

***Software* para la enseñanza de la dinámica y control de intercambiadores de calor de tubos y coraza**

Educational software for the teaching of the dynamics and control of shell and tube heat exchangers

*Fiderman Machuca**, *Oscar Urresta*

Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química A.A. 25360. Cali, Colombia.

(Recibido el 19 de octubre de 2007. Aceptado el 29 de enero de 2008)

Resumen

Este trabajo presenta la estructura de un *software* desarrollado para la enseñanza y aprendizaje de la dinámica y control de intercambiadores de calor de tubos y coraza. El programa presenta, de manera numérica y gráfica, el comportamiento dinámico en lazo abierto y cerrado del proceso para diferentes parámetros de diseño y condiciones de operación variables. El *software* permite modificar condiciones tanto de operación como de diseño, por ejemplo, temperatura y caudales de entrada a los tubos y coraza, número y longitud de tubos, número de pasos, diámetro externo e interno de los tubos, diámetro interno de coraza y factor de ensuciamiento.

----- *Palabras Clave:* Intercambiadores de calor, tubos y coraza, *software*, educación, dinámica y control de procesos.

Abstract

The present work shows the software structure developed for teaching and learning of the dynamics and control of shell and tubes heat exchangers. The program shows (numerical and graphical mode) the dynamic behavior in open and closed loop under different design parameters and variable operations conditions. The software allows changing operation and design conditions such as temperature and flow inlet in shells and tubes, number and length of tubes, inside and outside diameter of tubes, number of passes, shell outside diameter and fouling factor.

----- *Keywords:* Heat exchangers, shell and tubes, software, education, dynamic and process control.

* Autor de correspondencia: teléfono + 57 +2 +331 29 35, fax + 57 +2 +339 23 35, correo electrónico: fiderman@univalle.edu.co (F. Machuca)

Introducción

Las ventajas de los procesos interactivos de enseñanza aprendizaje en el sentido de incrementar la eficacia en la transmisión y adquisición del conocimiento son aspectos ampliamente reconocidos y documentados en la literatura de la psicología educativa y cognoscitiva. La acelerada evolución en los equipos de cómputo y las tecnologías de información han incrementado su potencial de aplicación en diferentes áreas de la ingeniería [1, 2, 3, 4]. Los cambios de flexibilidad, respuesta, visión y acción de los componentes del proceso enseñanza aprendizaje, han generado en el país una corriente orientada a la implementación de la educación por competencias [5]. La formación integral del ingeniero, en particular el ingeniero químico, requiere de una mayor compatibilidad entre las diferentes asignaturas de los currículos y el establecimiento de ejes de conocimiento. La convergencia de áreas como fenómenos de transporte, diseño e ingeniería de proyectos, dinámica y control de procesos así como el desarrollo de prácticas en el laboratorio, contribuyen por ejemplo a la adquisición de una visión global de la aplicación de los conocimientos básicos y específicos en la solución de un problema de ingeniería [6, 7].

El uso de simuladores es de amplio conocimiento en la mayoría de las universidades colombianas, una de las ventajas de usar estas herramientas es el aumento en el tiempo de análisis de resultados. El reducido número de profesores que utiliza esta clase de herramientas en las diferentes asignaturas, el tiempo que debe consumir el estudiante en aprender las reglas de uso del *software* y el tipo de lenguaje empleado, y la falta de una fuerte integración entre ingeniería química y el desarrollo de *software* se constituyen en obstáculos para la aplicación de los procesos interactivos de enseñanza. Muy pocos programas computacionales con propósitos educativos aparecen reportados en la literatura [8]. Los resultados de una búsqueda con las palabras clave *education*, *software*, *heat exchangers* y sus combinaciones entre bases

de datos como Science Direct, Scopus, EBSCO, Engineering Village2, ISI Web y SciFinder revelan una estadística muy baja, tanto en el número anual de artículos relacionados (45-50 entre los años 1995-2005) como en el de autores comprometidos con esta labor. Esta cifra contrasta con el alto número (mayor a 13.000) de páginas web que ofrecen este tipo de herramientas. Un ejemplo, para citar un caso, es el curso *The ECOSSE Control HyperCourse* desarrollado por Ponton en la Universidad de Edimburgo, en el cual mediante la integración de consideraciones teóricas y prácticas se desarrollan diferentes aspectos del control de procesos [9]. Wankat [10] plantea diez principios de aprendizaje en ingeniería química, entre los cuales se destaca el uso de módulos visuales. Este modelo implica que el desarrollo de simuladores educativos para la representación de planteamientos apropiados alrededor de un problema de ingeniería debe poseer una adecuada fundamentación técnico científica y en algunos casos sin presentar a priori un exhaustivo desarrollo matemático [4, 6, 7, 8, 11-17]. Un ejemplo de lo anterior lo constituye el trabajo de Sekulic [14], en el cual se promueve la enseñanza del concepto de efectividad basado en la temperatura adimensional a la salida de la corriente del fluido de intercambio. Este concepto es más adecuado desde el punto de vista pedagógico pues elimina el área de transferencia infinita para el caso de intercambiadores con mayor efectividad. Martín et al. [16] utilizan un intercambiador de calor real como herramienta didáctica. A partir de datos reales y con diferentes métodos de identificación, presentan la forma de calcular un modelo empírico útil en la enseñanza de la simulación y control del proceso. Los autores hacen énfasis en el entusiasmo de los alumnos al tener la posibilidad de confrontar la teoría con la práctica en el estudio de sistemas complejos. Este artículo tiene como objetivo presentar el desarrollo de un *software* como herramienta educacional basado en la integración del conocimiento para el estudio de la dinámica y el control de procesos en unidades de transferencia de calor.

Uso de modelos matemáticos para intercambiadores de calor de tubos y coraza

El uso de los modelos matemáticos para diseñar, optimizar y describir el comportamiento de las unidades de intercambio de calor, es muy amplio. Su importancia radica en la facilidad de obtener y analizar información con el objetivo de evitar accidentes, entrenar personal, diseñar estrategias de control y realizar procesos de paradas y arranques de equipos, entre otros [17, 18, 19]. Por lo tanto, el conocimiento de las características de los intercambiadores es fundamental para el desarrollo de los diferentes modelos. Urresta [20] realizó una recopilación de las características más relevantes de los intercambiadores de tubos y coraza, con el objetivo de incorporarlos en el desarrollo del *software*. Varios modelos desarrollados para intercambiadores han sido reportados en la literatura. Grossmann et al. [21, 22], por ejemplo, establecieron un algoritmo de cálculo para la optimización del costo en el diseño de unidades (simples y redes). El algoritmo tiene en cuenta el número de tubos, número de pasos por los tubos, diámetro interno y externo de los tubos, tipo de arreglo, número de mamparas, localización del fluido y caídas de presión. En este trabajo se usa el método de Bell-Delaware [23, 24] para calcular los coeficientes de transferencia de calor y la caída de presión en el lado de la coraza. Roetzel et al. [25] desarrollaron el *software* TAIHE (transient analysis in heat exchangers) mediante el modelamiento de la dinámica de un intercambiador de calor de tubos y coraza con múltiples corrientes. Esta herramienta permite cambios en las condiciones de temperatura y flujo de las corrientes de salida, en los coeficientes de transferencia de calor y patrones de flujo. Ranong y Roetzel [26] mostraron el comportamiento en estado estacionario y dinámico de dos unidades de intercambio, en este caso el modelo en estado estacionario se desarrolló en función del número de unidades de transferencia (NUT) y el modelo dinámico se realizó en función del balance de energía. Kapale y Chad [27] presentaron un modelo estructurado entre el diseño térmico y la caída de presión. Sus

principales características son: caída de presión en la coraza debido a las pérdidas por fricción en las boquillas de entrada y salida, diferentes porcentajes de corte en las mamparas, varias configuraciones de tubos y un intervalo en el número de Reynolds entre 10^3 - 10^5 . Georgiadis et al. [28] desarrollaron un modelo matemático que involucra la dispersión radial. En él se integran los fenómenos de transporte de calor y las reacciones químicas asociadas al proceso de pasteurización. Finalmente, Lecoeuche et al. [29] estudiaron el uso de redes neuronales en el desarrollo de modelos en intercambiadores. Ellos plantean que un intercambiador de doble tubo no se ajustaría a un modelo de primer orden más tiempo muerto. Lo anterior implicaría un cambio en la concepción de este tipo de sistemas. Por otra parte, Wang et al. [30] utilizaron esta herramienta para la predicción de propiedades en procesos de transferencia de calor, las cuales pueden a su vez modificarse con los parámetros de diseño y condiciones de operación.

Para el desarrollo de las ecuaciones del modelo, se utilizó la metodología propuesta por Ranong y Roetzel [26]. El punto de partida es la ecuación de energía para un sistema de flujo, representada por la ecuación (1).

$$\rho C_p \frac{DT}{dt} = -\nabla \cdot \vec{q} + \beta T \frac{Dp}{dt} + \phi \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, C_p es la capacidad calorífica, T es la temperatura, t es el tiempo, q es la densidad de flujo de calor, β es el coeficiente de expansión, p la presión y ϕ es la disipación volumétrica.

La situación particular en la que el fluido caliente fluye por la coraza y el frío por los tubos se puede analizar bajo las siguientes consideraciones: El único intercambio de calor es entre los fluidos caliente y frío. Las temperaturas y velocidades de los fluidos son uniformes a través de la sección normal a la dirección del flujo en los tubos. Las propiedades físicas de los fluidos son constantes y evaluadas a la temperatura media del fluido (densidad, viscosi-

dad, conductividad térmica y capacidad calorífica). Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, al igual que la transferencia de calor axial por conducción. El coeficiente global de transferencia de calor es constante. El flujo másico es constante por los tubos y coraza. No hay cambio en la caída de presión en el sistema. No hay cambio de fase de los fluidos. Los m pasos por los tubos y las n mamparas son las secciones horizontales y verticales en las que se divide el intercambiador respectivamente.

Bajo las consideraciones descritas, la ecuación (1) aplicada a cada uno de las partes del intercambiador (tubos y coraza) da lugar a las ecuaciones (2) y (3). Estas representan el comportamiento dinámico del sistema.

$$m_t C_{p_t} (T_t^i - T_t^o) + FUA (T_c - T_t) = \rho_t C_{p_t} V_t \frac{dT_t}{dt} \quad (2)$$

$$m_c C_{p_c} (T_c^i - T_c^o) - FUA (T_c - T_t) = \rho_c C_{p_c} V_c \frac{dT_c}{dt} \quad (3)$$

Donde C_{p_t} es la capacidad calorífica de fluido que fluye por los tubos, T_t^i es la temperatura de entrada del fluido en los tubos, T_t^o es la temperatura de salida del fluido en los tubos, F es el factor de corrección, U es el coeficiente global de transferencia de calor, A es el área de transferencia de calor, T_c es la temperatura del fluido en la coraza, T_t es la temperatura del fluido en los tubos, ρ_t es la densidad del fluido en los tubos, V_t es el volumen del fluido en los tubos, C_{p_c} es la capacidad calorífica de fluido que fluye por la coraza, T_c^i es la temperatura del fluido a la entrada de la coraza, T_c^o es la temperatura del fluido a la salida de la coraza, ρ_c es la densidad del fluido en la coraza, V_c es el volumen del fluido en la coraza, t es el tiempo. Las temperaturas de entrada y salida en cada sección del intercambiador se evalúan de acuerdo a la disposición de los flujos, en contracorriente o en paralelo y si el número m y n es par o impar. En todos los casos se aplica una aproximación en diferencias centrales para expresar la temperatura en cada sección. Las ecuaciones (no mostradas aquí) para el cálculo de las dimensiones de cada sección (área y volumen) tienen en cuenta la dis-

tancia de la sección, la longitud total del sistema (tubos y coraza), número de tubos y el diámetro externo e interno de los tubos y coraza [20]. Los coeficientes de transferencia de calor (globales e individuales de convección) se calculan haciendo uso de las expresiones típicas para este tipo de equipos y con el agua como fluido de intercambio [31]. Finalmente, la ecuación (4) representa el comportamiento del controlador PID.

$$CO = bias \pm Kc \left[E(t) + \frac{1}{\tau_i} \int E(t) dt + \tau_d \frac{dE(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

Donde CO es la señal de salida del controlador, $bias$ es el valor de la señal del controlador cuando el error es cero, Kc es la ganancia del controlador, τ_i es la constante de tiempo integral, τ_d es la constante de tiempo derivativo, E es el error.

Solución y validación del modelo matemático

Se utilizó el método de Runge Kutta de cuarto orden en la solución del sistema de ecuaciones. Para la validación del modelo matemático se compararon los resultados de una serie de pruebas experimentales a diferentes condiciones (dinámicas y en estado estacionario) en un intercambiador de calor de tubos y coraza de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle [20]. La tabla 1 presenta las características más importantes del equipo utilizado y la figura 1 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Características principales del intercambiador de calor del laboratorio

Parámetro	
Número de tubos	21
Longitud de tubos (m)	0,93
Diámetro interno de tubos (cm)	1,7
Diámetro externo de tubos (cm)	2,1
Claro entre tubos (cm)	5,75
Diámetro interno de coraza (cm)	45
Número de mamparas	6
Número de pasos por coraza	1
Número de pasos por tubos	3

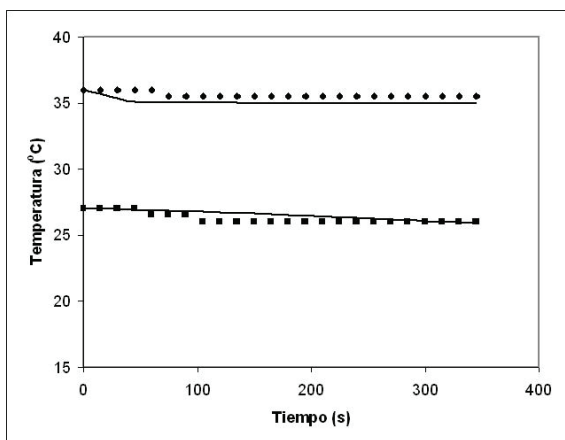


Figura 1 Validación del modelo matemático. Los símbolos y la línea continua indican valores experimentales y de simulación respectivamente. ◆ Temperatura del fluido en los tubos. ■ Temperatura del fluido en la coraza

Desarrollo del software

El módulo tutorial para la enseñanza de la dinámica y control de los intercambiadores de calor de tubos y coraza, programado en lenguaje Visual Basic 6.0, tiene como objetivo facilitar la comprensión del funcionamiento de los intercambiadores de calor de tubos y coraza, en lazo abierto y en lazo cerrado. El software está dividido en dos secciones. La primera consiste de cuatro presentaciones desarrolladas en Microsoft Power Point, las cuales incluyen aspectos básicos de transferencia de calor, teoría de intercambiadores (especialmente de tubos y coraza) y dinámica y control de procesos químicos. La segunda corresponde a la aplicación en sí misma.

Formularios de software

Al hacer clic en la opción CONTENIDO de la aplicación del módulo tutorial, véase figura 2, se abre inmediatamente la ventana que se ilustra en la figura 3, observándose las cuatro opciones equivalentes a las presentaciones mencionadas anteriormente y la opción para el ingreso de información necesaria para la aplicación del software (Menú, Acceso a INTER 2005)



Figura 2 Menú principal del software



Figura 3 Contenido de software

El tipo de ventanas en orden de ejecución, se muestra en las figuras 4-7. La figura 4 presenta las ventanas para el ingreso de datos de diseño y operación del intercambiador. Si el usuario desea realizar su propio diseño, se recomienda leer la presentación acerca de los intercambiadores de calor, donde se enuncian criterios para diseño y operación del equipo. Si el objetivo del usuario es simplemente observar el funcionamiento, el software brinda la posibilidad de utilizar los datos de diseño y de operación de un intercambiador prediseñado. El software tiene implementado el funcionamiento de un lazo de control por retroalimentación, con diferentes opciones (proporcional, integral y derivativo), el cual permite

modificar las variables de perturbación (valor y tipo) y el tiempo en el cual se desea que ocurra la alteración (véase figura 5).

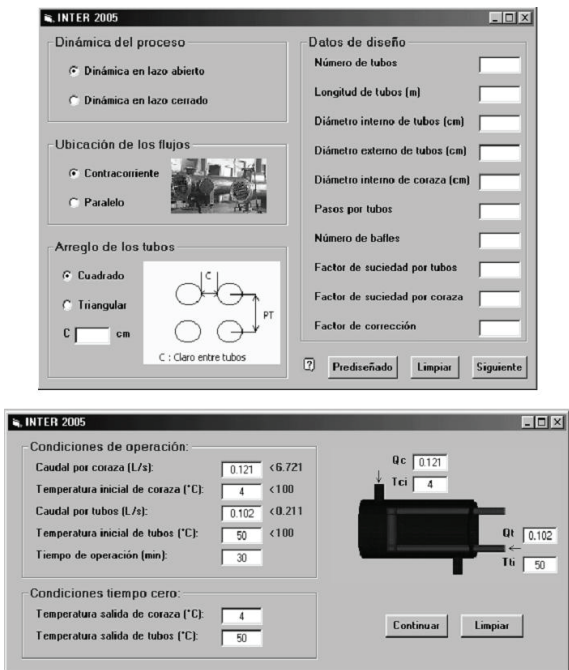


Figura 4 Módulo para ingreso de datos de diseño y operación del intercambiador del calor

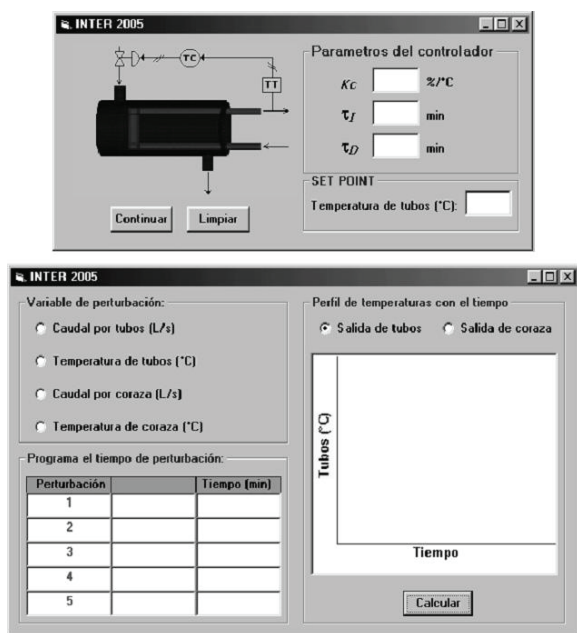


Figura 5 Módulo para ingresar los parámetros de control y perturbaciones en las variables de operación

Las figuras 6 y 7 ilustran el tipo de resultados obtenidos mediante la simulación del sistema tanto en estado dinámico como estacionario.

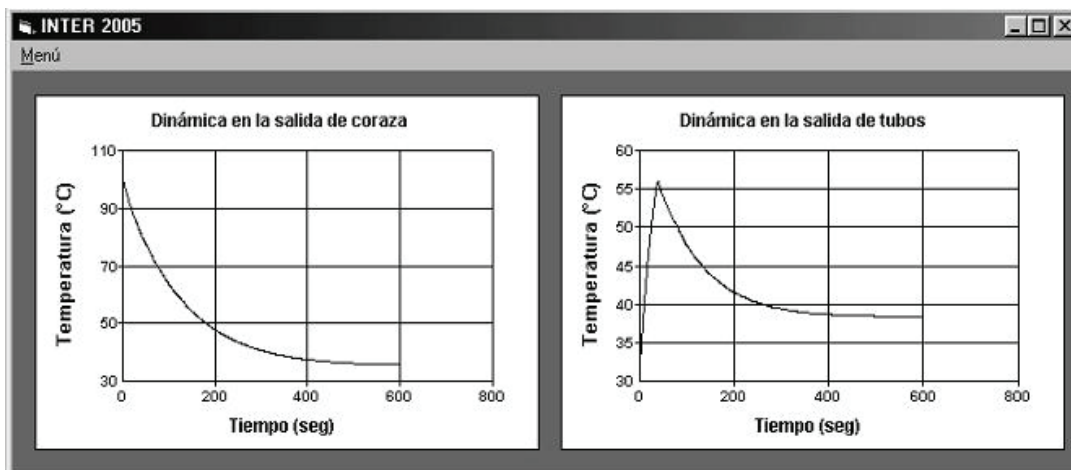


Figura 6 Presentación de resultados de simulación en forma gráfica

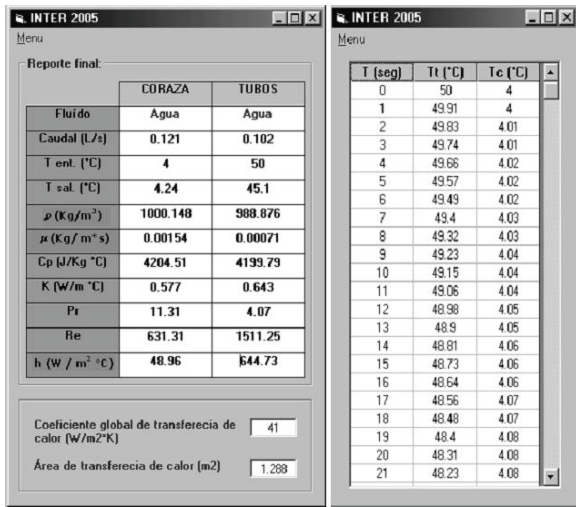


Figura 7 Presentación de resultados de simulación en forma numérica

Análisis y discusión

La utilización de este *software* permite a los usuarios, especialmente a estudiantes de pregrado de Ingenierías Química, Mecánica, Eléctrica y afines, comprender el funcionamiento de los intercambiadores de calor. El uso del *software* puede estimular al estudiante a tomar sus propias decisiones al enfrentar una situación real y empezar a desarrollar habilidades que un ingeniero de planta debe poseer desde el tercer año de formación. El *software* permite relacionar diferentes áreas del conocimiento, especialmente de ingeniería química, de tal manera que el estudiante se forme por competencias básicas y profesionales. Esto se observa al plantear ejercicios donde se pueda percibir el efecto de algunas condiciones de diseño del equipo en la dinámica del proceso (figuras 4 y 5). Este mismo objetivo se logra parcialmente en simuladores tales como Control Station [11, 32], HES [8], SYNHEN [33], RESHEX [34], entre otros. En ellos los parámetros de diseño se encuentran preestablecidos y sólo permiten el cambio de condiciones de operación. Otro tipo de *software* comercial tal como HYSYS o ASPEN PLUS, permite cambios más complejos pero presupone un adecuado conocimiento del *software* y sus capacidades, que implica una ele-

vada inversión no solo de tiempo sino de costos de licenciamiento. Urresta [20] presentó el análisis del comportamiento dinámico y de control del intercambiador bajo diferentes parámetros de diseño, como por ejemplo, la influencia del área de transferencia de calor mediante la modificación del diámetro externo, longitud y número de tubos. Así mismo, se estudió el efecto del comportamiento bajo diferentes condiciones de operación y parámetros de sintonización del controlador. La figura 8 muestra un esquema de las relaciones que pueden llevarse a cabo con el uso del *software* propuesto. Como puede apreciarse el flujo de conocimiento es multidireccional y finaliza con la aplicación del conocimiento. Este esquema permite plantear diferentes alternativas de aprendizaje en las que la teoría y la práctica interactúan.

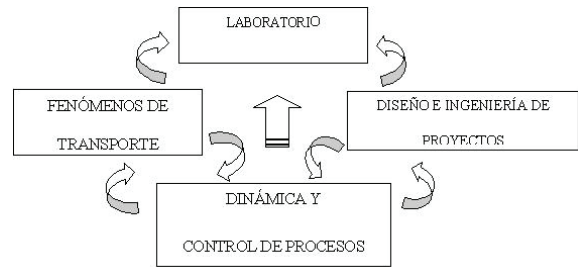


Figura 8 Relaciones entre las asignaturas donde es posible aplicar el *software*

Adicionalmente, el uso del *software* permite a los actores del proceso de enseñanza aprendizaje (profesores y estudiantes): realizar análisis y síntesis de los procesos involucrados en la operación de intercambiadores de calor, aplicar los conceptos y conocimientos teóricos de diferentes asignaturas en las prácticas de laboratorio, aprender autónomamente, incorporar nueva información y decidir la forma adecuada de usarla. En cualquier caso, los estudiantes pueden realizar prácticas en el laboratorio con un sistema real y/o simulaciones en el *software* con datos encontrados en la literatura [35]. Esta metodología puede ser aplicada para cursos de cuarto año en adelante y permite confrontar los resultados obtenidos de varias fuentes. Entre las limitaciones de este *software*

se encuentra la falta de una base de datos de fluidos de calentamiento y enfriamiento, sistemas de bombeo, instrumentación, evaluación económica y el desarrollo de redes, entre otros aspectos. Estas limitaciones pueden ser objeto de desarrollo de nuevos trabajos en el tema. Evaluaciones realizadas al *software* por parte de estudiantes regulares de los cursos de dinámica y control de procesos químicos resultaron ser un 90% favorables en cuanto a su uso y versatilidad (incluso después de haber utilizado también Control Station y ASPEN PLUS). Los estudiantes resaltaron el hecho de tener la posibilidad de integrar el diseño del equipo a la dinámica y control del mismo. Finalmente, el *software* para educación se convierte en una herramienta útil para lograr: clases más activas, programación de tareas de análisis, problemas con diferentes soluciones, discusiones técnicas e integración de conocimiento en el laboratorio, entre otros aspectos. El uso de este tipo de herramientas viene siendo desarrollado y ha sido propuesto por diferentes autores [36, 37] y se pueden encontrar dos alternativas: El desarrollo de *software* específico para educación y uso de *software* comercial.

Conclusiones

Se desarrolló un *software* para la enseñanza de la dinámica y el control de intercambiadores de tubos y coraza. El desarrollo del *software* permitió la integración de aspectos del diseño de equipos y condiciones de operación en la dinámica y el control de un intercambiador de calor. Este nuevo aspecto permitirá desarrollar diferentes esquemas de enseñanza basado en la solución de problemas complejos. El uso del *software* tuvo aceptación entre los estudiantes de los cursos de dinámica y control de procesos, de la Universidad del Valle, por cuanto permite el desarrollo de análisis de problemas complejos.

Referencias

1. K. S. Lee, M. L. H. Low. "Engineering visualization and modeling: teaching and management using the IT approach". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 32. 2004. pp. 160-181.
2. C. H. J. Davies. "Student engagement with simulations: a case study". *Computers & Education*. Vol. 39. 2002. pp. 271-282
3. D. J. Magin, J. A. Reizes. "Computer simulation of laboratory experiments. An unrealized potential". *Computers & Education*. Vol. 14. 1990. pp. 263-270.
4. E. M. A. Mokheimer, M. A. Antar. "On the use of spreadsheets in heat conduction analysis". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 28. 2000. pp. 113-140.
5. L. E. Blanco, C. Silveria. "Competencias: una forma de estandarización global". *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*. Vol. 59. 2005. pp. 39-46.
6. G. T. Lapidus. "Elaboration of industrial material and heat balances as a teaching aid". *Hydrometallurgy*. Vol. 79. 2005. pp. 40-47.
7. M. K. Ermakov, S. A. Nikitin, V. I. Polezhaev, V. P. Yaremchuk. "Education and tutorial in modeling of elementary flows, heat and mass transfer during crystal growth in ground-based and microgravity environment". *Journal of Cristal Growth*. Vol. 266. 2004. pp. 388-395.
8. L. Lona, M. Fernandes, M. Roque, S. Rodríguez. "Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects". *Computer and Chemical Engineering*. Vol. 24. 2000. pp. 1247-1251.
9. J. W. Ponton. *The ECOSSE Control HyperCourse*. <http://ecosse.org/courses/control/>. Consultada el 19 de junio de 2007.
10. P. C. Wankat. "What works. A quick guide to learning principles". *Chemical Engineering Education*. Vol. 27. 1993. pp. 120-127.
11. D. J. Cooper. "PICLES. A simulator for teaching the real world of process control". *Chemical Engineering Education*. Vol. 27. 1993. pp. 176-181.
12. M. B. Cutlip, M. Shacham, N. Brauner. "Application of an interactive ODE simulation program in process control education". *Chemical Engineering Education*. Vol. 28. 1994. pp. 130-135.
13. K. Sherwin, M. Mavromihales. "Design of a heat exchanger". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 27. 1999. pp. 209-216.
14. D. P. Sekulic. "A unified approach to the analysis of unidirectional and bi-directional parallel flow heat exchangers". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 28. 2000. pp. 307-320.

15. J. E. Gillett. "Chemical engineering education in the next century". *Chemical Engineering Technology*. Vol. 24. 2001. pp. 561-570.
16. P. A. Martin, F. K. Junior. "Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem y sistemas de controle". *XXIII Congreso Brasileiro de Ensino de Engenharia*. Campina Grande. Brasil. 2005. p. 12.
17. F. L. Tan, S. C. Fok. "An educational computer-aided tool for heat exchanger design". *Computer Applications in Engineering Education*. Vol. 14. 2006. pp. 77-89.
18. M. R. Ansari, V. Mortazavi. "Simulation of dynamical response of a countercurrent heat exchanger to inlet temperature or mass flow rate change". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 26. 2006. pp. 2401-2408.
19. R. K. Sahoo, W. Roetzel. "Hyperbolic axial dispersion model for heat exchangers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 45. 2002. pp. 1261-1270.
20. O. Urresta. "Modulo tutorial para la enseñanza de la dinámica y control de los intercambiadores de calor de tubos y coraza". Trabajo de Grado, 2006. Universidad del Valle. Cali. Colombia., pp. 1-94.
21. I. E. Grossmann, F. T. Mizutani, F. L. P. Pessoa, E. M. Queiroz, S. Hauan. "Mathematical programming model for heat-exchanger network synthesis including detailed heat-exchanger designs. 1. Shell-and-tube heat-exchanger design". *Industrial Engineering Chemistry Research*. Vol. 42. 2003. pp. 4009-4018.
22. I. E. Grossmann, F. T. Mizutani, F. L. P. Pessoa, E. M. Queiroz, S. Hauan. "Mathematical Programming Model for Heat-Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat-Exchanger Designs. 2. Network Synthesis". *Industrial Engineering Chemistry Research*. Vol. 42. 2003. pp. 4019-4027.
23. L. M. F. Lona, M. C. Roque. "The economics of the detailed design of heat exchanger networks using the Bell Delaware method". *Computer and Chemical Engineering*. Vol. 24. 2000. pp. 1309-1353.
24. M. A. S. S. Ravagnani, A. P. da Silva, A. L. Andrade. "Detailed equipment design in heat exchanger networks synthesis and optimisation". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 23. 2003. pp. 141-151.
25. W. Roetzel, X. Luo, X. Guan, M. Li. "Dynamic behaviour of one-dimensional flow multistream heat exchangers and their networks". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 46. 2003. pp. 705-715.
26. C. N. Ranong, W. Roetzel. "Steady-state and transient behaviour of two heat exchangers coupled by a circulating flowstream". *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 41. 2002. pp. 1029-1043.
27. U. C. Kapale, S. Chand. "Modeling for shell-side pressure drop for liquid flow in shell-and-tube heat exchanger". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 49. 2006. pp. 601-610.
28. M. C. Georgiadis, G. E. Rotstein, S. Macchietto. "Modelling and simulation of shell and tube heat exchangers under milk fouling". *AIChE Journal*. Vol. 44. 1998. pp. 959-970.
29. S. Lecoecuche, S. Lalot, B. Desmet. "Modelling a non-stationary single tube heat exchanger using multiple coupled local neural networks". *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 32. 2005. pp. 913-922.
30. O. W. Wang, G. N. Xie, M. Zeng, L. Q. Luo. "Heat transfer analysis for shell-and-tube heat exchangers with experimental data by artificial neural networks approach". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 27. 2007. pp. 1096-1104.
31. E. Ludwig. *Applied process design for chemical and petrochemical plants*. Boston: Gulf Professional. 2001. pp. 300-325.
32. D. J. Cooper, D. Dougherty. "A training simulator for computer-aided process control education". *Chemical Engineering Education*. Vol. 34. 2000. pp. 252-262.
33. J. Jeowski. "SYNHEN: Microcomputer directed package of programs for heat exchanger network synthesis". *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 16. 1992. pp. 691-706.
34. A. K. Saboo, M. Morarir, D. Colberg. "RESHEX: An interactive software package for the synthesis and analysis of resilient heat-exchanger networks. I: Program description and application". *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 10. 1986. pp. 577-589.
35. H. I. Abu-Mulaweh. "Experimental comparison of heat transfer enhancement methods in heat exchangers". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 31. 2003. pp. 160-167.
36. C. K. Leong, K. C. Toh, Y. C. Leong. "Shell and tube heat exchanger design software for educacional applications". *International Journal of Engineering Education*. Vol. 14. 1998. pp. 217-224.
37. W. L. Lyuben. "Use of dynamic simulation to converge complex process flowsheet". *Chemical Engineering Education*. Vol. 38. 2004. pp. 142-149.