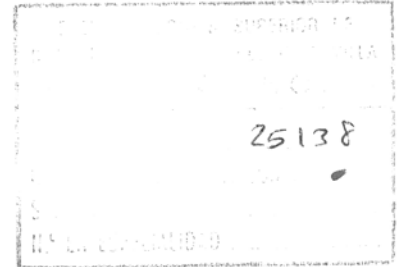


Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos
Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Sevilla



TESIS

Biblioteca
635 200002

**ANÁLISIS BIDIMENSIONAL TRANSITORIO
DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA TÉRMICA EN LECHOS POROSOS**

por

ISBEYEH WASMI MAYED

Sevilla, Mayo 1993

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIEROS INDUSTRIALES

Memoria presentada por Isbeyeh Wasmi para la obtención del grado de Doctor
Ingeniero Industrial.

Doctorando



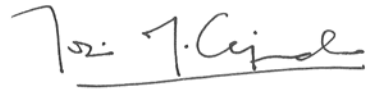
Fdo: Isbeyeh Wasmi

VºBº
Director de Tesis



Fdo: José Guerra Macho

VºBº
Director de Tesis



Fdo: José Manuel Cejudo López

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
SECRETARÍA GUBERNAL

Queda registrada esta Tesis Doctoral
al tomo 244 número 2 del libro
correspondiente a 4º semestre
Sevilla, a 18 de mayo de 1993
El Jefe del Registro de la Tesis.



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Depositado en Dpto Ingeniería Energética
y Ciencias de Fluidos
de la E.T.S.I. Industriales
de esta Universidad desde el día 18/5/93
hasta el día 8/6/93

Sevilla 9 de Junio de 1993
EL DIRECTOR DEL DPTO.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que han hecho posible la realización de esta tesis.

En particular:

- A los profesores Dr. José Guerra Macho y Dr. José M. Cejudo Lopez, por la dirección de esta tesis, agradeciéndoles muy especialmente su gran dedicación y trabajo, no sólo desde el punto de vista científico - técnico, sino también, en los aspectos lingüístico y moral, sin los cuales la tesis hubiera sido diferente.

- A los compañeros del Grupo de Termotecnia por sus constantes apoyos, tanto técnicos como morales y su gran preocupación en los momentos difíciles.

- A mi esposa y mis hijos por el apoyo que siempre me han brindado, especialmente en el tiempo que no hemos podido estar juntos.

A todos muchas gracias.

A mi familia con cariño.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción	1
1.2	Revisión Bibliográfica.	4
1.2.1	Flujo de fluidos a través de lechos porosos.	4
1.2.2	Coefficientes de transporte térmico.	6
1.2.3	Modelos globales de almacenamiento de energía.	10
1.3	Contenido y organización.	15
2	Planteamiento y solución del modelo matemático	17
2.1	Introducción	17
2.2	Modelo	18
2.2.1	Ecuación de continuidad	20
2.2.2	Ecuación de cantidad de movimiento	21
2.2.3	Ecuaciones de la energía	22
2.2.4	Condiciones iniciales y de contorno	24
2.3	Coefficientes de película	25
2.3.1	Partículas sólidas-fluido	25
2.3.2	Pared-fluido	27
2.4	Coefficientes de conductividad efectiva	28
2.5	Método de solución	29
2.5.1	Formulación de la conducción en las partículas.	31
2.5.2	Algoritmo de resolución	33
3	Validación del modelo	34
3.1	Introducción	34
3.2	Modelo de conducción en la partícula sólida	35
3.3	Comparación con modelos unidimensionales y datos experimentales	37
3.4	Comparación con modelo bidimensional y datos experimentales.	42
3.5	Influencia de los parámetros de discretización espacio-temporal	45
3.5.1	Parámetro de comparación	45
3.5.2	Número de segmentos axiales: N	46

3.5.3	Número de segmentos radiales en el lecho: M	47
3.5.4	Paso de tiempo: Δt	47
3.5.5	Número de segmentos radiales en la partícula: L	49
4	Análisis de sensibilidad	51
4.1	Introducción	51
4.2	Parámetros característicos	52
4.3	Parámetros de diseño	55
4.3.1	Influencia del material	55
4.3.2	Influencia del caudal másico	60
4.3.3	Influencia de la geometría del lecho.	63
4.4	Simplificación del modelo.	67
4.4.1	Temperatura interior de partícula uniforme.	69
4.4.2	Modelo unidimensional	70
4.4.3	Modelo monofásico	73
5	Conclusiones y desarrollo futuro	75
5.1	Conclusiones	75
5.2	Desarrollo futuro	77
	Referencias	78
	ANEXOS	
I	Cálculo de la velocidad y gradiente de presión	84
I.1	Introducción	84
I.2	Discretización radial del lecho	84
I.3	Proceso iterativo	86
II	Discretización de las ecuaciones diferenciales	88
II.1	Introducción	88
II.2	Ecuaciones para la partícula sólida	89
II.3	Ecuaciones para el fluido	92
II.3.1	Nodo general	92
II.3.2	Nodo del eje del lecho ($i = 1$)	94
II.3.3	Nodo entre el contorno y el interior ($i = M - 1$)	94
II.3.4	Nodo del contorno del lecho ($i = M$)	95
II.3.5	Nodo de entrada al lecho ($j = 1$)	95
II.3.6	Nodo de salida del lecho ($j = N$)	96
II.4	Ecuaciones para la pared	98

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

El almacenamiento de energía está presente en muchos procesos en los que se utiliza energía térmica. En el sector industrial el almacenamiento de energía está presente en numerosos procesos de calentamiento. En el sector edificación el almacenamiento de energía es prácticamente imprescindible en las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria y se incorpora con frecuencia en las instalaciones de calefacción.

En general, el almacenamiento de energía es necesario cuando la fuente de energía no coincide temporalmente con la demanda de la instalación, como ocurre en muchos sistemas de recuperación de energía y en los sistemas de energía solar. El almacenamiento de energía constituye asimismo un procedimiento eficaz para reducir la potencia punta de los equipos centrales de generación térmica, mejorando así el rendimiento estacional de la generación y reduciendo generalmente el coste inicial de la instalación. En estas circunstancias el almacenamiento es tanto más interesante cuanto más diferencia existe entre la potencia máxima y mínima de la instalación.

Un importante sistema de almacenamiento de energía térmica utiliza un fluido caloportador, generalmente aire, que es enfriado o calentado al circular a través de un material sólido poroso con el que intercambia energía térmica durante los periodos de carga y descarga del almacenamiento. Un sistema de almacenamiento de estas características se configura como un lecho poroso fijo en el que el material sólido es el medio de almacenamiento.

El medio poroso está formado por una matriz sólida (rocas, arena, partículas metálicas, etc.) con huecos o poros interconectados en su interior, a través de los cuales puede moverse uno o más fluidos bajo la influencia de un gradiente de presión, transportando masa y energía a través del material. En la situación más simple, flujo

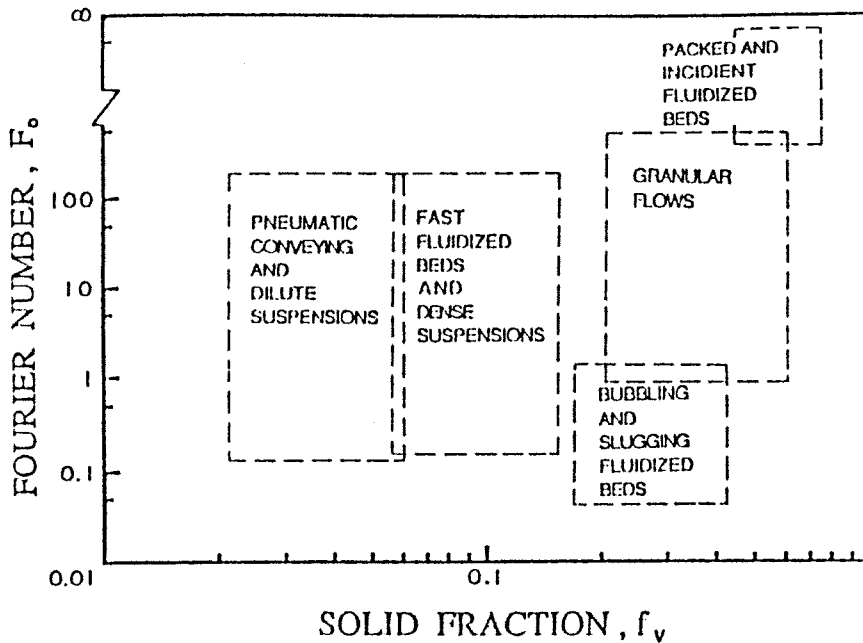


Figura 1.1: Sistemas de flujo de fluidos a través de medios porosos.

monofásico, los huecos están saturados por un único fluido. En los problemas bifásicos, generalmente un líquido y un gas ocupan los huecos.

El material sólido del lecho constituye el medio de almacenamiento sensible lo que permite utilizar materiales de bajo coste y con capacidades caloríficas importantes. La estructura porosa del lecho permite por otra parte mejorar los coeficientes de transporte sólido-gas cuando circula el fluido, aumentando el rendimiento del proceso de carga y descarga del lecho. La presencia de aire en los huecos disminuye asimismo la conductividad del lecho cuando el fluido no circula, aumentando el rendimiento de la acumulación. Por otra parte, la estructura de la matriz porosa permite mayor área de transferencia con menor volumen de almacenamiento.

Los lechos porosos fijos utilizados como sistemas de almacenamiento representan un caso particular del flujo de fluidos en medios porosos. En la figura 1.1 se presentan de forma esquemática diferentes sistemas con medios porosos, en función del porcentaje del volumen del lecho ocupado por el material sólido y del tiempo de residencia adimensional de la partícula sólida (número de Fourier).

En lechos fijos las partículas sólidas están en reposo, moviéndose sólo el fluido a

través de los huecos. En estas condiciones el flujo depende básicamente de la estructura del lecho y de las propiedades físicas del fluido. La fracción de sólidos suele estar comprendida entre 0.5 y 0.75 y el número de Fourier es infinito (velocidad nula).

En los lechos porosos fijos el tamaño y distribución de las partículas es irregular y la transferencia de masa y de calor a través del lecho es compleja. Aunque a nivel microscópico las magnitudes de interés (velocidad, presión, etc.) varían claramente en forma irregular, en la mayoría de las aplicaciones la longitud-característica del medio poroso es mucho mayor que la longitud característica de los poros, pudiéndose establecer una descripción del problema a escala macroscópica en la que el medio poroso aparece como un continuo y las magnitudes de interés varían de forma regular.

El planteamiento del problema a nivel macroscópico permite abordar el análisis de la transferencia de calor y masa en medios porosos, reemplazando las ecuaciones de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento a nivel microscópico por las correspondientes ecuaciones "macroscópicas", con variables medias obtenidas promediando las magnitudes fluidas en regiones de tamaño grande en relación con el tamaño de los poros y pequeño en relación con el tamaño característico del medio.

La descripción macroscópica del problema ha de tener en cuenta no obstante las variaciones radiales de la velocidad, temperatura, coeficientes de transporte y porosidad del lecho debido a la estructura irregular del medio poroso, con una distribución y tamaño de las partículas variable con la posición. En las proximidades de la pared del depósito que contiene al medio poroso aparece asimismo una zona de alta porosidad, que ofrece menor resistencia al flujo, aumentando el transporte de cantidad de movimiento y la transferencia de calor en esta zona.

La distribución de temperatura en el interior de las partículas sólidas es función del tipo de material, de sus dimensiones y de las condiciones de operación. En determinadas aplicaciones el gradiente de temperatura en el interior de las partículas no es despreciable, debiendo aparecer por tanto en la formulación general del problema.

El comportamiento de lechos porosos como sistema de almacenamiento de energía es por otra parte claramente transitorio, con variaciones en los campos de temperatura del lecho durante los períodos de carga y descarga. En algunas aplicaciones específicas, como es el caso de los sistemas de energía solar, la temperatura del fluido a la entrada del lecho es además variable con el tiempo durante los ciclos de carga y una adecuada cuantificación de la estratificación que se produce en el interior del lecho es fundamental para evaluar el rendimiento del sistema.

Las consideraciones anteriores ponen de manifiesto la complejidad del transporte de

masa y energía a través de medios porosos, así como el potencial de los lechos porosos fijos como medio de almacenamiento de energía. El objetivo de esta Tesis es profundizar en el conocimiento de los lechos porosos fijos como medio de almacenamiento, formulando para ello un modelo con carácter general, con el menor número posible de hipótesis, a partir del cual se puedan analizar los parámetros característicos del sistema.

1.2 Revisión Bibliográfica.

La transferencia de calor y masa a través de medios porosos ha sido ampliamente estudiada en sus diferentes aplicaciones. Generalmente estos estudios han incorporado las características particulares de la aplicación, con un elevado número de hipótesis de forma que el modelo obtenido no tiene carácter general. Por otra parte se han desarrollado numerosos estudios sobre problemas específicos relacionados con los procesos de transferencia en medios porosos, tales como aspectos estructurales del lecho, flujo de fluidos a través de medios porosos, transporte de calor convectivo, evaluación de los coeficientes de transporte, etc., muchos de los cuales no se han incorporado en los modelos de carácter global.

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de estudios previos directamente relacionados con la aplicación de lechos porosos fijos al almacenamiento de energía. La revisión bibliográfica se estructura en los apartados siguientes:

- a) Flujo a través de medios porosos.
- b) Coeficientes de transporte térmico en lechos porosos fijos.
- c) Modelos globales de sistemas de almacenamiento de energía en lechos porosos.

1.2.1 Flujo de fluidos a través de lechos porosos.

De Wiest (1.969) estudió el flujo a través de medios porosos, poniendo de manifiesto la dificultad del problema debido a la estructura del medio poroso y la necesidad de trabajar con magnitudes promedias al plantear las ecuaciones del movimiento del fluido a través del medio sólido. De Wiest presentó las ecuaciones para tres regímenes de flujo en función del número de Reynolds; régimen laminar lineal, laminar no lineal y turbulento.

Chandra y Willits (1.981) comprobaron experimentalmente que la caída de presión a través del lecho depende del tamaño de las partículas sólidas, la porosidad y la can-

tividad de movimiento del fluido.

Vafai y Tien (1.981) estudiaron los efectos de capa límite y de las fuerzas de inercia en el flujo de fluidos en lechos porosos, considerando tres tipos de resistencias al flujo a través del lecho; la resistencia debido a la estructura porosa del lecho, la viscosa debido al efecto de la capa límite y la debida a las fuerzas de inercia.

Hollands y Sullivan (1.984) obtuvieron una nueva correlación experimental para la caída de presión a través del lecho de rocas (rocas completamente lavadas), poniendo de manifiesto la importancia del tamaño de las partículas en la caída de presión a través del lecho. Hollands, Sullivan y Shewen (1.984) establecieron la magnitud y significado físico de la variación radial de la velocidad.

Bejan (1.984) explicó la similitud entre la ley de Darcy que representa el flujo en un medio poroso, régimen laminar, sin efectos de pared y la fórmula de la velocidad promedio en el flujo de Hagen-Poiseuille, sugiriendo que el flujo de Darcy es la manifestación macroscópica de un flujo altamente viscoso a través de los poros de una estructura permeable. Presenta asimismo soluciones analíticas para problemas de convección forzada y natural a través de lechos porosos con diferentes condiciones de contorno en la pared. Nield y Bejan (1.992) estudia en profundidad la convección en medios porosos con especial énfasis en el transporte por convección natural.

Cheng y Zhu (1.987) utilizaron el modelo de Darcy-Brinkman-Ergun de flujo totalmente desarrollado a través de un lecho cilíndrico y propusieron una variación exponencial para la porosidad en dirección radial. Comprobaron que:

- La velocidad máxima se presenta a una distancia de la pared del orden del 10 al 15% del diámetro de la partícula.
- La forma del perfil de la variación axial de la presión es prácticamente independiente del número de Reynolds a partir de Re igual a 100 (flujo turbulento).
- El efecto de canalización de la pared en el gradiente de presión es muy fuerte cuando $Re < 100$.

Khan y Beasley (1.989) observaron que la porosidad media es una función del cociente diámetro del lecho/diámetro de la partícula, y que es prácticamente constante e igual a 0,3625 cuando el cociente anterior es superior a 28.

1.2.2 Coeficientes de transporte térmico.

La transferencia de calor en lechos porosos gas-sólido ha sido ampliamente estudiada debido a su importancia en el diseño de equipos en la industria química. Recientemente, se han desarrollado nuevos trabajos por su potencial como sistema de almacenamiento de energía.

A continuación se consideran los estudios relacionados con los coeficientes de transporte térmico necesarios para describir el comportamiento dinámico de lechos porosos gas-sólido, bajo condiciones de flujo características de las aplicaciones de almacenamiento de energía. En particular se considera el coeficiente de película gas-sólido, el coeficiente de película en la pared interior del lecho y las conductividades térmicas efectivas radial y axial.

a) El coeficiente de película gas-sólido.

Aunque la transporte convectivo de calor entre el fluido y el material sólido del lecho ha sido ampliamente estudiado, aún existen incertidumbres en la evaluación del correspondiente coeficiente de película en todos los regímenes de flujo.

Glaser (1.956) midió experimentalmente las temperaturas de las dos fases y utilizó los datos para calcular el factor de Colburn en función del número de Reynolds para partículas en forma esférica, cilíndrica y cúbica.

Alanis (1.977) presentó una correlación experimental para el coeficiente de película en lecho de rocas, en función del caudal másico del fluido y del tamaño de la partícula. Barker (1.965), Jury y Berbano (1.977) y Balakrishnan y Pei (1.979), realizaron un estudio comparativo de los trabajos previos sobre el tema.

Gunn (1978) estudió la influencia de la distribución radial de la velocidad y de la conductividad axial en el coeficiente de película, observando que el efecto de la conducción axial puede explicar el comportamiento del número de Nusselt a bajos números de Reynolds ($Re < 10$). Comprobó que el valor límite de Nusselt a bajos números de Reynolds depende de la porosidad del lecho.

Martin (1.978) obtuvo una correlación para el coeficiente de película a bajos números de Peclet, teniendo en cuenta los efectos de la no uniformidad del lecho y de la velocidad. Kreith y Kreider (1.978) y Dixon y Creswell (1.979) proponen el uso de la correlación de Handley y Heggs (1.969) para evaluar el coeficiente de película sólido-gas.

Chandra y Willits (1.981) estudiaron experimentalmente la dependencia del coeficiente volumétrico convectivo en relación al tamaño de las partículas, la velocidad y la

porosidad del lecho.

Achenbach (1.982) estudió la caída de presión y la transferencia de calor y masa a través de un lecho poroso a altos números de Reynolds, observando la analogía existente entre el transporte de calor y masa.

Coutier y Farber (1.982) utilizaron un modelo numérico general para calcular el coeficiente volumétrico de película y compararon sus resultados con datos experimentales, proponiendo una expresión teórica para el mismo. Beasley (1.983) realizó una comparación entre nueve correlaciones diferentes proponiendo el uso de la correlación de Galloway y Sage (1.970).

Juang y Weng (1.983) propusieron un método para obtener la conductividad de las partículas sólidas y el coeficiente de película entre las partículas y el fluido a partir de la medición experimental de la curva de respuesta del lecho ante una excitación en la temperatura de entrada del fluido.

Vafai y Sozen (1.990) analizaron el transporte térmico e hidráulico en un medio poroso suponiendo que no existe equilibrio térmico local entre las partículas sólidas y el fluido.

b) El coeficiente de película en la pared.

Una gran parte de los estudios de transferencia de calor en lechos porosos se han centrado en la transferencia desde la pared a las dos fases existentes en el lecho. En los primeros estudios realizados se aproximó el transporte convectivo en la pared por un transporte puramente conductivo, definiendo una conductividad efectiva global en la pared. Coberly y Marshall (1.951) introdujeron por primera vez una condición de contorno convectiva en la pared.

Baddour y Yoon (1.960) analizaron los diferentes modelos y medidas existentes hasta la fecha, de la transferencia de calor en la pared de lechos porosos.

Yagi y Kunii (1.960) desarrollaron una correlación experimental para el coeficiente de película en la pared considerando sólo flujos de calor radiales y haciendo distinción entre la conductividad efectiva radial y el coeficiente convectivo en la pared. Los resultados obtenidos se compararon con los datos experimentales de Coberly y Marshall (1.951) y de otros autores, poniendo de manifiesto la necesidad de considerar la reducción de la dispersión radial en la región próxima a la pared para modelar correctamente el coeficiente de película en la pared.

Li y Finlayson (1.977) obtuvieron asimismo una correlación para el coeficiente de película en la pared, que coincide con la correlación de Yagi y Kunii (1.960) en un amplio rango del número de Reynolds.

Vafai y Tien (1.981) estudiaron los efectos de la capa límite y de las fuerzas de inercia en la transferencia de calor y en la distribución radial de la velocidad en medios porosos, proponiendo una correlación para el número de Nusselt en la pared en función de tres parámetros adimensionales característicos del proceso. Comprobaron que el efecto de la capa límite es siempre importante, pero que aumenta cuando la capa límite térmica tiene el mismo orden o es menor que la capa hidráulica. Este fenómeno tiene lugar cuando el número de Prandtl del fluido es alto.

Vafai (1.984) basándose en el trabajo anterior presentó un estudio detallado de la variación radial de la porosidad y su influencia en la transferencia de calor en la pared, observando asimismo que el efecto de la longitud de entrada es despreciable en lechos porosos.

Para flujo totalmente desarrollado en un lecho cilíndrico y condiciones de contorno en la pared de temperatura y flujo de calor constante, Cheng y Zhu (1.987) desarrollaron modelos matemáticos para el cálculo del número de Nusselt y de la distribución radial de temperatura. Sus modelos dependen de seis constantes experimentales y consideran los efectos de las variaciones de la conductividad efectiva y la dispersión térmica radial. Se realizó una comparación con datos experimentales de otros autores y su conclusión más importante fue que el perfil de temperatura radial es relativamente independiente de las condiciones térmicas del contorno cuando Re es alto.

Aunque existe en la actualidad una cierta discrepancia entre las diferentes correlaciones, es posible obtener valores razonables del coeficiente de película en la pared a partir de las correlaciones existentes.

c) La conductividad térmica efectiva.

En general la conductividad térmica en un lecho de partículas sólidas depende de la conductividad de ambas fases y de la dispersión térmica, tanto en dirección axial como en dirección radial. En cada dirección, la conductividad térmica efectiva se considera suma de la conductividad promedio de ambas fases cuando el fluido no se mueve k_e^0 y de la conductividad debida a los efectos de dispersión térmica k_e^d .

Existen numerosos trabajos relacionados con la evaluación de las conductividades efectivas radial y axial, directamente o a través de las conductividades k_e^0 y k_e^d , re-

sumiéndose a continuación los más importantes.

Baddour y Yoon (1.960) y posteriormente Beasley y Clark (1.984) obtuvieron correlaciones formalmente idénticas para la conductividad debida a la dispersión k_e^d en dirección radial y axial respectivamente.

Gabor y Botterill (1.985) analizaron trabajos anteriores y presentaron unas correlaciones que permiten calcular k_e^0 en función de la porosidad y conductividad térmica de ambos fases del lecho.

Dixon y Creswell (1.979) desarrollaron una teoría para calcular los coeficientes efectivos de conductividad térmica axial y radial así como el coeficiente de película entre el fluido y la pared. Comprobaron que las conductividades efectivas dependen de las conductividades de ambas fases, del transporte térmico entre las fases, del diámetro de la partícula y del cociente diámetro del lecho/diámetro de la partícula. Los resultados se compararon con datos experimentales de otros autores con resultados satisfactorios.

Vortmeyer y Adam (1.984) obtuvieron una correlación para la conductividad axial efectiva cuando el flujo de aire es bajo ($Re < 45$) a partir de sus propios datos experimentales.

Jaguaribe y Beasley (1.984) presentaron un modelo para calcular k_e^0 en función de la porosidad y de las propiedades de ambos fases del lecho. Prasad, Kladias, Bandyopadhyaya y Tian (1.989) obtuvieron nuevos datos experimentales de k_e^0 para un lecho de esferas y comparó cuatro correlaciones de otros autores con su datos experimentales.

Hunt y Tien (1.988) obtuvieron nuevas correlaciones que tenían en cuenta la variación radial de la conductividad térmica efectiva radial. La variación propuesta es de tipo exponencial de acuerdo con la variación de la porosidad y velocidad del fluido.

Georgiadis y Catton (1.988) investigaron analíticamente el efecto de la fluctuación de la velocidad en el transporte de calor y masa, comparando los valores calculados de las conductividades efectivas con datos experimentales de otros autores. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para números de Peclet inferiores a 20. Comprobaron que para números de Peclet bajos las dos conductividades efectivas son prácticamente iguales, mientras que para números de Peclet altos la conductividad axial es mayor que la radial.

Hsu y Cheng (1.988) utilizaron el método del volumen promedio para investigar la dispersión térmica en lechos de esferas sólidas, considerando la variación radial de la porosidad y utilizando algunas constantes de datos experimentales de otros autores.

Sus resultados fueron que la dependencia de la dispersión térmica es lineal con el número de Peclet cuando Reynolds es alto y cuadrática con Peclet cuando Reynolds es bajo.

Tien (1.990) realizó un resumen de los trabajos existente hasta la fecha, analizando el transporte térmico en lechos de partículas sólidas en modelos monofásicos. Observó que la dispersión térmica es una función de la capacidad térmica volumétrica del lecho, de la velocidad media del fluido, del diámetro de la partícula y de la geometría del lecho. Obtuvo correlaciones para ambas conductividades k_e^0 y k_e^d .

Prasad, Kladias, Bandyopadhaya y Tian (1.989) y Kunii y Smith (1.960) entre otros obtuvieron correlaciones experimentales para k_e^0 en lechos porosos de esferas, que contienen al menos dos constantes numéricas que se determinan empíricamente o se especifican para cada geometría.

Nield (1.991) estableció una nueva correlación de k_e^0 que a diferencia de correlaciones anteriores no introduce ninguna constante empírica y permite evaluar la conductividad k_e^0 en función de la porosidad del lecho y de las conductividades de las dos fases exclusivamente. La correlación de Nield no es válida cuando la conductividad del fluido es mucho menor que la del sólido, como es el caso de los lechos porosos sólido-gas considerados. En este caso Nield propone el uso de la correlación de Krupiczka (1.967).

1.2.3 Modelos globales de almacenamiento de energía.

Los modelos desarrollados para sistemas de almacenamiento de energía en lechos porosos se pueden clasificar en modelos monofásicos y modelos bifásicos, y cada uno de ellos a su vez pueden ser unidimensionales o bidimensionales. Todos los modelos considerados son modelos en régimen transitorio.

En los modelos monofásicos se supone que existe un equilibrio térmico local entre ambas fases. En estas condiciones, la temperatura del sólido y del fluido en cada punto es la misma y la ecuación de la energía del medio poroso se reduce a una única ecuación con propiedades físicas medias de ambas fases. En los modelos bifásicos se consideran temperaturas diferentes del sólido y del fluido en cada punto, existiendo por lo tanto un intercambio neto de energía por convección entre ambas fases cuantificado a través de un coeficiente de película sólido-fluido.

En los modelos unidimensionales se supone que la velocidad y temperatura son uniformes en cada sección, dependiendo sólo de la coordenada axial y del tiempo. En los modelos bidimensionales se considera la variación radial de los campos de velocidad

y temperatura dentro del lecho.

En la tabla 1.1 se resumen los modelos existentes de lechos porosos utilizados como sistemas de almacenamiento de energía, clasificados de acuerdo con los criterios anteriores.

El modelo unidimensional monofásico desarrollado por Vortmeyer y Schaefer (1.974) incorpora el transporte convectivo entre el sólido y el fluido de forma aproximada, definiendo una conductividad térmica efectiva modificada. Los resultados obtenidos se comparan con datos experimentales obteniendo una razonable aproximación del campo de temperaturas.

Riaz (1.977, 1.978) obtuvo una solución analítica de un modelo monofásico unidimensional para un lecho fijo semiinfinito sujeto a una variación en escalón de la temperatura de entrada del fluido. El modelo monofásico, desarrollado a partir de un modelo bifásico con un coeficiente de película sólido-fluido tendiendo a infinito, incorpora la conductividad térmica efectiva modificada definida por Vortmeyer y Schaefer.

Los modelos unidimensionales bifásicos son los más numerosos. El primer estudio analítico de la transferencia de calor en lechos porosos fue realizado por Schumann (1.929), que obtuvo una solución analítica para la temperatura de salida del fluido considerando un lecho semiinfinito. Las hipótesis incorporadas en el modelo de Schumann fueron las siguientes:

- Parámetros físicos constantes.
- No hay transferencia de masa.
- Flujo uniforme y unidimensional.
- Conducción axial despreciable.
- No hay transferencia radial.
- Gradientes térmicos en el interior de las partículas sólidas despreciables.
- Transferencia por radiación despreciable.
- Pérdidas al exterior nulas.

Clark y Arpaci (1.976) obtuvieron una solución analítica de un modelo unidimensional bifásico para una variación lineal en la temperatura de entrada del fluido. La respuesta del lecho poroso ante una variación arbitraria de la temperatura de entrada del fluido se obtenía realizando una discretización temporal de la excitación de forma

Modelos Dinámicos Unidimensionales Monofásicos				
Autor(es)	Año	Analítico	Numérico	Experimental
Vortmeyer y Schaefer	1.974	*		
Riaz	1.977	*		
Modelos Dinámicos Unidimensionales Bifásicos				
Autor(es)	Año	Analítico	Numérico	Experimental
Schumann	1.929	*		
Handley y Heggs	1.969		*	
Clark y Arpaci	1.976	*		
Mumma y Marvin	1.976		*	
Hughes, Klein y Close	1.976		*	
Burch, Allen y Peavey	1.976		*	
Yang y Lee	1.977	*		
Clark, Nabonzy y Heetderks	1.977		*	
Persons y Duffie	1.980			*
Gross, Hickox y Hackett	1.980		*	
Jones y Hill (NBS)	1.980			*
Spiga y Spiga	1.981	*		
Coutier y Farber	1.982		*	
Saez y McCoy	1.983		*	
Heggs	1.985		*	
Modelos Dinámicos Bidimensionales Monofásicos				
Autor(es)	Año	Analítico	Numérico	Experimental
Vafai y Sozen	1.990		*	
Modelos Dinámicos Bidimensionales Bifásicos				
Autor(es)	Año	Analítico	Numérico	Experimental
Vanden Broek y Clark	1.980			*
Beasley	1.983		*	
Beasley y Clark	1.984		*	

Tabla 1.1: Revisión de modelos de almacenamiento térmico en lechos porosos.

que en cada intervalo se pudiera suponer una variación lineal. Yang y Lee (1.977) desarrollaron una solución analítica para una excitación en escalón de la temperatura de entrada del fluido, obteniendo la respuesta en frecuencia del lecho así como los parámetros adimensionales característicos. Spiga y Spiga (1.981) obtuvieron una solución analítica para unas condiciones iniciales no uniforme en el lecho.

Dentro de los modelos unidimensionales bifásicos existen numerosas soluciones de tipo numérico, con diferentes condiciones iniciales y de contorno. Así por ejemplo, Mumma y Marvin (1.976) desarrollaron un modelo numérico para un problema unidimensional que consideraba pérdidas a través de las paredes y una temperatura de entrada del fluido variable. El modelo no consideraba la conducción axial ni la capacidad térmica de la pared y las condiciones de contorno en la entrada y salida del lecho no estaban claramente expresadas.

Handley y Heggs (1.969) consideraron la conducción axial dentro del lecho así como los gradientes de temperatura en el interior del sólido. El lecho poroso se supuso adiabático y no se utilizó la conductividad efectiva del lecho.

Hughes, Klein y Close (1.976) consideraron el lecho dividido en segmentos axiales en los que la temperatura era constante o variaba linealmente con la coordenada axial. Las ecuaciones de partida se basaron en el modelo de Schumann considerando pérdidas hacia el exterior. Utilizando el concepto del Número de Unidades de Transferencia NTU , estudiaron el comportamiento de un lecho de rocas dentro de un sistema de energía solar con colectores de aire, comprobando que a partir de un valor de NTU igual a 10 el rendimiento del sistema de energía solar era poco sensible frente al NTU . Se obtenía así el modelo de NTU_{∞} , que permitía caracterizar el problema a través de un modelo monofásico, siempre que el NTU del lecho fuera superior a 10.

El modelo de NTU_{∞} fue examinado experimentalmente por Persons y Duffie y Mitchell (1980), utilizándose en la simulación de los sistemas de almacenamiento de energía solar a largo plazo. El modelo NTU_{∞} se ha incorporado en diferentes programas de simulación de instalaciones térmicas con almacenamiento de energía, como TRNSYS (1.978), SERI-RES (1.979), SSBC (1.980) y EMGP2 (1.985) entre otros.

Gross, Hickox y Hackett (1.980) implementaron un método predictor-corrector para resolver el campo de temperaturas en un lecho poroso con temperatura del aire a la entrada variable, condiciones iniciales en el lecho no uniformes y propiedades físicas función de la temperatura. Aunque la conducción axial no se consideró en el modelo, el esquema numérico utilizado requería condiciones de contorno en las secciones de entrada y salida, suponiendo que la temperatura del fluido en el primer nodo era conocida y que la temperatura de salida del fluido era igual a la temperatura del último nodo

dentro del lecho.

El modelo anterior fue comprobado experimentalmente con los datos medidos por Jones y Hill (1.980) en el National Bureau of Standards en un lecho de rocas de sección cuadrada sujeto a una excitación escalón en la temperatura de entrada del aire. Las temperaturas de aire medidas correspondían al eje central del lecho, obteniendo una aproximación razonable.

Burch, Allen y Peavey (1.976) desarrollaron una solución numérica para un modelo unidimensional bifásico que incluía la conducción axial, aunque la condición de contorno en la entrada del lecho no está claramente definida.

Clark, Nabonzy y Heetderks (1.977) consideraron un lecho poroso adiabático y despreciaron la conducción axial, obteniendo una solución numérica del problema mediante un método implícito. Durante el periodo de carga del lecho obtuvieron diferencias entre las temperaturas del sólido y del fluido, de hasta el 15% de la excitación escalón en la temperatura del fluido, poniendo de manifiesto los errores asociados a los modelos monofásicos.

Coutier y Farber (1.982) desarrollan un método numérico para un lecho poroso en el que consideran pérdidas a través de la pared así como la conducción axial. La conductividad utilizada en la dirección axial es sin embargo la conductividad del sólido en lugar de la conductividad axial efectiva. La porosidad del lecho se supone uniforme y no considera la conducción en el interior del sólido.

Saez (1.981) y Saez y McCoy (1.982, 1.983) desarrollaron un modelo matemático del transporte transitorio de calor en lecho de rocas, bajo condiciones de temperatura de entrada variable con el tiempo. El modelo incluye la dispersión térmica en la dirección del flujo y la conducción dentro de la partícula sólida, despreciando la capacidad térmica de la pared. Los resultados del modelo se compararon con los datos experimentales de Vanden Broek y Clark (1.980), observándose diferencias entre ambos.

Heggs (1.985) realizó un estudio comparativo de modelos numéricos utilizados para resolver el problema de la transferencia de calor en lechos de partículas sólidas. Planteó cinco modelos matemáticos, con diferentes combinaciones de mecanismos controlantes de la transferencia de calor en el lecho. Las soluciones obtenidas son útiles para cualquier condición inicial y de contorno y además tienen en cuenta la convergencia y estabilidad de los métodos. Todos los modelos considerados son unidimensionales y consideran el lecho poroso adiabático.

Los primeros modelos bidimensionales en lechos porosos se desarrollaron para reac-

tores químicos, en los que aparece un término de generación interna. Beasley (1.983) y Beasley y Clark (1.984), desarrollaron los primeros modelos bidimensionales de lechos porosos fijos en sistema de almacenamiento. El modelo considera las conductividades efectivas radial y axial, la variación radial de la porosidad del lecho y de la velocidad del fluido, así como las pérdidas y capacidad térmica de la pared. No considera sin embargo los gradientes de temperatura en el interior del sólido y la variación radial de la porosidad se tiene en cuenta asignando un valor a la porosidad en el núcleo del lecho y otro en las proximidades de la pared.

Khan y Beasley (1.989) aplicaron el modelo bidimensional de Beasley al estudio del transporte de calor en un regenerador, del tipo lecho de partículas sólidas.

El modelo monofásico de Vafai y Sozen (1.990), basado en el modelo de volumen promedio de Vafai (1.984), considera las variaciones radiales de la velocidad, densidad, presión y temperatura. No considera sin embargo la conducción en el interior del sólido, ni las pérdidas y capacidad térmica de la pared.

1.3 Contenido y organización.

La revisión bibliográfica realizada pone de manifiesto el gran número de estudios desarrollados en relación con los lechos porosos como medio de almacenamiento de energía.

Si bien son necesarios nuevos trabajos para un mejor conocimiento y cuantificación de los procesos de transporte de cantidad de movimiento y calor a través de lechos porosos fijos, las correlaciones existentes suministran una base suficiente para caracterizar el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía en lechos porosos fijos.

No obstante, la revisión bibliográfica ha puesto de manifiesto que en la actualidad no existe un modelo general que represente el comportamiento de un almacenamiento en lecho poroso. Los modelos existentes incorporan un número excesivo de hipótesis de partida, no consideran procesos de transferencia que no siempre son despreciables y establecen simplificaciones, diferentes de un modelo a otro, que no están justificadas con suficiente rigor y generalidad.

El objetivo de la presente Tesis es desarrollar un modelo numérico de lechos porosos fijos utilizados como sistemas de almacenamiento de energía, que sea suficientemente general, reduciendo al mínimo el número de hipótesis y que permita un mejor conocimiento del comportamiento de estos sistemas.

En el capítulo 2 se plantea el modelo matemático del lecho poroso fijo, estableciendo claramente las hipótesis de partida y por lo tanto la validez del modelo. Los coeficientes de transporte en el interior del lecho se estudian en un apartado independiente, justificando en cada caso la correlación adoptada en el modelo. Una vez planteado el modelo y cerrado el problema con las condiciones iniciales y de contorno, se desarrolla el método numérico utilizado describiendo el algoritmo de resolución correspondiente.

En el capítulo 3 se realiza la validación del modelo a diferentes niveles. Se comprueba el modelo de conducción en partículas sólidas con soluciones analíticas particulares y se compara el modelo global del lecho desarrollado con modelos anteriores. Los resultados del modelo propuesto en la Tesis se comparan asimismo con datos experimentales de otros autores. En este capítulo se estudia también el comportamiento del modelo frente a los parámetros característicos de la discretización espacio-temporal, fijando criterios que permiten optimizar el proceso de cálculo.

En el capítulo 4 se desarrolla un análisis de sensibilidad del modelo frente a diferentes parámetros característicos del comportamiento del sistema de almacenamiento, con objeto de extraer criterios de diseño del lecho poroso tanto a nivel de condiciones de operación como de dimensiones del lecho. A partir del modelo general se introducen tres niveles de simplificación, estudiándose la validez de las mismas y cuantificando en cada caso, a través de parámetros adimensionales, el error cometido.

En el capítulo 5 se extraen las conclusiones y aportaciones más relevantes de la Tesis y se resumen las posibles líneas de continuación del trabajo.

Capítulo 2

Planteamiento y solución del modelo matemático

2.1 Introducción

Como ya ha sido definido, un medio poroso es un material formado por una matriz sólida, que puede estar formada por partículas, que deja huecos interconectados entre sí de manera que el fluido puede moverse por su interior. En el caso que se tratará existe un solo fluido que discurre por el interior de los poros. No se consideran los efectos de tensión superficial al ser las diferencias de presión a lo largo del lecho mucho mayores que las asociadas a la tensión superficial.

La figura 2.1 muestra algunos ejemplos de medios porosos utilizados en la edificación. Como puede observarse la distribución de huecos es altamente irregular. Si se toma como dimensión característica el tamaño de los poros, las magnitudes de interés (velocidad, temperatura, etc) serán también irregulares.

Una forma de abordar el problema es la descripción macroscópica de los mecanismos de transporte en la que se considera al medio poroso como un medio continuo. Las leyes obtenidas de esta forma deben apoyarse en resultados experimentales que proporcionan las propiedades medias del medio poroso. Se utilizará un promedio espacial, tomando un volumen representativo elemental cuya longitud característica es mucho mayor que la longitud característica de los huecos.

En este capítulo se plantearán las ecuaciones de conservación que junto con las constitutivas del medio, condiciones iniciales y de contorno cierran el problema. Especial atención merecerán los coeficientes que intervienen en el planteamiento del balance de energía del lecho. Una vez planteado el sistema de ecuaciones se abordará la solución numérica.

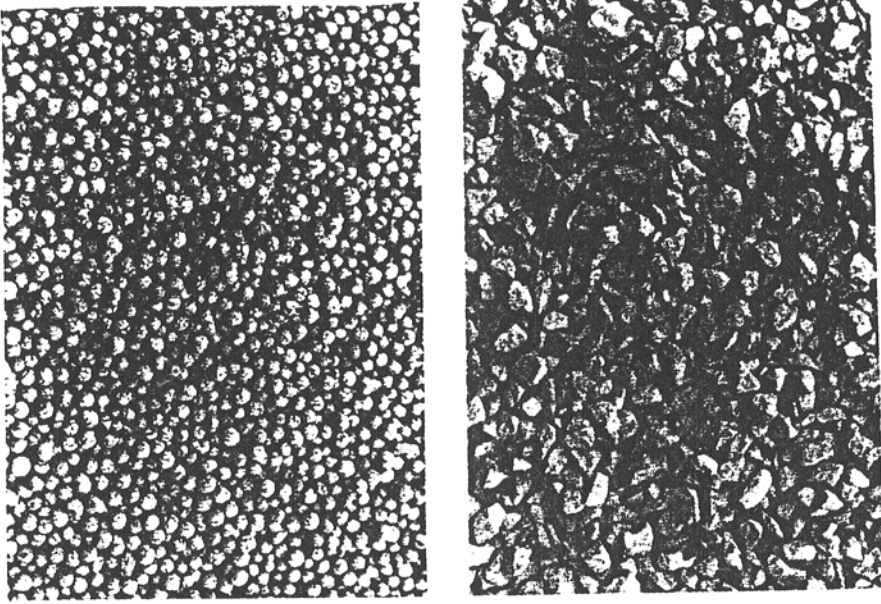


Figura 2.1: Medios porosos utilizados en la edificación.

El problema tratado es, en toda generalidad, tridimensional. Si se suponen propiedades constantes del lecho (fluido y partículas sólidas) y flujo totalmente desarrollado cualquier sección transversal del lecho puede formalmente ser tratada de la misma forma de manera que el problema es bidimensional. En el modelo desarrollado en la Tesis se ha considerado la variación radial de la porosidad por lo que el modelo es bidimensional, justificándose en qué casos es válido el modelo unidimensional.

2.2 Modelo

El modelo se desarrolla para un lecho cilíndrico de diámetro D_l y longitud L (Figura 2.2). Las partículas sólidas que contiene son esferas de diámetro D_p , capacidad térmica $\rho_s C_{p_s}$, difusividad térmica α_s y conductividad k_s . Si las partículas que contiene el lecho no son esféricas debe utilizarse el diámetro equivalente (D_e) de manera que la formulación que a continuación se desarrolla sigue siendo válida:

$$D_e = \left(\frac{6V_s}{n\pi} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

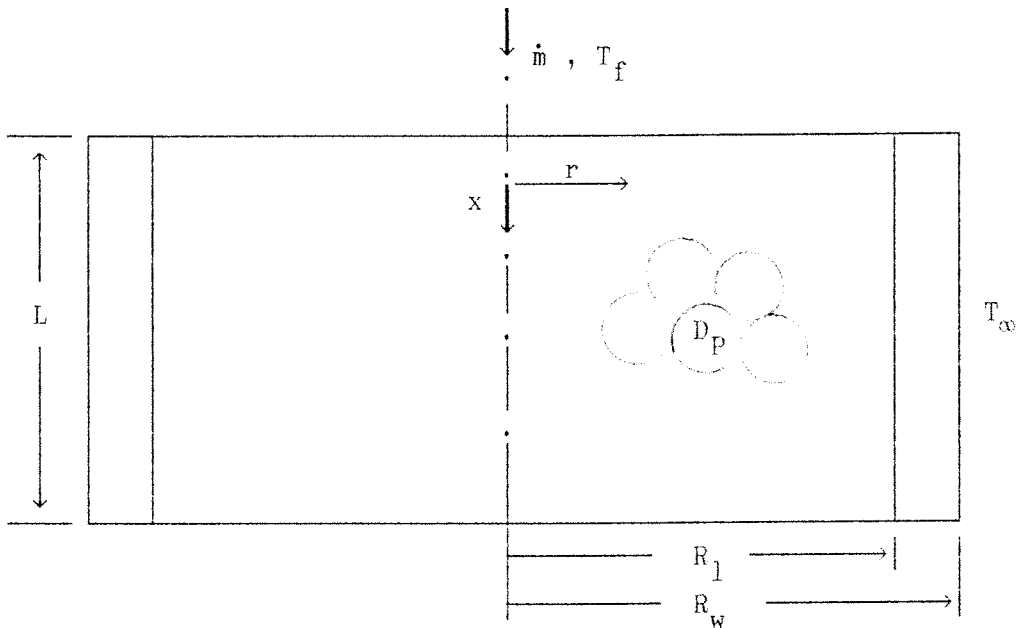


Figura 2.2: Definición del lecho considerado.

siendo:

V_s : volumen total de sólido en el lecho

n : número de partículas

Se considerarán propiedades físicas constantes y fluido incompresible. Se supondrá conocida la capacidad térmica de la pared y para tratar con toda generalidad el transporte de energía entre las dos fases del lecho se tratará independientemente cada una de ellas, acoplándose a través de la temperatura superficial de la partícula.

La porosidad local ϵ de un medio poroso se define como la fracción de volumen que está ocupada por los huecos en un entorno del punto considerado. La porosidad es función de la posición o, en nuestro caso, del radio. En un medio isotrópico la porosidad superficial, o fracción de área libre del área total de una sección transversal, es igual a ϵ . En el caso de lechos cilíndricos como el que nos ocupa, hay un incremento de la porosidad en las proximidades de la pared debido a la imposibilidad de acoplarse las partículas como lo hacen lejos de ésta. Experimentalmente se observa que la porosidad es una función de la distancia desde la pared, desde un valor próximo a la unidad en la pared hasta un valor constante a partir de aproximadamente 5 diámetros de partícula

desde la pared. Este valor lejos de la pared se designará ϵ_∞ . Para un lecho en el que las partículas sólidas son esferas, la porosidad en la zona central del lecho puede ser calculada a partir de la correlación de Khan y Beasley (1.989). En función de los diámetros de lecho y de partícula se tiene:

$$\epsilon_\infty = 0.4272 - 4.516 \times 10^{-3} \left(\frac{D_l}{D_p}\right) + 7.881 \times 10^{-5} \left(\frac{D_l}{D_p}\right)^2 \quad \text{si} \quad \frac{D_l}{D_p} < 28 \quad (2.2)$$

$$\epsilon_\infty = 0.3625 \quad \text{si} \quad \frac{D_l}{D_p} > 28 \quad (2.3)$$

La figura 2.3 representa la variación de la porosidad cerca de la pared según Cheng y otros (1.991) (tomada de Nield y Bejan (1.992)). En el modelo desarrollado en la tesis la porosidad $\epsilon(r)$ se tiene en cuenta a partir de la ecuación de Vafai (1.984) en la que se supone una variación exponencial con la distancia a la pared, $R_l - r$:

$$\epsilon(r) = \epsilon_\infty (1 + C e^{-N(R_l - r)/D_p}) \quad (2.4)$$

donde la constante C se elige de forma que la porosidad en la pared sea 1, es decir:

$$C = \frac{1}{\epsilon_\infty} - 1 \quad (2.5)$$

La constante N se elige $N = 6$ según Hunt y Tien (1.988).

2.2.1 Ecuación de continuidad

Para formular las ecuaciones de conservación como si se tratara de un medio continuo es necesario definir apropiadamente las magnitudes que intervienen. En particular, la densidad media local ρ_f se define como la masa del fluido contenida en los poros de un volumen representativo elemental dividido por el volumen de los poros en ese volumen. De forma análoga se definen los valores medios de presión, temperatura y otras variables termodinámicas, esto es, promediando en un volumen representativo elemental.

La velocidad aparente (v) se define de forma que la cantidad de fluido que atraviesa una superficie de medio poroso pueda ser obtenida integrando la velocidad aparente

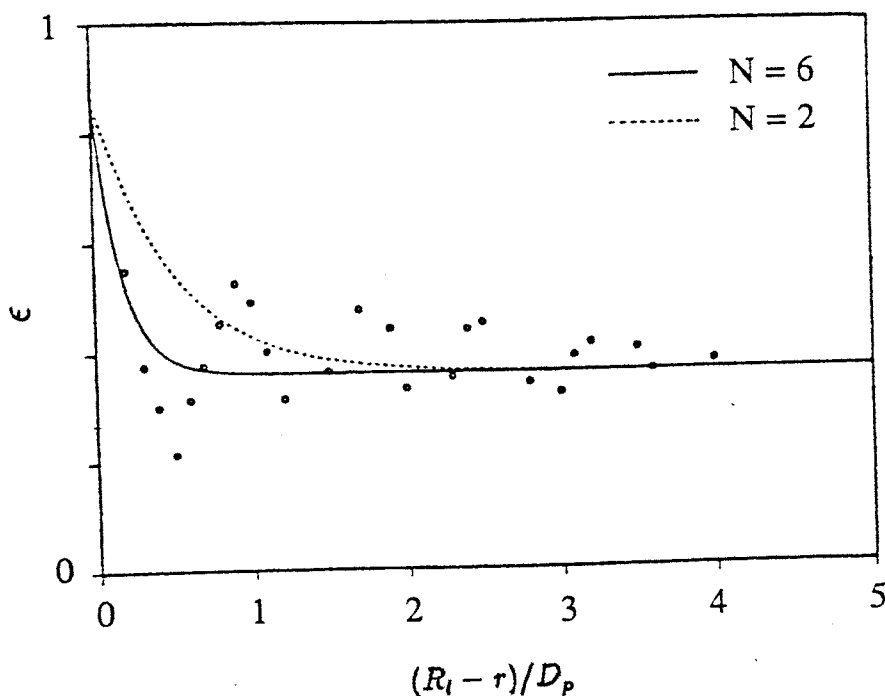


Figura 2.3: Variación de la porosidad cerca de la pared.

en toda la superficie elemental, incluyendo sólido y huecos. Con esta definición, la ecuación de continuidad queda:

$$\nabla \cdot (\rho_f v) = 0 \quad (2.6)$$

donde ρ_f es la densidad del fluido y v es la velocidad aparente.

Al no variar las propiedades físicas de una sección a otra del lecho en la dirección axial, la ecuación de continuidad se aplica en el proceso iterativo comprobando sólo que la masa que atraviesa cada sección transversal del lecho es constante. El gradiente de presión será el apropiado para que se cumpla la conservación de la masa.

2.2.2 Ecuación de cantidad de movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento se sustituye en este tipo de problemas por una ecuación constitutiva del medio. Cuando el número de Reynolds basado en el tamaño típico de los poros es del orden unidad la relación entre el gradiente de presión y la velocidad es lineal (ley de Darcy). En el caso que nos ocupa el número de Reynolds

no es del orden unidad y por lo tanto la relación entre el gradiente de presión y la velocidad deja de ser lineal. Se utilizará una particularización de la ecuación de Irmay (1.958) (ver Nield y Bejan (1.992)) conocida como ecuación de Ergun. Se supone flujo totalmente desarrollado, fuerzas másicas y efecto de la pared del lecho despreciables:

$$-\frac{dP}{dx} = 150 \frac{\mu_f (1 - \epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v + 1.75 \frac{\rho_f (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} v^2 \quad (2.7)$$

2.2.3 Ecuaciones de la energía

Se suponen las siguientes hipótesis:

- 1) Disipación viscosa despreciable (ver Whitaker (1.977))
- 2) Trabajo debido a las fuerzas de presión despreciable.
- 3) No existe reacción química ni generación interna de calor.
- 4) Radiación despreciable.

El tipo de aplicaciones que se estudia, almacenamiento de energía, justifica la hipótesis tercera. Por otra parte, según Saez (1.981) no es necesario considerar el intercambio radiante cuando las temperaturas del lecho son inferiores a 100 °C . En estas condiciones la ecuación de la energía se expresa:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 se particulariza para las diferentes fases del lecho y en las diferentes localizaciones. El subíndice **f** indica fluido, **s** sólido y **w** pared.

Ecuación del fluido en la zona interior

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{k_e^x}{\rho_f C p_f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{k_e^r}{\rho_f C p_f} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} \right) + \frac{h_{s,a}}{\epsilon \rho_f C p_f} (T_{ss} - T_f) \quad (2.9)$$

siendo:

k_e^x y k_e^r : conductividades efectivas en la dirección axial y radial ($W/m^\circ C$)

a : área superficial de las partículas por unidad de volumen elemental (m^{-1})

h_s : coeficiente de película entre el fluido y las partículas ($W/m^2^\circ C$)

T_{ss} : temperatura superficial de la partícula ($^\circ C$)

Ecuación del fluido junto a la pared

A la ecuación 2.9 debe añadirse el término convectivo con la pared:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{k_e^x}{\rho_f C p_f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{k_e^r}{\rho_f C p_f} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} \right) + \frac{h_s a}{\epsilon \rho_f C p_f} (T_{ss} - T_f) + \frac{h_w A_w}{\rho_f C p_f \epsilon} (T_w - T_f) \quad (2.10)$$

siendo:

A_w : área interior de la pared por unidad de volumen del lecho (m^{-1})

h_w : coeficiente de película entre el fluido y la pared ($W/m^2^\circ C$)

Ecuación de la partícula sólida

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (2.11)$$

siendo α_s la difusividad térmica de la partícula sólida (m^2/s).

Ecuación de la pared

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{h_w A_w^i}{\rho_w C p_w} (T_f - T_w) + \frac{U_\infty A_w^o}{\rho_w C p_w} (T_\infty - T_w) \quad (2.12)$$

siendo:

α_w : difusividad térmica de la pared (m^2/s)

A_w^i : área interior de la pared por unidad de volumen de pared (m^{-1})

A_w^o : área exterior de la pared por unidad de volumen de pared (m^{-1})

U_∞ : coeficiente global de transferencia entre la pared y el exterior ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

El acoplamiento entre las partículas y el fluido se lleva a cabo mediante la ecuación de balance en la interfase sólido-fluido:

$$h_s(T_{ss} - T_f) = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=D_p/2} \quad (2.13)$$

siendo T_{ss} la temperatura superficial de la partícula.

2.2.4 Condiciones iniciales y de contorno

a) Condiciones iniciales

Inicialmente, se supone el equilibrio térmico en el lecho. Si T_0 es la temperatura inicial, se tendrá:

$$T_f(x, r, 0) = T_s(x, r, 0) = T_w(x, 0) = T_0 \quad (2.14)$$

b) Condiciones de contorno

En primer lugar se tienen las condiciones de simetría en el lecho y las partículas sólidas:

$$\frac{\partial T_f}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.16)$$

En la sección de entrada se conocen la temperatura y velocidad de entrada del aire. Los primeros modelos numéricos de lechos de roca imponían que la temperatura del aire en el primer nodo fuera la de entrada del aire al lecho. Beasley (1.983) mostró que esta hipótesis no era correcta debido al efecto de las partículas sólidas en el aire. En la formulación numérica no se dispone de un nodo justo en la entrada de lecho por lo que es necesario prolongar artificialmente el lecho introduciendo un nodo ficticio que corresponde a una sección de lecho que no contiene partículas sólidas. En esta sección sí puede ya imponerse que la temperatura sea la de entrada del aire.

En la sección de salida el fluido no varía su contenido de energía, en realidad no existe continuidad de la derivada por lo que se ha expresado la derivada desde la derecha (en L^+):

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} |_{L^+} = 0 \quad (2.17)$$

2.3 Coeficientes de película

2.3.1 Partículas sólidas-fluido

Existen numerosas correlaciones para el cálculo del coeficiente de película entre las partículas sólidas y el fluido en un lecho poroso. En este apartado se evaluarán conjuntamente y se justificará la elección de una de ellas.

Para comparar las distintas correlaciones se han aplicado a un caso de referencia definido por Saez (1.981). En la figura 2.4 se representa el número de Nusselt para diferentes valores de Reynolds según cada correlación. La tabla 2.1 recoge las diferentes correlaciones haciendo referencia a las curvas de la figura 2.4. En la tabla 2.1 se han utilizado las siguientes magnitudes no definidas hasta ahora:

$$j_h = \frac{hs}{C_{p_f} \dot{m}} Pr^{\frac{2}{3}}, \text{ factor de transferencia de calor}$$

$$j_{ho} = \frac{0.535}{Re_h^{0.3} - 1.6}, \text{ factor de transferencia de calor cuando } \frac{\sqrt{A_p}}{D_l} \rightarrow 0$$

A_p : área superficial de la partícula.

CURVA	ECUACION	REFERENCIA
1	$\frac{j_h}{j_{h0}} = 1 + \frac{\sqrt{A_p}}{D_l} \log\left(\frac{4984}{Re_h^{0.933}}\right)$	Glaser (1.956)
2	$h_v = 824(\dot{m}/D_p)^{0.92}$	Alanis (1.977)
3	$Nu_s = (7 - 10\epsilon + 5\epsilon^2)(1 + 0.7Re^{0.2}Pr^{\frac{1}{3}}) + (1.33 - 2.4\epsilon + 1.2\epsilon^2)Re^{0.7}Pr^{\frac{1}{3}}$	Gunn (1.978)
4	$Nu_s = \frac{0.255}{\epsilon} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{2}{3}}$	Handley y Heggs (1.968)
5	$h_v = 700(\dot{m}/D_p)^{0.76}$	Coutier y Farber (1.982)
6	$Nu_s = 2 + 1.8Pr^{\frac{1}{3}}Re^{\frac{1}{2}}$	Jury y Berbano (1.977)
7	$Nu_s = 2 + 1.356Pr^{\frac{1}{3}}Re^{\frac{1}{2}} + 0.0326RePr^{\frac{1}{2}}$	Gallowy y Sage (1.970)
8	$\frac{h_v D_p^2}{k_f} = 1.45Re^{0.7}$	Chandr (1.981)
9	$h_s = 1.064Cp_f \dot{m} Pr^{-\frac{2}{3}} Re^{-0.41}$	Vafai y Sozen (1.990)

Tabla 2.1: Correlaciones para el cálculo del coeficiente de película entre las partículas sólidas y el fluido.

$$Re_h = \frac{\dot{m} \sqrt{A_p}}{\mu_f (1 - \epsilon) \phi}, \text{ número modificado de Reynolds.}$$

\dot{m} : caudal msico

ϕ factor de forma definido como el cociente entre la superficie de una esfera con el mismo volumen que la partícula y la superficie de la partícula (para esferas vale la unidad).

$$h_v = \frac{6(1 - \epsilon)}{D_p} h_s, \text{ coeficiente volumétrico de película.}$$

La comparación anterior permite observar que existen grandes diferencias para los valores de Nusselt según cada correlación, especialmente al aumentar el número de Reynolds. En esta Tesis se utilizará la correlación de Gallowy y Sage (1.970) que se

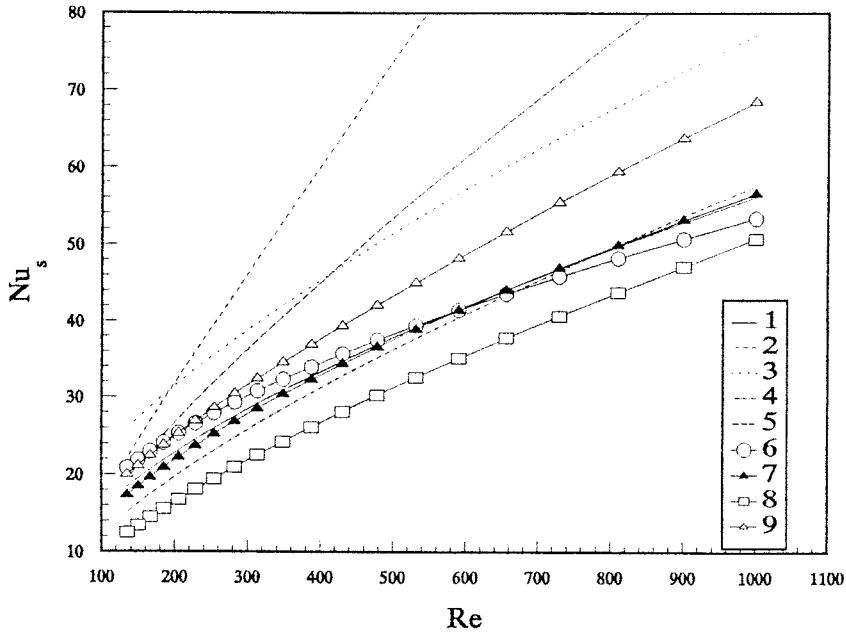


Figura 2.4: Comparación de valores de Nusselt en la interfase sólido-fluido según cada correlación.

situa en una posición intermedia.

2.3.2 Pared-fluido

En la literatura existen diferentes correlaciones para calcular el número de Nusselt en la pared, en particular:

$$Yagi \ y \ Kunii; \quad Nu_w = 3.0 + 0.054PrRe \quad (2.18)$$

$$Li \ y \ Finlayson; \quad Nu_w = 0.17 + Re^{0.79} \quad (2.19)$$

En la figura 2.5 se comparan los diferentes valores de Nusselt. Como se observa, prácticamente coinciden las dos en todo el rango de Reynolds. En esta Tesis se utilizará la correlación de Yagi y Kunii por ser de aplicación para cualquier geometría de lecho.

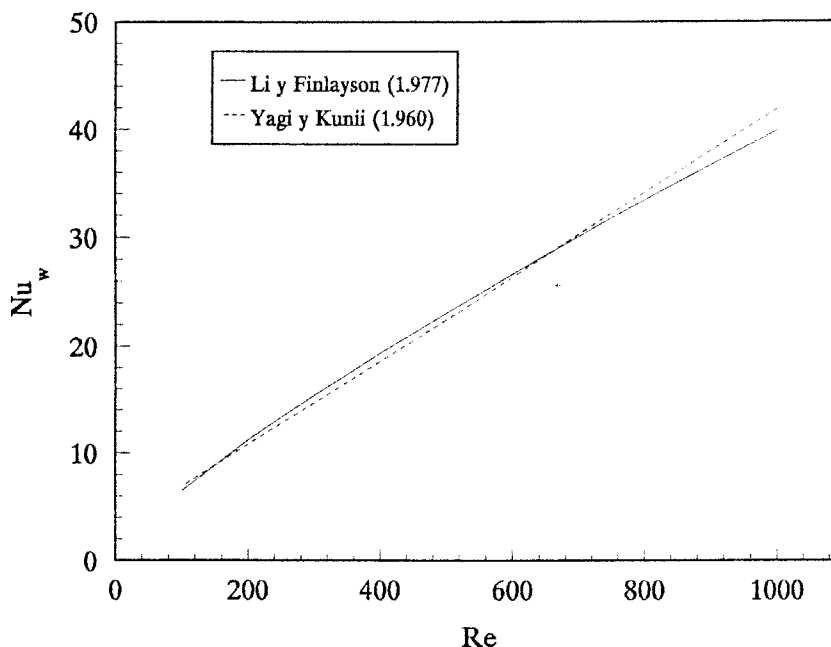


Figura 2.5: Comparación de valores de Nusselt en la pared según cada correlación.

2.4 Coeficientes de conductividad efectiva

Para cerrar el sistema de ecuaciones es necesario evaluar la conductividad del medio estudiado. La conductividad efectiva depende en medios porosos de la geometría del medio. Si no existiera movimiento de fluido podría definirse una conductividad promedio entre las dos fases k_e^0 .

La existencia de movimiento del fluido provoca adicionalmente la dispersión térmica: además de la difusión molecular de calor, debido a la propia geometría del medio poroso existe una mezcla de fluido provocada por el camino que sigue el fluido entre los huecos. La mezcla de las diferentes capas de fluido se ve favorecida por el choque de la corriente fluida con la matriz porosa. Este efecto se tiene en cuenta a partir de la conductividad k_e^d . En definitiva:

$$k_e = k_e^0 + k_e^d \quad (2.20)$$

Para la selección de k_e^0 existen trabajos llevados a cabo por Prasad (1.989) y Nield (1.991). En este último se aconseja utilizar la correlación de Krupiczka por ser simple de aplicar, estar basada en un modelo bidimensional y ajustarse mejor a los resultados

experimentales. La correlación es de la forma:

$$k_e^o = k_f \left(\frac{k_f}{k_s} \right)^{-n} \quad (2.21)$$

donde :

$$n = 0.280 - 0.757 \log \epsilon + 0.057 \log \left(\frac{k_f}{k_s} \right) \quad (2.22)$$

Para evaluar la conductividad efectiva debida a la dispersión térmica se utilizan correlaciones de la forma:

$$k_e^d = \gamma \rho_f C p_f v_a D_p \quad (2.23)$$

siendo:

γ : constante experimental

v_a : velocidad media

La constante γ se evalua según la dirección, radial o axial, considerada:

Radial:	Lejos de la pared $\gamma = 1$	[Tien (1.990)]
	Junto a la pared $\gamma = 0.01$	[Baddour y Yoon (1.960)]
Axial:	$\gamma = 0.5$	[Beasley y Clark (1.989)]

2.5 Método de solución

En el desarrollo del presente capítulo se ha llegado a plantear un sistema de ecuaciones cerrado que resuelto, proporciona los valores de temperatura del fluido y de las partículas sólidas en todo el lecho.

El sistema de ecuaciones en derivadas parciales no tiene una solución analítica y es necesario recurrir a métodos numéricos. El método de solución propuesto se basa en la transformación de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones en diferencias a partir de la discretización espacial y temporal de las ecuaciones. En este apartado se detallarán las líneas del método de solución pudiéndose encontrar en anexos el desarrollo

matemático detallado. Los datos de que se dispone son:

- Geometría del lecho.
- Propiedades físicas.
- Temperaturas iniciales.
- Flujo másico.
- Temperatura del aire a la entrada.
- Temperatura exterior.
- Coeficiente global de transferencia de la pared.

La metodología de resolución consiste en los siguientes pasos:

- 1) Cálculo de la distribución de porosidad (ecuaciones 2.2 a 2.4).
- 2) Cálculo del campo de velocidades (apartado 2.2.2 y Anexo I)
- 3) Cálculo de los coeficientes de película h_s y h_w (apartados 2.3.1 y 2.3.2).
- 4) Cálculo de las conductividades efectivas (apartado 2.4)
- 5) Resolución del sistema de ecuaciones (Anexo II) cuyas incógnitas son el campo de temperaturas en el fluido y la pared. La solución es iterativa en la dirección axial. En cada segmento axial se suponen conocidas las del segmento posterior. Una vez alcanzado el final de lecho se detecta la máxima variación de temperatura en la nueva iteración con el error fijado en el programa:

$$\frac{|T_{actual} - T_{anterior}|}{T_{anterior}} < 10^{-5} \quad (2.24)$$

en el caso de que el error sea mayor que el permitido se vuelve a iterar desde la sección de entrada del lecho, utilizando esta vez los valores de temperatura calculados en la iteración anterior.

Este punto implica el conocimiento de las temperaturas de las partículas sólidas. En la formulación desarrollada hasta ahora no es posible desacoplar los dos campos de temperatura debiéndose resolver simultáneamente las partículas sólidas y el fluido. A continuación se desarrolla un método que permite acoplar los dos problemas sin complicación adicional en la resolución.

2.5.1 Formulación de la conducción en las partículas.

El objetivo de este apartado es llegar a una formulación de la temperatura superficial de la partícula en un instante dado en función de valores conocidos y de la temperatura del fluido que está en contacto con la partícula en ese instante. Para ello se utilizará una formulación en el espacio de estados a partir de una discretización espacial de la ecuación diferencial 2.11. Los detalles de la discretización de las ecuaciones pueden encontrarse en el Anexo II. Se tiene de esta forma un sistema de ecuaciones lineales:

$$\left[\frac{d\vec{T}_s}{dt}\right] = [S]\vec{T}_s + [W]T_f \quad (2.25)$$

con la condición inicial:

$$\vec{T}_s(0) = \vec{T}_0 \quad (2.26)$$

Si L es el número de nodos en que se ha discretizado la esfera las dimensiones de las matrices y vectores son:

$$\vec{T}_s: L \times 1$$

$$[S]: L \times L$$

$$[W]: L \times 1$$

Para resolver el sistema de ecuaciones anterior se realiza un cambio de base a la base modal, es decir, a una base donde los vectores básicos son los autovectores de la matriz $[S]$. De esta forma queda diagonalizada la matriz y puede integrarse fácilmente. Los autovalores λ_i se calculan resolviendo el siguiente sistema, donde \vec{v}_i son los autovectores:

$$([S] - \lambda_i)\vec{v}_i = 0 \quad (2.27)$$

El cambio de base se hace mediante la matriz $[P]$ construida con los autovectores puestos por columnas:

$$\vec{T}_s = [P]\vec{X} \quad (2.28)$$

donde $[P]$ es cuadrada de dimensión igual al número de nodos en que se ha discretizado la esfera. En la base modal, aplicando la integral de Duhamel se tiene:

$$\vec{X}(t + \Delta t) = [\Phi(\Delta t)]\vec{X}(t) + \int_0^{\Delta t} [\Phi(\Delta t - \tau)][P]^{-1}[W]T_f d\tau \quad (2.29)$$

donde la matriz de transición de estados es:

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_L t} \end{bmatrix}$$

Si $T_f(\tau)$ se aproxima linealmente en el intervalo de tiempo $(t, t + \Delta t)$ puede integrarse la ecuación 2.29. En las base inicial se obtiene:

$$\vec{T}_s(t + \Delta t) = [L]\vec{T}_s(t) + [E'] [W]T_f(t) + [F'] [W]T_f(t + \Delta t) \quad (2.30)$$

donde:

$$[L] = [P][\Phi(\Delta t)][P']$$

$$[E'] = [P][E][P']$$

$$[F'] = [P][F][P']$$

Las matrices $[E]$ y $[F]$ son diagonales siendo sus elementos:

$$e_{ii} = \frac{1}{\lambda_i} \left[e^{\lambda_i \Delta t} + \frac{1 - e^{\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i \Delta t} \right] \quad (2.31)$$

$$f_{ii} = \frac{1}{\lambda_i} \left[-1 - \frac{1 - e^{\lambda_i \Delta t}}{\lambda_i \Delta t} \right] \quad (2.32)$$

La expresión 2.30 muestra que la temperatura de cualquier nodo de la partícula en el instante $t + \Delta t$ se puede calcular a partir de los valores de temperatura de la partícula en los instantes anteriores y de la temperatura del fluido en el instante de cálculo. De esta forma pueden acoplarse directamente las ecuaciones de balance de energía siendo las incógnitas las temperaturas del fluido.

2.5.2 Algoritmo de resolución

El planteamiento desarrollado en apartados anteriores de este capítulo conduce a un sistema de ecuaciones lineales representado por una matriz de dimensión $(M + 1) \times N$ siendo M el número de nodos en la dirección radial y N el número de nodos en la dirección axial. Esta matriz contiene numerosos nodos puesto que las derivadas segundas sólo implican a los nodos más cercanos al nodo en que se plantean. El ancho de banda resulta ser $2(M + 1) + 1$. El sistema de almacenamiento utilizado hace uso de esta característica de la matriz ahorrando espacio en memoria.

La solución del sistema se lleva a cabo por un método "línea a línea" que puede encontrarse en Patankar (1.980). Supongamos que la ecuación para una variable T en una sección transversal del lecho es:

$$a_P T_P + a_S T_S + a_N T_N + a_W T_W + a_E T_E = b \quad (2.33)$$

El método línea a línea consiste en conseguir una matriz con ancho de banda 3. Si se suponen conocidas T_N y T_S , que son las temperaturas en las filas inmediata anterior y posterior a la de cálculo:

$$a_P T_P + a_W T_W + a_E T_E = b - a_S T_S^0 - a_N T_N^0 \quad (2.34)$$

la matriz resultante es tridiagonal con lo cual puede utilizarse el algoritmo TDMA ("Tridiagonal Matrix Algorithm"). Una vez recorrido el lecho se calculan los residuos de la ecuación como $Max_i | \sum_j a_{ij} T_j - b_i |$ y se vuelve a iterar si es necesario utilizando los últimos valores calculados de las temperaturas. El conjunto del algoritmo está programado en FORTRAN 77.

Capítulo 3

Validación del modelo

3.1 Introducción

En la etapa de modelización se han realizado hipótesis simplificadoras que han permitido llegar a un modelo matemático de representación de la realidad física. La cuestión que ahora se plantea es la adecuación del modelo a esa realidad.

La validación del modelo puede llevarse a cabo de muy diferentes modos, todos ellos complementarios. Un primer nivel de validación es la comprobación analítica de partes del modelo con soluciones parciales, esto es, comprobación de mecanismos simples que intervienen en el modelo. Un segundo nivel es la comparación de los resultados del modelo con datos obtenidos experimentalmente.

En este capítulo se va a abordar la validación del modelo del comportamiento térmico de lechos de partículas sólidas en las siguientes fases:

- 1.- Comprobación del modelo de conducción en las partículas sólidas con soluciones analíticas particulares.
- 2.- Comparación de los resultados del modelo con los obtenidos con modelos unidimensionales y datos experimentales de un lecho de esferas de acero referidos por Saez (1.981).
- 3.- Comparación de los resultados del modelo con datos experimentales y un modelo bidimensional presentados por Beasley (1.983).

Finalmente se mostrará el efecto que tienen en los resultados la elección de los parámetros necesarios para la discretización espacio-temporal del dominio de estudio.

3.2 Modelo de conducción en la partícula sólida

La conducción se ha resuelto a partir de un método de variables de estado mediante el cual se llega a una expresión cerrada de la temperatura superficial de la partícula en un instante dado a partir de valores conocidos del instante anterior y la temperatura del fluido en el instante de cálculo (ver capítulo 2).

En este apartado se comprobará que el modelo de conducción es adecuado a partir de la comparación de los resultados obtenidos con el modelo con una solución analítica particular. Se trata del enfriamiento de una esfera de radio r inmersa en un medio de temperatura nula. Matemáticamente la formulación es la que sigue:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

siendo α_s la difusividad térmica del sólido y T_s su temperatura. Las condiciones de contorno son:

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} = -\frac{h_s}{k_s} T_s \quad \text{en} \quad r = D_p/2 = R_p \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} = 0 \quad \text{en} \quad r = 0 \quad (3.3)$$

y la condición inicial:

$$T_s = F(r) \quad \text{para} \quad 0 \leq r \leq R_p \quad (3.4)$$

La solución analítica del problema puede encontrarse en Ozisik (1.980), obtenida mediante separación de variables:

$$T_s(r, t) = \frac{2}{r} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha_s \beta_m^2 t} \frac{\beta_m^2 + K^2}{R_p(\beta_m^2 + K^2) + K} \text{sen}(\beta_m r) \int_0^{R_p} \xi F(\xi) \text{sen}(\beta_m \xi) d\xi \quad (3.5)$$

donde:

$$K = \frac{h_s}{k_s} - \frac{1}{R_p} \quad (3.6)$$

β_m son las raíces positivas de la ecuación característica, que tiene la siguiente forma para una esfera:

$$\beta_m R_p \cot g(\beta_m R_p) + R_p K = 0 \quad (3.7)$$

Integrando para $F(\xi) = \text{constante}$, la ecuación queda en la forma:

$$T_s(r, t) = \frac{2F(r)(1 + R_p K)}{r} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha_s \beta_m^2 t} \frac{\beta_m^2 + K^2}{R_p(\beta_m^2 + K^2) + K} \text{sen}(\beta_m R_p) \text{sen}(\beta_m r) \quad (3.8)$$

Para comparar con los resultados del modelo se define una esfera de diámetro $D_p = 5 \text{ cm}$, con $F(\xi) = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_s = 23.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ y las siguientes características:

$$\begin{aligned} k_s &= 1.16 \text{ W/mK} \\ \rho_s &= 2371 \text{ kg/m}^3 \\ C_{p_s} &= 0.84 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos vía analítica y numérica se muestran en las figuras 3.1 y 3.2 para la temperatura media y superficial de la esfera en función del número de segmentos en que se divide la esfera para la obtención de la solución numérica. Se muestra igualmente en estas figuras el tiempo de CPU utilizado para la consecución de la solución. Se ha utilizado como parámetro de comparación el error relativo definido por la ecuación 3.9, tanto para la temperatura media como para la superficial:

$$\varepsilon = \frac{|T_{sa} - T_{sn}|}{T_{sa}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

CASO	1	2	3	4
Caudal másico ($kg/s m^2$)	1.581	1.581	2.804	0.839
Temperatura inicial ($^{\circ}C$)	26.1	26.1	27.1	27.1
Temperatura de entrada ($^{\circ}C$)	64.7	64.7	62.7	62.7
Altura de medida (cm)	24.2	13.6	24.2	24.2

Tabla 3.1: Casos considerados.

donde, T_{sa} y T_{sn} son las temperaturas del sólido calculadas analítica y numéricamente.

Como era previsible el error disminuye al hacer más fina la discretización. Lo contrario ocurre con el tiempo de CPU. De la observación de las figuras puede concluirse que el error es menor del 1% en cualquier caso, tanto para la temperatura media como para la superficial. El tiempo de cálculo por otra parte es prácticamente lineal. Queda probado por lo tanto, que el modelo de conducción utilizado es capaz de reproducir la solución analítica con una precisión sobrada y con un coste de tiempo aceptable.

3.3 Comparación con modelos unidimensionales y datos experimentales

La segunda etapa de validación del modelo consistirá en comparar los resultados del modelo con los obtenidos experimentalmente por Vanden y Clark (recogidos por Saez (1.981)). Además se considerarán resultados de modelos unidimensionales para el mismo lecho experimental.

Los datos experimentales se refieren a un lecho de diámetro $D_l = 8 \text{ cm}$, longitud $L = 24.2 \text{ cm}$ con esferas de acero de diámetro $D_p = 0.5566 \text{ cm}$. La temperatura de entrada del aire se mantiene constante y se considera el lecho perfectamente aislado. Se consideran cuatro casos descritos en la tabla 3.1.

Las propiedades físicas de las dos fases del lecho (el subíndice **f** indica fluido y **s** sólido) se evalúan a la temperatura media entre la inicial y la final y se muestran a continuación:

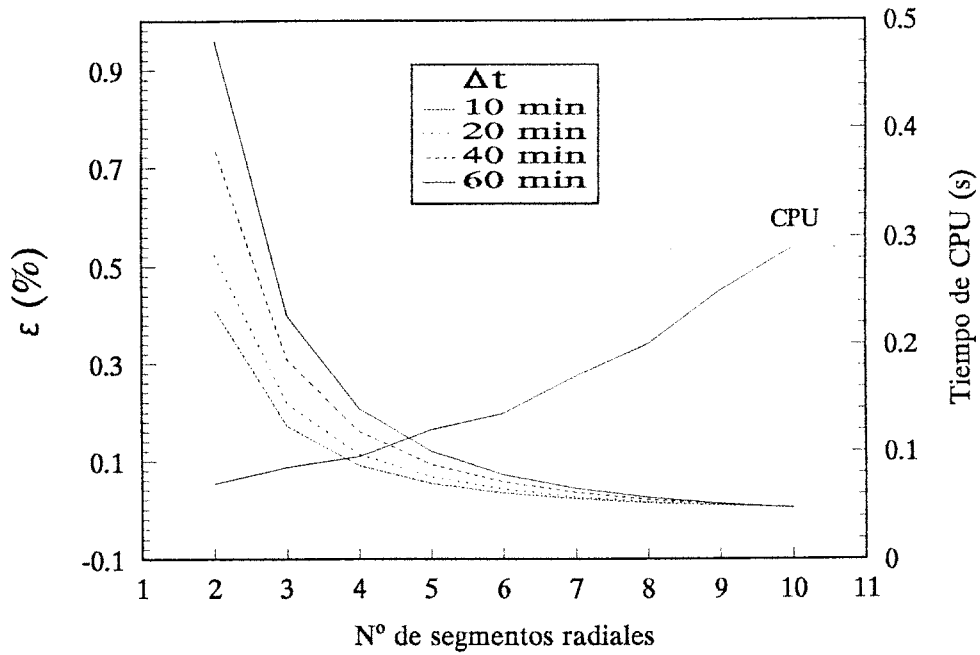


Figura 3.1: Error relativo para la temperatura superficial.

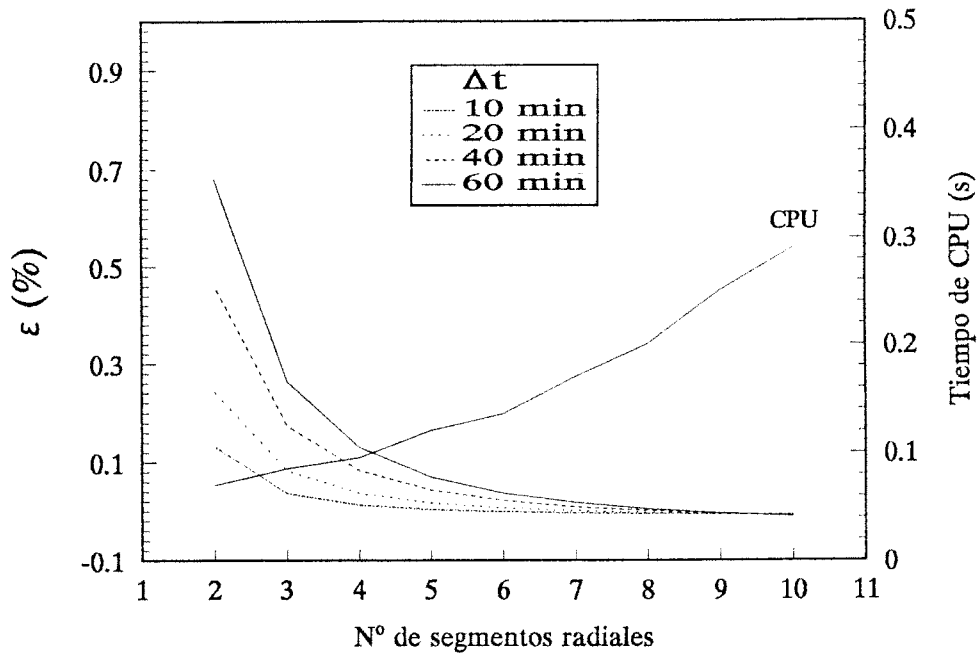


Figura 3.2: Error relativo para la temperatura media.

MODELO	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Vanden Breok	2.8	5.3	3.2	4.0
Riaz	8.1	5.6	5.6	9.0
Saez	2.2	3.5	3.2	2.9
Isbeyed	0.8	1.4	1.4	0.7

Tabla 3.2: Desviación absoluta según cada modelo.

$$\begin{aligned}
\rho_f &= 1.11 \text{ kg/m}^3 \\
Cp_f &= 1.047 \text{ kJ/kgK} \\
k_f &= 0.027 \text{ W/mK} \\
\mu_f &= 1.92 \times 10^{-5} \text{ kg/ms} \\
\rho_s &= 7850 \text{ kg/m}^3 \\
Cp_s &= 0.494 \text{ kJ/kgK} \\
k_s &= 46.1 \text{ W/mK}
\end{aligned}$$

Se ha utilizado para comparar los diferentes modelos y los datos experimentales la desviación absoluta definida por Saez (1.981):

$$\delta_a = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |T_{fc} - T_{fm}| dt \quad (3.10)$$

siendo T_{fc} y T_{fm} las temperaturas del aire calculadas y medidas respectivamente. Para adaptar el modelo desarrollado en esta Tesis a las condiciones particulares del caso ha sido necesario anular la capacidad térmica de la pared así como el coeficiente de película con ésta. De esta forma el modelo cumple la condición de pared del lecho adiabática.

Los resultados de desviación absoluta entre el modelo propuesto y los presentados en Saez (1.981) se muestran en la tabla 3.2. Las figuras 3.3 a 3.6 recogen la evolución con el tiempo de las temperaturas del aire medidas o calculadas en la posición que se indica en la tabla 3.1.

Los resultados muestran que las desviaciones absolutas obtenidas con el modelo propuesto son menores de la mitad de la menor de las desviaciones obtenidas con los otros modelos. En el caso 4 la desviación absoluta es aproximadamente el 25% de la menor desviación obtenida con los otros modelos. El modelo propuesto es, como queda demostrado, el que mejores resultados obtiene no sólo en el valor de la desviación ab-

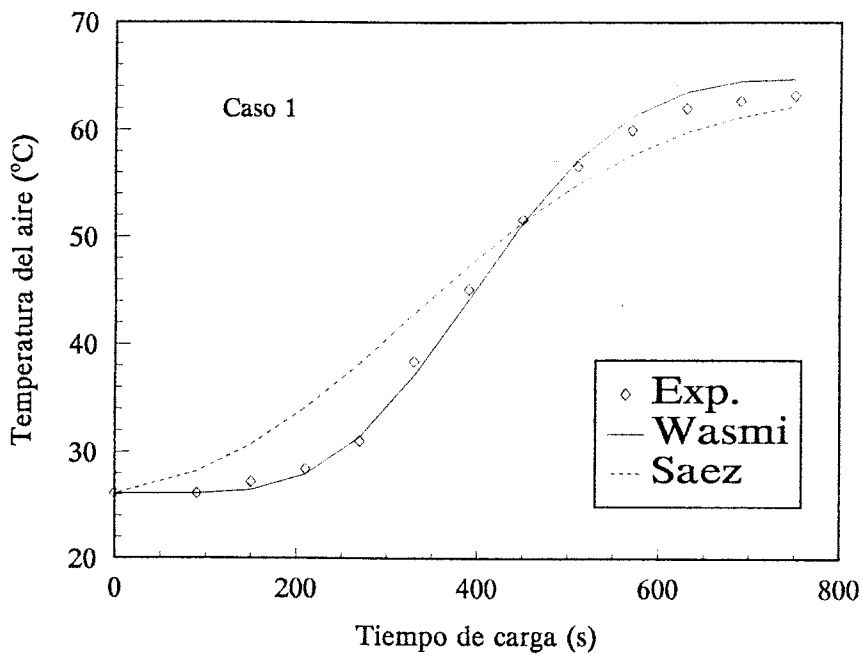


Figura 3.3: Comparación con el modelo de Saez y datos experimentales para el caso 1.

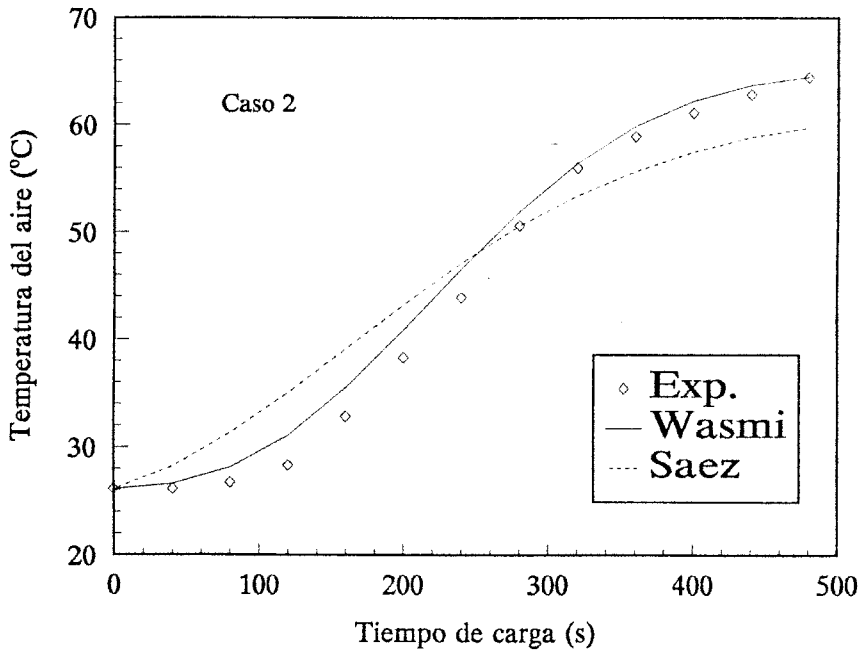


Figura 3.4: Comparación con el modelo de Saez y datos experimentales para el caso 2.

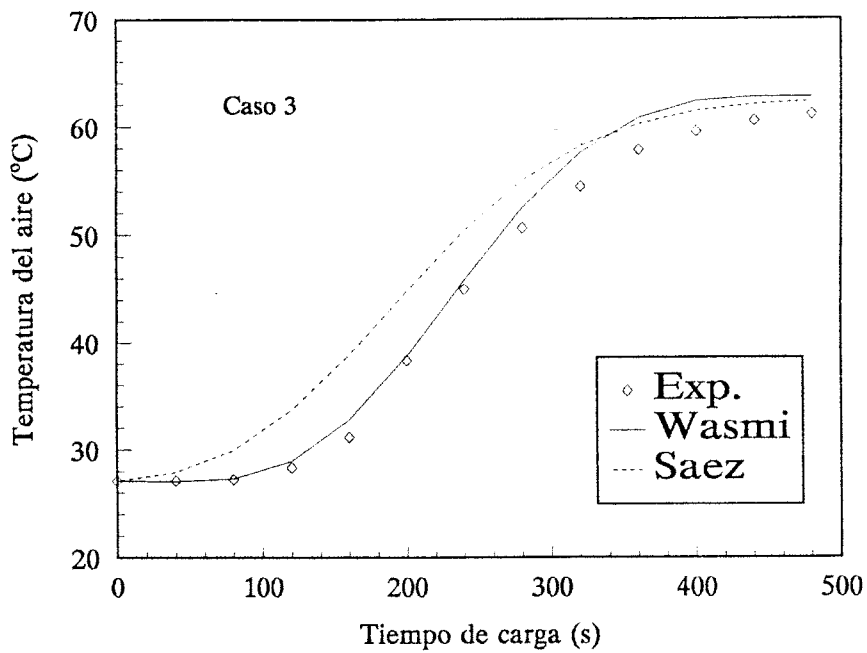


Figura 3.5: Comparación con el modelo de Saez y datos experimentales para el caso 3.

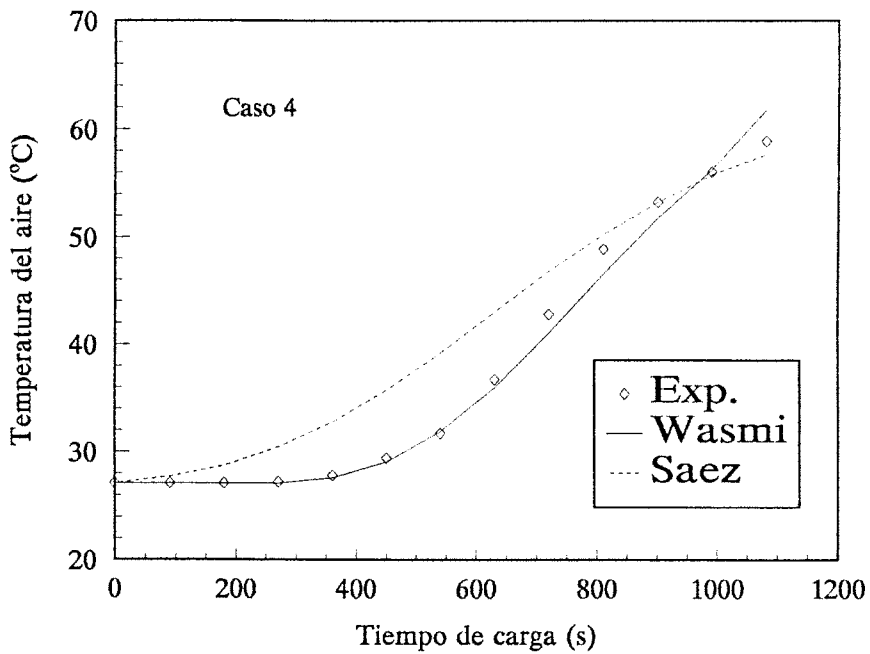


Figura 3.6: Comparación con el modelo de Saez y datos experimentales para el caso 4.

soluto sino en la evolución con el tiempo de la temperatura del aire, como ponen de manifiesto las figuras 3.3 a 3.6.

Las diferencias fundamentales que explican el mejor comportamiento del modelo propuesto son:

- 1.- Los modelos empleados en la comparación son unidimensionales. La porosidad y la velocidad no varían radialmente. Además se consideran las partículas sólidas como sistemas de capacidad.
- 2.- Los coeficientes de película que resultan de las correlaciones utilizadas en el modelo propuesto en esta Tesis, son menores que los utilizados por el resto de los modelos considerados para comparar (del orden de la mitad en los tres primeros casos). Para la conductividad efectiva se tiene lo contrario, es decir, los valores utilizados por el resto de los modelos son del orden del doble de los utilizados en el modelo propuesto.

3.4 Comparación con modelo bidimensional y datos experimentales.

La tipología de lechos que se utilizan para almacenamiento de energía difiere de la considerada anteriormente. Para que la validación sea completa es necesario comparar los resultados del modelo con otros datos, a ser posible experimentales, obtenidos con lechos lo más parecido posible a los utilizados en la práctica. Esta fase es la que se expone a continuación.

En el caso de lechos de rocas utilizados en la edificación el estudio de la conducción en las partículas sólidas debe ser más cuidadoso que en el caso anterior puesto que tiene mayor diámetro y menor conductividad que las esferas de acero del caso anterior.

La comparación que a continuación se presenta se ha llevado a cabo utilizando un lecho de rocas de tamaño comercial. Los datos experimentales así como el modelo bidimensional de referencia se describen en Beasley (1.983). Se trata de un lecho de 7 m^3 de volumen inicialmente a una temperatura uniforme el lecho y las paredes de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, sometido a un escalón de temperatura a partir del instante $t = 0$ conseguido haciendo vehicular un caudal constante de aire, que entra en el lecho a una temperatura de $61 \text{ }^\circ\text{C}$. El lecho y las características de funcionamiento se recogen en la tabla 3.3.

Para la aplicación del modelo propuesto se han seleccionado los siguientes parámetros de discretización (con posterioridad se analizará el efecto de cada parámetro en el re-

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
Diámetro de roca (D_p)	4.45	cm
Propiedades de roca:		
- Densidad (ρ_s)	2371	kg/m ³
- Calor específico (Cp_s)	0.840	kJ/kgK
Caudal másico (\dot{m})	0.131	kg/s m ²
Propiedades de la pared:		
- Densidad (ρ_w)	480.6	kg/m ³
- Calor específico (Cp_w)	1.26	kJ/kgK
- Conductividad (k_w)	0.173	W/mK
Diámetro del lecho (D_l)	2.24	m
Espesor de la pared	1.0	cm
Longitud del lecho (L)	2.0	m
Area transversal (A_l)	3.93	m ²
Coefficiente global de pérdidas (U_∞)	1.82	W/m ² K

Tabla 3.3: Características del lecho de rocas definido por Beasley (1.983).

sultado del modelo):

Segmentos radiales en partícula sólida: L=8
 Segmentos axiales en lecho: N=28
 Segmentos radiales en lecho: M=10
 Paso de tiempo: $\Delta t=1$ min

Los resultados del modelo propuesto en esta Tesis así como del modelo de Beasley (1.983) junto con los datos medidos se muestran en la figura 3.7. Se representan las temperaturas del aire medidas en el eje central del lecho para diferentes alturas y parametrizadas en función del tiempo.

En general puede afirmarse que los resultados obtenidos con el modelo propuesto se ajustan con suficiente precisión a los datos experimentales. No existen grandes diferencias entre los dos modelos considerados y los datos experimentales, aunque el mejor ajuste se consigue con el modelo propuesto. La diferencia fundamental entre los dos modelos hay que buscarla en el modelo de conducción que incorporan. El modelo de Beasley (1.983) utiliza, para establecer el balance entre las dos fases del lecho, la temperatura media de la partícula. El modelo propuesto no necesita hacer esta simplificación, utilizándose directamente la temperatura superficial de la partícula sólida. En casos en que la diferencia entre la temperatura media y la superficial sea mayor (altos números de Biot) el modelo de Beasley responderá peor que el modelo propuesto. Por

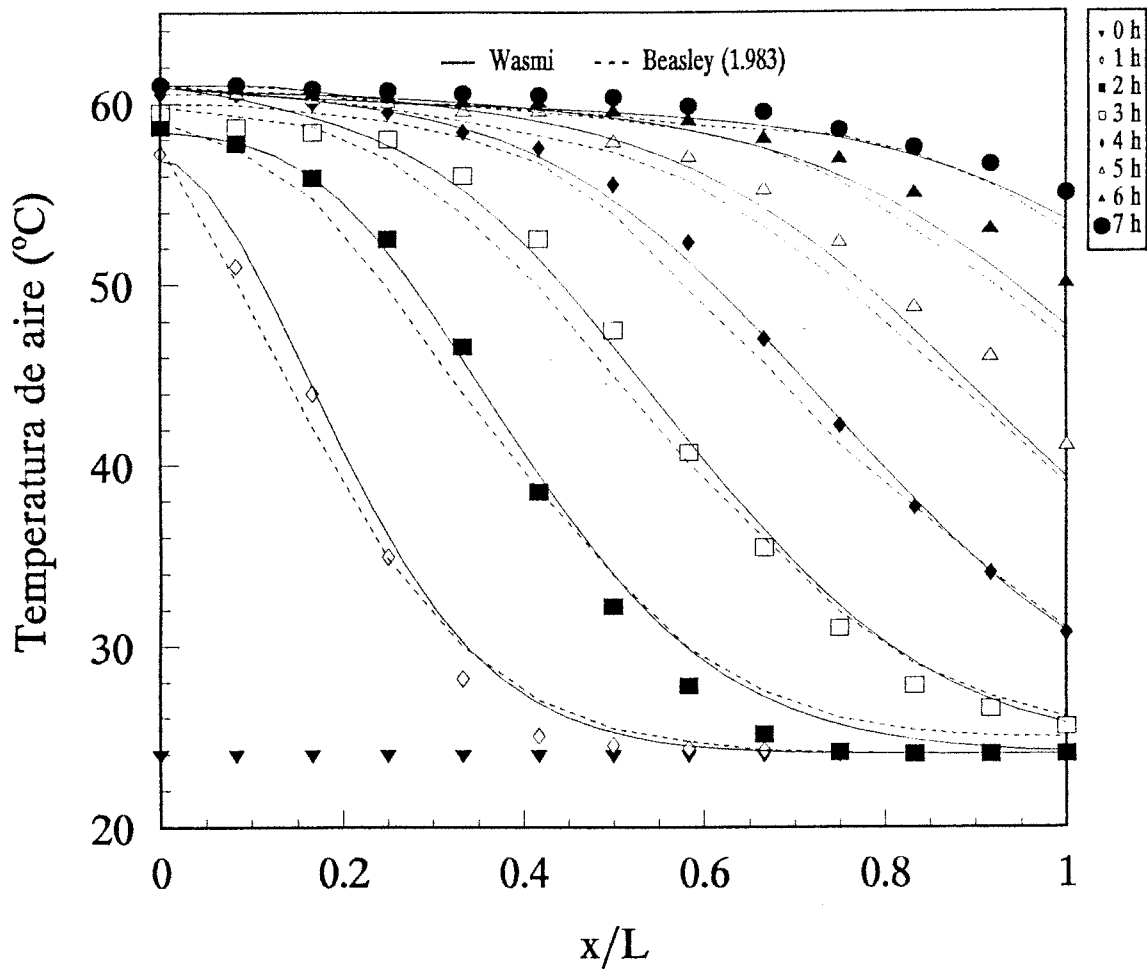


Figura 3.7: Comparación con el modelo de Beasley y datos experimentales.