

# Simulación de un Sistema de Enfriamiento Industrial que Opera con Múltiples Fermentadores en Modo Batch

Luis Toselli<sup>1</sup>, Romina Beltrán<sup>1</sup>, Paula Toselli<sup>2</sup>

(1) Grupo de Inv. en Simulación para Ing. Qca. (2) Fac. Reg. Villa María, Dpto. de Sistemas, Univ. Tecnológica Nacional, Av. Universidad 450, X5900HLR Villa María, Cba. (Argentina)  
(toselli\_l@frvm.utn.edu.ar)

## RESUMEN

Se ha analizado el comportamiento del sistema de enfriamiento de fermentadores de una planta industrial que produce bioetanol mediante el proceso de molienda seca de maíz. Ésta dispone de múltiples unidades que operan en modo batch, pero desfasadas en el tiempo. Dada la importancia que posee el control de la temperatura de fermentación para obtener un adecuado rendimiento del proceso, se ha desarrollado un modelo que fue implementado con la finalidad de simular el comportamiento de las demandas energéticas parciales y totales del proceso, contemplando además la opción de considerar cargas térmicas por efectos ambientales. El mismo permite el desarrollo de análisis predictivos que eviten sobrecargas del sistema de enfriamiento. Su aplicación ha resultado de interés para evaluar distintos escenarios de operación, cuenta con una interfaz amigable para el usuario y ha sido validado frente a datos reales de proceso. Actualmente se trabaja para ampliar sus prestaciones permitiendo su utilización en procesos que operen en modo continuo de fermentación.

## INTRODUCCIÓN

Modelos matemáticos sencillos que describen el comportamiento de las fermentaciones que se desarrollan en modo batch han sido tratados en la literatura científica (Zhang, 2009). En líneas generales éstos pueden ser definidos a partir de un sistema de ecuaciones basadas en una ecuación clásica de crecimiento limitado por la concentración de sustrato (Monod, 1949). Puntualmente un modelo de estas características es descrito por las ecuaciones 1 a 4:

$$\mu = \left( \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \left( \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} \right) \cdot X \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{X/S}} \left( \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} \right) \cdot X \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{Y_{P/S}} \left( \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} \right) \cdot X \quad (4)$$

En donde  $\mu$  corresponde a la velocidad de crecimiento de la población de levaduras, X representa su concentración, S es la concentración del sustrato (azúcar) y P la del producto (etanol),  $K_s$  es la

denominada constante de saturación o de Monod, en tanto que  $Y_{X/S}$  e  $Y_{P/S}$ , son coeficientes de rendimiento promedio de biomasa-sustrato y de producto- sustrato, respectivamente.

Sin embargo, el proceso de fermentación de etanol resulta mucho más complejo y demanda ecuaciones adicionales para manejar condiciones con múltiple sustrato o múltiple producto, además deberían considerarse, entre otras cuestiones, los efectos inhibitorios por alta concentración de azúcares o de alcohol. Así, por ejemplo, para un fermentador batch que opere en modo de sacarificación y fermentación simultánea, requeriría de un modelo que considere la ecuación de Michaelis-Menten para describir la reacción enzimática de conversión de dextrinas a azúcares fermentables. (Devantier et al., 2005; Thatipamala et al., 1992).

Como caso de estudio se ha analizado el comportamiento de una planta industrial que produce bioetanol mediante el proceso de molienda seca de maíz y dispone de múltiples fermentadores que operan en modo batch pero desfasados en el tiempo, a efectos de abastecer adecuadamente a la destilería que trabaja en condición de operación continua. El proceso en cuestión utiliza la modalidad de sacarificación y fermentación simultánea para mostos con alta concentración de sólidos (Begea et al, 2010).

El volumen de información disponible permitió realizar un pormenorizado monitoreo de variables propias de la preparación del mosto a fermentar tales como: contenido de almidón del cereal, granulometría de molienda, dosificación de enzimas, temperatura de licuefacción, pH, concentración de sólidos de partida, entre otras; con el seguimiento durante todo el proceso hasta su conversión a mosto fermentado de otras variables específicas como recuento de levaduras, evolución de la conversión del almidón a dextrinas y azúcares fermentables, además del pH, temperatura y el incremento de concentraciones de etanol, glicerol y de los ácidos láctico y acético como indicadores indirectos de una eventual contaminación por proliferación de bacterias en el medio. (Stambury et al., 2003)

Del análisis realizado se observa una operatoria estable en la mayoría de las variables citadas, destacándose entonces, bajo estas condiciones, la importancia dominante que posee el control de la temperatura de fermentación para optimizar el comportamiento de las levaduras maximizando el rendimiento en etanol. En base a la información disponible se ha desarrollado un modelo que contempla la interrelación que existe entre las variables que afectan el sistema de enfriamiento y permite evaluar las demandas energéticas parciales en cada fermentador y totales de proceso. (Aros N., 2011; Kelsall y Lyons, 2003; Mavituna y Sinclair, 2008; Meredith J., 2003)

## **DESARROLLO DEL MODELO**

El mismo considera: i) capacidad de enfriamiento total ii) calor generado por fermentación y iii) calor adicional incorporado como carga térmica o disipado al medio, de acuerdo a condiciones externas (estacionales) debidas, principalmente, a su localización física en la planta.

El primer ítem contempla la disponibilidad de agua de refrigeración que se recircula a través del sistema de torres que operan en cascada, las cuales varían su capacidad operativa debido, básicamente, a condiciones estacionales.

El calor de fermentación se genera a diferentes velocidades durante el tiempo total de proceso (aproximadamente 60 hs.) de acuerdo a la cinética de ésta y sus condiciones de operación (ej:

alta concentración de sólidos totales en el mosto, con porcentajes que pueden variar entre un 25 % mínimo y 35 % máximo, además de las restantes variables ya citadas) produce una elevación de la temperatura, debiendo ser enfriado por recirculación en un intercambiador de calor externo. Del análisis de datos reales disponibles de múltiples fermentadores, operando bajo distintas condiciones, es posible estimar el calor liberado de manera indirecta, a partir del análisis de la velocidad de generación de productos de fermentación, en particular, del etanol dado que la presencia de subproductos es minoritaria. Para esto se ha propuesto una función general de tipo:

$$Q_{ferm} = Q_t \left( \frac{at}{(b + ct^2)} \right) \quad (5)$$

En donde  $Q_{ferm}$  esta expresado en kcal/h y representa la evolución del calor liberado en un fermentador en el tiempo,  $Q_t$  dado en kcal es el calor total generado en el mismo y  $t$  el tiempo en h, en tanto que  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes cuyos valores son: 0,01; 0,5099 y 0,02102, respectivamente.

El calor que cada equipo incorporaría como una carga térmica adicional a través de su superficie de acuerdo a las condiciones ambientales, dada su localización física en el exterior de la planta, es contemplado en el modelo y puede ser considerado o no por el usuario, cuando se desarrolla la simulación. Para una temperatura en la superficie de los fermentadores superior a la del mosto, la carga adicional, es obtenida de la ecuación:

$$Q_a = h_c A \Delta t \quad (6)$$

En donde  $Q_a$  es la carga calórica expresada en kcal/h,  $\Delta t$  es la diferencia de temperatura entre la superficie del equipo y el mosto de fermentación en  $^{\circ}\text{C}$  y  $h_c$  es un coeficiente de convección expresado en  $\text{kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cuando, por condiciones ambientales, se trabaja a una temperatura de entorno que resulta inferior a la de la superficie externa del equipo, el calor que se disipa es obtenido a partir de la ecuación:

$$Q_d = h_d A \Delta t \quad (7)$$

En donde  $Q_d$  es dicho calor expresado en kcal/h,  $\Delta t$  es la diferencia de temperatura entre la pared del equipo y la del medio y  $h_d$  es un coeficiente de convección expresado en  $\text{kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los valores de dichos coeficientes han sido establecidos para rangos de temperaturas de superficie comprendidas entre 32 y 60  $^{\circ}\text{C}$  y de temperatura ambiente en el rango de 0 y 32  $^{\circ}\text{C}$ .

El modelo se implementó utilizando Java Development Kit 1.7, específicamente Netbeans 7.3 como entorno de desarrollo, y para el almacenamiento de los datos históricos se usó PostgreSQL 9.0, ambas herramientas son gratuitas y pueden ser descargadas de la web dado que disponen de licencias GNU GPL / Java Community Process y BSD, respectivamente. El software para Simulación del Sistema de Enfriamiento de Fermentación (SSEF v1.0) cuenta con interfaces intuitivas que hacen sencillo su uso. La carga de datos al sistema se muestra en las figuras 1 y 2.

## RESULTADOS

La aplicación del simulador permite evaluar distintas estrategias de operación, opciones de mayor o menor complejidad para su implementación y/o impacto en el rendimiento del proceso.

Fig. 1. Ingreso de datos con información general del sistema

Fig. 2. Ingreso de datos con parámetros de carga del fermentador

Como ejemplo se cita: definir un límite operativo para la concentración de sólidos totales al que resulte conveniente ajustar al mosto para ser fermentado. Esto implicaría regular la disponibilidad de almidón a hidrolizar, reducir la producción total de azúcares fermentables y, por ende, ajustar el calor total que será liberado en la fermentación con una reducción controlada en la producción de etanol evitando así superar la capacidad máxima del sistema de enfriamiento. Esta opción en principio menos atractiva, sin embargo resultará más favorable que afrontar las pérdidas de producción asociadas a la caídas de rendimiento de los fermentadores por daños irreversibles y/o muerte de las levaduras debido a incrementos de temperaturas que resultan incontrolables para el sistema, especialmente en aquellos períodos en donde se reduce la eficiencia de las torres por

problemas operativos y/o mantenimiento, o bien debido a dificultades propias de bajo rendimiento en condiciones ambientales desfavorables por altas temperaturas estacionales.

Los resultados que se obtienen de la simulación se presentan en modo gráfico y tabular. En la figura 3 se muestra, a manera de ejemplo, una salida gráfica que presenta la evolución de la demanda de caudal de agua de enfriamiento total y de cada fermentador, en el tiempo. La información que puede obtenerse como salida se resume en la Tabla 1.

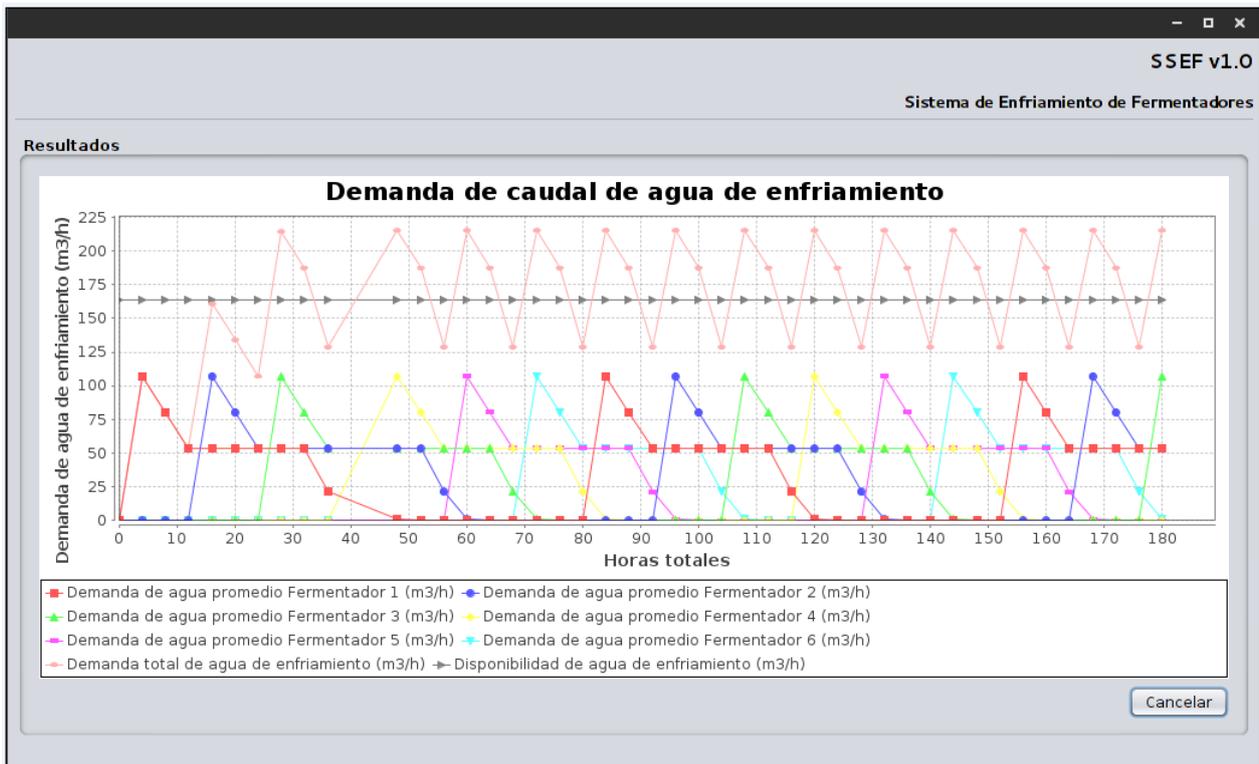


Fig. 3. Presentación de resultados en modo gráfico

Tabla 1. Opciones de salida de resultados que se pueden suministrar a requerimientos del usuario.

Resultados de:	Con referencia a:	Versus
Calor removido (kcal/h)	sistema global	tiempo total de operación (h)
	por fermentador	tiempo de fermentación (h)
Caudal de agua de enfriamiento requerida (m <sup>3</sup> /h)	sistema global	tiempo total de operación (h)
	por fermentador	tiempo de fermentación (h)
Nivel de empleo de la capacidad de enfriamiento (%)	sistema global	tiempo total de operación (h)
	por fermentador	tiempo de fermentación (h)
Utilización del área de transferencia disponible (m <sup>2</sup> )	sistema global	tiempo total de operación (h)
	por intercambiador	tiempo de fermentación (h)

Dado que el proceso real opera en modo batch pero está diseñado para poder trabajar también bajo la modalidad de fermentación continua, en la actualidad se está desarrollando la programación que permitirá ampliar las prestaciones del software para responder a ambas condiciones.

## CONCLUSIONES

La aplicación desarrollada resulta de operación sencilla y fácil de utilizar contando con una interfaz amigable para el usuario. La posibilidad de comparar la capacidad de enfriamiento disponible vs. la carga térmica total que debería ser eliminada del sistema, permite simular diferentes escenarios operativos para evitar condiciones de sobrecarga térmica que podrían afectar el rendimiento. Los datos teóricos que se han obtenido han podido compararse frente a datos reales de proceso, observando que los mismos resultan representativos del sistema.

## REFERENCIAS

- Aros N., M. Cifuentes y J. Mardones; *Modelación, Simulación y Control de Procesos de Fermentación*, Ingeniare: 19, 210-218 (2011).
- Begea M., G. Bâldea, C. Cîmpeanu, C. Stoicescu y P. Begea; *Utilization of Last Generation Enzymes for Industrial Use in Orden to Obtain Bioethanol from Locally Available Agricultural Renewable Resource*, Romanian Agricultural Research: 27, 155-160 (2010).
- Devantier, R., S. Pedersen y L. Olsson; *Characterisation of Very High Gravity Ethanol Fermentation of Corn Mash: Effects of Glucoamylase Dosage, Pre-saccharification and Yeast Strain*, Microbiology and Biotechnology: 68, 622-629 (2005).
- Kelsall D. R. y T. P. Lyons; *Chapter 10: Practical Management of Yeast: Conversion of Sugars to Ethanol. The Alcohol Textbook*, Nottingham University Press: UK. (2003).
- Mavituna F. y C. G. Sinclair; *Chapter 7: Modelling the Kinetics of Biological Activity in Fermentation Systems. Practical Fermentation Technology*, John Wiley & Sons Ltd. UK. (2008).
- Meredith J.; *Chapter 25: Understanding energy use and energy users in contemporary ethanol plants. The Alcohol Textbook*, Nottingham University Press. UK. (2003).
- Monod J.; *The Growth of Bacterial Culture*, Annual Review Microbiology: 1, 371-394 (1949).
- Stambury P.F., A. Whitaker y J.J. Hall; *Chapter 2: Microbial Kinetics Growth. Principles of Fermentation Technology*, 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier Science. USA. (2003)
- Thatipamala, R., Rohani, S. y Hill G.; *Effects of High Product and Substrate Inhibitions on the Kinetics and Biomass and Products Yields During Ethanol Batch Fermentation*, Biotechnology and Bioengineering: 40, 289-297 (1992).
- Zhang, Z.; *Chapter 17: Batch Fermentation and Fermentor Design. The Alcohol Textbook*, 5<sup>th</sup> edition, Nottingham University Press. UK. (2009).