
 para Comprender
Reactores Químicos con Multireacción

Fernando Tiscareño Lechuga

Título de la obra

ABC para Comprender Reactores Químicos con Multireacción

© Dr. Fernando Tiscareño Lechuga

Profesor Investigador del Departamento de

Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Celaya

Inscrito en el Registro Público del Derecho de Autor

con Número de Registro: 03-2008-061709441800-01

D.R. © 2008

© REVERTÉ EDICIONES, S.A. DE C.V. y EDITORIAL REVERTÉ, S.A. Río

Pánuco No. 141, Col. Cuauhtémoc

06500 México, D.F. 08029

T. + (52) 55 5533.5658

F. + (52) 55 5514.6799

reverte@reverte.com.mx

www.reverte.com

Loreto 13-15 Local B

Barcelona, España

T. (3493) 419.33.36

F. (3493) 419.51.89

reverte@reverte.com

www.reverte.com

© INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

Av. Tecnológico y A. García Cubas s/n

A.P. 57, C.P. 38010

Celaya, Gto.

www.itc.mx

ISBN 978-968-6708-76-9

Primera edición, 2008.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del editor.

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

Impreso en Programas Educativos, S.A. de C.V.

Calz. de Chabacano No. 65, Local A

Col. Asturias, C.P. 06850

México, D.F.

Fecha: Julio 2008

Prefacio

El porqué nos interesa un curso de diseño de reactores

Normalmente cuando se dicta una conferencia, se escribe algún artículo científico o, en este caso, un libro de texto. La introducción debe incluir una justificación poderosa, de tal manera que cuando se lea el enunciado referente al objetivo, no exista duda alguna de la relevancia de lo que se va a exponer. De igual modo, al comenzar un curso, el profesor emplea buena parte del tiempo del primer día de clases en explicar al alumno la importancia de la materia y de cómo encajarán los nuevos conocimientos en su formación profesional. La motivación es necesaria para que el alumno se esfuerce durante el resto del curso.

En los primeros semestres de la carrera de Ingeniería Química el alumno estudia materias que serán la base para comprender las asignaturas de los siguientes años. Las últimas materias son las que distinguen específicamente a esta disciplina de las demás. El pilar más importante son las matemáticas pero también se deben cubrir materias intermedias como química inorgánica y orgánica, termodinámica, fisicoquímica, balances macroscópicos y fenómenos de transporte. En apariencia sus tópicos son aislados y como el alumno a este nivel desconoce su utilidad, no se motiva para esforzarse en comprenderlos debidamente. Entre más sólidas sean sus bases, más sencillo será comprender los temas posteriores. Aquí, cabe apuntar que tal vez deba usar sinónimos para comprender como entender, aprender, discernir, saber o conocer; sin embargo, el matiz entre ellos me parece diferente. Personalmente creo que comprender va más allá que entender. En ingeniería lo deseable es digerir el conocimiento y encontrar su esencia; dicho de otra manera, no conformarse con saber una fórmula y cómo aplicarla matemáticamente, sino además comprender cómo se dedujo y las implicaciones de las suposiciones involucradas, para así tener la capacidad de discernir en qué condiciones puede emplearse.

La función fundamental del ingeniero químico en la sociedad es transformar la materia a gran escala. Él o ella saben de reactores y separadores, esa es nuestra esencia. Las materias que estudiamos nos forman para comprender cómo diseñar, operar, controlar y

optimizar plantas con equipos de separación y reactores químicos, incluidos los equipos para el cuidado ambiental que caen en una o ambas categorías. Nuestro entorno está lleno de objetos en los que se emplearon conocimientos de ingeniería química para su elaboración, por ejemplo: ropa, muebles y plásticos; aparatos electrónicos, eléctricos y mecánicos; pinturas, solventes y combustibles, entre otros. Incluso, la producción de gas y electricidad requiere de ellos. A grandes rasgos, los reactores son el corazón de una planta química mientras que el resto de los equipos son necesarios para acondicionar su alimentación o para separar los distintos productos y reactivos emitidos por ellos. La economía de una planta depende considerablemente de la eficiencia con que se operen los reactores. Con base en lo anterior podemos afirmar lo siguiente: Si a algún alumno de ingeniería química no le gustan los reactores químicos, simplemente cometió un error al seleccionar su carrera.

El porqué de este libro

El material contenido en este estudio ya ha sido abordado de excelente manera en distintas publicaciones de uso extendido; entonces surge la pregunta, ¿por qué escribir otro libro más?

Durante más de quince años he impartido el curso de diseño de reactores en el programa de posgrado del Instituto Tecnológico de Celaya, y en ese tiempo he notado que los alumnos egresados de distintas universidades y tecnológicos del país, llegan con serias deficiencias en sus conocimientos básicos de diseño de reactores. Problemas con una reacción y de primer orden, los tienen muy bien mecanizados y los “saben” resolver perfectamente, las lagunas comienzan cuando el problema no involucra el orden mencionado. Otro error muy común es que no distinguen las diferencias entre la solución matemática de reactores en fases líquida y gaseosa. Asimismo, una deficiencia generalizada -con contadas excepciones- estriba en que la gran mayoría tiene serias dificultades al momento de intentar resolver problemas con más de una reacción independiente. Aun cuando el alumno sigue un “procedimiento correcto”, la solución es con frecuencia equivocada por el simple error de no incluir correctamente algún coeficiente estequiométrico.

Es probable que al alumno de licenciatura se le enseñe reactores catalíticos por su importancia industrial, sin tener en cuenta que carece de bases sólidas en el estudio de reactores ideales homogéneos. Los modelos principales de reactores catalíticos utilizan las mismas suposiciones que los modelos ideales homogéneos, a nivel licenciatura las únicas diferencias son las unidades de la expresión de velocidad de reacción y la inclusión de algún factor de efectividad. En mi opinión, es preferible que un alumno conozca a profundidad

los reactores homogéneos, a que reciba información superficial sobre algunos aspectos de catálisis pero dejando serias lagunas en la comprensión fundamental de los reactores.

Estas opiniones y experiencias me indicaban que debía escribir un libro de texto que enseñara de manera apropiada los sistemas multireacción a nivel licenciatura. Prácticamente, cuando terminé los capítulos y problemas propuestos tuve la convicción de que era necesario extender su alcance a posgrado, porque también en ese nivel los alumnos muestran dificultades cuando intentan aplicar a los sistemas mencionados, la información disponible sobre reactores catalíticos heterogéneos. Antes de comenzar a escribir e inventar problemas, fue determinante saber que podría aportar un libro diferente, con sus fortalezas y debilidades, pero diferente. Al desarrollarlo, haciendo énfasis en los sistemas multireacción, me di cuenta de que existían lagunas en la literatura conocida y con el fin de cubrirlas propuse algoritmos y métodos inéditos, por ejemplo: 1) método para encontrar las funcionalidades de las variables estequiométricas dependientes con base en avances de reacción; 2) método para determinar la estabilidad en reactores de tanque agitado con multireacción; 3) extensión del método de distribución de tiempos de residencia a sistemas multireacción; 4) algoritmo para evaluar velocidades simultáneas de reacción con un solo ciclo de convergencia, considerando efectos internos y externos; 5) modelo bidimensional de un reactor de lecho empacado en fase gaseosa y con velocidad superficial variable; 6) transformación del balance de masa en la burbuja para reactores en suspensión a una ecuación algebraica.

El porqué del título y de ejemplos con Multireacción

Con el término ABC se pretende remarcar que se presenta una metodología, un “abecedario” para estudiar y comprender los reactores químicos en presencia de reacciones simultáneas. También, se busca afrontar alguna crítica referente a la exclusión de reacciones reales en nuestro tratado, reconociendo que se trata principalmente de cinéticas ficticias.

Los ejemplos y problemas propuestos son originales, no han sido tomados ni adaptados de otros textos. Puesto que en México se realiza más análisis que diseño, en los ejercicios se incluyen aspectos que aparentemente hacen más larga la solución, pero que en realidad introducen elementos de análisis. Es primordial que el alumno obtenga bases sólidas sobre el efecto de las condiciones de operación sobre la conversión y la selectividad. Además, algunos ejemplos consideran temas sencillos de optimización. Una particularidad importante de la estructura del libro es que en los temas de cada sección se trata primero el caso de una reacción, e inmediatamente después se explican las implicaciones de los

sistemas multireacción. Los ejemplos con reacciones múltiples y su solución conllevan no sólo la necesidad de contar con una computadora y el software que resuelva ecuaciones diferenciales y ecuaciones no-lineales simultáneas, sino también tener especial cuidado al considerar los aspectos estequiométricos.

Aunque lo deseable sería contar con ejemplos basados completamente en reacciones de importancia industrial, recopilar los datos cinéticos reales lleva demasiado tiempo. Además, la mayoría de las expresiones cinéticas registradas en la literatura fueron obtenidas en reactores de laboratorio que no representan las condiciones de operación de una planta. Esta es una desventaja de los ejercicios y problemas propuestos que son básicamente del tipo ABC. Sin embargo, al conceptualizarlos y seleccionarlos se buscó que cada uno mostrase algún punto importante y no solamente describiera el procedimiento matemático de la solución. Considero que a pesar de ser cinéticos y compuestos hipotéticos, los ejercicios y problemas son adecuados para que el alumno comprenda el diseño y la operación de los reactores reales. Especialmente se determinó evitar los ejemplos y deducciones donde:

- Los números estequiométricos en las reacciones son 1; y
- donde el orden de reacción es 1.

Estas especificaciones han sido consideradas en otros textos porque con ellas se obtienen soluciones analíticas elementales. Sin embargo, mi experiencia académica me ha demostrado que el alumno por lo general no analiza la información y se confunde al abordar casos más complejos (cinéticas no-elementales o la presencia de sistemas con varias reacciones). En lugar de incluir ejemplos sencillos, decidí incluir ejemplos ilustrativos en los cuales se tenga que recurrir a tablas de integrales o a métodos numéricos. Los casos elementales con solución analítica se dejaron para los primeros problemas propuestos al final de cada capítulo.

En un curso de reactores químicos la capacidad de análisis se desarrollará en la medida que se estudien las implicaciones de los sistemas multireacción. Salvo en algunos casos isotérmicos y con cinéticas de primer orden, se emplean soluciones numéricas cuando hay varias reacciones. Si durante su formación académica los alumnos únicamente trabajan con problemas que involucren una reacción irreversible, es posible que el análisis resulte trivial: "Para aumentar la conversión aumentamos la temperatura, bajamos el flujo de alimentación, aumentamos la concentración de reactivo o catalizador, o aumentamos el volumen del reactor ... y ¡se acabó el 'análisis'!". El análisis comienza a disfrutarse cuando se consideran los efectos térmicos y de inertes para una reacción reversible; el reto mejora al incrementarse el número de reacciones debido a los compromisos existentes entre

conversiones y selectividades. Si existen perfiles de temperatura, las diferentes dependencias exponenciales de las constantes de velocidad y de equilibrio lo hacen cada vez más interesante. Cabe aclarar que en esta somera explicación de la dificultad del análisis no se han incluido otros efectos, como resistencias intra y extrapartícula a las transferencias de masa y calor que se abordan en la Parte II.

Normalmente el material que se abarca en un curso de diseño de reactores es tal que el alumno se pierde en procedimientos matemáticos para encontrar la solución analítica. Más que un curso de reactores parece un excelente repaso de matemáticas avanzadas. El alumno se enfrasca tanto en la parte matemática que pierde la esencia de lo que estudia y comete errores tan simples como no considerar las relaciones estequiométricas. La solución de los ejemplos debe ser más conceptual que matemático-analítica. Cabe subrayar que lo más importante en la formación del alumno es su capacidad de análisis. La expresión coloquial de encontrar una solución analítica no se refiere al análisis del problema, sino a la capacidad de utilizar álgebra, cálculo y ecuaciones diferenciales para encontrar una expresión numérica que refleje el resultado.

Comprender cómo se obtiene una ecuación es importante porque al entender las suposiciones involucradas se puede saber en qué condiciones es adecuado utilizar un modelo. Sin embargo, no debemos pensar en redescubrir el hilo negro cada vez que comencemos a resolver un problema. Hay ecuaciones que conviene tener presentes y saberlas sin deducirlas, pero siempre entendiendo su desarrollo. Para orientar al alumno, se han encerrado en un marco las ecuaciones que conviene memorizar.

Por otro lado, algunos aspectos que considero fundamentales se enfatizan en más de una ocasión. Tal vez, esto aburra a los estudiantes que captan las ideas al vuelo, por lo que pido disculpas. Sin embargo, prefiero correr este riesgo y pecar de redundante con tal de que algún lector reciba el mensaje en la segunda o tercera vez que reitere algún punto.

Los problemas que se proponen muestran los siguientes símbolos para indicar que la solución requiere o es:



Analítica y/o con operaciones convencionales en una calculadora.



Calculadora científica programable que resuelva ceros de una función, ecuaciones lineales simultáneas, ajuste a una línea recta e integre numéricamente.



Excel o algún paquete de matemáticas en computadora. Para los problemas de la Parte II, este símbolo puede indicar la necesidad de desarrollar programas de cómputo particulares.

Debo aclarar que la clasificación anterior no está directamente relacionada con la dificultad de solución. Un problema que requiere computadora puede ser muy simple de plantear mientras uno analítico puede requerir más tiempo y conocimientos.

Los “pequeños grandes errores”

Los signos de términos correspondientes a velocidades de reacción y los coeficientes estequiométricos juegan un papel fundamental en ingeniería de reactores. Al plantear los problemas o ejercicios de reactores es muy fácil que el alumno se equivoque en algún signo o coeficiente estequiométrico. Lo común es que se muestre muy indignado cuando se le otorgan pocos puntos del valor total de un problema y que esgrima el argumento: “sólo tuve un pequeño error en el problema”. Plantear los problemas es relativamente fácil mientras que resolverlos puede ser extremadamente complicado. Para fines didácticos, considero que los errores de planteamiento deben ser severamente penalizados mientras que los errores de cálculo pudieran pasarse por alto. No es aceptable que el alumno reclame: “nada más me equivoqué en un coeficiente o signo”; en ingeniería de reactores esto es crítico y debe cuidarse de manera especial, por ese “pequeño” signo o coeficiente el volumen de reactor o la conversión final seguramente estará, ahora sí, completamente mal.

Influencias académicas

Las influencias académicas descritas a continuación conciernen exclusivamente a mis conocimientos sobre ingeniería de reactores. Durante mis estudios de maestría en el Tecnológico de Celaya, tuve la fortuna de que el Prof. Joe M. Smith impartiera el curso de reactores. Su texto me parece excelente tanto para licenciatura como para posgrado. En particular, la mayoría de sus ejemplos y problemas incluyen cinéticas reales. En retrospectiva, ahora pienso: “¡qué bueno hubiera sido, para aprovechar mejor sus conocimientos, si en ese tiempo yo hablara un inglés más técnico o que él dominara más el español!”. De hecho, el Prof. Smith ofreció su clase en español, pero la barrera del lenguaje planteó problemas de comunicación. Una anécdota al respecto, durante la primera clase habló de la “rata de reacción” y, la verdad, no supe a qué se refería, “no me cayó el veinte”, hasta esa tarde que me puse a estudiar y leí en su texto: rate of reaction, que en su traducción a nuestra jerga significa velocidad de reacción.

En dos ocasiones tuve la suerte de asistir a los cursos que el Prof. Octave Levenspiel impartió en diferentes ediciones del Seminario Anual de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Celaya. Debido a la brevedad de este evento no puedo afirmar que recibí una

influencia importante de su cátedra. Sin embargo, el estudio de sus libros enriqueció mi visión del diseño de reactores de manera decisiva; particularmente, su Omnibook me parece extraordinario. El contenido de sus libros es claro con ejercicios no-convencionales interesantes, aun cuando emplea reacciones del tipo ABC.

Durante mis estudios doctorales en la Universidad de Wisconsin tomé cursos sobre reactores químicos con los profesores Charles G. Hill, Jr., Warren E. Stewart y James A. Dumesic. El Prof. Stewart centró su interés en las herramientas computacionales para el tratamiento de sistemas complejos de reacción y ajuste de parámetros. El Prof. Dumesic, como experto en catálisis, abordó las técnicas de preparación y análisis para catalizadores sólidos, y la teoría cinética molecular enfocada a velocidades de reacción; además de referir cómo explicar mediante mecanismos de reacción las cinéticas observadas y cómo apoyarse de distintas técnicas espectroscópicas y de caracterización para elucidarlos. Sin embargo, la influencia técnica y didáctica más significativa la recibí del Prof. Charles G. Hill, Jr., quien fue mi asesor de tesis. No sólo me impactó la claridad y el dinamismo para explicar su cátedra, sino también su profesionalismo y calidad humana. Su libro es didáctico y está dirigido a estudiantes de licenciatura, los ejemplos y problemas en su mayoría se refieren a reacciones reales.

Concluyo esta sección comentando la siguiente influencia que fue cronológicamente la primera y la más determinante. Durante la licenciatura, al principio del curso de reactores, cometí la imprudencia de demostrarle al profesor que estaba equivocado; lo grave fue que lo hice frente a la clase. Creo que los profesores tenemos “derecho” a cometer errores alguna vez, pero este maestro inicialmente lo tomó de forma personal y endureció el nivel de los exámenes siguientes. Esto me orilló a intensificar mis estudios y a esforzarme en comprender el contenido de todos los libros que encontré en la biblioteca sobre el tema. Posteriormente, cuando el profesor nos enseñó los temas de reactores en fase gaseosa, cometió algunas inexactitudes conceptuales que logré detectar gracias a que había estudiado a conciencia. Antes del examen correspondiente, a puerta cerrada y con libros en mano, nos pusimos a discutir y aclarar las implicaciones de los fluidos compresibles. Desde entonces, Reactores Químicos es y ha sido mi materia favorita; por ello, estoy realmente agradecido con este profesor. Incluyo también este comentario porque aporta un elemento que justifica el hecho de que en esta obra se traten “por separado” a líquidos (fluidos incompresibles para nuestros fines) de gases.

Estructura del contenido

El contenido se divide en dos partes: la Parte I concierne a reactores homogéneos y comprende del Capítulo 1 al 6; la Parte II, con material recomendado para nivel de posgrado, se

enfoca en no-idealidades en los patrones de flujos y en reactores heterogéneos, se compone de los Capítulos 7 al 11. Ambas partes se complementa con 10 apéndices que contienen material de apoyo diverso.

Parte I. El Capítulo 1 plantea las bases estequiométricas para poder trabajar problemas con cinéticas en que intervenga más de un componente en la expresión cinética y/o que haya más de una reacción independiente. Un aspecto importante de la estructura es que se discuten en paralelo el tratamiento de problemas para una o varias reacciones buscando enfatizar las diferencias. El uso de la termodinámica para calcular las condiciones de equilibrio se presenta en el Capítulo 2. El Capítulo 3 describe los procedimientos para estimar los parámetros en expresiones de velocidad de reacción a partir de datos experimentales. Cabe aclarar que en ninguno de estos capítulos se lleva a cabo un tratamiento exhaustivo del equilibrio o la cinética, su enfoque supone que el lector ya cuenta con fundamentos, por lo que sólo se pretende complementar algunos aspectos importantes para diseño de reactores que normalmente no se cubren en los cursos previos. Los Capítulos 4 y 5 discuten los modelos ideales básicos de reactores isotérmicos para reacciones en fase líquida y gaseosa, respectivamente. Aunque el material contenido en ambos es conceptualmente idéntico, se presenta por separado con la intención de que el alumno perciba las diferencias conceptuales y en su solución matemática. El Capítulo 6 examina los efectos térmicos sobre los reactores ideales.

Parte II. El Capítulo 7 describe los modelos básicos para considerar no-idealidades en los patrones de flujo. Los Capítulos 8 y 9 se refieren a reactores catalíticos empacados. El primero se enfoca en las velocidades catalíticas de reacción y el segundo a la aplicación de las ecuaciones de diseño. El Capítulo 10 hace una breve descripción de reactores de lecho fluidizado. Finalmente, en el Capítulo 11 se realiza una introducción a los reactores de tres fases.

Respecto a los anexos, el Apéndice A contiene como material de apoyo las respuestas de todos los problemas propuestos. El Apéndice B muestra algunos ejemplos de la utilización de MathCad en la solución de problemas. Algunas de las integrales más usadas en la obtención de soluciones analíticas se incluyen en el Apéndice C. El Apéndice D concierne a la estimación lineal de parámetros. El Apéndice E describe brevemente la utilización de la herramienta Solver de Excel para optimizar parámetros de casos no-lineales sencillos. El Apéndice F resume las fórmulas más relevantes de la Parte I. El Apéndice G presenta una alternativa para evaluar con MathCad velocidades para reacciones simultáneas en presencia de efectos internos y externos. El apéndice H muestra una forma de solucionar, mediante MathCad, problemas que involucren sistemas de ecuaciones algebraicas locales dentro de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. Por último, los Apéndices I y J incluyen códigos en FORTRAN de un modelo unidimensional que evalúa localmente

las velocidades de reacción con métodos de disparo y de un modelo bidimensional de lecho empacado que considera variación axial de la velocidad superficial, respectivamente. Aunque dichos códigos pueden ser fácilmente adaptables a distintos problemas, debe reconocerse que su inclusión se hizo con fines ilustrativos y no como simuladores generales e infalibles.

Agradecimientos

A lo largo del desarrollo de este libro a través de sus diferentes versiones, la retroalimentación con los estudiantes fue valiosa porque me permitió pulir los contenidos. Un buen número de nuestros estudiantes de licenciatura y posgrado creyó en esta aventura y se unió participando activamente como críticos, revisores técnicos y editores. Es difícil nombrarlos a todos y, reconociendo mi mala memoria, no quiero pecar dejando de lado a alguno; por ello les digo ¡muchas gracias a todos!, creo que hemos hecho una excelente aportación con un libro diferente.

Mi intención no fue escribir un libro de nivel intermedio o avanzado para licenciatura. Sin embargo, reconozco que algunos problemas son elaborados o difíciles, aunque a primera vista todos se ven sencillos. De ahí que pensara en escribir un manual de soluciones que sirviera de apoyo al profesor. Para hacer el manual consideré importante involucrar a alumnos de licenciatura con el fin de demostrar que la Parte I es adecuada para ese nivel académico. Alejandra Rivas y Rafael Callejas aceptaron con entusiasmo participar en la elaboración de dicha parte del manual, y me ayudaron a depurar algunos de los problemas propuestos; agradezco su colaboración.

La redacción del contenido, por mucho, fue la parte fácil y rápida del esfuerzo para la realización de este libro. La mayoría del tiempo se empleó en crear nuevos problemas o en desarrollar algunos de los métodos propios. Cuando comencé a escribir la Parte II decidí involucrar a alumnos de posgrado para desarrollar los problemas, a sabiendas del tiempo que me había tomado generar los de la Parte I. Un buen número de problemas de la Parte II y dos de la Parte I, surgieron como proyectos que encargué a alumnos que cursaban estudios de posgrado en Ingeniería de Reactores. En esta situación imperó la consigna de ganar-ganar, pues durante todo el proceso los alumnos incrementaron sus conocimientos al mismo tiempo que estuvieron en supervisión e interacción constante conmigo. Las ideas para producir nuevos problemas se las asignaba muy específicas e incluso en muchos casos les explicaba también la metodología de solución. Es un orgullo reconocer que la mayoría de estos problemas son originales e interesantes; algunos se diseñaron como complemento para abordar tópicos que no se tratan en el libro. Invito al lector a no emitir juicios superficiales y a darse cuenta de que, a pesar de tratarse

de problemas ABC inventados, resultan altamente ilustrativos. Podrán decirme que mis problemas son deficientes, esta es una opinión respetable; pero nadie podrá acusarme de plagio pues ni siquiera adapté problemas de otros autores. El manual de soluciones de la Parte II es resultado de editar las soluciones presentadas por los alumnos que me ayudaron a desarrollar los problemas; algunos tuve que re TRABAJARLOS y entonces fueron otros los alumnos que voluntariamente corroboraron los resultados y me apoyaron pasando en limpio la solución.

Poco a poco esta obra se ha empezado a conocer e incluso ya ha sido utilizada en algunas instituciones del país. Sin embargo, expreso mi reconocimiento al M.C. Guillermo Vidriales (ex alumno de nuestra maestría y en ese tiempo profesor de la BUAP) por ser el primer profesor que la empleó como libro de texto en un curso de licenciatura que impartió fuera del Instituto Tecnológico de Celaya. Asimismo, agradezco al Dr. Alberto Ochoa su sugerencia para abordar la condición frontera en la pared del balance de energía para el modelo bidimensional.

En estos seis años de escritura no habría sido posible avanzar sin el apoyo y las palabras de aliento de mis colegas y del personal administrativo, quiero agradecer ampliamente a todos y cada uno de mis compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Química. En particular, agradezco a los doctores Arturo Jiménez y Pedro Quitana por abrir brecha en la alternativa de coedición de libros, al Dr. Javier Alvarado por convencerme de emplear Latex, y al Dr. Eleazar Escamilla por promover la publicación final y por haber puesto el “dedo en la llaga” durante su gestión como jefe de nuestro departamento en cada evento de bienvenida de nuestra tradicional Donas y Café. Finalmente el apoyo más importante, quiero hacer constar mi agradecimiento al Instituto Tecnológico de Celaya y a su director, Ing. Heriberto Pfeiffer, por el respaldo para la publicación de este libro en coedición con Editorial Reverté.

FERNANDO TISCAREÑO LECHUGA
Celaya, Gto.