

# Entorno Eficiente de Simulación Dinámica para la Operación de Plantas de Procesamiento de Alimentos

Carlos Vilas, Míriam R. García, Marcos Villafín, Julio R. Banga, Antonio A. Alonso\*  
Grupo de Ingeniería de Procesos (IIM-CSIC). Eduardo Cabello, 6. 36208 Vigo, \*antonio@iim.csic.es

## Resumen

*Al contrario de industrias como la química o la automovilística, donde se aprovechan desde hace décadas las ventajas que ofrecen el modelado matemático y las herramientas de simulación, la industria alimentaria todavía está empezando a vislumbrar sus posibilidades. En este trabajo se presenta un entorno amigable y una librería de unidades de operación para la industria alimentaria. Las plantas de procesamiento de alimentos son buenos ejemplos de sistemas híbridos, donde las dinámicas continuas no lineales están acopladas con eventos discretos (sistemas híbridos). Este entorno utiliza nuevos métodos en la construcción de modelos y es capaz de reconstruir la operación de la planta a diferentes niveles de detalle. La arquitectura permite embeber las transformaciones del producto en diferentes operaciones unitarias y éstas en un modelo económico.*

**Palabras clave:** Sistemas Híbridos, Simulación Dinámica, Procesamiento de Alimentos, Entorno de Simulación Amigable.

## 1. Introducción

Tradicionalmente, en la industria de procesamiento térmico de alimentos, la política de operación de la planta se ha diseñado basándose en la experiencia de sus operarios. Éstos deciden, teniendo en cuenta distintos factores (como la cantidad de producto a tratar, las leyes vigentes sobre seguridad alimentaria, entre otros) los parámetros característicos del proceso, como pueden ser la temperatura o el tiempo del tratamiento. Normalmente este enfoque lleva asociado un sobre-procesamiento del producto, para asegurar las condiciones de seguridad, repercutiendo tanto en la calidad como en los costes de producción del mismo.

En un intento de sistematizar y optimizar el diseño de tales procesos se han propuesto numerosas alternativas, de las cuales, las más exitosas se basan en la utilización de modelos matemáticos [7]. La combinación de las leyes físicas derivadas

de fenómenos de transferencia de materia, energía y cantidad de movimiento con ecuaciones constitutivas asociadas a transformaciones cinéticas y propiedades físicas, permite predecir o, al menos aproximar, el comportamiento de aquellas variables relevantes (temperatura, contenido de humedad, concentración de nutrientes o microorganismos, etc.) ante cambios en los flujos de materia y energía que lo abastecen. Estas predicciones se pueden utilizar, posteriormente, para diseñar la política óptima de operación que asegura las condiciones de seguridad del alimento y que también maximiza la calidad del producto y minimiza los costes de operación. Además, este enfoque permite, de forma intuitiva, tener en cuenta otros factores importantes como el impacto medioambiental. En la mayoría de los casos, las operaciones a llevar a cabo para obtener dichas predicciones son demasiado tediosas como para realizarlas a mano. Con la aparición del ordenador se eliminó este inconveniente, surgiendo así la ingeniería asistida por ordenador.

Muchas industrias como la automovilística o la química se han beneficiado, desde hace décadas, de las ventajas de esta última forma de actuar. Sin embargo, en la industria alimentaria estas ideas son relativamente nuevas y, a pesar de que cada vez hay más trabajos en el área, todavía no han llegado a cuajar [10]. A finales de la década de los sesenta empezaron a publicarse los primeros trabajos en este área [21, 20] y desde entonces se han presentado numerosas contribuciones - véase, por ejemplo [13, 12, 9, 11, 22]-.

Estos modelos requieren poseer, para su utilización y para la interpretación de los resultados, unos conocimientos matemáticos importantes. Es por ello que resulta de vital importancia el desarrollo de entornos amigables de simulación, donde el usuario pueda manejar estos modelos de una forma intuitiva (por ejemplo mediante iconos que representen el proceso que se quiere modelar). Existen diversos simuladores comerciales en el campo de la ingeniería industrial, entre los que se encuentran EcosimPro ([www.ecosimpro.com/](http://www.ecosimpro.com/)), Modelica ([www.modelica.org](http://www.modelica.org)), Abacuss II (<http://yoric.mit.edu/abacuss2/>), gPROMS

([www.psenterprise.com](http://www.psenterprise.com)) o Ascend IV ([www-2.cs.cmu.edu/ascend/](http://www-2.cs.cmu.edu/ascend/)), por nombrar algunos de los más importantes. También se han desarrollado entornos en el área de tratamiento de alimentos (PRO-FOOD ([www.cimne.com/profood/](http://www.cimne.com/profood/))). Sin embargo, a pesar de que existen diversos trabajos donde se describen los distintos procesos que intervienen en las plantas de tratamiento térmico de alimentos [1], no existe ningún simulador que tenga en cuenta todos estos procesos a la vez. Uno de los mayores inconvenientes para la simulación en la industria alimentaria es que implica tratar con sistemas híbridos [8], es decir, sistemas que combinan procesos con dinámicas continuas (como la cocción, esterilización o congelación) y eventos discretos (como las acciones de los controladores) [2].

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un entorno de simulación eficiente, dinámico y multi-propósito para plantas de procesamiento de alimentos. El entorno debe ser amigable y compatible con el control, predicciones en tiempo real, análisis de la información y herramientas de apoyo a la decisión como optimizadores. Además debe ser capaz de tratar de forma eficiente sistemas híbridos, con posibilidad de componentes distribuidos y procesos dinámicos no lineales, tanto discontinuos como semicontinuos, donde los fenómenos de transporte están acoplados. Por último, los optimizadores incluidos deben poder trabajar con restricciones no lineales para satisfacer las demandas de seguridad y calidad.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: En la Sección 2 se presentará brevemente la clase de procesos que se dan en la industria de procesamiento de alimentos. En la siguiente sección se describirá la arquitectura del simulador discutiendo las ventajas que ofrece. En la Sección 4 se ilustrará mediante distintos ejemplos representativos algunas de las capacidades predictivas del entorno de simulación. Finalmente, el artículo concluye con algunos comentarios sobre el trabajo presentado.

## 2. La Estructura de Simulación de Plantas de Procesamiento de Alimentos

La representación matemática de los fenómenos físico-químicos de un determinado proceso es el primer paso, de importancia fundamental, para el posterior análisis, optimización y control del mismo. Para llevar a cabo dicha representación se pueden considerar tres enfoques diferentes [19]. Por una parte, en el enfoque teórico o fenome-

nológico (caja blanca) los modelos se deducen basándose en leyes físicas derivadas de fenómenos de transferencia de materia, energía y cantidad de movimiento (primeros principios). El inconveniente de este método es que se necesita un completo conocimiento de los fenómenos físico-químicos (y las ecuaciones que los describen) que tienen lugar. Por otra parte, en el enfoque experimental (caja negra), la relación entre entradas y salidas del sistema se determina mediante un sistema matemático genérico que se ajusta mediante la medida de ciertas variables cuando dicho sistema se somete a unas perturbaciones dadas. El mayor problema de este método es la gran cantidad de medidas que necesita para que sus predicciones sean realistas. La tercera opción (caja gris) resulta de la combinación de las dos anteriores aprovechando, de esta forma, las ventajas de ambos métodos y minimizando sus inconvenientes.

Los modelos de nuestro entorno de simulación se engloban dentro de la tercera opción. Éstos están constituidos por un conjunto de ecuaciones que describen los diferentes componentes agrupando las características inherentes de los procesos, unidades y equipamiento auxiliar como autoclaves, intercambiadores de calor, balsinas, calderas, controladores, válvulas y bombas, por ejemplo. El mundo continuo se representa mediante las leyes de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento. Matemáticamente, estos componentes se expresan mediante conjuntos de ecuaciones diferenciales no lineales, tanto parciales como ordinarias (EDPs y EDOs). La descripción se completa finalmente con un número dado de ecuaciones no lineales algebraicas que tienen en cuenta las relaciones constitutivas entre los estados y los parámetros físicos. Formalmente, los distintos tipos de sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales parciales (EADP) son de la forma:

$$x_t + \nabla(v_k x) = \nabla(\kappa(x)\nabla x) + f(t, \xi, x, u), \quad (1)$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (2)$$

donde  $x$  es el vector de estados, el cual puede representar, por ejemplo, la distribución de masa o temperatura en un sólido y  $u$  las acciones de control.

Debe notarse que la solución numérica de sistemas de la forma de (1) implica un esfuerzo computacional elevado debido a la alta dimensionalidad del sistema resultante de los esquemas de discretización clásicos, como son *diferencias finitas* y *elementos finitos* (véase, por ejemplo [16, 15]). Esto se traduce en un sistema con un número extremadamente elevado de EDO a resolver, lo que hace que el método resulte prohibitivo para aplicaciones en tiempo real como simulación, control

u optimización. Una forma de superar esta limitación es la utilización de los modelos de orden reducido [5, 6]. Estas técnicas aprovechan la estructura disipativa del sistema en EDP [4] lo que permite la extracción de un subespacio de dimensión baja que captura las dinámicas relevantes del comportamiento del sistema. Con respecto a esto, se han implementado en el simulador las técnicas de reducción de orden de *descomposición espectral* [3] y *Descomposición Ortogonal Propia* [17, 14, 6].

Por último, las relaciones algebraicas constitutivas incluyen las cinéticas de degradación de nutrientes y parámetros de interés, como crecimiento y cinéticas de destrucción térmica de microorganismos. Por ejemplo, la siguiente ecuación, relaciona la letalidad térmica y la temperatura:

$$(F_0)_t = \exp\left(\frac{T_{ref} - T(r_0)}{z} \ln(10)\right), \quad (3)$$

Otras expresiones constitutivas recogidas en el entorno de simulación representan los flujos de líquidos o gases a través de distintas válvulas y sus relaciones con la estructura de control. Véase [18] para un estudio exhaustivo de los distintos tipos de válvulas empleadas normalmente en la industria. Sirva como ejemplo la siguiente ecuación [1]:

$$F_s = k_1 C_f C_{vS} P_1 (y_s - k_2 y_s^3); \quad C_{vS} = k_3 u, \quad (4)$$

que relaciona el flujo a través de la válvula de vapor del autoclave ( $F_s$ ) con su abertura ( $u$ ).

### 3. Arquitectura del software

Para asegurar la coherencia entre las distintas unidades y equipamiento, la transparencia, además de otras características del entorno de simulación, el software ha sido diseñado como una estructura por capas traslapadas e interconectadas. Dicha arquitectura permite la consistencia, inclusión/exclusión, mejora y modificación de los componentes (tanto de los existentes como de los nuevos) abarcando las necesidades de los distintos usuarios. En la Figura 1 se muestra un esquema de las diferentes capas y de las interrelaciones entre ellas. El nivel básico es el modelado y es aquí donde se decide qué ecuaciones (ver Sección 2) son las adecuadas para representar un sistema determinado. La siguiente capa se corresponde con el motor computacional, *EcosimPro* ([www.ecosimpro.com](http://www.ecosimpro.com)), donde los modelos se construyen en forma de componentes con capacidades de herencia y re-utilidad. Esta herramienta hace uso de un lenguaje de alto nivel (EL) que trata de forma eficiente sistemas híbridos de EADP y permite combinarlos mediante la tecnología de puertos. El último nivel (el Simulador) hace accesible los modelos y los algoritmos de cálculo a los

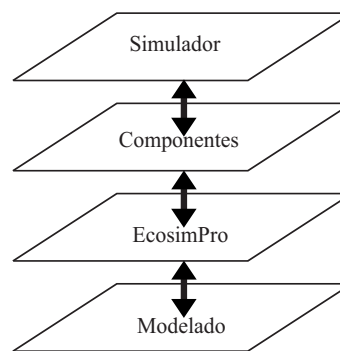


Figura 1: Las distintas capas de la estructura del software.

usuarios mediante un interfaz gráfico altamente interactivo. En esta capa los distintos procesos, unidades (por ejemplo autoclave) o cualquier otro equipamiento (válvulas, bombas, etc.) se transforman en objetos ActiveX (iconos) organizados en librerías operadas gráficamente. De esta manera, las cuestiones del usuario referentes a la predicción de posibles cuellos de botella u otros problemas, modos de operación, costes, etc. encuentran la respuesta adecuada de una forma intuitiva. Algunos detalles de los componentes y del interfaz se pueden ver en la Figura 2. Además, el entorno

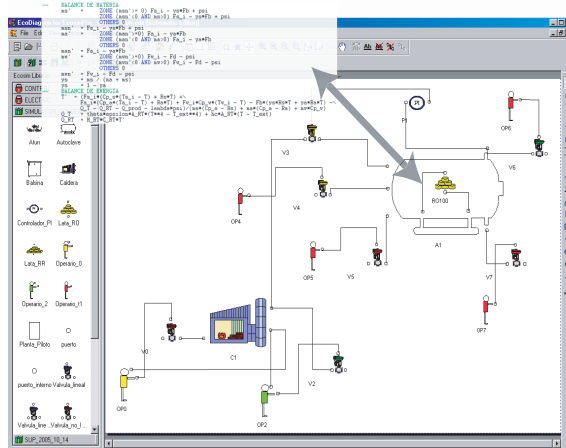


Figura 2: Ejemplo de un autoclave de vapor construido en el interfaz gráfico. Las distintas unidades y equipo se seleccionan de una librería (en el lado izquierdo de la pantalla). Como se muestra en la Figura, cada componente tiene asociado su propio modelo matemático.

de simulación incluye herramientas adicionales como optimizadores, observadores de estado y estimadores de parámetros, los cuales, vía web, complementan y analizan a niveles económico y/o de procesos el rendimiento de la planta (ver Figura 3).

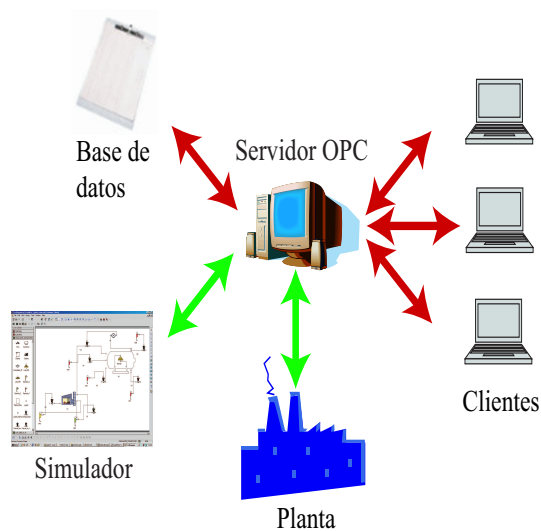


Figura 3: Extensiones del entorno de simulación a la estructura de información general de la planta. Las flechas verdes y rojas indican el intercambio de datos con la planta/simulador en tiempo real y con el servicio de base de datos, respectivamente.

## 4. Resultados

Con el objetivo de ilustrar algunas de las aplicaciones prácticas del simulador se presentarán dos ejemplos correspondientes a una planta de conservas. El primero consiste en seleccionar, entre un número dado de escenarios, aquél que tenga un menor consumo energético. El segundo ejemplo ilustra las ventajas del entorno de simulación en el ajuste de un regulador de temperaturas proporcional-integral para un autoclave dado.

### 4.1. Comparación entre distintos escenarios

El problema consiste en comparar un número de modos de operación (escenarios) en el proceso de esterilización de una cantidad dada de atún. La comparación se hará desde el punto de vista económico y de ahorro de tiempo. Los tipos de lata disponibles son *RO85*, *RO1000* y *RO3900*. El primer y el segundo escenario se corresponden con los casos extremos en que todo el atún se procesa utilizando solamente latas del tipo *RO85* y *RO3900*, respectivamente. En el resto de los escenarios (seis) se consideró que la cantidad de latas de tipo *RO85*, *RO1000* y *RO3900* necesarias para procesar todo el atún requería realizar cuatro, tres y dos ciclos de esterilización, respectivamente. Además de estos tres tipos de latas se han considerado los siguientes elementos: tres autoclaves operando en paralelo, una caldera, distintos tipos de válvulas, un controlador PI y distintos

tipos de operarios (controladores todo-nada). En la Figura 4 se muestra el gráfico de organización de un escenario en particular. Cada rectángulo repre-

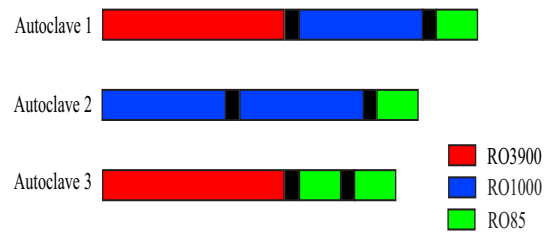


Figura 4: Ejemplo de un gráfico de organización de un escenario.

senta el ciclo de esterilización para el tipo de latas *RO3900* (rojo), *RO1000* (azul) y *RO85* (verde) y el rectángulo negro entre los ciclos simboliza los tiempos de carga y descarga.

Una vez realizadas las simulaciones se pueden comparar los resultados obtenidos. En la Figura 5 se muestra el porcentaje de ahorro de fuel en cada uno de los escenarios con respecto al que más fuel ha consumido (escenario 2). Se puede ver en la misma que, eligiendo de forma adecuada el modo de operación se puede llegar a un ahorro cercano al 18% en uno de los escenarios comparado con la peor alternativa. Además este escenario es el que menor cantidad total de tiempo de procesamiento necesita. De hecho, este tiempo se reduce casi a la mitad si se compara con la peor alternativa.

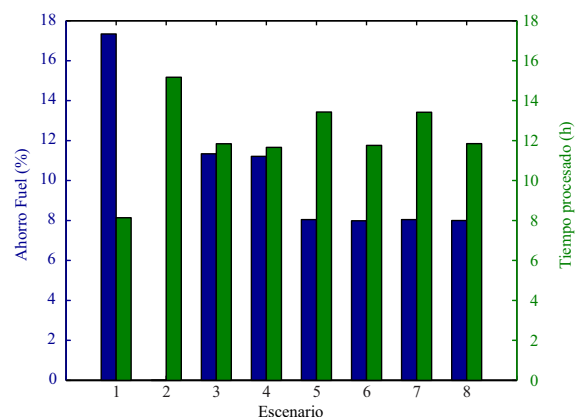


Figura 5: Comparación entre los distintos escenarios. Las barras azules hacen referencia al ahorro de fuel mientras que las verdes indican el tiempo total de procesamiento.

Otra ventaja del entorno de simulación es que permite comprobar en línea que el producto respeta las especificaciones marcadas por la ley. La Figura 6 muestra una gráfica tipo obtenida con el simulador para un ciclo de esterilización de las latas de tipo *RO3900*. Un valor de letalidad (línea verde)

muy superior al exigido por la ley, indica un sobreprocesamiento del producto. Se podría pensar, en-

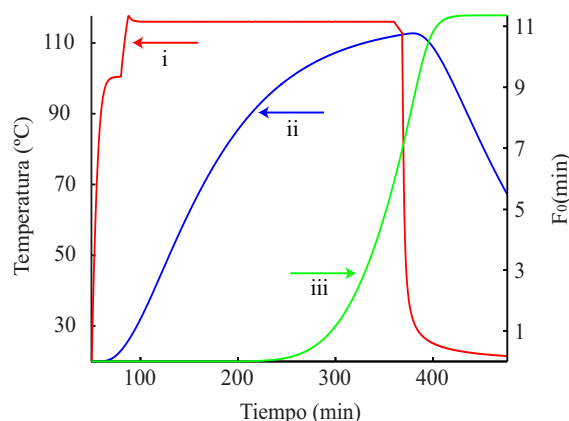


Figura 6: Gráfica típica mostrando (i) la temperatura del autoclave, (ii) temperatura en el centro de la lata y (iii) letalidad para un ciclo de esterilización dado.

tonces, en reducir el tiempo de procesamiento para aumentar la calidad del producto y disminuir los costes económicos.

#### 4.2. Ajuste de los parámetros de un controlador PI

En este ejemplo se ha empleado el entorno de simulación para ajustar un controlador del tipo PI, el cual se ha diseñado en el marco de IMC (*Internal Model Control*) [2]. El regulador resultante en forma de velocidades tiene la forma:

$$u_k = u_{k-1} + \frac{\tau}{K\lambda}(\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}) + \frac{1}{K\lambda}\varepsilon_k(t_k - t_{k-1}) \quad (5)$$

donde  $u$  es la abertura de la válvula,  $\varepsilon$  representa el error entre el punto de consigna y la medida de temperatura real y  $t$  es el tiempo. Los parámetros del controlador  $K$  y  $\tau$  representan, respectivamente, la ganancia y la constante de tiempo para la planta en lazo abierto, linealizada alrededor de la temperatura de operación de interés. Finalmente,  $\lambda$  es el parámetro del filtro y está relacionado con la velocidad de respuesta deseada en lazo cerrado. Para testar el efecto de  $\lambda$  en la respuesta de temperatura y en los movimientos de las válvulas manipuladas, se probaron distintos valores fijando el resto de los parámetros a:  $\tau = 35s$ ,  $K = 500$  y  $t_k - t_{k-1} = 10s$ , siendo la temperatura de consigna  $T_{sp} = 121,11^\circ C$ . La evolución de la temperatura del autoclave y de las aberturas de las válvulas de vapor y purga se representan en la Figura 7. Como se puede ver en la misma, cuanto más pequeño sea el valor de  $\lambda$  más rápida es la respuesta del controlador. Hay que tener en cuenta que valores muy pequeños de

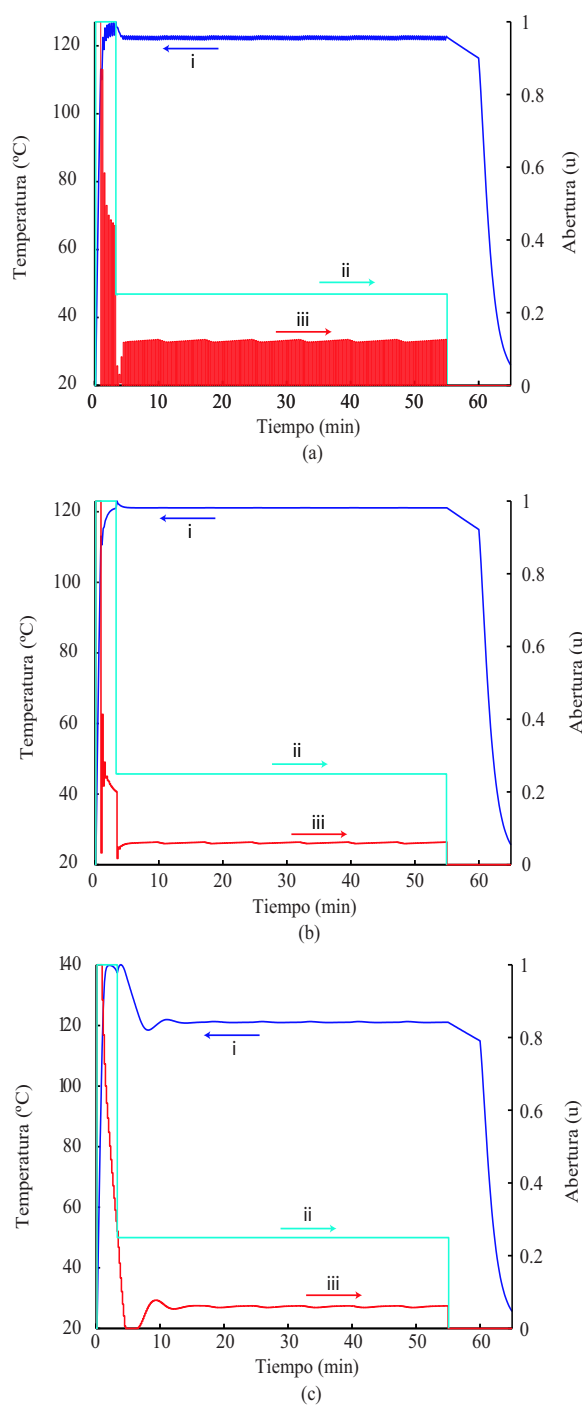


Figura 7: Simulación de un ciclo de esterilización con distintos valores del filtro (a)  $\lambda = 0,1$ , (b)  $\lambda = 1$  y (c)  $\lambda = 10$ . Las líneas azul (i), turquesa (ii) y roja (iii) indican la temperatura del autoclave, la abertura de la válvula de purga y la abertura de la válvula de vapor (acciones del controlador), respectivamente.

$\lambda$  pueden provocar un fenómeno de saturación de la válvula, como se ilustra en la Figura 7(a).

## 5. Conclusiones

Se ha presentado un entorno amigable para la simulación de procesos de la industria alimentaria. De forma intuitiva y mediante iconos, el usuario puede utilizar este entorno para el análisis del efecto de tecnologías alternativas en la producción, para el ajuste de controladores, así como para diseñar nuevas políticas de producción en el caso de condiciones de suministro fluctuantes, sin la necesidad de un conocimiento matemático extenso. Cabe destacar que, dadas las características de los procesos en los sistemas considerados, el simulador es capaz de tratar, de forma eficiente, sistemas híbridos así como procesos dinámicos no lineales distribuidos. Además, el entorno de simulación se puede incluir en esquemas de gestión via web, que permiten el acceso del usuario a la estructura de información general de la planta.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida del gobierno español (Proyecto del MCyT DPI2004-07444-C04-03).

### Referencias

- [1] Alonso, A.A., Banga, J.R., y Martín, R.I.P., (1997) "A Complete Dynamic Model for the Thermal Processing of Bioproducts in Batch Retorts and its Application to Controller Design", *Chem. Eng. Sci.* 52(8), pp 1307–1322.
- [2] Alonso, A.A., Banga, J.R., y Martín, R.I.P., (1998) "Modeling and Adaptive Control for Batch Sterilization", *Computers & Chemical Engineering* 22, pp 445–458.
- [3] Alonso, A.A., Fernández, C.V., y Banga, J.R., (2004) "Dissipative Systems: from physics to robust nonlinear control", *Int. J. Robust Nonlinear Control* 14(2), pp 157–179.
- [4] Alonso, A.A. y Ydstie, B.E., (2001) "Stabilization of Distributed Systems Using Irreversible Thermodynamics", *Automatica* 37(11), pp 1739–1755.
- [5] Balsa-Canto, E., Alonso, A.A., y Banga, J.R., (2002) "A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. Part I: Theory.", *Journal of Food Engineering* 52, pp 227–234.
- [6] Balsa-Canto, E., Alonso, A.A., y Banga, J.R., (2004) "Reduced-order models for nonlinear distributed process systems and their application in dynamic optimization", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43(13), pp 3353–3363.
- [7] Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C., y Alonso, A.A., (2003) "Improving food processing using modern optimization methods", *Trends in Food Science and Technology* 14(4), pp 131–144.
- [8] Barton, P.I., Banga, J.R., y Galán, S., (2000) "Optimization of hybrid discrete/continuous dynamic systems", *Computers & Chemical Engineering* 24, pp 2171–2182.
- [9] Chandra, P.K. y Singh, R.P. (1995) *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers*. CRC Press Inc. Florida, USA.
- [10] Datta, A.K. (2002) *Enabling Computer-Aided Food Process Engineering: Status and Needs* pages 3–14. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona 2002.
- [11] Datta, A.K. y Anantheswaran, R.C. (2001) *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Marcel Dekker Ltd. 270 Madison Avenue, New York.
- [12] Fryer, P., (1994) "Mathematical Models in Food Processing", *Chem. & Ind. London* 13, pp 515–518.
- [13] Fryer, P. y Li, Z., (1993) "Electrical-Resistance Heating of Foods", *Trends in Food Science & Technology* 4(11), pp 364–369.
- [14] Holmes, P.J., Lumley, J.L., Berkooz, G., Mattingly, J.C., y Wittenberg, R.W., (1997) "Low-dimensional models of coherent structures in turbulence", *Physics Reports* 287(4), pp 337–384.
- [15] Reddy, J.N. (1993) *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill 2nd edition.
- [16] Schiesser, W.E. (1991) *The Numerical Method of Lines*. Academic Press, New York.
- [17] Sirovich, L., (1987) "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. Part I: Coherent Structures", *Quarterly of Appl. Math.* 45(3), pp 561–571.
- [18] Smith, C.A. y Corripio, A.B. (1985) *Principles and practice of automatic process control*. John Wiley & Sons Inc.
- [19] Stephanopoulos, G. (1984) *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*. Prentice Hall New Jersey, USA.
- [20] Teixeira, A.A., Dixon, J.R., Zahradnik, J.W., y Zinsmeister, G.E., (1969) "Computer Determination of Spore Survival Distributions

in Thermally-Processed Conduction-Heated Foods”, *Food Technology* 23(3), pp 78.

- [21] Teixeira, A.A., Dixon, J.R., Zahradnik, J.W., y Zinsmeister, G.E., (1969) “Computer Optimization of Nutrient Retention in Thermal Processing of Conduction-Heated Foods”, *Food Technol.* 23, pp 137–42.
- [22] Tijskens, L.M.M., Hertog, M.L.A.T.M., y Nicolai, B.M. (2001) Food process modeling. Woodhead Pub. Lim. UK.