mayor que la temperatura de la (TIAC).

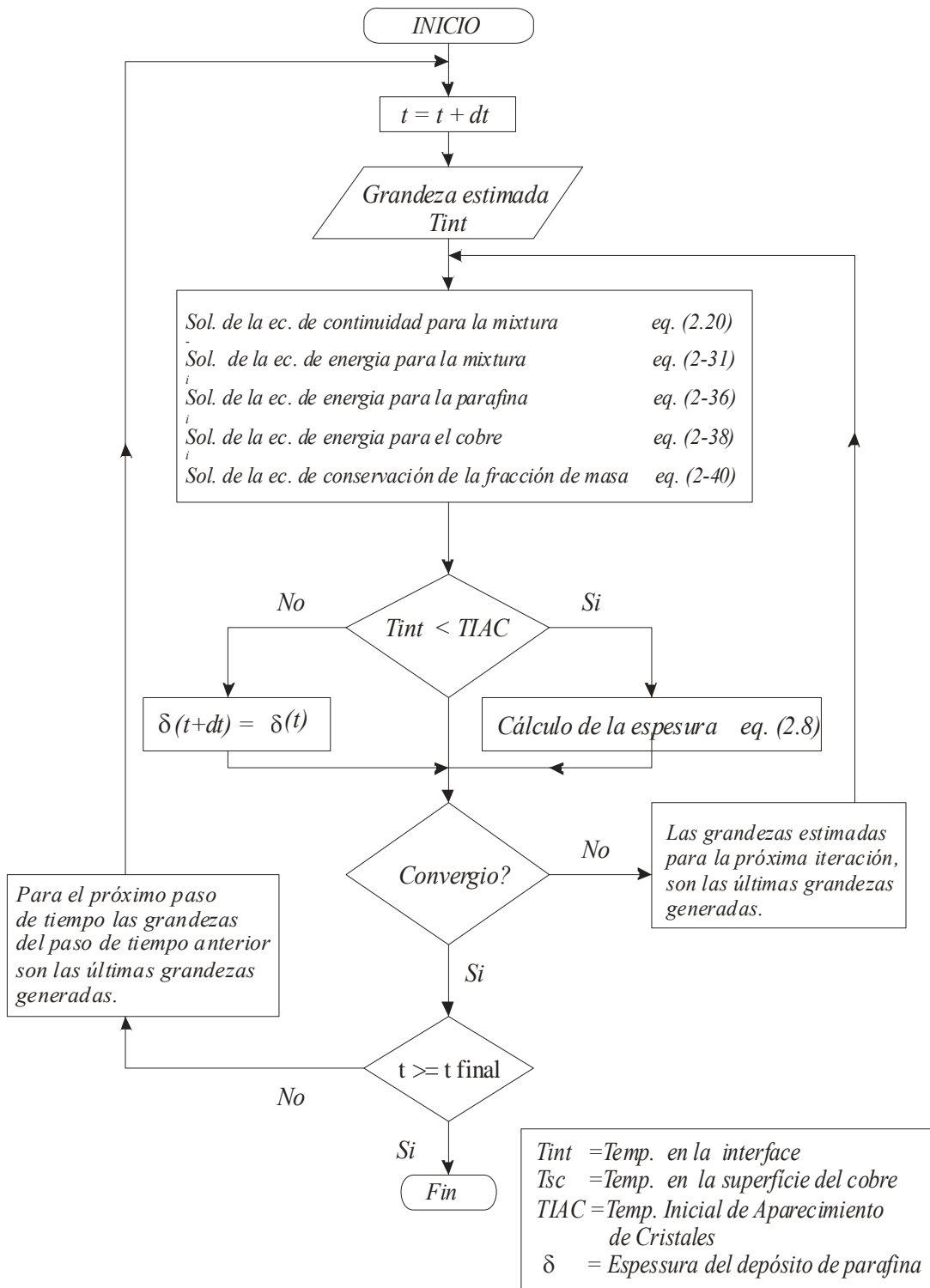


Figura 3.3 – Diagrama de flujo del procedimiento numérico.

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En este capítulo se comparan los resultados numéricos obtenidos utilizando el modelo de difusión bi-dimensional con los datos obtenidos experimentalmente de la deposición de parafina en la sección de prueba descrita en el capítulo 2. Los parámetros geométricos de la sección de prueba se encuentran ilustrados en la figura 2.2.

Se consideró la mixtura óleo-parafina con una fracción volumétrica de parafina disuelta igual a 10% a una temperatura de 40°C entrando en el dominio. Inicialmente, el fluido se encuentra fluyendo en régimen permanente con agua fluyendo externamente en la sección de prueba a 40°C.

Para complementar las informaciones necesarias para la obtención de la solución, las propiedades utilizadas son presentadas a seguir. Como mencionado, las propiedades fueron consideradas como constantes, con excepción de la solubilidad de la mixtura , ecuación 2.3.

4.1 PROPIEDADES USADAS EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En el intervalo de temperatura del presente análisis, la masa varía de 855 kg/m³ a 842 kg/m³, figura 2.2, lo que corresponde a una variación de 15%. Se optó por considerar como valor representativo de la masa específica el valor obtenido en la temperatura de la TIAC, de 36,6°C, siendo igual a 844 kg/m³.

4.1.1 Propiedades Termo físicas

El calor específico de la mezcla óleo-parafina, fue determinado a partir de su densidad utilizando la siguiente correlación:

$$c_{p_m} (\text{cal}/(\text{g}^\circ\text{C})) = \frac{A}{(d_{15/4})^{0.5}} + B(T(^\circ\text{C}) - 15), \quad (4.1)$$

en el cual $d_{15/4}$ es la densidad de la parafina calculada a 15°C con relación a la densidad del agua calculada a 4°C, A y B son constantes que dependen del fluido. Según la literatura, los siguientes valores son recomendados para óleos parafínicos: $A = 0,425$; $B = 9,2 \times 10^{-4}$. Considerando los valores de referencia con base en la temperatura de la TIAC, se utilizó el calor específico igual 2018 J/(kg K).

Los valores correspondientes a la conductividad térmica de la mezcla y el calor latente fueron definidos como siendo $K = 0,23$ W/(mK) y $\lambda = 2,644 \times 10^5$ J/(kg K), respectivamente. Se consideró la

porosidad de la parafina sólida igual a 0,86 de acuerdo con Burger (1981).

4.1.2 Coeficiente de Difusión Molecular.-

Para especificar el coeficiente de difusión se utilizó la correlación propuesta por Hayduk y Minhas (1982). Esta correlación propuesta para la determinación de la difusión molecular de parafinas en soluciones parafínicas, con un error medio de 3,4%, es dado por

$$D_m = 1,33 \times 10^{-7} \frac{T^{1,47} \mu^\gamma}{V_A^{0,71}} \quad (4.2)$$

en cm^2/s , en el cual T es la temperatura absoluta en Kelvin, μ es la viscosidad absoluta del solvente en $\text{g}/(\text{cm s})$, V_A es el volumen molar de la parafina en (cm^3/mol) , dado por la razón de peso molecular M_m en (g/mol) y de la masa específica ρ_m en (g/cm^3) y γ es una función de V_A ,

$$\gamma = \frac{10,2}{V_A} - 0,791 \quad ; \quad V_A = \frac{M_m}{\rho_m} \quad (4.3)$$

La viscosidad absoluta de la mixtura fue obtenida a partir de la ecuación 2.2, calculada en la temperatura de la TIAC, de $36,6^\circ\text{C}$, como siendo igual a $\mu = 1,02 \times 10^{-2}$ Pa.s. La Tabla 4.1 presenta un resumen de las propiedades termo físicas utilizadas.

Tabla 4.1 – Propiedades Termo físicas

Propiedad	Mixtura	Parafina	Cobre	Vidrio	Acrílico
-----------	---------	----------	-------	--------	----------

$\rho(\text{kg/m}^3)$	844	844	8920	2707	1190
$K(\text{W/m K})$	0,23	0,23	401	1,3	0,21
$C_p(\text{J/kg K})$	$2,018 \times 10^3$	$2,018 \times 10^3$	383	835	1465
$\Lambda(\text{J/kg})$	-	$2,644 \times 10^5$	-	-	-
$\mu(\text{Pa.s})$	$1,02 \times 10^{-2}$	-	-	-	-
$D_m(\text{m}^2/\text{s})$	$2,09 \times 10^{-10}$	-	-	-	-
$M_m(\text{g/mol})$	218	-	-	-	-
Φ	-	0,86	-	-	-

4.2 RESULTADOS DEL MODELO BI-DIMENSIONAL

Este modelo permite calcular la posición de la interfase con facilidad. La ligación entre la fase líquida (fluido) y sólida (parafina) es hecha por la representación de la interfase por un volumen de control con espesura cero, no siendo necesario, términos fuentes adicionales para detectar el salto de las cantidades en la interfase. La estimativa inicial de la interfase, a cada paso de tiempo, es hecha utilizando valores del paso de tiempo anterior, y un número menor de cálculos es requerido hasta alcanzar el criterio de convergencia.

Para ser posible utilizar la formulación bi-dimensional se utilizó sistemas de coordenadas móviles, debido a que el dominio de interés es variable en el tiempo. Los resultados fueron obtenidos utilizando un paso de tiempo igual a 3 segundos, con 50 volúmenes de control a lo largo del canal, correspondiendo a la región del cobre, parafina y fluido; y la siguiente distribución en la vertical: a).- 101 volúmenes en la región del fluido, b).- 21

volúmenes en la región de la parafina y c).- 31 volúmenes en la región del cobre.

Para este modelo, la definición de malla en la dirección vertical es crítica, debido al pequeño valor de la difusión molecular D_m , lo que causa un gradiente muy acentuado de la concentración. Una prueba de malla fue realizado, donde se observó que las diferencias entre las soluciones disminuían con el aumento de la malla, siendo inferiores a 5% al aumentar la malla en el fluido en 50%.

4.2.1 Resultados para Fluido a Diferentes Caudales

Cuatro valores diferentes de número de Reynolds iguales a 366, 516, 688 y 856 fueron investigados, siendo el número de Reynolds definido como siendo:

$$\text{Re} = \frac{\rho_m u_m D_h}{\mu} \quad (4.4)$$

onde u_m es la velocidad media del fluido, ρ_m es la masa específica de la mixtura, μ es la viscosidad dinámica y D_h es el diámetro hidráulico.

La variación de la espesura de la parafina depositada a lo largo de la sección rectangular, para diferentes instantes de tiempo, es presentada en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 correspondientes a los números de Reynolds 366, 516, 688 y 856, respectivamente. Los resultados obtenidos numéricamente en el presente trabajo son presentados por líneas continuas, mientras que los datos

experimentales se encuentran representados por puntos. Tanto la espesura de deposición como la coordenada axial a lo largo del canal están dadas en milímetros. La comparación de los resultados numéricos con los datos experimentales son presentados para instantes de tiempo de 1, 3, 5 y 10 minutos después del inicio del resfriamiento del fluido, al utilizar agua fluyendo a 15°C; la comparación también fue hecha cuando no hubo mas crecimiento del depósito, indicando que el régimen permanente había sido alcanzado.

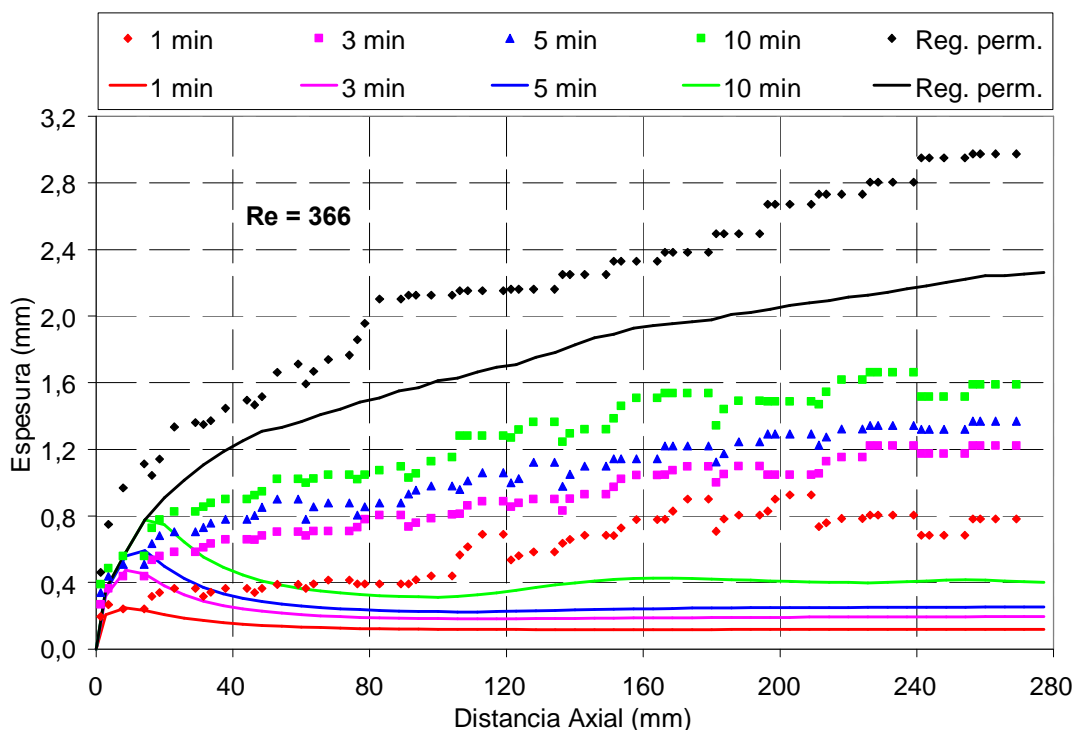


Figura 4.1 – Evolución espacial y temporal del depósito de parafina, $Re=366$.

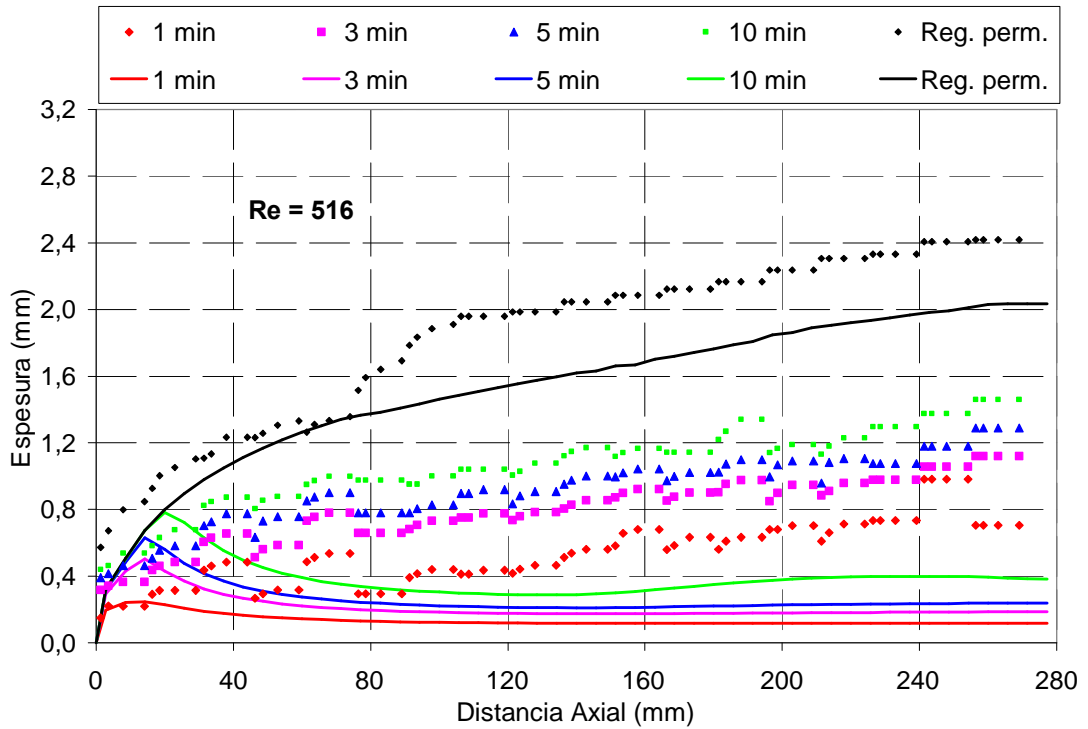


Figura 4.2 – Evolución espacial y temporal del depósito de parafina, $Re=516$.

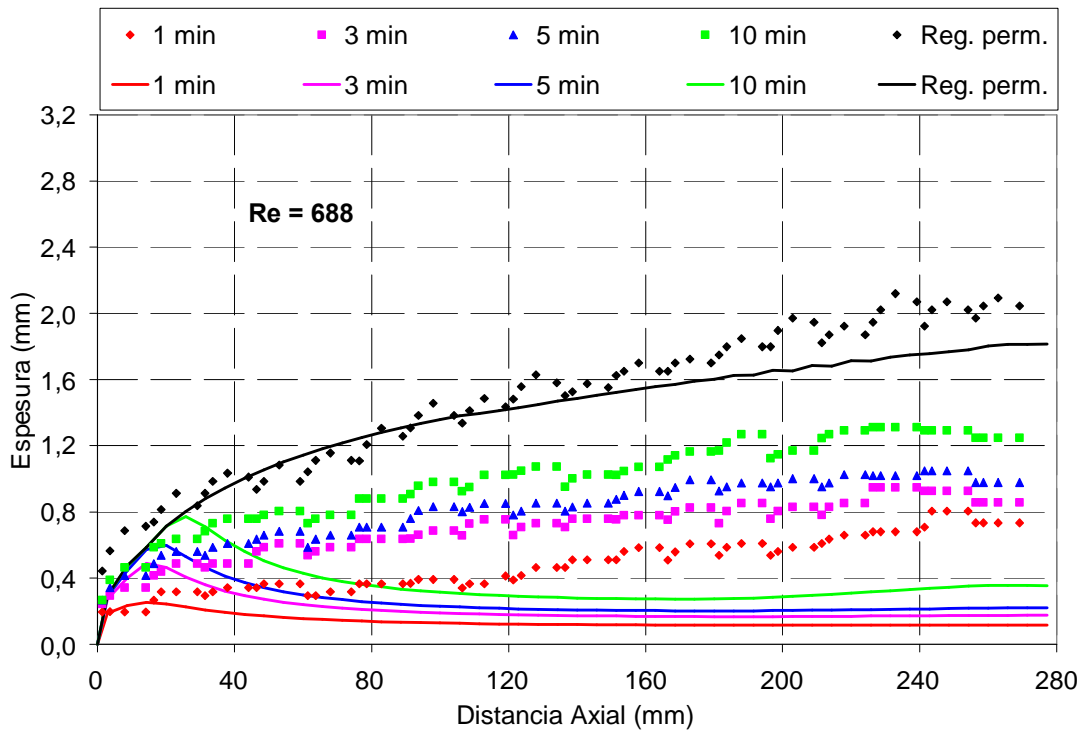


Figura 4.3 – Evolución espacial y temporal del depósito de parafina, $Re=688$.

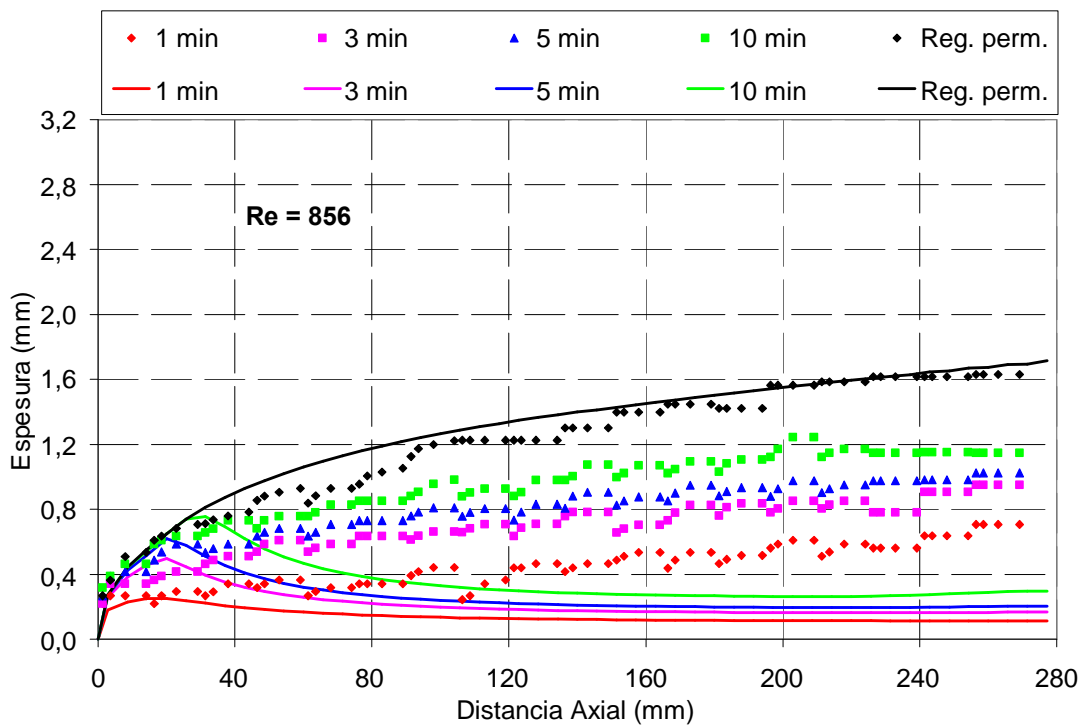


Figura 4.4 – Evolución espacial y temporal del depósito de parafina, $Re=856$.

Analizando los datos experimentales en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se observa un rápido crecimiento de la camada depositada. Los primeros 10 minutos son responsables por más del 50% del depósito final, obtenido en el régimen permanente. Se observa también que la deposición de la parafina crece en la dirección del flujo. Se seleccionó los mismos colores para comparar los resultados numéricos con los datos experimentales, observándose una pésima concordancia entre los resultados, con excepción de los casos en régimen permanente. No sólo el índice de deposición obtenida numéricamente es mucho más lenta, si no también que el modelo no es capaz de prever la correcta tendencia de la distribución espacial del depósito.

La razonable concordancia con los datos experimentales, obtenida para el régimen permanente, puede ser explicada por el hecho de que el depósito solamente puede ocurrir si la temperatura de la interfase fuera inferior a la TIAC, y este valor es controlado por el flujo de calor por conducción a través de la parafina depositada. Para un mismo flujo de calor a través de la parafina, se obtiene una temperatura mayor en la interfase, a la medida que la espesura del depósito crece. Cuando la temperatura de la interfase alcanza el valor el valor de la TIAC, no ocurre mas deposición. Considerando este argumento, se tiene que la espesura final de la parafina depositada es gobernada por la posición de la isoterma correspondiente a la TIAC, la cual depende solamente del problema de transferencia de calor por conducción en el depósito, no siendo influenciado por el proceso de transferencia de masa.

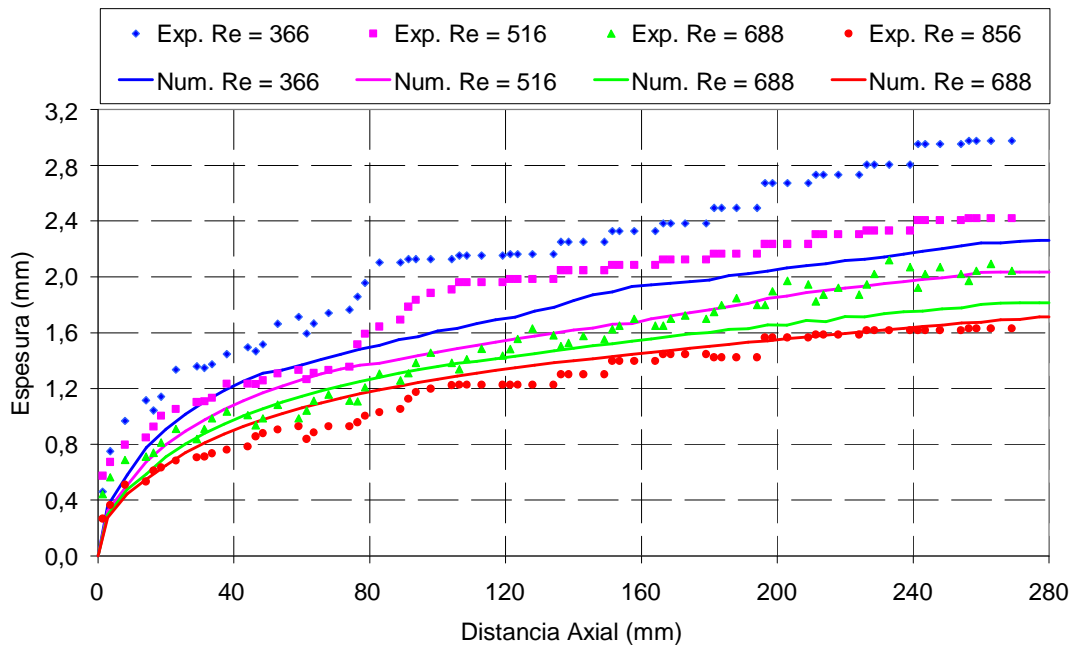


Figura 4.5 – Comparación del perfil espacial del depósito de parafina a lo largo del canal rectangular, para diferentes Reynolds, en régimen permanente.

En la figura 4.5 se compara los resultados obtenidos numéricamente en el régimen permanente, con los datos experimentales, para diferentes números de Reynolds. Se puede observar una concordancia razonable entre los resultados. El modelo numérico prevé una camada menos espesa de parafina a medida que el número de Reynolds aumenta, de acuerdo con los datos experimentales. Vale observar por tanto, que la concordancia entre los resultados es mejor para mayores números de Reynolds.

4.2.2 Resultados para Fluido Estacionario

El modelo bi-dimensional fue acondicionado para simular el crecimiento del depósito de parafina de un fluido estacionario, donde fue considerado los siguientes puntos:

- Campo de velocidad del fluido nulo
- La concentración del fluido de parafina líquida disminuyó en el sistema hasta alcanzar el régimen permanente
- Se consideró la temperatura constante y el gradiente de concentración cero en la superficie interna del cobre de la pared superior.

Para la obtención de los datos experimentales fue utilizado el mismo canal de pruebas, figura 2.2, y se consideró el punto central del canal ($x=15\text{cm}$) para acompañar el crecimiento del depósito de parafina.

Se obtuvieron datos experimentales para tres casos diferentes, siendo que la temperatura superior del cobre permaneció a 40°C para todos los casos y la temperatura inferior del cobre a 5°C , 15°C y 25°C , para el primer, segundo y tercer caso, respectivamente.

En las figuras 4.6 y 4.7, se muestra la influencia del coeficiente de difusión en el crecimiento del depósito de parafina, para el caso en que la temperatura superior del cobre está a 40°C y la temperatura inferior a 15°C . Se puede observar que el índice de deposición de parafina es proporcional con el coeficiente de difusión, llegando a un valor estimado de 300 veces el valor del coeficiente de

difusión teórico para obtener resultados cuantitativos y cualitativos con los datos experimentales.

La figura 4.7 muestra una ampliación de los resultados mostrados en la figura 4.6 para los 150 minutos iniciales. En esta figura 4.7 se puede observar una buena concordancia entre los resultados experimentales y numéricos ($D_f = 300D$). La línea continua muestra los resultados numéricos.

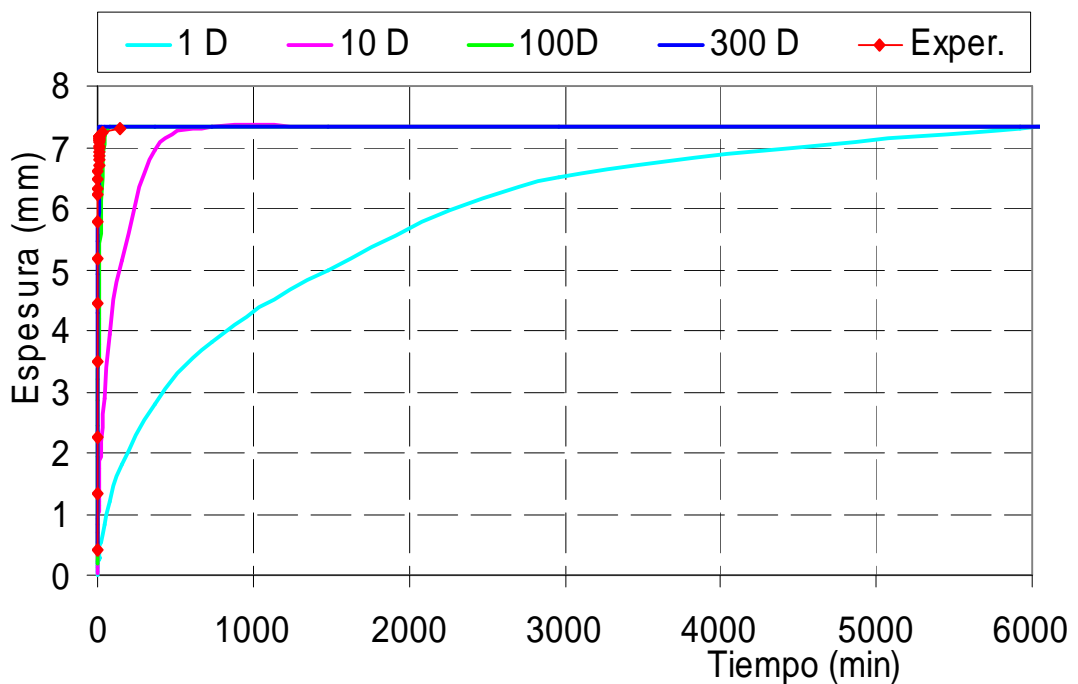


Figura 4.6 – Influencia del coeficiente de difusión en el índice del crecimiento de parafina. ($T_s=40^\circ\text{C}$ y $T_{inf} = 15^\circ\text{C}$).

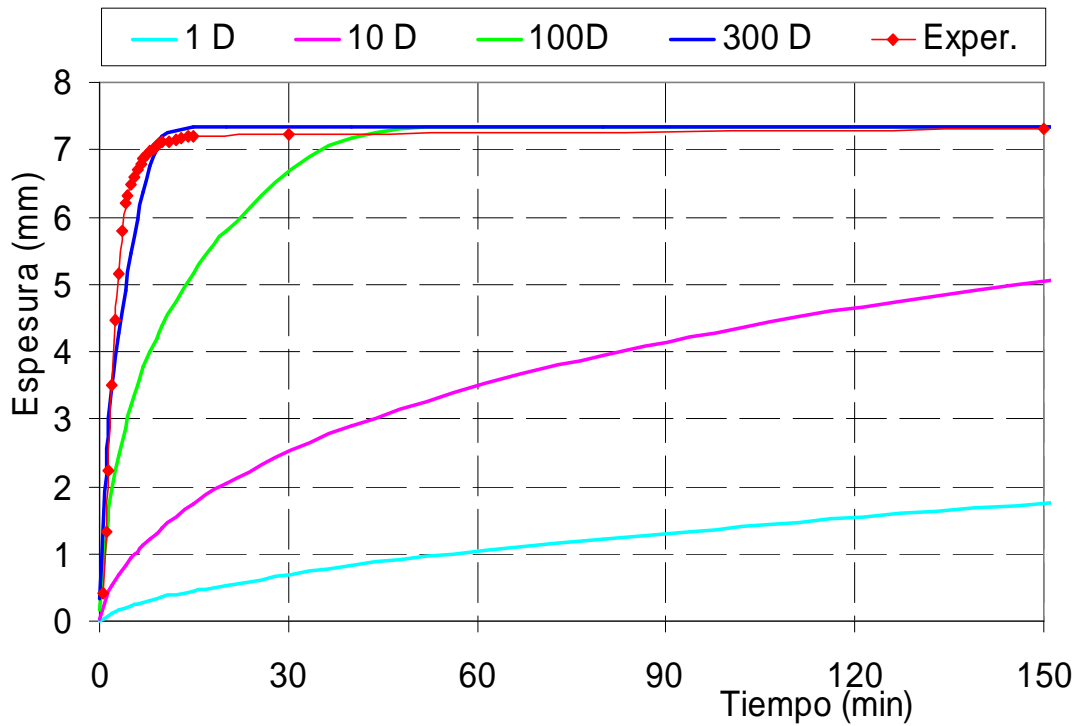


Figura 4.7 – Influencia del coeficiente de difusión en el índice del crecimiento de parafina. ($T_s=40^\circ\text{C}$ y $T_{inf} = 15^\circ\text{C}$).

En la figura 4.8 se muestra los resultados para los tres casos descritos encima, siendo que los resultados obtenidos numéricamente consideran el coeficiente de difusión como siendo 300 veces mayor que el coeficiente de difusión teórico. Se puede observar que la concordancia entre los resultados aumenta conforme aumenta el gradiente de temperatura en la interfase.

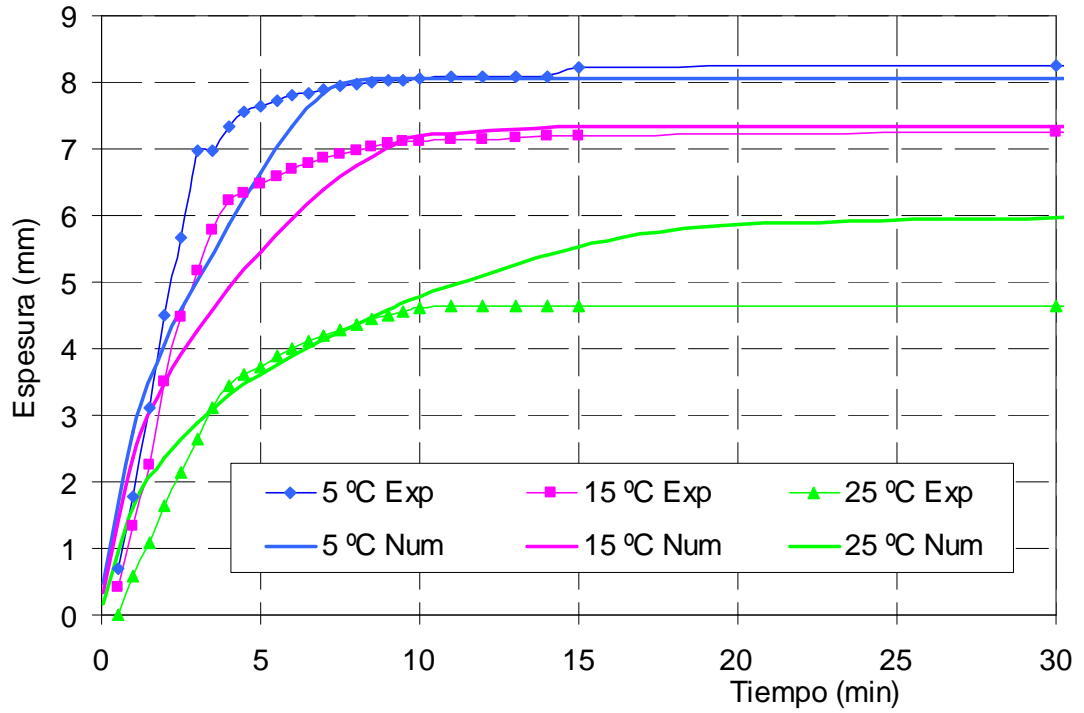


Figura 4.8 – Comparación del crecimiento del depósito de parafina de un fluido estacionario, para diferente casos.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La deposición de parafina en un ducto de sección rectangular sobre condiciones de flujo laminar fue analizada, considerando la difusión molecular como el único mecanismo responsable por la deposición. El objetivo de este estudio fue evaluar la importancia del mecanismo difusivo en el proceso de deposición de parafina. La estrategia utilizada en el estudio fue comparar las previsiones del modelo de simulación implementado con los datos experimentales. El modelo de simulación implementado procura representar de manera más fiel posible las condiciones en las cuales los experimentos fueron realizados.

Primeramente se desarrollo un modelo de simulación utilizando una formulación bi-dimensional. En este modelo, las ecuaciones de conservación de energía y conservación de masa de parafina disuelta en el óleo fueron resueltas, siendo el índice de deposición de parafina calculada a partir de un modelo difusivo que se basa en el gradiente de

concentración junto a la pared sólida. Luego, este modelo bi-dimensional fue modificado para simular la deposición de parafina del mismo fluido en estado estacionario.

La comparación con los datos experimentales presentó una buena concordancia con las espesuras de deposición a lo largo del canal para la condición de régimen permanente, tanto para el fluido estacionario como para el fluido bajo diferentes números de Reynolds. Mientras que, las previsiones en régimen transiente generadas por el modelo desarrollado, resultaban significativamente mucho menor que los resultados experimentales.

Según los resultados experimentales obtenidos del fluido bajo diferentes caudales y del fluido estacionario, puede observarse que el índice de la deposición de parafina es directamente proporcional al gradiente de temperatura en la interfase y que el mecanismo de cisallamiento está presente en el crecimiento del depósito de parafina.

Estos resultados pueden indicar que existen otros mecanismos de deposición interviniendo en conjunto con la difusión molecular. Al modelo bi-dimensional fue incorporado el efecto de calor latente para la formación de la parafina, no siendo observado efecto relevante en la espesura del depósito previsto.

5.2 RECOMENDACIONES

Como recomendación para trabajos futuros se puede indicar la utilización de algoritmos más robustos en la solución del sistema algebraico de ecuaciones. Una de las limitaciones del estudio del problema en régimen transiente consiste en el excesivo tiempo de procesamiento, el que puede ser minimizado con el desarrollo de algoritmos robustos.

Además, el modelo bi-dimensional utilizado consideró el campo de velocidad como uni-dimensional, de esta manera la ecuación de conservación de cantidad de movimiento no fue resuelto. Esta restricción debería ser eliminada con la determinación del campo de flujo bi-dimensional acoplada con la solución de la ecuación de energía y de conservación de fracción volumétrica.

Finalmente, otros mecanismos de deposición deben ser incorporados al modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- /1/ *Azevedo, L.F.A., y Teixeira A.M.* "A Critical Review of the Modeling of wax Deposition Mechanisms", Petroleum Science and technology, 21:393-408, 2003.
- /2/ *Banki, R. y Firoozabadi, A.* "Moldeling of Wax Deposition in Pipelines from Irreversible Thermodynamics. SPE, 77571, 2002.
- /3/ *Brown, T.S., Niesen V.G. y Erickson D.D.* "Measurement and prediction of the Kinetics of paraffin Deposition. SPE, 26548:353-368, 1993.
- /4/ *Burger, E.D., Perkins T.K. y Striegler J.H* "Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline", Journal of Petroleum Technology, p.1075-1086, 1981.
- /5/ *Fusi, L.* "On the stationary Flor of a waxy Crude oil with Deposition mechanisms" 2003.
- /6/ *Hamouda A.A. y Ravnoy, J.M.* "Prediction of wax deposition in Pipelines and Field Experience on the Influence of wax on Drag-reducer Performance", Off-shore technology Conference, 7060:669-679, 1992.

- /7/ *Leiroz, A.T.* “Estudo Sobre a Deposição de Parafina em Linhas de Petróleo”. Tese de Doutorado, 2004.
- /8/ *Patankar, S.V.* “Numerical Heat transfer and Fluid Flow”, Hemisphere, New Cork, 1980.
- /9/ *Ribeiro, F.S., Souza Mendes P.R. y Braga S.L.* “Obstruction of Pipelines Due to Paraffin Deposition During the Flow of Crude Oils”. Journal Heat Mass transfer, 40:4319-4328, 1997.
- /10/ *R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot*, “Fenómenos de Transporte”, editorial Reverté S. A., México, México 1997.
- /11/ *Gerhart Philip M.*, “Mecánica de Fluidos”, editorial Addison – Wesley Publishing Company, Massachussets, E. U., 1992.
- /12/ *Shames, Irving H.*, “Mecánica de Fluidos”, tercera edición, editorial McGraw – Hill Hispanoamericana S. A., México, 1995.
- /13/ *D. Russell Lynn, A. Adebisi George*, “Termodinámica Clásica”, editorial Addison – Wesley Iberoamericana, E. U., 1993.
- /14/ *Virgil Moring Faires*, “Termodinámica”, editorial Limusa, S.A de C.V., México, 1996.
- /15/ *Shoichiro Nakamura*, “Análisis Numérico y Visualización Gráfica con Matlab”, editorial Prentice – Hall Hispanoamericana S. A., México, 1996.
- /16/ *Delores M., Etter*, “Solución de problemas de Ingeniería con Matlab”, segunda edición, editorial Prentice - Hall Hispanoamericana S. A., México, 1998.

- /17/ *John H. Mathews and Kurtis D. Fink*, "Métodos Numéricos con Matlab", tercera edición, editorial Prentice – Hall, Madrid, 2000.
- /18/ *James R: Welty, Charles E: Wicks, Robert E: Wilson*, "Fundamentos de Transferencia de momento, calor y masa", primera edición, editorial Limusa, México, 1993.
- /19/ *Frank P. Incropera, David P. DeWitt*, "Fundamentos de transferencia de calor", cuarta edición, editorial Prentice – Hall, México, 1996.

ANEXOS

APÉNDICE

A.- SIMBOLOGÍA

B.- PROGRAMA DESARROLLADO EN MATLAB

B.1.- CALCULO DE LAS CONDICIONES INICIALES

B1.1.- RUTINA PRINCIPAL

B1.2.- SUBRUTINAS

B.2.- CALCULO DE LA PARAFINA DEPOSITADA

B2.1.- RUTINA PRINCIPAL

B2.2.- SUBRUTINAS

A.- SIMBOLOGÍA.-

Este apéndice contiene una lista de la mayoría de los símbolos usados en el presente trabajo. Debido a que existen muchos más conceptos que caracteres disponibles en los alfabetos castellano y griego, es inevitable que se presenten algunas duplicidades, pero cada símbolo es explicado en su respectivo capítulo.

SÍMBOLO	CONCEPTO
<hr/> Símbolos Latinos <hr/>	
a	<i>Altura del canal rectangular.</i>
A	<i>Área de la sección transversal del canal.</i>
A_d	<i>Área de deposición de parafina.</i>
A_t	<i>Área de la sección transversal del ducto.</i>
b	<i>Ancho del canal rectangular.</i>
C_p	<i>Calor específico a presión contante.</i>
D_h	<i>Diámetro Hidráulico.</i>
D_m	<i>Coefficiente de difusión de la parafina líquida en el óleo.</i>
ec, ev	<i>Espera del cobre y del vidrio, respectivamente.</i>
e_{ξ}^p, e_{η}^p	<i>Espera del cobre y del vidrio, respectivamente.</i>

h_i	Coeficiente superficial interno de transferencia de calor.	h_ξ, h_η	Constantes de proporcionalidad en las direcciones ξ, η.
			Ja
			Jacobiano de transformacion de coordenadas.
k	Conductividad termica.		
\dot{m}	Flujo másico de la mistura oleo Spindle + parafina.		
\dot{m}_p	Flujo másico de parafina depositada.		
\dot{m}''	Flujo difusivo de la fracción volumétrica.		
\vec{n}	Vector normal a la superficie de transferencia.		
N_{ui}	Número de Nuselt interno.		
P_m	Perímetro mojado.		
Pr	Número de Prandtl.		
q_{int}	Flujo de calor normal la interface.		
q_L	Calor utilizado para la mudanza de fase.		
q_v	Flujo de calor normal al lado lateral del rectángulo.		
q_{wax}	Flujo de calor en la parafina.		
\vec{q}''	Flujo de calor difusivo.		
\vec{r}	Vector posición.		
Re	Número de Reynolds.		
S_T	Generación de calor por unidad de volumen.		
S_w	Fuente de fracción volumetrica.		
t	Tiempo.		
T	Temperatura.		
\vec{u}, \vec{v}	Componentes cartesianos de la velocidad absoluta en las direcciones x e y, respectivamente.		
\vec{u}	Vector del fluido en la dirección x.		
∇	Volumen.		
∇	Gradiente.		
U_v	Coeficiente global de transferencia de calor en el vidrio.		
u_g, v_g	Componentes cartesianos de la velocidad de la malla en las direcciones x e y, respectivamente.		

U, V	Componentes contravariantes de la velocidad de la malla en las direcciones x e y, respectivamente.
\tilde{U}, \tilde{V}	Componentes contravariantes de la velocidad relativa en las normales a las direcciones x e y, respectivamente.
y, x vertical.	Coordenadas cartesianas horizontal y vertical.

SÍMBOLO	CONCEPTO
Símbolos Griegos	
α	Difusión Térmica.
β_ξ, β_η	Áreas normales a los flujos de calor secundario, tangentes a ξ y η, respectivamente.
δ	Espesura del depósito de parafina.
λ	Calor latente.
μ	Viscosidad dinámica.
ξ, η	Coordenadas en el plano transformado.
Γ	Coefficiente de difusión.
ρ	Masa específica del fluido.
ρ_p	Masa específica de la parafina.
τ	Tempo transformado.
$\vartheta_\xi, \vartheta_\eta$	Áreas principales en la dirección normal a ξ y η.
ϕ	Porosidad.
Φ	Variable dependiente en la ecuación general discretizada.
ω	Fracción de masa de la parafina.
SÍMBOLO	CONCEPTO
Subíndices	

<i>c</i>	Cobre.
<i>e,ee,ne,s,se,w</i>	Faces del volumen de control.
H₂O	Agua.
<i>i,I</i>	Posición axial a lo largo del ducto.
Int	Interface.
<i>m</i>	Mistura.
<i>p</i>	Parafina.
P,N,S,E,W	Puntos nodales del dominio computacional.
<i>sev</i>	Superficie externa del vidrio.
<i>sc</i>	Superficie externa del cobre.
<i>v</i>	Vidrio.
wax	Parafina sólida.
<i>ξ, η</i>	Coordenadas curvilíneas.
<i>∞</i>	Ambiente.

Abreviaturas

SC	Superficie de control.
VC	Volumen de control.
TDMA	Algoritmo matricial tridiagonal.

B.- PROGRAMA DESARROLLADO EN MATLAB.

B.1.- CALCULO DE LAS CONDICIONES INICIALES

B1.1.- RUTINA PRINCIPAL

```
clear all
clc
disp('')
disp('%%%%%%%% calculo de la deposicion de parafina %%%')
disp(' ')
format long
Talc_rp=input('ingrese el tiempo para alcanzar el regimen permanente (s)
=');
disp(' ')
% disp(' ')
    Rc=input('ingrese numero de Reynolds Rc= ');
%
%----- lee los datos iniciales
    dados_iniciais
%
%----- vector posicion
    Posicao
%
%----- vector tiempo
    tempo_inicio
%
%----- lectura de las condiciones iniciales
    valores_iniciais_inicio
%
%----- Calculo de la temperatura para cada paso de tiempo.....
    jrp=0;
%
    while jrp<=nt
        jrp=jrp+1
%
%---- Almacenano las propiedades en el tiempo anterior
        archivando_acrilico_inicio
%
%---- temperatura en el acrilico
%
        dif_T_acr=1;
        tol=1e-10;
        npp=0;
%
%--- convergencia de la temperatura da superficie
%
        while dif_T_acr >= tol & npp <= 800
%
            npp=npp+1;
%
%---- calculo da conservacion de massa
```



```
conserv_massa_acrilico_inicio
%
%---- temperatura del oleo en el acrilico
Temp_oleo_acrilico_inicio
%
%----- calculo de la temperatura de la superficie del acrilico
Temp_no_acrilico_inicio
%
%----- comparando resultados de temp. Superficie
%
for i=1:1:nx_a
    difere_tem_acr(i,1)=Tsuper_acr_chu(i,1)-Tsuper_acr(i,1);
    Tsuper_acr_chu(i,1)=Tsuper_acr(i,1);
%----
    Tsuper_acr_chu(nx_a,1)=Tsuper_acr_chu(nx_a-1,1);
End
%
    dif_T_acr = max(abs(difere_tem_acr));
%
%---- fin de la convergencia en el canal de acrilico
%
End
%
%%%%%%%%%%%%%%
%%---- calculo del perfil de temperatura y velocidad acrilico---cobre
%
for j=2:1:nwj
    toa=1/del_Xw_a(nx_a,1);
    toc=1/del_Xe_c(1,1);
    ap_to=toa+toc;
%
    Tentrada_cobre(1,1)=Toleo_acr(nx_a,1);
end
%
for j=1:1:nwj
    fm_c(1,1)=fma(nx_af,1);
end
%
%%%%%%%%%%%%%%
%% Almacenando las propiedades en el tiempo anterior
%
    archivando_cobre_inicio
%
%---- temperatura en el cobre
%
    dif_T_cobre=1;
    tol_cob=1e-9;
```

```
npc=0;
deo_c=840;
%
%--- convergencia de la temperatura de la superficie
%
while dif_T_cobre >= tol_cob & npc<=800
    npc=npc+1;
%
%--- calculo de la conservacion de massa
    conserv_massa_cobre_inicio
%
%--- temperatura del oleo en el acrilico
    Temp_oleo_cobre_inicio
%
%--- calculo de la temperatura de la superficie del acrilico
    Temp_no_cobre_inicio
%
%--- comparando resultados de temp. Superficie
%
    for i=1:1:nx_c
        dif_tem_cobre(i,1)=Tsuper_cobre_chu(i,1)-Tsuper_cobre(i,1);
        Tsuper_cobre_chu(i,1)=Tsuper_cobre(i,1) ;
%
        Tsuper_cobre_chu(nx_c,1)=Tsuper_cobre_chu(nx_c-1,1);
    end
%
    dif_T_cobre = max(abs(dif_tem_cobre));
%
%--- fin de la convergencia en el canal do cobre
%
    End
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%--- final del lapzo del tiempo
%
    End
%----
    registro_datos_inicio
%----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

B1.2.- SUBRUTINAS

1.- datos_iniciais

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% disp('%%%%%%%%-----Duto retangular de cobre-----')
disp(' ')
disp('%%%-----Dados geometricos-----')
disp('Comprimento      ....      L(m)=0.3')
disp('Altura            ....      a(m)=0.01')
disp('Largura           ....      b(m)=0.003')
    L=0.28;
    a=0.01;
    b=0.003;
disp(' ')
disp('-----Propriedades do oleo-----')
disp('Densidade oleo      ....      deo(kg/m3)=840')
disp('Viscosidade dinamica ....      vi(kg/(ms))=0.0102')
disp('Condutividade termica ....      ki(W/(mK))=0.23')
disp('Calor especifico      ....      cp(J/(Kg.K))=2020.218')
deo=842.65;
vi=0.008;
ki=0.23;
cp=2017.68;
disp(' ')
disp('-----Propriedades da parafina-----')
disp('Densidade parafina    ....      dep(kg/m3)=760')
disp('Condutividade da parafina ....      kp(W/(mK))=0.23')
disp('Porosidade do deposito ....      pop=0.86')
disp('Calor Latente de fusao ....      cal(J/kg)=264400')
disp('Calor especifico      ....      cp(J/(Kg.K))=2211.41')
    dep=842.65;
    kp=0.23;
    pop=0.86;
    cp_p=2017.78
    cal=264400;
%cal=0;
disp(' ')
disp('-----Condicoes de contorno-----')
disp('temp. inicial oleo      ....      Tini_oleo_cobr(K)=313.15')
disp('temp. da agua inicial   ....      Tagua_inicio(K)=288.15')
disp('temp. da agua final     ....      Tagua_fim(K)=313.15')
disp('temp. ambiente          ....      Tamb(K)=298.15')
disp('temp. de nevoa          ....      Tiac(K)309.15')
    Tini_oleo_cobr=313.15;
    Tagua_inicio=313.00;
    Tagua_fim=288.15;
    Tamb=300.15;
    Tiac=309.75;
disp(' ')

```

```
disp('----Dados da parede vertical (vidrio)---')
disp('Espessura          ....   eh_v(m)=0.003')
disp('Condutividade termica do vidro ....   k_v(W/mK)=0.76')
disp('Densidade          ....   de_v(kg/m3)=2707')
disp('Calor especifico    ....   cp_v(J/(Kg.K))=835')
disp('Coeficiente de transferencia ....   hv_v(W/m2*K)=10')
    eh_v=0.003;
    k_v=1.3;
    de_v=2707;
    cp_v=835;
    hv_v=10;
disp(' ')
disp('-----Dados do cobre-----')
disp('Espessura          ....   ev_c(m)=0.030')
disp('Condutividade termica ....   k_c(W/mK)=401')
disp('Densidade          ....   de_c(kg/m3)=8920')
disp('Calor especifico    ....   cp_c(J/(Kg.K))=383')
disp('Coeficiente de transferencia ....   hh_c(W/m2*K)=1500')
    ev_c=0.03;
    ec=0.03;
    ev_c=0.03;
    k_c=401;
    de_c=8920;
    cp_c=383;
    hh_c=1500;
disp(' ')
%%%%%%%%%%
%disp('%%%%%%%%')
disp('%-----Acrilico-----')
disp('%%%%%%%%')
disp(' ')
disp('%-----Dados geometricos internos-----')
disp('comprimento      ....   LA(m)=0.04')
disp('altura           ....   a(m)=0.01')
disp('largo            ....   b(m)=0.003')
    LA=0.04;
    a=0.01;
    b=0.003;
disp(' ')
disp('---Propriedades fisicas do acrilico -----')
disp('Condutividade termica ....   k_a(W/mK)=0.2093')
disp('Densidade          ....   de_a(kg/m3)=1190')
disp('Calor especifico    ....   cp_a(J/(Kg.K))=1465')
    k_a=0.2093;
    de_a=1190;
    cp_a=1465;
disp(' ')
```

```
disp('%%%-----Dados geometricos externos-----')
disp('Anchura horizontal externa .... lhe_a(m)=0.0254')
disp('Altura vertical externa .... lve_a(m)=0.061')
    lhe_a=0.0254;
    lve_a=0.061;
disp(' ')
disp('-----Condicoes de contorno-----')
disp('temp. na entrada do canal de acrilico ...
Tingreso_oleo_acr(K)=313.15')
disp('temp. da superf. horizontal externa ... Tamb_z(K)=298.15')
disp('temp. da superf. vertical externa ... Tamb_y(K)=298.15')
    Tingreso_oleo_acr=313.15;
    Tamb_z=298.15;
    Tamb_z_fim=298.15;
    Tamb_y=298.15;
disp(' ')
disp('-----Dados da parede vertical acrilico -----')
disp('espessura .... ev_a(m)=0.0112')
disp('coeficiente de transf. do calor .... hv_a(W/m2*K)=10')
    ev_a=0.0112;
    hv_a=48;
disp(' ')
disp('-----Dados da parede horizontal acrilico ---')
disp('Espessura .... eh_a(m)=0.0255')
disp('Coeficiente de transf. do calor .... hh_a(W/m2*K)=10')
    eh_a=0.0255;
    hh_a=57;
disp(' ')
```

2.- Posicao

```
%%% volumes de controle no acrilico -- diferencas finitas
%
    nx_c=141;
    nx_cf=nx_c-1;
    nx_a=11;
    nx_af=nx_a-1;
%
    nwj=151;
    nw_p=11;
%
%----- na espessura no acrilico direcao "y"
    ny_a=11;
    ny_ea_f=ny_a-1;
%
    eta_ea_f(1,1)=0;
```

```
        eta_ea_p(1,1)=0;
%
        eta_ea_p(1,ny_a)=ev_a;
        for j=2:ny_a-1
            eta_ea_f(1,j)=(ev_a)*((j-1)/(ny_a-2));
            eta_ea_p(1,j)=(eta_ea_f(1,j)+eta_ea_f(1,j-1))/2;
        end
% criando deltas de faces e pontos
        del_ea_Nf(1,1)=0;
        del_ea_Ns(1,1)=0;
        del_ea_Nn(1,1)=eta_ea_p(1,2)-eta_ea_p(1,1);
        for j=2:ny_a-1
            del_ea_Nf(1,j)=eta_ea_f(1,j)-eta_ea_f(1,j-1);
            del_ea_Ns(1,j)=eta_ea_p(1,j)-eta_ea_p(1,j-1);
            del_ea_Nn(1,j)=eta_ea_p(1,j+1)-eta_ea_p(1,j);
%delta entre a face e o ponto nodal em y
            yy_ea_n(1,j)=eta_ea_f(1,j)-eta_ea_p(1,j);
            yy_ea_s(1,j)=eta_ea_p(1,j)-eta_ea_f(1,j-1);
        end
        del_ea_Nf(1,ny_a)=0;
        del_ea_Ns(1,ny_a)=eta_ea_p(1,ny_a)-eta_ea_p(1,ny_a-1);
        del_ea_Nn(1,ny_a)=0;
%
%----- vetor na superficie do acrilico na direcao "x" --- volumes finit
        xf_a(1,1)=0;
        xp_a(1,1)=0;
        dxf_a(1,1)=0;
        dxp_a(1,1)=0;
%
        xf_a(nx_a,1)=LA;
        xp_a(nx_a,1)=LA;
        dxf_a(nx_a,1)=0;
        dxp_a(nx_a,1)=0;
        for i=2:nx_a-1
            xf_a(i,1)=LA*(i-1)/(nx_a-2);
            xp_a(i,1)=(xf_a(i,1)+xf_a(i-1,1))/2;
            dxf_a(i,1)=xf_a(i,1)-xf_a(i-1,1);
        end
        for i=1:nx_a-1
            dxp_a(i,1)=xp_a(i+1,1)-xp_a(i,1);
        end
% criando deltas de faces e pontos
        del_Xf_a(1,1)=0;
        del_Xw_a(1,1)=0;
        del_Xe_a(1,1)=xp_a(2,1)-xp_a(1,1);
        for i=2:nx_a-1
            del_Xf_a(i,1)=xf_a(i,1)-xf_a(i-1,1);
```

```
del_Xw_a(i,1)=xp_a(i,1)-xp_a(i-1,1);
del_Xe_a(i,1)=xp_a(i+1,1)-xp_a(i,1);
end
del_Xf_a(nx_a,1)=0;
del_Xw_a(nx_a,1)=xp_a(nx_a,1)-xp_a(nx_a-1,1);
del_Xe_a(nx_a,1)=0;
%----- estudo da malha em y---para a regio do fluido volumens finitos
%
nwjf=nwj-1;
eta_f(1,1)=0;
eta_p(1,1)=0;
%
eta_p(1,nwj)=1;
del_eta(1,nwj)=0;
for j=2:nwj-1
eta_f(1,j)=((j-1)/(nwj-2));
eta_p(1,j)=(eta_f(1,j)+eta_f(1,j-1))/2;
end
for j=1:nwj-1
del_eta(1,j)=eta_p(1,j+1)-eta_p(1,j);
end
% criando deltas de faces e pontos
del_Nf(1,1)=0;
del_Ns(1,1)=0;
del_Nn(1,1)=eta_p(1,2)-eta_p(1,1);
for j=2:nwj-1
del_Nf(1,j)=eta_f(1,j)-eta_f(1,j-1);
del_Ns(1,j)=eta_p(1,j)-eta_p(1,j-1);
del_Nn(1,j)=eta_p(1,j+1)-eta_p(1,j);
%delta entre a face e o ponto nodal em y
yy_n(1,j)=eta_f(1,j)-eta_p(1,j);
yy_s(1,j)=eta_p(1,j)-eta_f(1,j-1);
end
del_Nf(1,nwj)=0;
del_Ns(1,nwj)=eta_p(1,nwj)-eta_p(1,nwj-1);
del_Nn(1,nwj)=0;
%--- estudo da malha em y---para a regio da parafina
eta_f_ep(1,1)=0;
eta_p_ep(1,1)=0;
%
eta_p_ep(1,nw_p)=1;
for j=2:nw_p-1
eta_f_ep(1,j)=(j-1)/(nw_p-2);
eta_p_ep(1,j)=(eta_f_ep(1,j)+eta_f_ep(1,j-1))/2;
end
% criando deltas de faces e pontos
del_Nf_ep(1,1)=0;
```

```
del_Ns_ep(1,1)=0;
del_Nn_ep(1,1)=eta_p_ep(1,2)-eta_p_ep(1,1);
for j=2:nw_p-1
    del_Nf_ep(1,j)=eta_f_ep(1,j)-eta_f_ep(1,j-1);
    del_Ns_ep(1,j)=eta_p_ep(1,j)-eta_p_ep(1,j-1);
    del_Nn_ep(1,j)=eta_p_ep(1,j+1)-eta_p_ep(1,j);
%delta entre a face e o ponto nodal em y
yy_n_ep(1,j)=eta_f_ep(1,j)-eta_p_ep(1,j);
yy_s_ep(1,j)=eta_p_ep(1,j)-eta_f_ep(1,j-1);
end
del_Nf_ep(1,nw_p)=0;
del_Ns_ep(1,nw_p)=eta_p_ep(1,nw_p)-eta_p_ep(1,nw_p-1);
del_Nn_ep(1,nw_p)=0;

% ----- vetor na espessura do cobre na direcao "y"
ny_c=31;
ny_ec_f=ny_c-1;
%
eta_ec_f(1,1)=0;
eta_ec_p(1,1)=0;
%
eta_ec_p(1,ny_c)=ev_c;
for j=2:ny_c-1
    eta_ec_f(1,j)=(ev_c)*((j-1)/(ny_c-2));
    eta_ec_p(1,j)=(eta_ec_f(1,j)+eta_ec_f(1,j-1))/2;
end
% creando deltas de faces e pontos
del_ec_Nf(1,1)=0;
del_ec_Ns(1,1)=0;
del_ec_Nn(1,1)=eta_ec_p(1,2)-eta_ec_p(1,1);
for j=2:ny_c-1
    del_ec_Nf(1,j)=eta_ec_f(1,j)-eta_ec_f(1,j-1);
    del_ec_Ns(1,j)=eta_ec_p(1,j)-eta_ec_p(1,j-1);
    del_ec_Nn(1,j)=eta_ec_p(1,j+1)-eta_ec_p(1,j);
%delta entre a face e o ponto nodal em y
yy_ec_n(1,j)=eta_ec_f(1,j)-eta_ec_p(1,j);
yy_ec_s(1,j)=eta_ec_p(1,j)-eta_ec_f(1,j-1);
end
del_ec_Nf(1,ny_c)=0;
del_ec_Ns(1,ny_c)=eta_ec_p(1,ny_c)-eta_ec_p(1,ny_c-1);
del_ec_Nn(1,ny_c)=0;
%----- estudo da malla na superficie do cobre "x"
% nx_c numero de pontos -- nodos
%
xf_c(1,1)=0;
xp_c(1,1)=0;
dxf_c(1,1)=0;
```



```
    dxp_c(1,1)=0;
%
    xp_c(nx_c,1)=L;
    dxp_c(nx_c,1)=0;
    for i=2:nx_c-1
        xf_c(i,1)=L*((i-1)/(nx_c-2));
        xp_c(i,1)=(xf_c(i,1)+xf_c(i-1,1))/2;
        dxf_c(i,1)=xf_c(i,1)-xf_c(i-1,1);
    end
    for i=1:nx_c-1
        dxp_c(i,1)=xp_c(i+1,1)-xp_c(i,1);
    end
% criando deltas de faces e pontos
    del_Xf_c(1,1)=0;
    del_Xw_c(1,1)=0;
    del_Xe_c(1,1)=xp_c(2,1)-xp_c(1,1);
    %
    xx_e(1,1)=xf_c(1,1)-xp_c(1,1);
    xx_w(1,1)=0;
    for i=2:nx_c-1
        del_Xf_c(i,1)=xf_c(i,1)-xf_c(i-1,1);
        del_Xw_c(i,1)=xp_c(i,1)-xp_c(i-1,1);
        del_Xe_c(i,1)=xp_c(i+1,1)-xp_c(i,1);
        %%distancia entre a face e o ponto nodal
        xx_e(i,1)=xf_c(i,1)-xp_c(i,1);
        xx_w(i,1)=xp_c(i,1)-xf_c(i-1,1);
    end
    del_Xf_c(nx_c,1)=0;
    del_Xw_c(nx_c,1)=xp_c(nx_c,1)-xp_c(nx_c-1,1);
    del_Xe_c(nx_c,1)=0;
    %
    xx_e(nx_c,1)=0;
    xx_w(nx_c,1)=xp_c(nx_c,1)-xf_c(nx_c-1,1);
disp(' ')
```

3.- tempo_inicio

```
%%% tempo para atingir o regime permanente
    mt=10;
    ddt_rp=Talc_rp/mt;
%
    dr1=ddt_rp;
    dr2=1*ddt_rp;
    dr3=1*ddt_rp;
    dr4=2*ddt_rp;
    dr5=3*ddt_rp;
```

```
dr6=4*ddt_rp;  
dr7=5*ddt_rp;  
dr8=6*ddt_rp;  
dr9=7*ddt_rp;  
dr10=8*ddt_rp;  
dr11=9*ddt_rp;  
dr12=10*ddt_rp;  
%  
    nt=10;  
    dt_rp=Talc_rp/nt;
```

4.- valores_iniciais_inicio

```
%----- leitura das condicoes iniciais  
for i=1:1:nx_a  
%temperatura na superficie do acrilico  
    Tsuper_acr(i,1)=313.15;  
% temperatura do oleo no interior do acrilico  
    Toleo_acr(i,1)=313.15;  
%%% temperatura na espessura do acrilico em Y"  
end  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% chute inicial Tini_super_cobre=313.12;  
for i=1:1:nx_c  
%temperatura na superficie do cobre  
    Tsuper_cobre(i,1)=313.15;  
% temperatura do oleo no interior do cobre  
    Toleo_cobre(i,1)=313.15;  
    Tentrada_cobre(1,1)=313.15;  
end  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%% no acrilico na direcao "x"  
for i=1:1:nx_a  
%% temperatura no fluido  
    Toleo_acr(i,1)=313.15;  
    Tentrada_acrilico(1,1)=313.15;  
%%%temperatura da interface inicial "chute"  
    Tsuper_acr(i,1)=313.15;  
end  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%% no cobre na direcao "x"  
for i=1:1:nx_c  
%% temperatura no fluido  
    Toleo_cobre(i,1)=313.15;  
%%% na espessura do cobre na direcao "y"  
%%%temperatura da interface inicial "chute"
```

```
Tsuper_cobre(i,1)=313.15;
end

disp(' ')
disp('%%%-----inializacao de valores----- ')
disp(' ')
%%% coeficientes de difusividade
% no oleo
    alf_oleo=ki/(deo*cp);
% na parafina
    alf_paraf=kp/(dep*cp_p);
% no acrilico
    alf_acr=k_a/(de_a*cp_a);
% no cobre
    alf_cobre=k_c/(de_c*cp_c);
% no vidro
    alf_vidro=k_v/(de_v*cp_v);
% densidade do oleo no acrilico
    deo_a=840;
% densidade do oleo no cobre
    deo_c=840;
% conductividade oleo no cobre
    ko_c=0.23;
% conductividade oleo no acrilico
    ko_a=0.23;
% viscosidade no acrilico
    ko_c=0.23;
    deo_c=deo;
% % viscosidade
    vi_a=0.008;
% viscosidade no cobre
    vi_c=vi_a;
% variacao da difusividades no oleo
    alf_oleo_a=ko_a/(deo_a*cp);
%%% constantes da equacao de Nusselt
    an=76.524132;
    bn=218.6783;
    cn=561.3199;
    dn=-796.6956;
    en=1657.8963;
    fn=13034.0557;
    gn=77831.1516;
    hn=77252.9691;
    in=627426.5378;
% parametros geometricos em duto limpo
    Ac=a*b;
    Pmc=2*(a+b);
```

```
dhc=4*Ac/Pmc;
% parametros adimensionais iniciais
Pc=Rc*vi*cp/ki;
Pr=cp*vi/(ki);
% calculo da vazao
Qv=Rc*Ac*vi/(dep*dhc)
%%%%%%%% calculo do Reynolds e Nusselt no acrilico
for i=1:nx_a
    Rc_a=deo_a*Qv^4/(vi_a*Pmc);
    Pr_a=cp*vi_a/(ko_a);
    Xn_a(i,1)=(xp_a(i,1))/(dhc*Rc_a*Pr_a)^0.5;
Nui_a(i,1)=(an+cn*Xn_a(i,1)+en*Xn_a(i,1)^2+gn*Xn_a(i,1)^3+in*Xn_a(i,1)^4
)/(1+bn*Xn_a(i,1)+dn*Xn_a(i,1)^2+fn*Xn_a(i,1)^3+hn*Xn_a(i,1)^4);
%%%%%%%% calculo do coeficiente global dimencional
    Uv_a(i,1)=inv(ev_a/k_a+dhc/(Nui_a(i,1)*ko_a)+1/hv_a);
end
%%%%%%%% calculo do Reynolds e Nusselt no cobre
    Rc_c=deo_c*Qv^4/(vi_c*Pmc);
    Pr_c=cp*vi_c/(ko_c);
for i=1:nx_c
    Xn(i,1)=((xp_c(i,1)+0.04))/(dhc*Rc_c*Pr_c)^0.5;
Nui_v(i,1)=(an+cn*Xn(i,1)+en*Xn(i,1)^2+gn*Xn(i,1)^3+in*Xn(i,1)^4)/(1+bn*X
n(i,1)+dn*Xn(i,1)^2+fn*Xn(i,1)^3+hn*Xn(i,1)^4);
%%%%%%%% calculo do coeficiente global adimencional
    Uv(i,1)=1/(eh_v/k_v+dhc/(Nui_v(i,1)*ko_c)+1/hv_v);
end
```

5.- arquivando_acrilico_inicio

```
%%%%%%%% arquivando as propriedades no tempo anterior
%%%%%%%% para tempos jrp>1
for i=1:1:nx_a
    Told_oleo_acr(i,1)=Toleo_acr(i,1);
end
%%%%%%%%%%%%%%
%% chute inicial: Tsuperf_cobre ou a Temperatura na interface
for i=1:1:nx_a
    Tsuper_acr_chu(i,1)=Tsuper_acr(i,1);
end
%%%%%%%%%
```

6.- conserv_massa_acrilico_inicio

```
% fluxo de masa na entrada do acrilico
```

```
    for i=1:nx_af
        fma(i,1)=deo_c*Qv;
    end
%
7.- Temp_oleo_acrilico_inicio
% %%% condicoes de contorno para a temperatura
% %%% calculo de hi
    for i=1:nx_a
        hi(i,1)=Nui_a(i,1)*ki/dhc;
    end
%temperatura na superficie da interface
    for i=1:nx_a
        Toleo_acr(i,1)=Tsuper_acr_chu(i,1);
    end
% % temperatura na entrada do canal de acr
    Toleo_acr(1,1)=Tingreso_oleo_acr;
    %
% %%% coeficientes TDMA
    apo_a(1,1)=0;
    ae_a(1,1)=0;
    aw_a(1,1)=0;
    bb_a(1,1)=Toleo_acr(1,1);
    ap_a(1,1)=1;
%
    for i=2:nx_a-1
        apo_a(i,1)=deo_a*Ac*dxf_a(i,1)*cp/dt_rp;
        ae_a(i,1)=0;
        aw_a(i,1)=fma(i,1)*cp;
        sc_a(i,1)=2*(b*hi(i,1)*Tsuper_acr_chu(i,1)+Uv_a(i,1)*a*Tamb);
        sp_a(i,1)=-2*(b*hi(i,1)+Uv_a(i,1)*a);
        bb_a(i,1)=apo_a(i,1)*Told_oleo_acr(i,1)+sc_a(i,1)*dxf_a(i,1);
        ap_a(i,1)=ae_a(i,1)+aw_a(i,1)+apo_a(i,1)-sp_a(i,1)*dxf_a(i,1);
    end
%
    apo_a(nx_a,1)=0;
    ae_a(nx_a,1)=0;
    aw_a(nx_a,1)=1;
    sc_a(nx_a,1)=0;
    sp_a(nx_a,1)=0;
    bb_a(nx_a,1)=0;
    ap_a(nx_a,1)=1;
%
%calculo de P e Q
%
    P_a(1,1)=ae_a(1,1)/ap_a(1,1);
```

```
        QQ_a(1,1)=bb_a(1,1)/ap_a(1,1);
%
    for i=2:1:nx_a
        denom=(ap_a(i,1)-aw_a(i,1)*P_a(i-1,1));
        P_a(i,1)=ae_a(i,1)/denom;
        QQ_a(i,1)=(bb_a(i,1)+aw_a(i,1)*QQ_a(i-1,1))/denom;
    end
%
        Toleo_acr(nx_a,1)=QQ_a(nx_a,1);
    for i=(nx_a-1):-1:1
        Toleo_acr(i,1)=P_a(i,1)*Toleo_acr(i+1,1)+QQ_a(i,1);
    end
%
```

8.- Temp_no_acrilico_inicio

```
%%% temperatura na espessura do acrilico numa posicao
%%%
%%% condicoes da temperatura na fronteira com a agua
    for i=1:nx_a
        Texterna_acr(i,1)=Tamb;
    end
%%%temperatura
    for i=1:nx_a
        aux_a(i,1)=1/(k_a/eh_a+hi(i,1));
        aux_b(i,1)=k_a/eh_a;
    end
Tsuper_acr(i,1)=aux_a(i,1)*(hi(i,1)*Toleo_acr(i,1)+aux_b(i,1)*Texterna_acr(i,1));
end
%
```

9.- arquivando_cobre_inicio

```
%%% arquivando as propriedades no tempo anterior
%%% para tempos jrp>1
    for i=1:1:nx_c
%%% na espessura do cobre em Y"
%%% no interior do canal
        Told_oleo_cobre(i,1)=Toleo_cobre(i,1);
    end
%%%%%%%%%%
%%% chute inicial: Tsuperf_cobre ou a Temperatura na interface
    for i=1:1:nx_c
        Tsuper_cobre_chu(i,1)=Tsuper_cobre(i,1);
    end
```

10.- conserv_massa_cobre_inicio

```
%% variacao do delta nas faces do volume de controle em "x"
%%$% espessura=0 ..pelo tanto del(i,1)=0
    for i=1:nx_c
        del(i,1)=0;
    end
%%%%
    d_w(1,1)=del(1,1);
    d_w(2,1)=del(1,1);
    for i=3:nx_c-1
d_w(i,1)=del(i-1,1)*(xx_w(i,1)/del_Xw_c(i,1))+del(i,1)*(1-xx_w(i,1)/del_Xw_c(i,1));
    end
    d_w(nx_c,1)=del(nx_c,1);
%% face
    d_e(1,1)=del(1,1);
    for i=2:nx_c-2
d_e(i,1)=del(i+1,1)*(xx_e(i,1)/del_Xe_c(i,1))+del(i,1)*(1-xx_e(i,1)/del_Xe_c(i,1));
    end
    d_e(nx_c-1,1)=del(nx_c,1);
    d_e(nx_c,1)=del(nx_c,1);
%%%%
%% definindo areas nas faces
    for i=1:nx_c
        A_w(i,1)=(a-2*d_w(i,1))*b;
        A_p(i,1)=(a-2*del(i,1))*b;
        A_e(i,1)=(a-2*d_e(i,1))*b;
    end
%%%%
% velocidade na entrada
    vede_f(1,1)=Qv/A_p(1,1);
% velocidade ao longo do duto nas faces
    for i=2:nx_cf
        aw_v(i,1)=A_w(i,1)/A_e(i,1);
%        b_v(i,1)=(A_p(i,1)-At_var_old(i,1))/A_e(i,1);
        b_v(i,1)=0;
        %
        vede_f(i,1)=aw_v(i,1)*vede_f(i-1,1)-b_v(i,1)*del_Xf_c(i,1)/dt_rp;
    end
```

11.- Temp_oleo_cobre_inicio

```
%temperatura na superficie da interface
```

```
    for i=1:nx_c
        Toleo_cobre(i,1)=Tsuper_cobre_chu(i,1);
    end
% temperatura na entrada do canal de cobre
%   for j=2:nwj
        Toleo_cobre(1,1)=Tentrada_cobre(1,1);
%%% calculo de hi
        for i=1:nx_c
            hi_v(i,1)=Nui_v(i,1)*ki/dhc;
        end
%%% coeficientes TDMA
        apo_c(1,1)=0;
        ae_c(1,1)=0;
        aw_c(1,1)=0;
        bb_c(1,1)=Toleo_cobre(1,1);
        ap_c(1,1)=1;
%
%   for i=2:nx_c-1
        apo_c(i,1)=deo_c*Ac*dx_f_c(i,1)*cp/dt_rp;
        ae_c(i,1)=0;
        aw_c(i,1)=deo_c*cp*A_w(i,1)*vede_f(i-1,1);
        sc_c(i,1)=2*(b*hi_v(i,1)*Tsuper_cobre_chu(i,1)+Uv(i,1)*(a-
2*del(i,1))*Tamb);
        sp_c(i,1)=-2*(b*hi_v(i,1)+Uv(i,1)*(a-2*del(i,1)));
        %%%
        bb_c(i,1)=apo_c(i,1)*Told_oleo_cobre(i,1)+sc_c(i,1)*dx_f_c(i,1);
        ap_c(i,1)=ae_c(i,1)+aw_c(i,1)+apo_c(i,1)-sp_c(i,1)*dx_f_c(i,1);
    end
%
        apo_c(nx_c,1)=0;
        ae_c(nx_c,1)=0;
        aw_c(nx_c,1)=1;
        sc_c(nx_c,1)=0;
        sp_c(nx_c,1)=0;
        bb_c(nx_c,1)=0;
        ap_c(nx_c,1)=1;
%
%calculo de P e Q
%
        P_c(1,1)=ae_c(1,1)/ap_c(1,1);
        QQ_c(1,1)=bb_c(1,1)/ap_c(1,1);
%
%   for i=2:1:nx_c
        denom=(ap_c(i,1)-aw_c(i,1)*P_c(i-1,1));
        P_c(i,1)=ae_c(i,1)/denom;
        QQ_c(i,1)=(bb_c(i,1)+aw_c(i,1)*QQ_c(i-1,1))/denom;
    end
```



```
%
    Toleo_cobre(nx_c,1)=QQ_c(nx_c,1);
for i=(nx_c-1):-1:1
    Toleo_cobre(i,1)=P_c(i,1)*Toleo_cobre(i+1,1)+QQ_c(i,1);
end
%
```

12.- Temp_no_cobre_inicio

```
%%% temperatura na espessura do cobre numa posicao
%%% condicoes da temperatura na frontera com a agua
for i=1:nx_c
    Texterna_cobre(i,1)=Tagua_inicio;
end
%%%temperatura
for i=1:nx_c
    aux_c(i,1)=1/(k_c/ev_c+hi_v(i,1));
    aux_d(i,1)=k_c/ev_c;
%%
%
Tsuper_cobre(i,1)=aux_c(i,1)*(hi_v(i,1)*Toleo_cobre(i,1)+aux_d(i,1)*Textern
a_cobre(i,1));
end
% %
%
```

13.- registro_dados_inicio

```
%
save Temp_superficie_cobre.dat Tsuper_cobre -ascii
save Temp_oleo_no_cobre.dat Toleo_cobre -ascii
%
save Temp_superficie_acrilico.dat Tsuper_acr -ascii
save Temp_oleo_no_acrilico.dat Toleo_acr -ascii
%
load Temp_superficie_cobre.dat
load Temp_oleo_no_cobre.dat
%
load Temp_superficie_acrilico.dat
load Temp_oleo_no_acrilico.dat
```

B.2.- CALCULO DE LA PARAFINA DEPOSITADA

B.2.1.- RUTINA PRINCIPAL

```
clear all
clc
disp(' ')
disp('%%%%%%%%%%calculo da deposicao de
parafina%%%%%%%%%')
disp(' ')
format long
Tdeposicao=input('ingresse o tempo de deposicao (s)= ');
disp(' ')
Rc=input('ingrese numero de Reynolds Rc= ');
%%%%%%%%%
%% lee los datos iniciais
    dados_iniciais
%
%% vector posicion
    Posicao
%
% vector tiempo
    Tempo
%
%% inicializa los valores geometricos
    inializacao_valores
%
% lectura de las condicines iniciales
    valores_iniciais
%
%%%%%%%%%%
%% ... Marchando en el tempo .....
%%%%%%%%%%
    jd=0;
    while jd <=nrt
        jd=jd+1
%%%%%%%%%%
%% almacenando los datos en el paso de tiempo anterior
    archivando_cobre
%
        tol=1e-9;
        dif_T_cobre=1;
        npp=0;
%
    while dif_T_cobre >= tol & npp<=1000
        npp=npp+1;
```

```
%% variacion de las propiedades con la temperatura (densidades,
viscosidades, conductividades)
    propiedades
%
%% calculo de la conservacion de masa
    conserv_massa_cobre
%
%% calculo de la temperatura de la mixtura en la region del cobre
    Temp_oleo_cobre
%
%% calculo de la temperatura de la superficie de la parafina
%----con y sin deposito de parafina
    Temp_interface
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% condicion de deposicion
    for i=1:nx_c
%
        dxw_dt(i,1)=1.021e-9*5.133*(Tinterf(i,1)-273.15)^4.133;
        D=2*2.08756223696204E-10;
%
        if (Tinterf(i,1)<=Tiac)
%
            beta=D*deo_c*dxw_dt(i,1)/((1-pop)*dep);
            del_a(i,1)=ki/(hi_v(i,1)*beta)-deo_c*cal*(1-
pop)/(hi_v(i,1)+U_pc(i,1));
            del_b(i,1)=del_a(i,1)*(1+hi_v(i,1)/U_pc(i,1));
%
            del(i,1)=delta_old(i,1)+(Toleo_cobre(i,1)-Tagua_fim)*dt/del_b(i,1);
            else
            del(i,1)=delta_old(i,1);
            end
            del(1,1)=0;
        end
    end
%% calculo de la diferencia de espesura
    for i=1:nx_c
        delta_dt(i,1)=(del(i,1)-delta_old(i,1))/dt;
    end
%% convergencia de la temperatura chutada e calculada en la interface
    for i=2:1:nx_c
        dif_T_super_cobre(i,1)=Tinterf(i,1)-Tinterf_chute(i,1);
        Tinterf_chute(i,1)=Tinterf(i,1);
%
        Tinterf_chute(nx_c,1)=Tinterf_chute(nx_c-1,1);
    end
    dif_T_cobre = max(abs(dif_T_super_cobre));
%% fin de la convergencia de la temperatura de la interface
```

```
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% calculo da velocidade media
for i=1:nx_c-1
    vede_f(i,1)=vede_f(i,1);
    q_vidro(i,1)=2*Uv(i,1)*(a-2*del(i,1))*(Toleo_cobre(i,1)-
Tamb)*dxf_c(i,1);
    q_cobre(i,1)=2*b*dxf_c(i,1)*(Tinterf(i,1)-
Tagua_fim)/(ev_c/k_c+del(i,1)/kp);
    q_latente(i,1)=dep*b*dxf_c(i,1)*(1-pop)*delta_dt(i,1)*cal;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
del;
% %%%%%%%%%%
%%% Rutina de armazenamento de temperaturas
registro_dados
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% fim del lazo de tempo
end
% %%%%%%%%%%
%%% Rutina de graficos em diferentes tempos
Graficos
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

B.2.2- SUBRUTINAS

- 1.- dados_iniciais (Es el mismo que la subrutina anteior)
- 2.- Posicao (Es el mismo que la subrutina anteior)
- 3.- Tempo

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
mrt=6000;
ddt=Tdeposicao/mrt;
%
%
d0=ddt;
d1=20*ddt;
d2=40*ddt;
d3=60*ddt;
d4=80*ddt;
d5=100*ddt;
```

```
d6=120*ddt;
d7=140*ddt;
d8=160*ddt;
d9=180*ddt;
d10=200*ddt;
d11=300*ddt;
d12=400*ddt;
d13=600*ddt;
d14=800*ddt;
d15=1200*ddt;
d16=1600*ddt;
d17=2000*ddt;
d18=2400*ddt;
d19=2800*ddt;
d20=3200*ddt;
d21=6000*ddt;
% Reynold 301 demorou aprox. 4 horas 40 minutos ate atingir o
% permanente
% vetor tempo
%
%vetempo=[d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 d10 d11];
%
    nrt=6000;
    dt=Tdeposicao/nrt;
%%%
```

4.- inicializacao_valores

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----duto retangular-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp(' ')
disp('%%-----inicializacao de valores----- ')
disp(' ')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% coeficientes de difusividade
% no oleo
    alf_oleo=ki/(deo*cp);
% na parafina
    alf_paraf=kp/(dep*cp_p);
% no acrilico
    alf_acr=k_a/(de_a*cp_a);
% no cobre
    alf_cobre=k_c/(de_c*cp_c);
% no vidro
```

```
    alf_vidro=k_v/(de_v*cp_v);
% densidade do oleo no acrilico
    deo_a=840;
% densidade do oleo no cobre
    deo_c=840;
% condutividade oleo no cobre
    % ko_c=0.14;
    ko_c=0.23;
% condutividade oleo no acrilico
    % ko_a=0.14;
    ko_a=0.23;
% viscosidade no acrilico
    vi_a=1.03092*(36.6)^(-1.29417);
% viscosidade no cobre
    vi_c=1.03092*(36.6)^(-1.29417);
% variacao da difusividades no oleo
    alf_oleo_a=ko_a/(deo_a*cp);
%% %% constantes da equacao de Nusselt
    an=76.524132;
    bn=218.6783;
    cn=561.3199;
    dn=-796.6956;
    en=1657.8963;
    fn=13034.0557;
    gn=77831.1516;
    hn=77252.9691;
    in=627426.5378;
% parametros geometricos em duto limpo
    Ac=a*b;
    Pmc=2*(a+b);
    dhc=4*Ac/Pmc;
% parametros adimensionais iniciais
    Pc=Rc*vi*cp/ki;
    Pr=cp*vi/(ki);
% calculo da vazao
    Qv=Rc*Ac*vi/(dep*dhc)
%% %% %% calculo do Reynolds e Nusselt no acrilico
    for i=1:nx_a
        Rc_a=deo_a*Qv^4/(vi_a*Pmc);
        Pr_a=cp*vi_a/(ko_a);
        Xn_a(i,1)=(xp_a(i,1)/(dhc*Rc_a*Pr_a))^0.5;
        Nui_a(i,1)=(an+cn*Xn_a(i,1)+en*Xn_a(i,1)^2+gn*Xn_a(i,1)^3+in*Xn_a(i,1)^4
        )/(1+bn*Xn_a(i,1)+dn*Xn_a(i,1)^2+fn*Xn_a(i,1)^3+hn*Xn_a(i,1)^4);
%% %% calculo do coeficiente global dimencional
        Uv_a(i,1)=inv(ev_a/k_a+dhc/(Nui_a(i,1)*ko_a)+1/hv_a);
        %+1/hv_a
    end
```

```
%%% calculo do Reynolds e Nusselt no cobre
    Rc_c=deo_c*Qv*4/(vi_c*Pmc);
    Pr_c=cp*vi_c/(ko_c);
    for i=1:nx_c
        Xn(i,1)=((xp_c(i,1)+0.04)/(dhc*Rc_c*Pr_c))^0.5;
    Nui_v(i,1)=(an+cn*Xn(i,1)+en*Xn(i,1)^2+gn*Xn(i,1)^3+in*Xn(i,1)^4)/(1+bn*X
n(i,1)+dn*Xn(i,1)^2+fn*Xn(i,1)^3+hn*Xn(i,1)^4);
    %%% calculo do coeficiente global adimensional
        % Uv(i,1)=1/(eh_v/k_v+dhc/(Nui_v(i,1)*ko_c)+1/hv_v);
        Uv(i,1)=0;
    %         +1/hv_v
    end
```

5.- valores_iniciais

```
% leitura das condicoes iniciais
% distribuicao da temperatura do oleo ao longo do canal de cobre
    load Temp_superficie_cobre.dat
    load Temp_oleo_no_cobre.dat
%
    load Temp_superficie_acrilico.dat
    load Temp_oleo_no_acrilico.dat
%%%%%%%%%%
%% inicializacao de valores
%%%%%%%%%%
%% no cobre na direcao "x"
    for i=1:1:nx_c
%% espessura
        del(i,1)=0;
        delta_dx(i,1)=0;
        delta_dt(i,1)=0;
        At_var(i,1)=a*b;
%% temperatura do fluido no cobre
        Toleo_cobre(i,1)=Temp_oleo_no_cobre(i,1);
        ff_aux(i,1)=0;
        Tentrada_cobre(1,1)=Toleo_cobre(1,1);
% %%% temperatura da interface inicial "chute"
        Tsuper_cobre(i,1)=Temp_superficie_cobre(i,1);
        Tinterf_chute(i,1)=Tsuper_cobre(i,1);
%
    end
%% no acrilico na direcao "x"
%% temperatura do fluido no acrilico
    for i=1:nx_a
        Toleo_acr(i,1)=Temp_oleo_no_acrilico(i,1);
%% temperatura da interface inicial "chute"
```

```
Tsuper_acr_chu(i,1)=Temp_superficie_acrilico(i,1);  
end
```

6.- arquivando_cobre

```
%%% arquivo de dados no tempo anterior  
for i=1:nx_c  
    delta_old(i,1)=del(i,1);  
    At_var_old(i,1)=At_var(i,1);  
    Tsuper_cobre_old(i,1)=Tsuper_cobre(i,1);  
%%% no interior do canal  
    Told_oleo_cobre(i,1)=Toleo_cobre(i,1);  
%%% calculo da concentracao  
end
```

7.- propriedades

```
%%% constantes da equacao de Nusselt  
an=76.524132;  
bn=218.6783;  
cn=561.3199;  
dn=-796.6956;  
en=1657.8963;  
fn=13034.0557;  
gn=77831.1516;  
hn=77252.9691;  
in=627426.5378;  
%% variacao das propriedades com a temperatura no cobre  
ko_c=0.23;  
deo_c=deo;  
% % viscosidade  
vi_c=0.008;  
%%%%%%%%%%  
%%% calculo do Reynolds e Nusselt  
Rc_c=deo_c*Qv*4/(vi_c*Pmc);  
Pr_c=cp*vi_c/(ko_c);  
for i=1:nx_c  
%%% variacao dos parametros  
Lv_v(i,1)=(a-2*del(i,1));  
Lh_c=b;  
At_var(i,1)=Lh_c*Lv_v(i,1);  
Pm_var(i,1)=2*(Lv_v(i,1)+Lh_c);  
dh_var(i,1)=4*At_var(i,1)/(Pm_var(i,1));  
%%%%%%%%%%  
Xn(i,1)=((xp_c(i,1)+0.04)/(dh_var(i,1)*Rc_c*Pr_c))^0.5;
```



```
Nui_v(i,1)=(an+cn*Xn(i,1)+en*Xn(i,1)^2+gn*Xn(i,1)^3+in*Xn(i,1)^4)/(1+bn*Xn(i,1)+dn*Xn(i,1)^2+fn*Xn(i,1)^3+hn*Xn(i,1)^4);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% calculo do coeficiente global adimensional
    Uv(i,1)=1/(eh_v/k_v+dh_var(i,1)/(Nui_v(i,1)*ko_c));
end
```

8.- conserv_massa_cobre

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% conservacao_massa
% variacao do delta nas faces do volume de controle em "x"
% % $ % % face
    d_w(1,1)=del(1,1);
    d_w(2,1)=del(1,1);
    for i=3:nx_c-1
        d_w(i,1)=del(i-1,1)*(xx_w(i,1)/del_Xw_c(i,1))+del(i,1)*(1-xx_w(i,1)/del_Xw_c(i,1));
    end
    d_w(nx_c,1)=del(nx_c,1);
% % face
    d_e(1,1)=del(1,1);
    for i=2:nx_c-2
        d_e(i,1)=del(i+1,1)*(xx_e(i,1)/del_Xe_c(i,1))+del(i,1)*(1-xx_e(i,1)/del_Xe_c(i,1));
    end
    d_e(nx_c-1,1)=del(nx_c,1);
    d_e(nx_c,1)=del(nx_c,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % definindo areas nas faces
    for i=1:nx_c
        A_w(i,1)=(a-2*d_w(i,1))*b;
        A_p(i,1)=(a-2*del(i,1))*b;
        A_e(i,1)=(a-2*d_e(i,1))*b;
    end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % velocidade na entrada
    vede_f(1,1)=Qv/A_p(1,1);
% % velocidade ao longo do duto nas faces
    for i=2:nx_cf
        aw_v(i,1)=A_w(i,1)/A_e(i,1);
        b_v(i,1)=(A_p(i,1)-At_var_old(i,1))/A_e(i,1);
%
        vede_f(i,1)=aw_v(i,1)*vede_f(i-1,1)-b_v(i,1)*del_Xf_c(i,1)/dt;
    end
```

9.- Temp_oleo_cobre

```
%%%%%%%%%%
% temperatura na entrada do canal de cobre
  Toleo_cobre(1,1)=Tentrada_cobre(1,1);
%% calculo de hi
  for i=1:nx_c
    hi_v(i,1)=Nui_v(i,1)*ki/dh_var(i,1);
  end
%%% coeficientes TDMA
  apo_c(1,1)=0;
  ae_c(1,1)=0;
  aw_c(1,1)=0;
  bb_c(1,1)=Toleo_cobre(1,1);
  ap_c(1,1)=1;
%
  for i=2:nx_c-1
    apo_c(i,1)=deo_c*At_var_old(i,1)*dxf_c(i,1)*cp/dt;
    ae_c(i,1)=0;
    aw_c(i,1)=deo_c*cp*A_w(i,1)*vede_f(i-1,1);
    sc_c(i,1)=2*(b*hi_v(i,1)*Tinterf_chute(i,1)+Uv(i,1)*(a-
2*del(i,1))*Tamb);
    sp_c(i,1)=-2*(b*hi_v(i,1)+Uv(i,1)*(a-2*del(i,1)));
    %%%
    bb_c(i,1)=apo_c(i,1)*Told_oleo_cobre(i,1)+sc_c(i,1)*dxf_c(i,1);
    ap_c(i,1)=ae_c(i,1)+aw_c(i,1)+apo_c(i,1)-sp_c(i,1)*dxf_c(i,1);
  end
%
  apo_c(nx_c,1)=0;
  ae_c(nx_c,1)=0;
  aw_c(nx_c,1)=1;
  sc_c(nx_c,1)=0;
  sp_c(nx_c,1)=0;
  bb_c(nx_c,1)=0;
  ap_c(nx_c,1)=1;
%
% calculo de P e Q
%
  P_c(1,1)=ae_c(1,1)/ap_c(1,1);
  QQ_c(1,1)=bb_c(1,1)/ap_c(1,1);
%
  for i=2:1:nx_c
    denom=(ap_c(i,1)-aw_c(i,1)*P_c(i-1,1));
    P_c(i,1)=ae_c(i,1)/denom;
    QQ_c(i,1)=(bb_c(i,1)+aw_c(i,1)*QQ_c(i-1,1))/denom;
  end
%
  Toleo_cobre(nx_c,1)=QQ_c(nx_c,1);
  for i=(nx_c-1):-1:1
```

```
        Toleo_cobre(i,1)=P_c(i,1)*Toleo_cobre(i+1,1)+QQ_c(i,1);  
    end
```

10.- Temp_interface

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%temperatura na interface  
    for i=1:nx_c  
    %% calor latente qL  
        qL(i,1)=dep*cal*(1-pop)*delta_dt(i,1);  
        U_pc(i,1)=1/(ec/k_c+del(i,1)/kp);  
    %%%  
        Tinterf(i,1)=(Toleo_cobre(i,1)*hi_v(i,1)-  
qL(i,1)+Tagua_fim*U_pc(i,1))/(hi_v(i,1)+U_pc(i,1));  
    end
```

11.- registro_dados

```
% arquivando a temperatura da mistura no cobre  
    tempo=dt*(jd-1);  
%  
    if tempo==d0  
        for i=1:1:nx_c-1  
            Tm_cd0(i)=Toleo_cobre(i,1) ;  
            Tif0(i)=Tinterf(i,1);  
            Tsc_yd0(i)=Tsuper_cobre(i,1);  
            esp0(i)=del(i,1);  
            ve0(i)=vede_f(i,1);  
            cr_v0(i)=q_vidro(i,1);  
            cr_c0(i)=q_cobre(i,1);  
            cr_m0(i)=q_latente(i,1);  
        end  
    end  
%  
    if tempo==d1  
        for i=1:1:nx_c-1  
            Tm_cd1(i)=Toleo_cobre(i,1) ;  
            Tif1(i)=Tinterf(i,1);  
            Tsc_yd1(i)=Tsuper_cobre(i,1);  
            esp1(i)=del(i,1);  
            ve1(i)=vede_f(i,1);  
            cr_v1(i)=q_vidro(i,1);  
            cr_c1(i)=q_cobre(i,1);  
            cr_m1(i)=q_latente(i,1);  
        end
```

```
end
%%%%%
if tempo==d2
  for i=1:1:nx_c-1
    Tm_cd2(i)=Toleo_cobre(i,1);
    Tif2(i)=Tinterf(i,1);
    Tsc_yd2(i)=Tsuper_cobre(i,1);
    esp2(i)=del(i,1);
    ve2(i)=vede_f(i,1);
    cr_v2(i)=q_vidro(i,1);
    cr_c2(i)=q_cobre(i,1);
    cr_m2(i)=q_latente(i,1);
  end
end
%%%%%
if tempo==d3
  for i=1:1:nx_c-1
    Tm_cd3(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
    Tif3(i)=Tinterf(i,1);
    Tsc_yd3(i)=Tsuper_cobre(i,1);
    esp3(i)=del(i,1);
    ve3(i)=vede_f(i,1);
    cr_v3(i)=q_vidro(i,1);
    cr_c3(i)=q_cobre(i,1);
    cr_m3(i)=q_latente(i,1);
  end
end
%%%%%
if tempo==d4
  for i=1:1:nx_c-1
    Tm_cd4(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
    Tif4(i)=Tinterf(i,1);
    Tsc_yd4(i)=Tsuper_cobre(i,1);
    esp4(i)=del(i,1);
    ve4(i)=vede_f(i,1);
    cr_v4(i)=q_vidro(i,1);
    cr_c4(i)=q_cobre(i,1);
    cr_m4(i)=q_latente(i,1);
  end
end
%%%%%
if tempo==d5
  for i=1:1:nx_c-1
    Tm_cd5(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
    Tif5(i)=Tinterf(i,1);
    Tsc_yd5(i)=Tsuper_cobre(i,1);
    esp5(i)=del(i,1);
```

```
        ve5(i)=vede_f(i,1);
        cr_v5(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c5(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m5(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d6
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd6(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif6(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd6(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp6(i)=del(i,1);
        ve6(i)=vede_f(i,1);
        cr_v6(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c6(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m6(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d7
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd7(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif7(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd7(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp7(i)=del(i,1);
        ve7(i)=vede_f(i,1);
        cr_v7(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c7(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m7(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%%
if tempo==d8
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd8(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif8(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd8(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp8(i)=del(i,1);
        ve8(i)=vede_f(i,1);
        cr_v8(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c8(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m8(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d9
```

```
for i=1:1:nx_c-1
    Tm_cd9(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
    Tif9(i)=Tinterf(i,1);
    Tsc_yd9(i)=Tsuper_cobre(i,1);
    esp9(i)=del(i,1);
    ve9(i)=vede_f(i,1);
    cr_v9(i)=q_vidro(i,1);
    cr_c9(i)=q_cobre(i,1);
    cr_m9(i)=q_latente(i,1);
end
end
%%%
if tempo==d10
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd10(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif10(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd10(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp10(i)=del(i,1);
        ve10(i)=vede_f(i,1);
        cr_v10(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c10(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m10(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d11
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd11(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif11(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd11(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp11(i)=del(i,1);
        ve11(i)=vede_f(i,1);
        cr_v11(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c11(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m11(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d12
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd12(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif12(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd12(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp12(i)=del(i,1);
        ve12(i)=vede_f(i,1);
        cr_v12(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c12(i)=q_cobre(i,1);
```

```
        cr_m12(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%
if tempo==d13
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd13(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif13(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd13(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp13(i)=del(i,1);
        ve13(i)=vede_f(i,1);
        cr_v13(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c13(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m13(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%
if tempo==d14
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd14(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif14(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd14(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp14(i)=del(i,1);
        ve14(i)=vede_f(i,1);
        cr_v14(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c14(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m14(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%
if tempo==d15
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd15(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif15(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd15(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp15(i)=del(i,1);
        ve15(i)=vede_f(i,1);
        cr_v15(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c15(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m15(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%
if tempo==d16
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd16(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif16(i)=Tinterf(i,1);
```

```
Tsc_yd16(i)=Tsuper_cobre(i,1);
esp16(i)=del(i,1);
ve16(i)=vede_f(i,1);
cr_v16(i)=q_vidro(i,1);
cr_c16(i)=q_cobre(i,1);
cr_m16(i)=q_latente(i,1);
end
end
%%%
if tempo==d17
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd17(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif17(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd17(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp17(i)=del(i,1);
        ve17(i)=vede_f(i,1);
        cr_v17(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c17(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m17(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d18
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd18(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif18(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd18(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp18(i)=del(i,1);
        ve18(i)=vede_f(i,1);
        cr_v18(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c18(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m18(i)=q_latente(i,1);
    end
end
%%%
if tempo==d19
    for i=1:1:nx_c-1
        Tm_cd19(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
        Tif19(i)=Tinterf(i,1);
        Tsc_yd19(i)=Tsuper_cobre(i,1);
        esp19(i)=del(i,1);
        ve19(i)=vede_f(i,1);
        cr_v19(i)=q_vidro(i,1);
        cr_c19(i)=q_cobre(i,1);
        cr_m19(i)=q_latente(i,1);
    end
end
```



```
%%%
    if tempo==d20
        for i=1:1:nx_c-1
            Tm_cd20(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
            Tif20(i)=Tinterf(i,1);
            Tsc_yd20(i)=Tsuper_cobre(i,1);
            esp20(i)=del(i,1);
            ve20(i)=vede_f(i,1);
            cr_v20(i)=q_vidro(i,1);
            cr_c20(i)=q_cobre(i,1);
            cr_m20(i)=q_latente(i,1);
        end
    end
%%%
    if tempo==d21
        for i=1:1:nx_c-1
            Tm_cd21(i)=Toleo_cobre(i,1) ;
            Tif21(i)=Tinterf(i,1);
            Tsc_yd21(i)=Tsuper_cobre(i,1);
            esp21(i)=del(i,1);
            ve21(i)=vede_f(i,1);
            cr_v21(i)=q_vidro(i,1);
            cr_c21(i)=q_cobre(i,1);
            cr_m21(i)=q_latente(i,1);
        end
    end
%%%
```

12.- graficos

```
% arquivando parametros fisicos
save Tmedia_cobre.dat Tm_cd0 Tm_cd1 Tm_cd2 Tm_cd3 Tm_cd4
Tm_cd5 Tm_cd6 Tm_cd7 Tm_cd8 Tm_cd9 Tm_cd10 Tm_cd11 Tm_cd12
Tm_cd13 Tm_cd14 Tm_cd15 Tm_cd16 Tm_cd17 Tm_cd18 Tm_cd19
Tm_cd20 Tm_cd21 -ascii
save Tinterface_cobre.dat Tif0 Tif1 Tif2 Tif3 Tif4 Tif5 Tif6 Tif7 Tif8 Tif9
Tif10 Tif11 Tif12 Tif13 Tif14 Tif15 Tif16 Tif17 Tif18 Tif19 Tif20 Tif21 -ascii
save Tsuperficie_cobre.dat Tsc_yd0 Tsc_yd1 Tsc_yd2 Tsc_yd3 Tsc_yd4
Tsc_yd5 Tsc_yd6 Tsc_yd7 Tsc_yd8 Tsc_yd9 Tsc_yd10 Tsc_yd11
Tsc_yd12 Tsc_yd13 Tsc_yd14 Tsc_yd15 Tsc_yd16 Tsc_yd17 Tsc_yd18
Tsc_yd19 Tsc_yd20 Tsc_yd21 -ascii
save espessura.dat esp0 esp1 esp2 esp3 esp4 esp5 esp6 esp7 esp8 esp9
esp10 esp11 esp12 esp13 esp14 esp15 esp16 esp17 esp18 esp19 esp20
esp21 -ascii
```

```
save velocidade.dat ve0 ve1 ve2 ve3 ve4 ve5 ve6 ve7 ve8 ve9 ve10 ve11
ve12 ve13 ve14 ve15 ve16 ve17 ve18 ve19 ve20 ve21 -ascii
save calor_vidro.dat cr_v0 cr_v1 cr_v2 cr_v3 cr_v4 cr_v5 cr_v6 cr_v7 cr_v8
cr_v9 cr_v10 cr_v11 cr_v12 cr_v13 cr_v14 cr_v15 cr_v16 cr_v17 cr_v18
cr_v19 cr_v20 cr_v21 -ascii
save calor_cobre.dat cr_c0 cr_c1 cr_c2 cr_c3 cr_c4 cr_c5 cr_c6 cr_c7
cr_c8 cr_c9 cr_c10 cr_c11 cr_c12 cr_c13 cr_c14 cr_c15 cr_c16 cr_c17
cr_c18 cr_c19 cr_c20 cr_c21 -ascii
save calor_latente.dat cr_m0 cr_m1 cr_m2 cr_m3 cr_m4 cr_m5 cr_m6
cr_m7 cr_m8 cr_m9 cr_m10 cr_m11 cr_m12 cr_m13 cr_m14 cr_m15
cr_m16 cr_m17 cr_m18 cr_m19 cr_m20 cr_m21 -ascii
%%% arquivando coordenadas
save coordenada-x.dat xp_c -ascii
save coordenada-y.dat eta_p -ascii
%%% arquivando valores da concentracao
%%%
load Tmedia_cobre.dat
load Tinterface_cobre.dat
load Tsuperficie_cobre.dat
load espessura.dat
load velocidade.dat
load calor_vidro.dat
load calor_cobre.dat
load calor_latente.dat
%
load coordenada-x.dat
load coordenada-y.dat
% % variacao da temp. do oleo no cobre vs. posicao "x" em varios
instantes de tempo
% %
% figure(1)
%
plot(x_c,cr_md1,'r*',x_c,Tm_cd2,x_c,Tm_cd3,'c+',x_c,Tm_cd4,x_c,Tm_cd5,
x_c,Tm_cd6,x_c,Tm_cd7,x_c,Tm_cd8,x_c,Tm_cd9,x_c,Tm_cd10,x_c,Tm_c
d11,'g. ');
title('Temp. do oleo no cobre vs. posicao "x" em varios instantes de tempo');
xlabel('x_{cobre}');
ylabel('Temperatura_{oleo}');
grid;
%
% variacao da Temp. da superficie em "y" vs. posicao(x) em varios nstantes
de tempo
%
% figure(2)
%
plot(x_c,Tsc_yd1,'r*',x_c,Tsc_yd2,x_c,Tsc_yd3,'c+',x_c,Tsc_yd4,x_c,Tsc_yd
```

```
5,x_c,Tsc_yd6,x_c,Tsc_yd7,x_c,Tsc_yd8,x_c,Tsc_yd9,x_c,Tsc_yd10,x_c,T
sc_yd11,'g.');
```

title('Temp. da superficie em "y" vs. posicao "x "em varios instantes de tempo');

xlabel('y_{cobre}');

ylabel('Temperatura_{superficie cobre}');

grid;

% %

% % variacao da Temp. da superficie em "z" vs. posicao(x) em varios instantes de tempo

% %

% figure(3)

%

```
plot(x_c,Tsv_zd1,'r*',x_c,Tsv_zd2,x_c,Tsv_zd3,'c+',x_c,Tsv_zd4,x_c,Tsv_zd
5,x_c,Tsv_zd6,x_c,Tsv_zd7,x_c,Tsv_zd8,x_c,Tsv_zd9,x_c,Tsv_zd10,x_c,T
sv_zd11,'g.');
```

% title('Temp. da superficie em "z" vs. posicao "x "em varios instantes de tempo');

xlabel('z_{vidrio}');

ylabel('Temperatura_{superficie vidro}');

grid;

%

%% variacao da Temp. do cobre vs. posicao(y) em varios instantes de tempo

% %

% figure(4)

%

```
plot(tc_y1_d,y_c,'r*',tc_y2_d,y_c,tc_y3_d,y_c,'c+',tc_y4_d,y_c,tc_y5_d,y_c,t
c_y6_d,y_c,tc_y7_d,y_c,tc_y8_d,y_c,tc_y9_d,y_c,tc_y10_d,y_c,tc_y11_d,y_
c,'g.');
```

title('Temp. no cobre vs. posicao "y" em varios instante de tempo');

xlabel('Temperatura_{cobre}');

ylabel('Posicao_{altura cobre "y"}');

grid;

%

% variacao da Temp. do vidro vs. posicao(z) em varios instantes de tempo

% %

% figure(5)

%

```
plot(tv_z1_d,z_v,'r*',tv_z2_d,z_v,tv_z3_d,z_v,'c+',tv_z4_d,z_v,tv_z5_d,z_v,t
v_z6_d,z_v,tv_z7_d,z_v,tv_z8_d,z_v,tv_z9_d,z_v,tv_z10_d,z_v,tv_z11_d,z_
v,'g.');
```

title('Temp. no vidro vs. posicao "z" em varios instante de tempo');

xlabel('Temperatura_{vidrio}');

ylabel('Posicao_{vidrio "z"}');

grid;

%

```
% variacao da espessura em "y" vs. posicao(x) em varios instantes de
%tempo
%
figure(6)
plot(x_c,esp1,'r',aaa((2:73),1),aaa((2:73),2),'r.',
x_c,esp3,'b',aaa((2:73),1),aaa((2:73),4),'b*',x_c,esp5,'c',aaa((2:73),1),aaa((2
:73),6),'c+',x_c,esp10,'y',aaa((2:73),1),aaa((2:73),11),'y*',x_c,esp11,'g',aaa((
2:73),1),aaa((2:73),12),'g. ');
title('variacao da espessura em "y" vs. posicao "x "em varios instantes de
tempo');
xlabel('X_{posicao no cobre}');
ylabel('Espessura_{para cada x}');
grid;
%
figure(7)
plot(x_c,esp1,'r', x_c,esp3,'b',x_c,esp5,'c',x_c,esp10,'y',x_c,esp11,'g');
title('espessura em "y" vs. posicao "x "em varios instantes');
xlabel('X_{posicao no cobre}');
ylabel('Espessura_{para cada x}');
grid;
%
% variacao da Temp. da interface solido-liquido em "y" vs. posicao(x) em
varios instantes de tempo
% %
figure(8)
%
plot(x_c,Tif1,'r*',x_c,Tif2,x_c,Tif3,x_c,Tif4,x_c,Tif5,x_c,Tif6,x_c,Tif7,x_c,Tif8,
x_c,Tif9,x_c,Tif10,x_c,Tif11,'g. ');
title('variacao da Temp. da interface solido -liquido em "y" vs. posicao "x
"em varios instantes de tempo');
xlabel('x_{cobre}');
ylabel('Temp._{interafce}');
grid;
%
```