

3 - Control y Dinámica de Procesos

Minimización de los Consumos de Agua y Energía durante la Fermentación Alcohólica No Isotérmica en Vinos

Pablo. M. Aballay^{1*}, Gustavo J. E. Scaglia¹, Martha D. Vallejo² y Oscar A. Ortiz¹

¹ Instituto de Ingeniería Química - Universidad Nacional de San Juan,
Av. Lib. San Martín Oeste 1109, (J5400ARL) San Juan, Argentina, *paballay@unsj.edu.ar

² Instituto de Biotecnología - Universidad Nacional de San Juan,
Av. Lib. San Martín Oeste 1109, (J5400ARL) San Juan, Argentina

Resumen - El uso de procedimientos no isotérmicos controlados en la producción de vinos de alta gama conduce a usar enfriamiento/calentamiento eficiente y sistemas automáticos de control.

En este trabajo se minimiza el consumo de agua (de enfriamiento/calentamiento) y energía (para su bombeo) durante la fermentación alcohólica en vinificación mediante la determinación de un perfil óptimo de temperatura de fermentación que preserva la producción deseada de etanol y la calidad del vino. Dicho perfil se obtiene mediante un método no restringido de optimización dinámica y el problema es de programación no lineal. Las restricciones son requisitos de temperatura y tiempo. Se utiliza un modelo no isotérmico mejorado para fermentaciones alcohólicas discontinuas aplicado a vinificaciones con uso de pre-fermentación en frío.

Los resultados se han verificado por simulación y comparado con la literatura y sugieren que se pueden obtener ahorros significativos de agua y energía durante la fermentación alcohólica enológica no isotérmica.

Palabras Claves: optimización dinámica, fermentación alcohólica enológica, ahorro de agua y energía

Minimization of water and energy consumptions during a non-isothermal alcoholic wine fermentation

Abstract - The use of controlled non-isothermal procedures in the production of high-quality wines leads to the use of efficient cooling/heating and automatic control systems.

In this work, (cooling/heating) water and energy (for its pumping) consumptions during alcoholic wine fermentation are minimized, by means of determining an optimal fermentation temperature profile that preserves the desired ethanol production and the wine quality. Such a profile is obtained by using a non-constrained dynamic optimization method and the problem is one of non-linear programming. Constraints are temperature and time requirements. An improved non-isothermal model for a batch alcoholic fermentation is used and it is applied to a cold pre-fermentation winemaking.

Results, which are been verified and compared to literature data, suggest that by means of optimization techniques, significant improvements in water and power savings can be obtained during non-isothermal oenological alcoholic fermentation.

Keywords: dynamic optimization, alcoholic wine fermentation, water and energy saving

INTRODUCCIÓN

El proceso industrial de vinificación requiere energía de muchas formas (calentamiento, enfriamiento, potencia, gases comprimidos, etc.). Generalmente la energía eléctrica es la más usada en las bodegas para

suministrar otras formas de energía. La energía eléctrica gastada para refrigeración suma alrededor del 50-70% del total de energía consumida en la bodega y, dentro de ésta, la operación de fermentación representa el principal consumo (Arroqui et al., 2002). La energía requerida en procesar una tonelada de uvas en la bodega se estima en 1,555 GJ (Smyth y Rusell, 2009). En las últimas décadas se ha observado el uso de procedimientos no isotérmicos cuidadosamente controlados en la producción de vinos tintos de alta gama. La maceración pre-fermentativa en frío es una práctica relativamente nueva que tiene el fin de mejorar algunas características de calidad importantes en los vinos tales como color y aroma. Consiste en mantener las uvas molidas entre 5-10°C durante algunos días permitiendo así la extracción de polifenoles del hollejo (piel de la uva) (Heredia et al., 2010) y, además, la temperatura no debe exceder 25°C. La fermentación primaria es la etapa clave en el proceso de vinificación: el azúcar contenida en el mosto (jugo de uva) se transforma en etanol, anhídrido carbónico y otros productos mediante la acción de levaduras según: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CH_3CH_2OH + 2CO_2$.

La temperatura es muy importante durante esta etapa de enfriamiento (algunas veces puede ser necesario un calentamiento) lo cual representa un gasto significativo de agua y energía. También es una práctica frecuente manipular la temperatura de fermentación para evitar fermentaciones lentas y detenidas. El diseño y el control adecuados del sistema de refrigeración son algunos de los tópicos importantes para el uso óptimo de la energía y el mantenimiento de la calidad final del vino. En este sentido el comportamiento térmico del proceso de fermentación es un factor clave a controlar.

El propósito de este trabajo es minimizar el consumo de agua y energía durante la fase de crecimiento celular (hasta 200 horas de proceso) dentro de la etapa de fermentación en la producción de vino mediante un perfil óptimo de temperatura que permita mantener la producción de etanol en el nivel deseado y preservar la calidad del vino. El perfil óptimo de temperatura se logra por medio de un algoritmo de optimización dinámica. Los estados y las acciones de control se aproximan con un polinomio de la temperatura y el problema de optimización se convierte en un problema de programación no lineal (PNL). El consumo de agua y energía en la etapa de fermentación se puede controlar como una función de la evolución deseada del proceso representada por un perfil de CO₂ o concentración de células. Además las restricciones para mantener la calidad del vino son generalmente temperatura y tiempo.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: primero se formula el problema de optimización dinámica, segundo se describe el algoritmo de optimización dinámica para la resolución del problema, tercero los resultados de la optimización se muestran y comparan con un perfil de temperatura experimental típico generado a partir de la literatura, cuarto se expone una discusión sobre la aplicación de los resultados obtenidos en esquemas complejos de control en la vinificación y las conclusiones del trabajo.

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

El siguiente problema de optimización dinámica comprende un funcional de costo (función objetivo), un modelo dinámico del bioproceso descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) (ver detalles como la descripción de parámetros y las suposiciones en Aballay et al., 2010) y restricciones de igualdad y de desigualdad (ver Tabla 1). El tiempo t [h] $\parallel [0, t_f]$, donde t_f es el tiempo final del proceso.

2.1 Función objetivo: el índice de desempeño a minimizar, J , deriva del modelo matemático del proceso y, específicamente, proviene del balance de energía entre el biorreactor y su camisa de agua de enfriamiento/calentamiento,

$$J = M_w(tf) = abs \left[\int_0^{t_f} \left(\begin{array}{l} \frac{1}{Cp_w \cdot (T_{w,out} - T_{w,in})} \dots \\ \rho_r \cdot V_r \cdot Cp_r \cdot \frac{dT}{dt} \dots \\ \dots - Y_{H/CO_2} \cdot V_r \cdot \frac{dCO_2}{dt} \end{array} \right) dt \right] \quad (1)$$

$M_w(t_f)$ [kg] es la masa total de agua utilizada para enfriamiento/calentamiento durante la fase de crecimiento celular en la fermentación alcohólica enológica. La función completa dentro de la integral representa el caudal de agua de enfriamiento/calentamiento, F_w [kg h⁻¹], el cual varía con el tiempo. El denominador del primer cociente del lado derecho de la Ec. (1) proviene del calor sensible del lado de la camisa de agua. Cp_w es la capacidad calorífica del agua [W-h kg⁻¹ K⁻¹], $T_{w,out}$ (Ec. 2) y $T_{w,in}$, ambas en [K], son las temperaturas del agua de enfriamiento/calentamiento en la salida y la entrada de la camisa respectivamente. Además el segundo paréntesis del lado derecho de la Ec. (1) representa el calor total intercambiado (como potencia) entre la masa en fermentación y la camisa, $Q(tf)$ [W]. Luego el primer término dentro del paréntesis del lado derecho de la Ec. (1) es la cantidad de (calor) acumulado en el biorreactor como potencia y el segundo término es el calor generado por la biorreacción como potencia. V_r [m³], ρ_r [kg m⁻³] y C_{pr} [W-h kg⁻¹ K⁻¹] son el volumen, la densidad y capacidad calorífica de la masa en fermentación, respectivamente. T [K] es la temperatura (del biorreactor o de fermentación). Y_{HCO_2} [W-h producidos/kg CO₂ liberado] es la energía debida a la evolución de anhídrido carbónico liberado por la biorreacción.

2.2 Restricciones de igualdad (Tabla 1): Se establecen a partir del modelo fenomenológico no isotérmico (Aballay et al., 2010; Aballay et al., 2012) y principalmente a partir de sus balances de masa en el tiempo para células viables (X) [kg m⁻³], sustrato (S) [kg m⁻³], anhídrido carbónico (CO₂) [kg m⁻³] (ver Tabla 1) y etanol (P) [kg m⁻³]. Los balances de masa se acoplan con el balance de energía por medio de la ecuación de Arrhenius para las velocidades de crecimiento y muerte celular específicas máximas, $\mu_m(T)$ [h⁻¹] y $K_d(T)$ [h⁻¹], respectivamente, y por medio del anhídrido carbónico liberado al 85-95% valor máximo, $CO_{2(95)}(T)$ [kg m⁻³]. El balance de energía del lado de la camisa y la suposiciones correspondientes se detallan en el trabajo de Aballay et al. (2008) donde la temperatura del agua de enfriamiento/calentamiento en la salida de la camisa se calcula mediante

$$\text{Función objetivo: } \min_{T(t)} J = M_w(t_f) = \int_0^{t_f} f [\dot{C}O_2(X, S, T), \dot{T}(t), T_{w,out}(T, F_w), t] dt$$

Restricciones:

| Modelo fenomenológico no isotérmico | Condiciones iniciales y finales |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| $\frac{dX}{dt} = f_1(X, S, T, t)$ | $X(0) = 0,455$ |
| $\frac{dS}{dt} = f_2(X, S, T, t)$ | $t_f = 200$ |
| $\frac{dCO_2}{dt} = f_3(X, S, T, t)$ | $CO_2(0) = 0$ |
| $\frac{dT}{dt} = f_4(a_1, t)$ | $80 \leq \dot{C}O_2(tf) \leq 100$ |
| $T_{w,out} = f_5(FW, T, t)$ | $T(0) = 278$ |
| | $T_{w,in} = 293.5$ |
| | $a_1(0) = 1$ |
| | $(0) = 0.244$ |

Límites sobre las variables de estado y optimización

$$X, S, T, F_w, t \geq 0 \qquad 278 \leq T(t) \leq 298$$

Tabla 1 - Formulación del problema de optimización dinámica.

$$T_{w,out} = T - \frac{T - T_{w,in}}{e^{\frac{U \cdot A_t}{F_w \cdot C_p_w}}} \quad (2)$$

U [$W m^{-2} K^{-1}$] es el coeficiente global de transferencia de calor y A_t [m^2] es el área de intercambio calórico.

Condiciones iniciales y finales: usadas para simular y optimizar el proceso. Las mismas se obtuvieron a partir de fermentaciones experimentales propias (Aballay et al., 2008) y de la literatura (Heredia et al., 2010) (ver Tabla 1).

2.3 Restricciones de desigualdad: para mantener la calidad final del vino y su concentración de etanol. Las mismas se basan en el CO_2 final liberado (Tabla 1).

Límites sobre la variable de optimización: por el uso de la maceración pre-fermentativa para generar el color y el aroma adecuados en el vino (Heredia et al., 2010) (Tabla 1).

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

En este caso el problema de optimización dinámica se puede especificar como un problema de programación no lineal en una variable, la temperatura, y resolverse con un método de optimización no restringida.

La meta del procedimiento es obtener el perfil de temperatura óptimo, el cual depende del tiempo, mediante el cálculo del valor óptimo del coeficiente a_1 en una ecuación polinómica de segundo orden que considera las condiciones iniciales y finales del proceso,

$$T(t) = 278 + t/10 + a_1 t (200-t) \quad (3)$$

Debido a que se debe resolver numéricamente el conjunto de EDO del modelo para actualizar el valor de la función objetivo (Ec. 1) en cada búsqueda iterativa se ha adoptado un procedimiento en dos etapas el cual se muestra en la Fig. 1. El algoritmo se ha implementado en Matlab® (2008) y después de resolver las ecuaciones del modelo (primera etapa) con el método de la secante, se minimiza la función objetivo J que depende del coeficiente a_1 . Luego de obtener el valor óptimo del coeficiente, éste se reemplaza en la ecuación polinómica de la temperatura. El perfil óptimo de temperatura obtenido hace que los usos totales de agua de enfriamiento/calentamiento y de energía sean mínimos.

Con respecto al caudal de agua de enfriamiento/calentamiento, $F_w(t)$, que permite determinar la masa total de agua utilizada en el proceso, $M_w(t_f)$, se aproxima numéricamente hasta convergencia a partir de las Ecs. (1) y (2) mediante la función *fzero* de Matlab® (2008) que se aplica en funciones continuas en una sola variable y utiliza una combinación entre los métodos de bisección, secante e interpolación cuadrática inversa para encontrar la raíz de funciones como la función objetivo implícita en una sola variable de este trabajo. Y en referencia a la energía total consumida como potencia para bombeo de agua de enfriamiento/calentamiento durante el tiempo de proceso, W_s [J], la misma se calcula según Ulrich (1984), como:

$$W_s(t_f) = \int_0^{t_f} \dot{W}_s(t) dt \quad (4)$$

$\dot{W}_s(t)$ [$J h^{-1}$] es la potencia de eje o al freno, para bombeo de agua en este caso, y la misma varía en el tiempo. Finalmente,

$$W_s(t_f) = \frac{M_w(t_f) \cdot \Delta p}{\rho_w \cdot \varepsilon_i} \cdot f_c \quad (5)$$

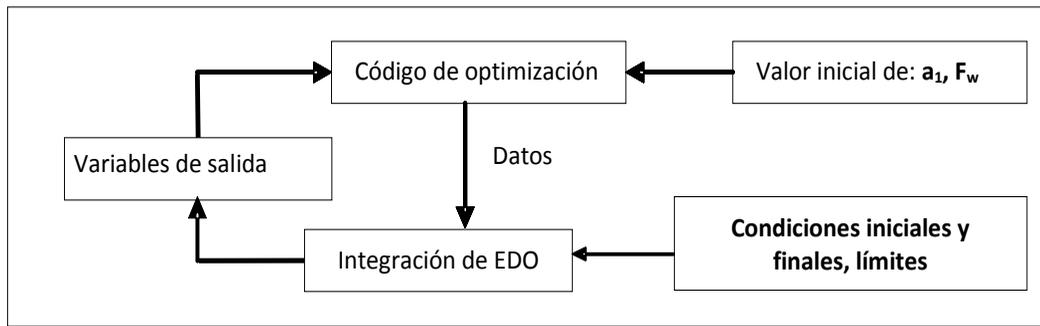


Figura 1 - Procedimiento en dos etapas para resolver el problema de optimización

| | a_1 | T [K] | X [kg m ⁻³] | CO ₂ [kg m ⁻³] | W _s [×10 ³ J] | M _w [kg] |
|------------------------|--------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Valor inicial | 1.000 | 278 | 0.0455 | 0 | 5,8393* | 48.908* |
| | | T(t) = 278+t/10+ | | | | |
| Valor solución | 0.0159 | | Fig. 6b | Fig. 7b** | 4,8295 | 40.451 |
| | | 0.0159*t(200-t) | | | | |
| Límite inferior | - | 278 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Límite superior | - | 298 | - | - | - | - |

*Este valor corresponde a la fermentación realizada mediante un perfil experimental típico de temperatura. (Heredia et al., 2010).

** CO₂ (200h) = 86,85 kg m⁻³

Tabla 2 - Solución al problema de optimización dinámica

Δp [atm] es el incremento de la presión de agua por bombeo, ϵ_i [adimensional] es la eficiencia intrínseca de la bomba como una relación entre la potencia teórica y la de eje, y f_c es un factor de conversión de unidades, igual a 101300 J atm⁻¹ m⁻³. Por último, se asume $\Delta p = 1$ atm (valor estimado) y $\epsilon_i = 0,85$ (valor típico para bombas centrífugas). Cabe aclarar que $W_s(t_f)$ (Ec. 5) está incorporado como una subrutina de cálculo dentro del algoritmo de optimización dinámica, y que W_s se utiliza generalmente como base para diseño preliminar y análisis económico (Ulrich, 1984).

RESULTADOS

El perfil óptimo para la variable de optimización, la temperatura del biorreactor, que minimiza el consumo de agua y energía para su bombeo a través de la camisa durante la etapa de crecimiento celular en la

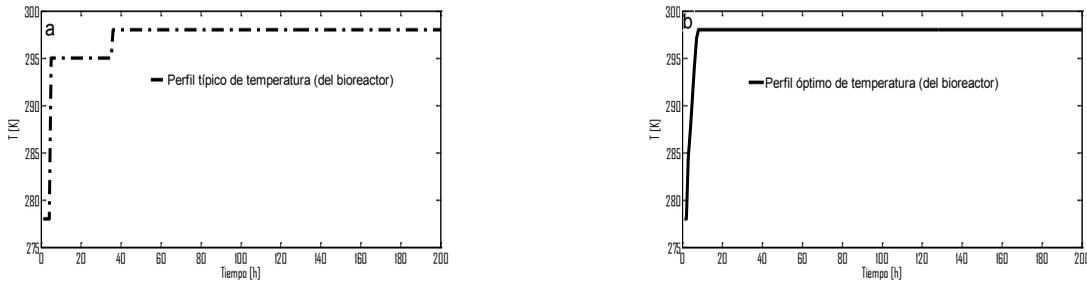


Figura 2 - Temperatura de fermentación (variable de optimización): Perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

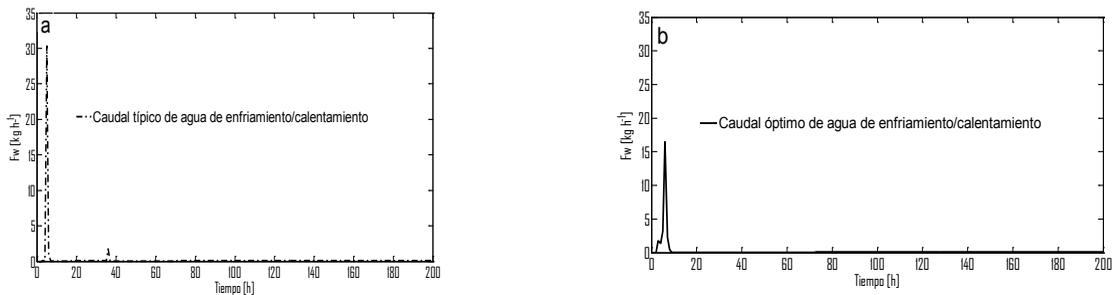


Figura 3 - Caudal de agua de enfriamiento/calentamiento (función objetivo): Perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

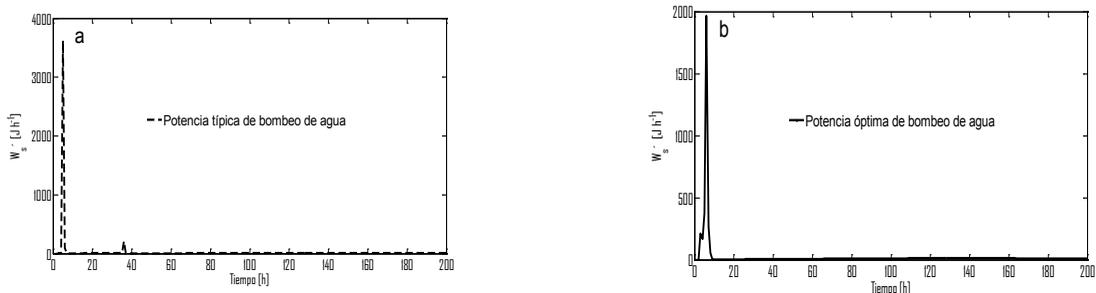


Figura 4 - Potencia de bombeo de agua de enfriamiento/calentamiento en la camisa (función objetivo): Perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

fermentación alcohólica enológica se muestra en la Tabla 2.

Teniendo en cuenta la forma altamente no lineal y el acoplamiento de ecuaciones en el problema de optimización dinámica se ha adoptado una solución casi óptima que asegura el consumo mínimo de agua y energía con una calidad final del vino aceptable. Por otra parte tal solución mantiene el sentido físico real del bioproceso de fermentación en la vinificación. Esta solución se ha verificado vía simulación en Matlab® (2008), resolviendo el sistema de EDO. La evolución de las variables de estado X y CO_2 con el perfil óptimo de temperatura logrado se muestra en las Figs. 2-7.

Finalmente, como se puede ver en la Tabla 2, la energía total consumida para bombeo de agua (W_s) y el gasto de agua (M_w) para calentamiento y enfriamiento durante la etapa de crecimiento celular en el proceso de fermentación se han minimizado hasta un 17,29%, en ambos casos, lo cual es una reducción no despreciable.

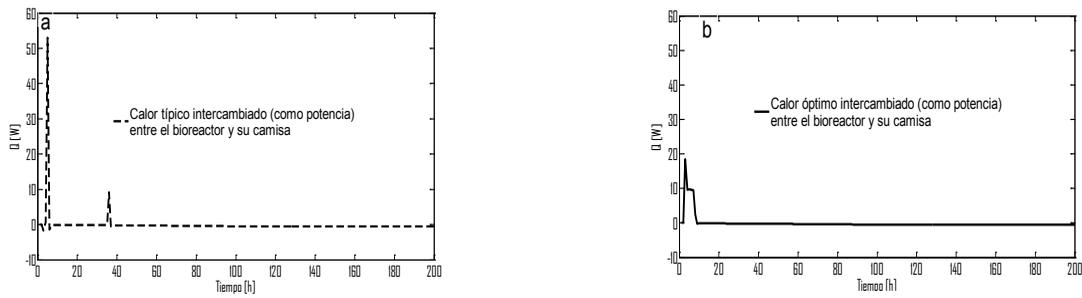


Figura 5 - Calor intercambiado (como potencia) entre la masa en fermentación y la camisa: Perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

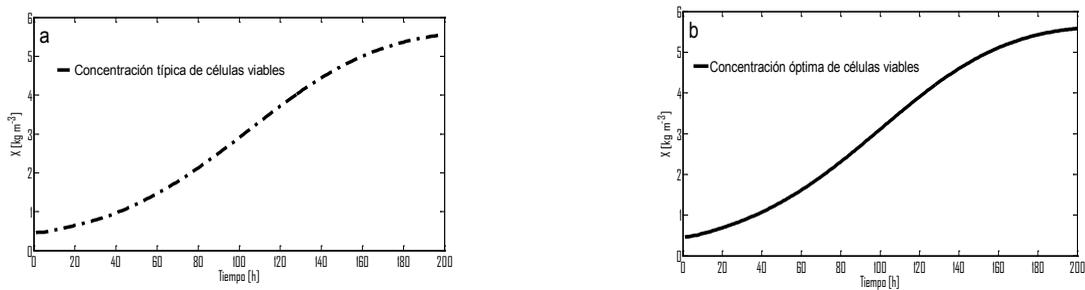


Figura 6 - Células viables (variable de estado): perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

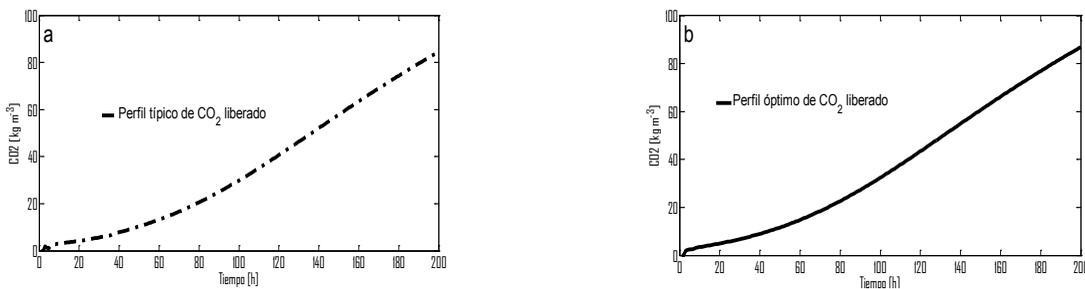


Figura 7 - Anhídrido carbónico liberado (variable de estado): perfiles (a) Típico y (b) Óptimo

De este modo se alcanza el objetivo final de este trabajo, la minimización del consumo de agua y de potencia para su bombeo con un ahorro de agua de 8,457 kg de agua y de 1009,8 J de energía de bombeo. Estos últimos resultados se han alcanzado con un perfil de temperatura optimizado con respecto a un perfil experimental típico (Fig. 2a). Al mismo tiempo, al verificarse las restricciones, no se modifica la calidad del vino y la concentración final de etanol está dentro del rango permitido (Tabla 1). Por otra parte se puede ver que: (Fig. 2b) el perfil óptimo de temperatura tiene forma cuadrática hasta que alcanza 298 K (a 8 horas de proceso) cuando se vuelve constante; (Fig.3) el perfil óptimo de caudal de agua de enfriamiento/calentamiento alcanza valores máximos que son la mitad con respecto al perfil típico. (Fig.4) el perfil de potencia de bombeo en el tiempo correspondiente al perfil de temperatura óptimo (b) requiere un máximo que es un 45% menor y ocurre antes que el máximo F_w con el perfil típico (a). Además en el caso (b) la máxima potencia se requiere en una sola

sesión; (Fig.5) la energía intercambiada en el tiempo para ambos perfiles de temperatura, el típico y el óptimo, requiere un calentamiento despreciable y un enfriamiento más importante. (Fig. 6) la concentración de células casi máxima de $5,56 \text{ kg m}^{-1}$ se alcanza a las 195 horas de proceso en el perfil óptimo (b), el cual es anterior al mismo valor en el perfil típico (a) (alcanzado a las 200 horas); (Fig. 7) La misma cantidad final de CO_2 liberado por unidad de volumen de masa en fermentación se alcanza antes con el perfil óptimo (195 horas) que con el típico (a las 200 horas).

CONCLUSIONES

Esta contribución se aplica a minimizar los requerimientos de agua y energía durante la fase de crecimiento celular en la etapa de fermentación en vinificación. La solución al problema de optimización dinámica, el perfil óptimo de temperatura del biorreactor se obtiene por medio de un algoritmo de optimización en dos etapas. Asimismo las restricciones de igualdad y de desigualdad aseguran la producción de etanol en el nivel deseado y que la calidad del vino no esté en riesgo debido a temperaturas no deseadas. Los resultados muestran la ventaja de la solución casi óptima sobre la típica.

Adicionalmente en próximas contribuciones se incluirán otros tópicos tales como: considerar el proceso de fermentación completo con la fase de muerte celular, mostrar un extenso análisis de sensibilidad para las variables y los parámetros del problema, extender los límites de optimización y la función objetivo al problema global de alto consumo de potencia y costos de refrigeración en vinificación y seguir el perfil óptimo de temperatura mediante un sistema de control avanzado.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Juan y al Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina, por el apoyo financiero para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Arroqui, Virseda y López, "Uso eficiente del frío en la industria enológica", *ACE Revista de enología*; 18, 1-7, (2002).
- Smyth y Russell, "From graft to bottle—Analysis of energy use in viticulture and wine production and the potential for solar renewable technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 13, 1985–1993, (2009).
- Heredia, Escudero-Gilete, Hernanz, Gordillo, Meléndez-Martínez, Vicario y González-Miret, "Influence of the refrigeration technique on the color and phenolic composition of syrah red wines obtained by pre-fermentative cold maceration", *Food Chemistry*; 118, 377–383, (2010).
- Aballay, Scaglia, Vallejo, Rodríguez y Ortiz, "Nonisothermal Model of the Yeasts Growth in Alcoholic Fermentations for High Quality Wines", *Actas de the 4th International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation-IMAACA 2010, Fes - Marruecos, 13-15 de octubre de 2010, 143-151, (2010).*
- Aballay, Vallejo, Scaglia, Serrano, Rómoli y Ortiz, "Phenomenological Modelling for Non-Isothermal Wine Fermentation", *Actas del V Encuentro Regional y el XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Química – AIQU CIIQ 2012, V. único, Cód. TL35, Montevideo, Uruguay, 12 al 14 de noviembre de 2012, 32, (2012).*
- Aballay, Scaglia, Vallejo y Ortiz, "Non isothermal phenomenological model of an enological fermentation: modelling and performance analysis", *Actas de the 10th International Chemical and Biological Engineering Conference - CHEMPOR 2008, Braga - Portugal, 4-6 de septiembre de 2008, (2008).*
- Matlab®, "Version 7.6.0.324 (Release 2008A)", *The MathWorks, Inc., USA, (2008).*
- Ulrich Gael, "A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics", *John Wiley & Sons, USA, 67-204, (1984).*