materia

Experimentación en Química Industrial 1

unidade didáctica 2

Condución de calor en réxime non estacionario: determinación de propiedades de transporte

María José Vázquez Vila
Departamento de Enxeñaría Química
Facultade de Ciencias

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA
VICERREITORÍA DE ESTUDANTES, CULTURA E FORMACIÓN CONTINUA

titulación

Grao en Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

unidade **didáctica 2**

Condución de calor en réxime non estacionario: determinación de propiedades de transporte

María José Vázquez Vila

Departamento de Enxeñaría Química
Facultade de Ciencias

unidadedidáctica
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Deseño
Unidixital
Servizo de Edición Dixital
da Universidade de Santiago de Compostela

Edita
Vicerreitoría de Estudantes,
Cultura e Formación Continua
da Universidade de Santiago de Compostela
Servizo de Publicacións
da Universidade de Santiago de Compostela

Imprime
Unidixital

Dep. Legal: C 266-2013
ISBN 978-84-9887-996-4

MATERIA: Experimentación en Química Industrial 1
TITULACIÓN: Grao en Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais
PROGRAMA XERAL DO CURSO
Localización da presente unidade didáctica

Unidade I. Transporte de fluídos

Práctica 1
Calibrado dun estreitamento para a medida de caudais de líquido

Práctica 2
Perdas de presión a través dun leito de recheo

Práctica 3
Ecuación de Bernouilli

Práctica 4
Curvas características dunha bomba centrífuga

Práctica 5
Sedimentación

Unidade II. Transmisión de calor

Práctica 6
Condución de calor en réxime non estacionario: determinación de propiedades de transporte

Unidade III. Transferencia de materia

Práctica 7
Curvas de solubilidade en sistemas líquido-líquido

Práctica 8
Absorción gas-líquido

Práctica 9
Destilación diferencial

Práctica 10
Rectificación descontinua

Práctica 11
Lixiviación

Unidade IV. Transferencia de materia e transmisión de calor

Práctica 12
Determinación da temperatura húmida do aire

Práctica 13
Secado de sólidos

ÍNDICE

PRESENTACIÓN

A unidade didáctica *Condución de calor en réxime non estacionario: determinación de propiedades de transporte* está incluída na materia *Experimentación en Química Industrial 1* que se imparte no primeiro semestre do terceiro curso do grao en *Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais*, é de carácter obrigatorio e pertence ao bloque de tecnoloxía específica en Química Industrial. É unha materia, de carácter totalmente práctico, polo tanto o seu desenvolvemento farase integramente no laboratorio.

A materia divídese en 48 horas de prácticas de laboratorio e 3 horas de titorías en grupo, actividades todas elas de carácter presencial obrigatorio.

O profesor ten ao seu cargo ata 25 estudantes que estarán no laboratorio realizando prácticas durante 16 días en sesións de 3 horas. A presente unidade didáctica terá unha duración aproximada de 9 horas.

Así nesta materia preténdese poñer en práctica os coñecementos teóricos adquiridos noutras materias estudadas durante o primeiro e segundo curso da titulación, como son: *Fundamentos da Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais*, *Operacións Básicas*, *Transferencia de Materia*, *Transporte de Fluídos* e *Transmisión de Calor*.

Concretamente esta unidade didáctica correspóndese con algúns dos contidos traballados nas materias *Operacións Básicas* e *Transmisión de Calor*.

OS OBXECTIVOS

O obxectivo xeral da materia é por en práctica unha boa parte dos conceptos aprendidos e traballados nas materias da área de enxeñaría química do primeiro e segundo curso.

Esta unidade didáctica ten como obxectivos específicos os seguintes:

- recoñecer os mecanismos de transmisión de calor;
- saber analizar os datos experimentais obtidos e interpretar a teoría que os explica;
- obter o valor da difusividade térmica (α) e a condutividade térmica (k) dunha mostra líquida contida nun recipiente de xeometría coñecida mediante un método analítico;
- manexar os gráficos de Gurney-Lurie para cálculos en estado non estacionario.

METODOLOXÍA

Tendo en conta que a materia na que se inclúe a unidade didáctica que se presenta é totalmente práctica, é necesario indicar que os conceptos teóricos da unidade xa se viron noutras materias.

Polo tanto é moi importante que o alumnado teña estudadas as materias dos cursos anteriores co fin de sacarlle o maior proveito á realización das prácticas nesta materia.

A continuación detállase a metodoloxía docente empregada en todas as unidades didácticas da materia *Experimentación en Química Industrial 1*.

A materia impártese durante 16 días en sesións de 3 horas, neses días o estudante realizará catro de todas as prácticas propostas (unha de cada unidade didáctica). Antes de empezar a práctica no laboratorio intentarase que o estudante coñeza as prácticas que vai realizar e os compoñentes do seu grupo de traballo. Os grupos formaranse na titoría que haberá ao comezo do curso. No Campus Virtual proporcionaráselles aos estudantes os guións de todas as prácticas contidas na materia.

No Campus Virtual tamén se lles informa das Normas Xerais de Seguridade nos Laboratorios de Prácticas da USC (NPR-20). O primeiro día de prácticas o estudante asina un escrito que di que coñece e que vai cumprir as normas esixidas no traballo no laboratorio.

O estudante tamén deberá buscar e coñecer as fichas de seguridade dos reactivos utilizados nas prácticas que vai realizar.

O alumnado deberá facer unha lectura dos guións das prácticas e da bibliografía complementaria (inclúese unha orientativa en cada guión) antes da realización das mesmas. Así o estudante poderá ter claro en que consiste a práctica que van realizar no laboratorio, que variables van estudar, que experimentos deben realizar, así como que datos deben tomar. Deben analizar os fundamentos teóricos, para evitar erros na execución da práctica. É necesario preparar cada experimento pois dará bos froitos no traballo no laboratorio. É moi importante ter claro, antes de comezar a realización experimental, os obxectivos e os procedementos da unidade didáctica. O profesor responsable dos grupos de prácticas resolverá as dúbidas sobre as mesmas.

Esta preparación da práctica será contrastada co profesor de prácticas antes do inicio do procedemento experimental. Os estudantes antes do comezo de cada práctica responderán unha serie de cuestións que realizará o profesor sobre a práctica en cuestión.

O alumnado terá un caderno de laboratorio (nunca follas soltas), único para cada grupo, onde deben anotarse os procedementos, material de laboratorio utilizado, datos experimentais e datas, de forma que calquera persoa poida reproducir os resultados dos experimentos.

O alumnado presentará na data acordada unha memoria de todas as prácticas na que incluirá os seguintes apartados: Título da práctica, Obxectivos, Fundamentos teóricos, Materiais e Métodos, Resultados e Discusión, Conclusións, Causas de erro, Referencias Bibliográficas, e Apéndices (Anexos).

O traballo persoal e autónomo do estudante divídese entre a realización da memoria de prácticas e o tratamento dos datos experimentais obtidos (85 horas) e a preparación e realización do exame final (9 e 3 horas, respectivamente).

OS CONTIDOS

Nesta unidade didáctica inclúese a parte teórica e dedución das expresións matemáticas correspondentes á transmisión de calor por condución en réxime non estacionario necesarias para o tratamento dos datos experimentais que se obterán cando se traballe esta unidade didáctica.

En primeiro lugar defínense dous módulos adimensionais, o Biot e o Fourier, que se usan na transmisión de calor e que se teñen en conta nesta unidade didáctica:

$$Bi = \frac{resistencia\ interna\ a\ la\ transmisión\ de\ calor}{resistencia\ externa\ a\ la\ transmisión\ de\ calor} = \frac{L/kA}{1/h_c A} = \frac{Lh_c}{k}$$

$$Fo = \frac{flujo\ de\ calor\ por\ conducción}{flujo\ de\ calor\ almacenado} = \frac{\alpha\, t}{L^2} = \frac{(k/\rho C_P)\, t}{L^2}$$

onde k é a condutividade térmica, L a lonxitude característica, A a área de intercambio calorífico, h_c o coeficiente de convección, ρ a densidade do fluído, C_p a calor específica do fluído, t o tempo e α a difusividade térmica.

1. Método analítico

Preséntanse as solucións analíticas para as xeometrías sinxelas que se utilizan nesta unidade didáctica.

A ecuación que representa o proceso de transferencia de calor por condución nunha dirección (se as propiedades físicas son constantes) para as dúas xeometrías citadas é:

lámina
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

cilindro
$$\frac{\partial T}{\partial t} = r\frac{\partial}{\partial r}\left(r\alpha \frac{\partial T}{\partial r}\right) \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right] \quad (2)$$

Para simplificar o problema defínense as seguintes variables adimensionais:

Temperatura adimensional
$$Y = \frac{(T_e - T)}{(T_e - T_o)} \quad (3)$$

Tempo adimensional
$$X_{\text{lámina}} = \frac{\alpha \cdot t}{x_m^2} \quad ó \quad X_{cilindro} = \frac{\alpha \cdot t}{r_m^2} \quad (4)$$

Lonxitude adimensional
$$n_{lámina} = \frac{x}{x_m} \quad ó \quad n_{cilindro} = \frac{r}{r_m} \quad (5)$$

onde T_e é a temperatura do baño, T_o é a temperatura inicial do líquido contido nunha lata cilíndrica, T é a temperatura en cada instante nun punto considerado, α é a difusividade térmica, t o tempo, x_m a distancia do centro ao bordo da lámina, r_m o raio do cilindro e x e r son puntos xenéricos da lámina ou do cilindro, respectivamente.

Introducindo as variables adimensionais obtéñense as seguintes ecuacións diferenciais:

lámina
$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\partial^2 Y}{\partial n^2} \tag{6}$$

cilindro
$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\partial^2 Y}{\partial n^2} + \frac{1}{n}\frac{\partial Y}{\partial n} \tag{7}$$

Nos seguintes apartados resólvense estas ecuacións coas condicións adecuadas.

1.1. Lámina de espesor finito e longo e ancho infinito

Tense unha lámina cun espesor igual a $2x_m$, unha temperatura inicial T_o e unha temperatura que teñen os arredores a un tempo moito maior de 0, T_e.

Poden existir diferentes casos coa transmisión de calor dende a lámina ao medio circundante, é dicir, que haxa ou non resistencia á transmisión de calor. No noso caso suponse que a resistencia é nula ou desprezable.

As condición límite para resolver a ecuación (1) para este caso son:

Condicións inicial: $t=0$ $T=T_o$ (para todo valor de x)
Condicións contorno: $x=x_m$ $T=T_e$ (para todo valor de $t>0$)
$x=-x_m$ $T=T_e$ (para todo valor de $t>0$)

Introducindo as variables adimensionais representadas polas ecuacións (3), (4) e (5) na ecuación (1) temos a ecuación (6), que é a que se resolve tendo en conta as condicións límite presentadas como:

Condición inicial: $X=0$ $Y=1$
Condicións contorno: $n=+1$ $Y=0$
$n=-1$ $Y=0$

polo tanto a ecuación diferencial e as condicións límite quedan nunha forma máis sinxela.

Resólvese polo método de separacións de variables, supoñendo que a solución pode obterse coma o produto de dúas funcións, unha das cales só depende de *X* e a outra de *n*. É dicir, podese postular que o problema admite unha solución na forma:

$$Y(X, n)=f(n)\cdot g(X) \tag{8}$$

Facendo as derivadas correspondentes e desenvolvendo os primeiros termos do sumatorio obtido na resolución, tense:

$$Y = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 X} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{2}\right) - \frac{4}{\pi}\cdot\frac{1}{3} e^{-\left(\frac{3}{2}\pi\right)^2 X} \cdot \cos\left(\frac{3}{2}\pi \cdot n\right) + \ldots \tag{9}$$

e substituíndo os valores correspondentes a *X* e *n* (ecuacións (4) e (5) para unha lámina), obtense o perfil de temperaturas para unha lámina infinita:

$$Y=\frac{4}{\pi}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\alpha\cdot t}{x_m^2}}\cdot\cos\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{x}{x_m}\right)-\frac{4}{\pi}\cdot\frac{1}{3}e^{-\left(\frac{3}{2}\pi\right)^2\frac{\alpha\cdot t}{x_m^2}}\cdot\cos\left(\frac{3}{2}\pi\cdot\frac{x}{x_m}\right)+\ldots \qquad (10)$$

No centro da lámina, $x=0$, a ecuación queda como:

$$Y=\frac{4}{\pi}\left(e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\alpha\cdot t}{x_m^2}}-\frac{1}{3}e^{-\left(\frac{3}{2}\pi\right)^2\frac{\alpha\cdot t}{x_m^2}}+\ldots\right) \qquad (11)$$

Esta solución en forma de serie infinita é típica dos problemas de réxime non estacionario.

Para valores grandes de tempo adimensional a serie converxe rapidamente (só teñen importancia os primeiros termos). Mentres que para tempos curtos a converxencia é moi lenta.

1.2. Cilindro infinito

A ecuación (2) representa o proceso de transferencia de calor por condución na dirección radial nun cilindro se as propiedades físicas son constantes.

Introducindo as variables adimensionais representadas polas ecuacións (3), (4) e (5) na ecuación (2) tense a ecuación (7), que se resolve tendo en conta as condicións límite presentadas como:

$Y(1, X)=0$ (para todo valor de $X>0$)

$\frac{\partial Y}{\partial n}(0,X)=0$ (para todo valor de $X>0$)

$Y(n, 0)=1$ (para $0\leq n<1$)

e a ecuación (7), sendo un sistema estándar de Sturn-Louiville cunha solución matemática como:

$$Y(n,X)=\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2\cdot e^{-\lambda_i^2 X}}{\lambda_i\cdot J_1(\lambda_i)}\cdot J_o(\lambda_i\cdot n) \qquad (12)$$

onde J_1 e J_o son funcións de Bessel de primeira clase, J_o de orde 0 e J_1 de orde 1. E λ_i é unha raíz resultante da solución da ecuación $J_o(\lambda)=0$.

No centro do cilindro ($r=0$) o valor de $J_o(\lambda_i\cdot 0)= J_o(0)= 1$ polo que a ecuación (12) queda como:

$$Y(0,X)=\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2\cdot e^{-\lambda_i^2 X}}{\lambda_i\cdot J_1(\lambda_i)} \qquad (13)$$

calculando os valores de λ_i e substituíndoos na ecuación de Bessel obtéñense os valores correspondentes para λ_i e $J_1(\lambda_i)$.

Considerando o primeiro termo do sumatorio como suficiente para a resolución do problema e os valores de $\lambda_1 = 2,405$ e $J_1(\lambda_1)=0,5191$, na ecuación (13) obtense a solución para un cilindro infinito ($r=0$):

$$Y(0,X)=\frac{2\cdot e^{-2,405^2 X}}{2,405\cdot 0,5191} \qquad (14)$$

reorganizando e substituíndo a ecuación (4) para un cilindro tense:

$$Y = 1,602\cdot e^{-5,784\cdot\frac{\alpha\cdot t}{r_m^2}} \qquad (15$$

2. Método gráfico

Neste apartado preséntanse as gráficas de Gurney-Lurie para as dúas xeometrías traballadas na unidade didáctica. En cada un dos apartados móstranse as variables a ter en conta en cada caso.

2.1. Lámina de espesor finito e longo e ancho infinito

As variables adimensionais no caso da lámina infinita son as definidas nas ecuacións (3), (4) e (5) ademais do parámetro m que é a inversa do Biot.

$$m=\frac{1}{Bi}=\frac{k}{Lh_c} \qquad (16)$$

As variables X e Y preséntanse no eixo *x* e *y*, respectivamente; o valor de n e m aparecen nas escalas internas do gráfico. O gráfico para unha lámina infinita preséntase na figura 1.

Coñecidos os parámetros xeométricos pódense determinar os valores da temperatura nun punto determinado da xeometría estudada ou unha propiedade física descoñecida.

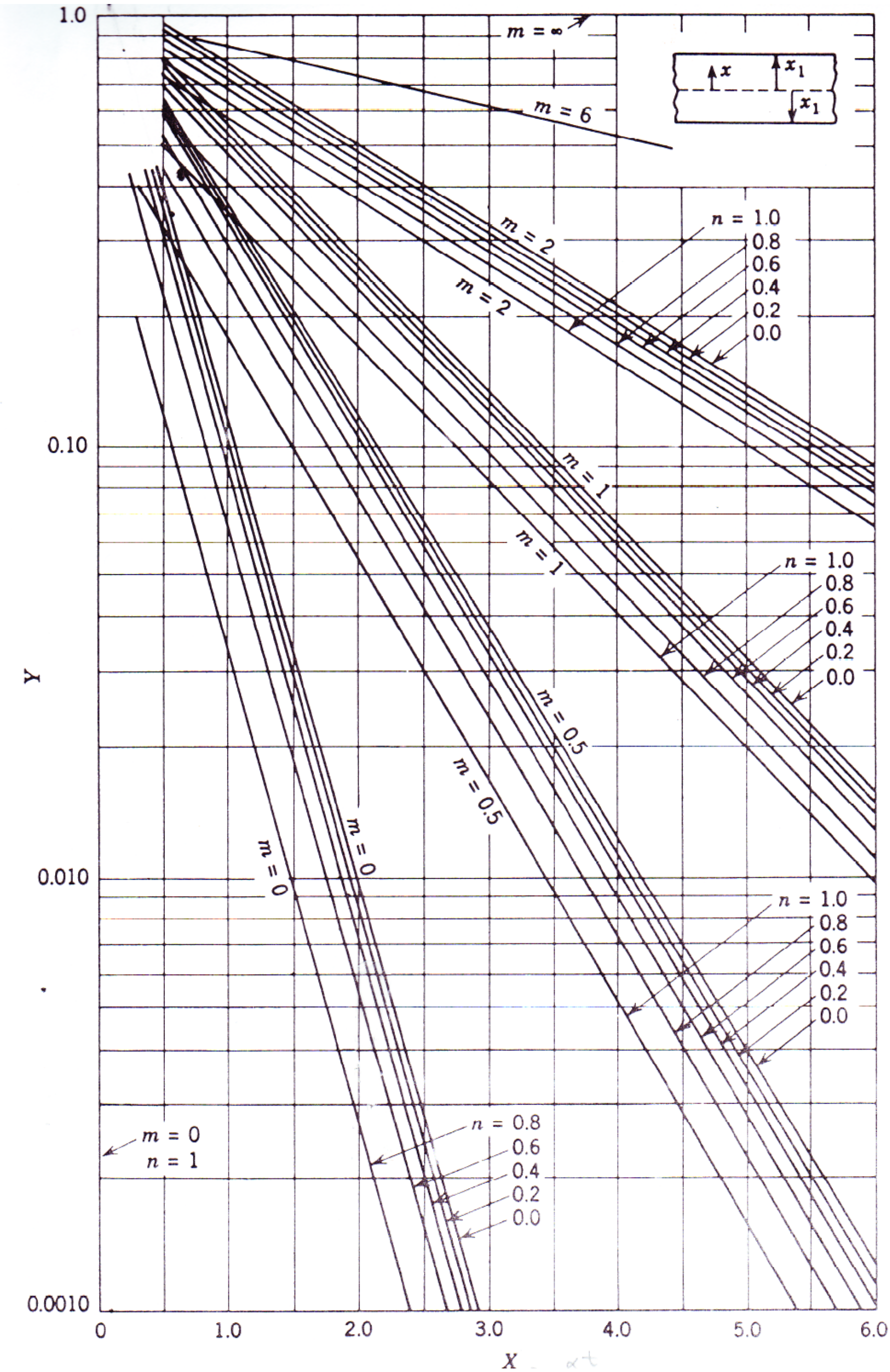

Figura 1. Gráfico de Gurney-Lurie para unha lámina infinita (Welty, 2000)

2.2. Cilindro infinito

As variables adimensionais neste caso son as definidas nas ecuacións (3), (4) e (5) para un cilindro e o parámetro m definido na ecuación (16).

As variables X e Y preséntanse no eixo *x* e *y*, respectivamente; o valor de n e m aparecen nas escalas internas do gráfico. O gráfico para o cilindro infinito preséntase na figura 2.

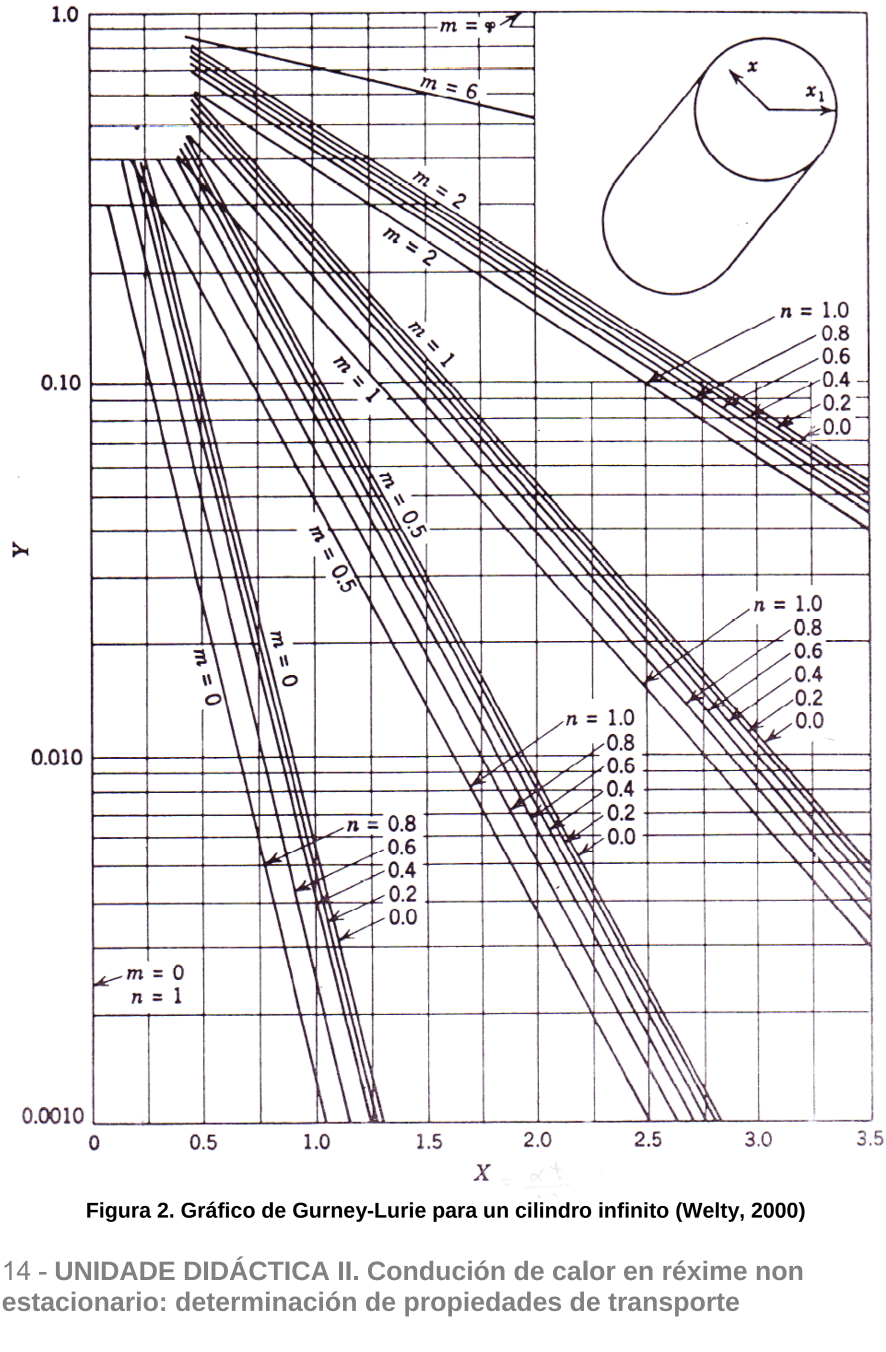

Figura 2. Gráfico de Gurney-Lurie para un cilindro infinito (Welty, 2000)

3. Regra de Newman

Os obxectos que teñen dimensións finitas, como paralelepípedos, cilindros, etc., poden considerarse como a intersección de dous ou máis corpos de dimensións infinitas. O noso caso concreto é un cilindro finito, que é a intersección dunha lámina de caras paralelas, de espesor igual á altura do cilindro e de longo e ancho infinitos, cun cilindro de lonxitude infinita e radio finito. Na figura 3 preséntase a obtención do cilindro finito a partires das xeometrías descritas anteriormente. Na figura 4 móstrase a nomenclatura das dimensións do cilindro finito.

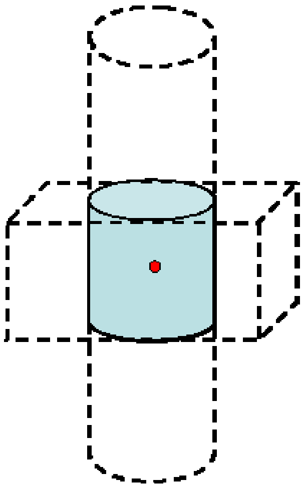

Figura 3. Obtención do cilindro finito

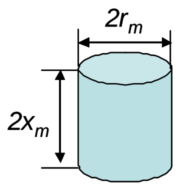

Figura 4. Dimensións do cilindro finito

A regra de Newman vai relacionar as variables adimensionais de temperatura do cilindro finito (Y_{cf}) coas da lámina e cilindro infinitos (Y_{li} e Y_{ci}, respectivamente) da seguinte maneira:

$$Y_{cilindro\ finito} = Y_{lámina\ infinita} \cdot Y_{cilindro\ infinito} \qquad (17)$$

$$Y_{cf} = Y_{li} \cdot Y_{ci} \qquad (18)$$

Tendo en conta o primeiro termo das ecuacións no centro da lámina (11) e do cilindro (15) obtense a ecuación para un cilindro finito como:

$$Y_{cilindro\ finito} = \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot t}{x_o^2}} \cdot 1{,}602 \cdot e^{-5{,}784 \cdot \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2}} \qquad (19)$$

Linealizando obtense unha recta, na que coñecidos os datos xeométricos e a variación da temperatura co tempo, pódese obter o valor da difusividade térmica (α):

$$\ln Y_{cilindro\ finito} = \ln 2{,}040 - \left(\frac{\pi^2}{4x_m^2} + \frac{5{,}784}{r_m^2}\right) \cdot \alpha \cdot t \qquad (20)$$

No tratamento dos datos experimentais teranse en conta as seguintes consideracións:

- condución non estacionaria;
- a diferenza de temperatura entre a superficie do material e o exterior é desprezable (só hai gradiente de temperatura dende a superficie ao interior do material), polo tanto, $Bi \to \infty$;
- o quentamento é efectivo, pois suponse que está axitado;
- a temperatura mídese no centro polo que $r=0$ e $x=0$;
- experimentalmente existe un tempo de indución, polo que só se consideran os datos posteriores ao tempo de indución.

4. Guión de prácticas

Preséntase o guión de prácticas desta unidade didáctica que se proporciona no *Aula Virtual* da materia. Dito guión contén os conceptos básicos para poder desenvolver a unidade didáctica no laboratorio.

CONDUCIÓN DE CALOR EN RÉXIME NON ESTACIONARIO:
determinación de propiedades de transporte.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta práctica refírese á condución de calor en réxime non estacionario, polo que as variables a controlar no laboratorio son temperatura, posición e tempo.
Dado que a xeometría de estudo corresponde a un cilindro finito, é necesario dispoñer das ecuacións adecuadas para tratar os datos experimentais e obter o valor do coeficiente de difusividade térmica, α.
A ecuación de deseño dun corpo xeométrico que se poda construír por intersección de corpos infinitos, obtense como o produto das solucións dos corpos infinitos (regra de Newman). No caso dun bote de tomate, cilindro finito, poderase considerar como a intersección dun cilindro infinito e unha lámina infinita de espesor igual á altura do cilindro finito.
A ecuación que representa o proceso de transferencia de calor (se as propiedades físicas son constantes) para as dúas xeometrías citadas é:

lámina
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (1)$$

cilindro
$$\frac{\partial T}{\partial t} = r\frac{\partial}{\partial r}\left(r\alpha\frac{\partial T}{\partial r}\right) \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right] \qquad (2)$$

Método analítico

Para simplificar o problema defínense as seguintes variables adimensionais:

(Temperatura adimensional)
$$Y = \frac{(T_e - T)}{(T_e - T_o)} \qquad (3)$$

(Tempo adimensional)
$$X_{lámina} = \frac{\alpha \cdot t}{x_m^2} \quad ó \quad X_{cilindro} = \frac{\alpha \cdot t}{r_m^2} \qquad (4)$$

(Lonxitude adimensional)
$$n_{lámina} = \frac{x}{x_m} \quad ó \quad n_{cilindro} = \frac{r}{r_m} \qquad (5)$$

onde T_e é a temperatura do baño, T_o é a temperatura inicial do tomate triturado, T é a temperatura en cada instante nun punto considerado, α é a difusividade térmica, t o tempo, x_m a distancia do centro ao bordo da lámina, r_m o raio do cilindro e x e r son puntos xenéricos da lámina ou do cilindro, respectivamente.

Introducindo as variables adimensionais obtéñense as seguintes ecuacións diferenciais:

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\partial^2 Y}{\partial n^2} \qquad (6)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\partial^2 Y}{\partial n^2} + \frac{1}{n}\frac{\partial Y}{\partial n} \qquad (7)$$

Analiticamente pódense obter as ecuacións para a lámina de espesor finita e para o cilindro infinito. Polo tanto, a expresión a utilizar neste caso será o produto das dúas ecuacións (regra de Newman):

$$Y_{cilindro\ finito} = Y_{lámina\ infinita} \cdot Y_{cilindro\ infinito} \qquad (8)$$

Considerando unicamente o primeiro termo do desenvolvemento en serie que se ten analiticamente para ambas ecuacións, a expresión de $Y_{cilindro\ finito}$ toma a forma:

$$Y_{cilindro\quad finito} = \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot t}{x_m^2}} \cdot 1{,}602 \cdot e^{-5{,}748 \frac{\alpha \cdot t}{r_m^2}} \qquad (9)$$

que reagrupando e aplicando logaritmos será:

$$\ln Y_{cilindro\quad finito} = \ln 2{,}040 - \left(\frac{\pi^2}{4 \cdot x_m^2} + \frac{5{,}784}{r_m^2} \right) \cdot \alpha \cdot t \qquad (10)$$

ecuación que goberna o proceso e será a utilizada para tratar os datos obtidos experimentalmente.

Consideracións.
1.- Condución non estacionaria.
2.- A diferenza de temperatura entre a superficie do material e o exterior é desprezable (só hai gradiente de temperatura desde a superficie ao interior do material) e o quentamento é efectivo, pois o líquido do baño está axitado (Bi $\rightarrow\infty$).
3.- A temperatura mídese no centro, r= 0.
4.- Os datos experimentais (T fronte a t) teñen un comportamento sigmoide; en realidade a dependencia non é exponencial, polo tanto considerarase para a análise os puntos da representación de T fronte a t, para tempos posteriores ao $t_{indución}$, que se corresponden cos posteriores ao punto de inflexión.

Método gráfico
A miúdo as ecuacións analíticas resultan complicadas, de maneira que se pode traballar con gráficas xa existentes, e que permiten resolver o problema de maneira rápida.
Estas gráficas presentan os valores de **Y** en función de **X**, e liñas para os distintos valores de **n** e **m** (m=1/Bi). Existen distintas gráficas segundo as xeometrías, lámina ou cilindro infinitos (gráficas de Gurney-Lurie) que se poden utilizar para estimar valores da temperatura nun punto a un determinado tempo ou o tempo que se tardará en alcanzar certa temperatura nun punto determinado do sólido.
Nas Figuras 1 e 2 preséntanse os gráficos de Gurney-Lurie para unha lámina e un cilindro infinitos.

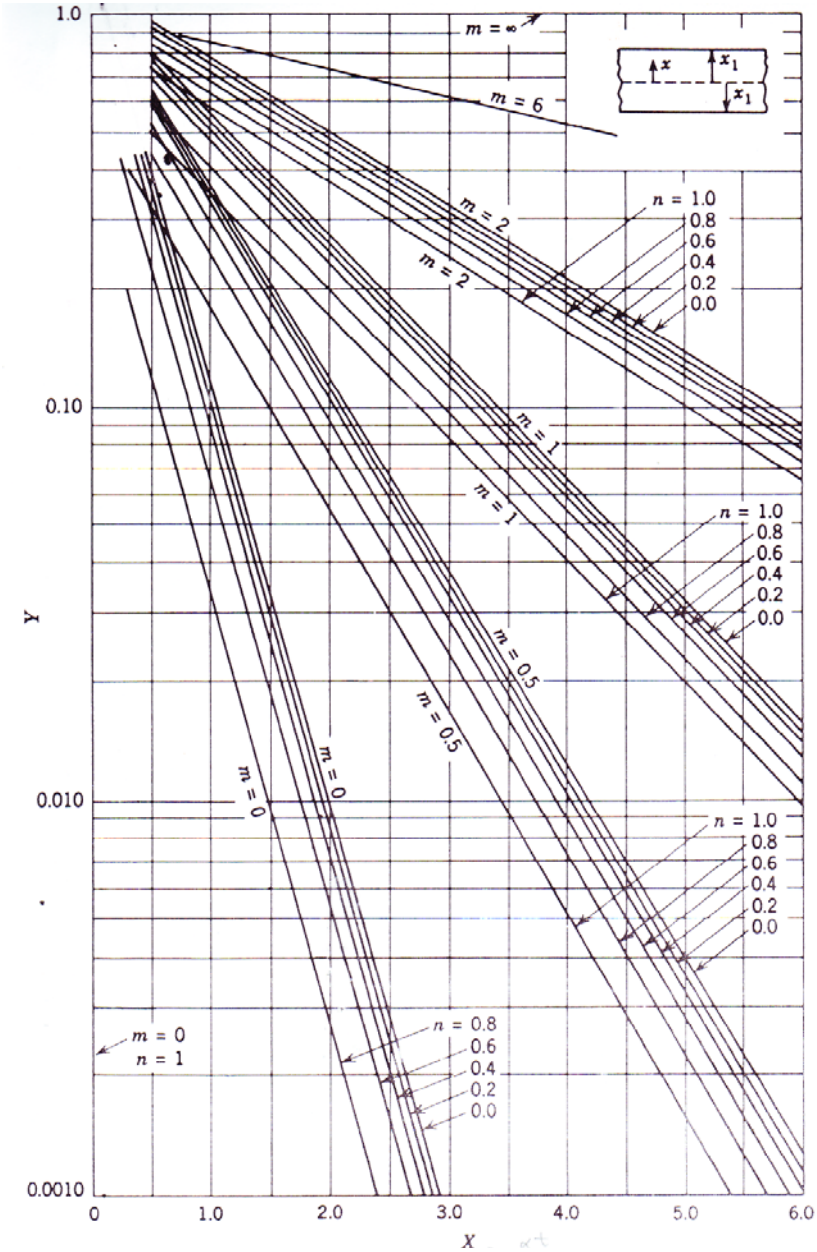

Figura 1. Gráfico de Gurney-Lurie para unha lámina infinita (Welty, 2000)

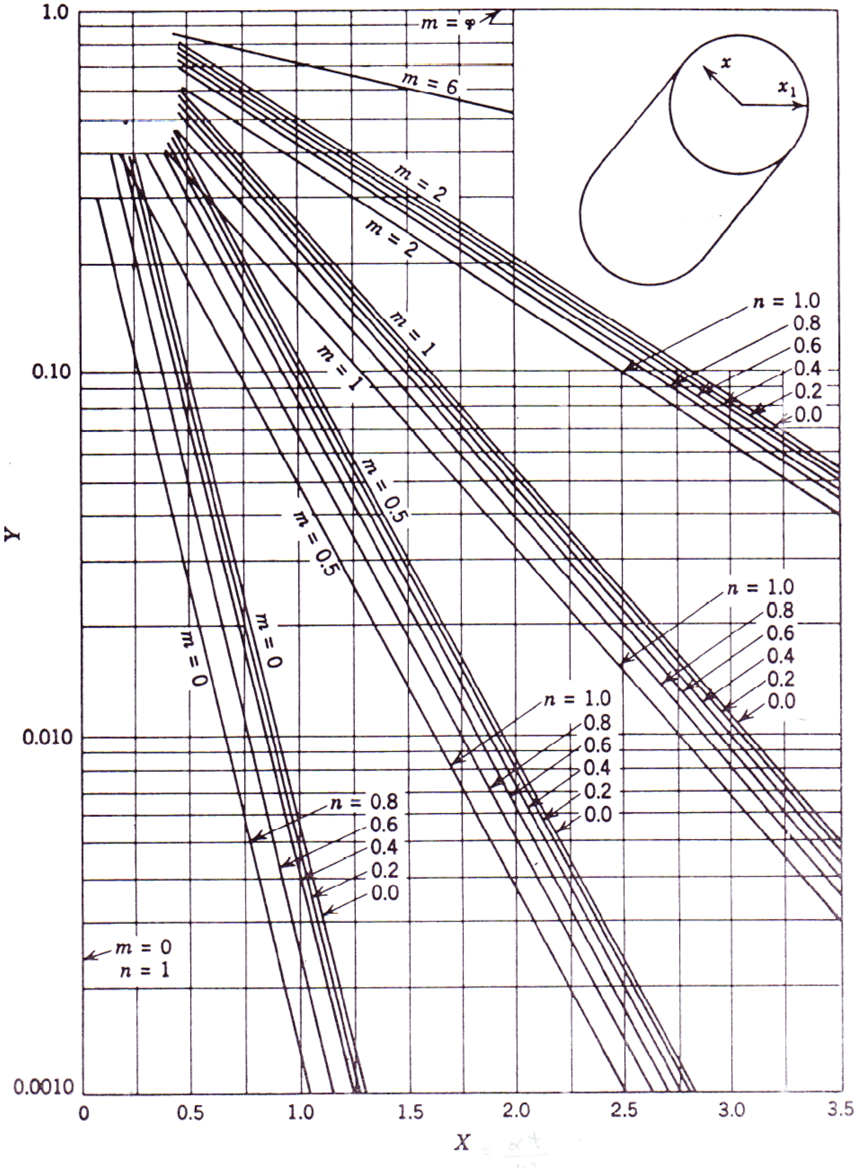

Figura 2 Gráfico de Gurney-Lurie para un cilindro infinito (Welty, 2000)

2. OBXECTIVOS DA PRÁCTICA

Trátase de obter o valor da difusividade térmica (α) dunha mostra líquida contida nun recipiente de xeometría coñecida. Posteriormente, calcúlase a condutividade térmica (k), coñecida a densidade (ρ) e a calor específica (c). O fenómeno estudarase sobre tomate triturado contido nun bote de lata cilíndrico.

3. MATERIAL NECESARIO

- Baño termostático
- Termómetro
- Un soporte, 3 pinzas e 3 noces
- Lata de tomate triturado

4. PROCEDEMENTO EXPERIMENTAL

Seleccionar no baño termostático unha temperatura ao redor de 55°C; a auga do baño debe de estar ben axitada para asegurar un quentamento efectivo do bote. Requírese un bote de tomate triturado de xeometría definida. No devandito bote introducirase un termómetro que tomará a temperatura no centro. Débese asegurar ben o termómetro para que non se desprace nin penetre auga no interior do bote.
Introdúcese o bote de tomate triturado no baño termostático. Iranse tomando datos de temperatura e tempo, por exemplo, para cada grao de variación de temperatura anotarase o tempo transcorrido. Cando a temperatura do tomate triturado estea próxima á temperatura do baño pódese dar por finalizado o experimento.

5. TRATAMENTO DE DATOS EXPERIMENTAIS

Ademais dos datos xeométricos do bote é necesario anotar as temperaturas do baño e do tomate triturado no momento inicial.

Presentaranse dúas táboas:
1) táboa de datos experimentais: temperatura (°C) e tempo (min).
2) táboa dos datos calculados de **Y** e de **ln Y** e tempo (min).

6. RESULTADOS E DISCUSIÓN

Presentar dúas gráficas, que se corresponden cos datos das táboas indicadas anteriormente; a primeira será a de temperatura fronte ao tempo, datos puramente experimentais, e a segunda do **ln Y** fronte ao tempo.

Na discusión de resultados débense comentar as respostas ás seguintes cuestións:

- tendo en conta os fundamentos teóricos e a bibliografía, intentar deducir, e/ou mostrar as etapas básicas da obtención das ecuacións analíticas;
- obter o valor da difusividade térmica do tomate triturado (α, m^2/s);
- calcular o valor da condutividade térmica (k, W/m·K) estimando previamente os datos necesarios;
- supoñendo válido o valor obtido de α estima (utilizando o método gráfico) a temperatura no centro do bote para un tempo de 35 minutos, por exemplo. Explica os pasos a realizar. Compara os resultados cos experimentais e coméntaos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. BIRD, R.B.; STEWART, W.E. e LIGHTFOOT, E.N. (1980): *Fenómenos de trasporte*, Barcelona: Ed. Reverté.

2. CARSLAW, H.S. e JAEGER, J.C. (1959): *Conduction of heat in solids*, Oxford: Oxford University Press.

3. CRANK, J. (1975): *The mathematics of diffusion*, Oxford: Oxford University Press.

4. SINGH, R.P. e HELDMAN, D.R. (1997): *Introducción a la ingeniería de los alimentos*, Zaragoza: Ed. Acribia.

ACTIVIDADES PROPOSTAS

Ao rematar esta unidade didáctica o estudante deberá ter realizadas as seguintes tarefas:

- buscar os conceptos teóricos correspondentes á práctica proposta;
- realizar os experimentos da práctica proposta;
- anotación no caderno de laboratorio dos procedementos, instrumentos/equipas/material de laboratorio utilizado, datos experimentais e datas, para poder analizar os experimentos;
- realización dunha memoria da práctica que recolla os seguintes apartados: Título da práctica, Obxectivos, Fundamentos teóricos, Materiais e Métodos, Resultados e Discusión, Conclusións, Causas de erro, Referencias Bibliográficas, e Apéndices (Anexos).

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

- Valorarase positiva ou negativamente a actitude e aptitude individual do estudante, a súa capacidade para traballar en equipa, para debater co docente e para realizar o traballo experimental, e a presentación do caderno de laboratorio cos comentarios correspondentes á unidade didáctica (20%).
- Tamén se valorará a calidade da memoria da práctica realizada por cada grupo de estudantes, na que deberán facer constar: obxectivo da práctica, fundamentos teóricos, materiais e métodos, resultados e discusión, conclusións, causas de erro, bibliografía e apéndices (15%).
- Por último, haberá un exame teórico-práctico obrigatorio no que o estudante deberá responder unha serie de cuestións e/ou exercicios sobre cada unha das unidades didácticas traballadas (65%).

Para a cualificación final teranse en conta tres factores:

a) calidade do traballo e do caderno de laboratorio;
b) calidade da memoria presentada;
c) exame, que se efectuará na data oficial.

BIBLIOGRAFÍA

BIRD, R.B.; STEWART, W.E. e LIGHTFOOT, E.N. (1980): *Fenómenos de trasporte*, Barcelona: Ed. Reverté.

CARSLAW, H.S. e JAEGER, J.C. (1959): *Conduction of heat in solids*, Oxford: Oxford University Press.

CRANK, J. (1975): *The mathematics of diffusion*, Oxford: Oxford University Press.

IBARZ, A.; BARBOSA, G.; GARZA, S. e GIMENO, V. (2000): *Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria*, Zaragoza: Ed. Acribia.

MATTESON, M.J. e SOMMERFELD, J.T. (1984): «Thermal conductivity of a hotdog», *Chemical Engineering education*, Summer (1984), 110-111.

SINGH, R.P. e HELDMAN, D.R. (1997): *Introducción a la ingeniería de los alimentos*, Zaragoza: Ed. Acribia.

WELTY, J.R.; WICKS, C.E. e Wilson, R.E. (2000): *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*, México: Ed. Limusa Wiley.

Citas de recursos en internet

Fichas Internacionais de Seguridade Química: Web Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de Trabajo e Inmigración (http://www.insht.es/portal/site/Insht/)

unidadesdidácticas
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade

Impreso en papel 100% reciclado e libre de cloro

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

SERVIZO DE NORMALIZACIÓN LINGÜÍSTICA

9 788498 879964