

Optimización del rendimiento del proceso de secado y extracción de polifenoles de biomasa vitivinícola residual.

Performance optimization of the process of drying and extraction of polyphenols from wine residual biomass.

Rocío ASAD, Mónica BONFIGLI

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Universidad Tecnológica Nacional -
Facultad Regional Rosario

rocioasad@gmail.com, mbonfigli@frro.utn.edu.ar

Resumen

Se describe un modelo matemático del proceso de secado de orujo y la extracción de sus compuestos fenólicos, con el objetivo de recuperar bio-compuestos a partir de los desechos de la industria vitivinícola para su revalorización. Se analiza el comportamiento de variables operativas de interés al maximizar el rendimiento total de la extracción para diferentes cantidades de materia prima ingresada al sistema. El rendimiento óptimo es muy elevado en todo el rango analizado, disminuyendo levemente con el incremento de la alimentación de orujo fresco. Para maximizar la recuperación total, el extracto concentrado alcanza la máxima concentración de sólidos solubles permitida en todos los casos a la vez que se incrementa el flujo de producto final. El desempeño del modelo es aceptable, lo que conduce a ampliar el análisis, en futuros trabajos, considerando no solo aspectos operativos sino también tecno-económicos con el fin de hacerlo más eficiente dentro del marco de la economía circular.

Palabras Claves

GAMS, Modelado Matemático, Optimización, Residuos de la industria vitivinícola.

Abstract

A mathematical model of the pomace drying process and the extraction of its phenolic compounds is described, with the aim of recovering bio-compounds from the waste of the wine industry for its revaluation. The behavior of operative variables of interest is analyzed when maximizing the total recovery of the extraction for different amounts of raw material feed into the system. The optimum recovery is really high throughout the analyzed range, slightly decreasing with the increase in fresh pomace feeding. To maximize

total recovery, the concentrated extract reaches the maximum concentration of soluble solids allowed in all cases while increasing the final product flow. The performance of the model is acceptable, which leads to the expansion of the analysis, in future works, considering not only operational but also techno-economic aspects in order to make it more efficient within the framework of the circular economy.

Keywords

GAMS, Mathematical Modeling, Optimization, Waste of the Wine Industry.

Introducción

Las grandes cantidades de biomasa de desecho que se generan en sectores primarios de base biológica son recursos valiosos para nuevas cadenas de valor con un fuerte potencial industrial en la visión circular de la bioeconomía (Rodríguez et al., 2019; Da Porto, 2018). En particular, la industria del vino produce una cantidad importante de residuos sólidos compuesta principalmente de orujo de uva, que puede representar más del 20% del peso de la biomasa cosechada y procesada. Este subproducto posee compuestos biológicamente activos que son interesantes para las industrias cosmética, farmacéutica y alimentaria para elaborar nuevos productos de alto valor agregado a través de procesos de extracción (da Silva et al., 2022). En este contexto, el objetivo del presente trabajo es analizar el proceso de extracción de polifenoles a partir de orujos tintos en base al modelado y la optimización matemática. Básicamente, se maximiza el rendimiento total de extracción para diversos ingresos de materia prima al sistema, conformado por una etapa de secado para el acondicionamiento del orujo seguida de otra de extracción.

Metodología

La etapa inicial consistió en la interpretación y análisis de resultados de dos modelos independientes desarrollados previamente en el centro de investigación. Específicamente, Bonfigli (2020) implementó un modelo de un secadero de túnel en contracorriente cuyo objetivo es reducir el porcentaje de humedad del orujo mientras que Bahr et al (2019) desarrollaron un modelo de una configuración típica del proceso de extracción por solvente de bio-compuestos a partir de orujos tintos.

Luego, en función de unificación de nombres de variables, conversión de unidades, estrategias de inicialización y escalado, etc. se acoplaron ambos procesos con el objeto de analizar el sistema integrado de secado del orujo y la extracción de sus compuestos fenólicos. En particular, se analizó la variación de la energía requerida en el secadero, el rendimiento y volumen operativos de los tanques de extracción, la energía consumida en el evaporador y el flujo de solvente fresco al maximizar el rendimiento total de la extracción para diferentes cantidades de materia prima ingresada al sistema.

El modelo matemático NLP (Non Linear Programming) es implementado en GAMS (General Algebraic Modelling System). Cuenta con 327 variables y 433 restricciones (igualdad y desigualdad), y se resuelve utilizando CONOPT con el objeto de optimizar las distintas variables operativas frente a distintos escenarios de optimización, cumpliendo las restricciones propuestas para una configuración definida.

Descripción del proceso

En la Figura 1 se representa esquemáticamente el sistema de secado de orujo (calentador de aire y secadero de túnel) y el de extracción en contracorriente de sus componentes fenólicos.

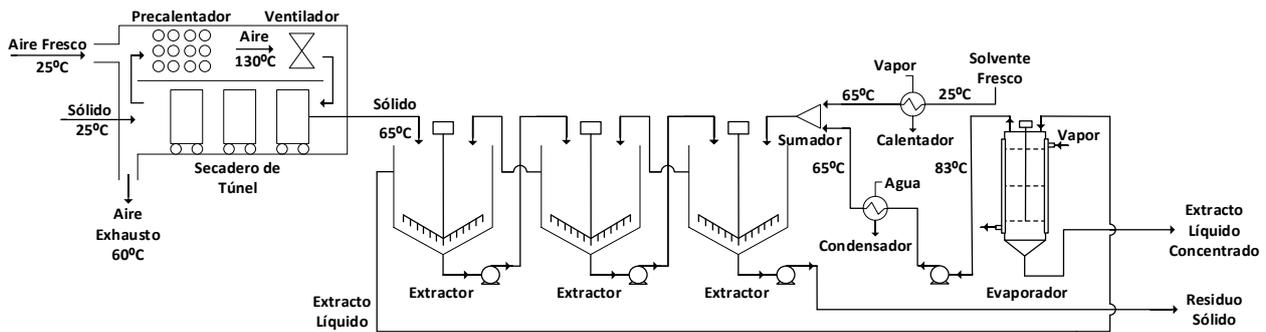


Figura 1. Esquema del proceso de secado de orujo y extracción de sus componentes fenólicos.

El secadero está formado por un túnel o cabina, con carretillas y bandejas sobre las cuales se coloca el material a secar. Las carretillas se desplazan por el túnel, por el cual fluye aire caliente en contracorriente que pasa sobre la superficie de cada bandeja. El aire atmosférico alimenta al secador y se mezcla con parte del aire húmedo que está recirculando. Luego, esta mezcla se calienta y se fuerza con un ventilador de manera homogénea a través de la sección transversal del túnel. Por otro lado, el sistema de extracción que, al igual que el secadero opera en forma continua y en contracorriente, está conformado por tres tanques de lixiviación (extractores) conectados en serie, un condensador, un calentador, un mezclador y un evaporador. Básicamente, el sólido previamente acondicionado (seco) ingresa en la primera etapa de extracción, mientras que en la tercera ingresa una mezcla de solvente fresco (etanol-agua 50% v/v) con una parte de solvente recirculante y se extrae el sólido residual. En el evaporador se concentra el producto final (extracto líquido concentrado) y se recupera parte del solvente que posteriormente se recircula.

Características de los modelos matemáticos

El modelo del secadero de túnel consiste básicamente en balances de materia y energía para tres secciones consecutivas: precalentamiento, secado a velocidad constante y a velocidad decreciente. En la etapa de precalentamiento se calcula la energía necesaria para elevar la temperatura del sólido hasta el valor de temperatura de bulbo húmedo a la que se realizará el secado. En la sección de secado a velocidad constante, se estima la energía que hay que aportar al sistema para la evaporación de la humedad del material hasta llegar a la humedad crítica, pues se considera que toda el agua se evapora en esta etapa. Finalmente, en la sección de secado a velocidad decreciente se determina la energía requerida para el recalentamiento del material hasta llegar a la temperatura final. La cantidad de aire necesaria para el secado es función de la suma de la energía intercambiada en cada sección del secadero. Además, el modelo relaciona diversas variables operativas (caudal, flujo máximo y temperatura del aire y del material a secar, etc.) con otras asociadas a sus características geométricas (longitud total, longitud del secadero ocupada por carretillas, área de la superficie total de bandejas, área transversal de flujo, número de bandejas, tiempo de residencia, etc.).

Por otro lado, hay correlaciones para la estimación del calor específico y la densidad del material a secar en función de los componentes mayoritarios en el orujo como así también otras para la estimación de la temperatura del bulbo húmedo y la humedad absoluta del aire.

El modelo matemático de la etapa de extracción para la recuperación de polifenoles a partir de orujos tintos está constituido por ecuaciones que describen la cinética de extracción, ecuaciones de balances de materia, tiempo de residencia y volumen operativo de los tanques de lixiviación y balances en el evaporador y módulos auxiliares que conforman el proceso. Se asume que la unidad de lixiviación a escala industrial tiene el mismo comportamiento cinético que el observado a escala laboratorio cuando las condiciones de operación se mantienen constantes (fracción volumétrica de solvente, temperatura, presión, tiempo de lixiviación, porosidad y densidad de la materia prima). Finalmente, para evaluar la performance de la extracción se define el rendimiento total como la relación entre la cantidad de polifenoles recuperados en el proceso de extracción respecto de la cantidad disponible en la materia prima.

Caso de estudio

Se asume que el orujo a tratar está constituido por 4.9% de hidratos de carbono, 3.4% de proteínas, 2.2% de lípidos, 2.4% de cenizas, 13.7% de fibras y 73.5% de agua. Este entra al secadero con una temperatura de 25°C y humedad de 73.5%, y sale con una temperatura de 65°C y humedad de 7.5%. El aire, por otra parte, entra con una temperatura de 130°C y humedad relativa de 2.5%, y sale con una temperatura de 60°C y una humedad relativa de 55%. La extracción se realiza a 65°C y el evaporador de película descendente opera a 85°C. Los parámetros de diseño del secadero y del sistema de extracción son tomados de Bonfigli (2020) y Bahr et al. (2019), respectivamente.

Se analiza la performance del proceso al maximizar el rendimiento, variando paramétricamente el caudal de alimentación fresca entre 800 kg/s y 1200 kg/s. Se asume que se dispone de un volumen total máximo de 10 m³ para los tres tanques y que cada tanque puede operar con un máximo del 75% de su capacidad. Por otro lado, la concentración final de sólidos solubles en el extracto líquido debe encontrarse entre 20 y 40%.

Análisis de Resultados

En primera instancia, se analiza el consumo energético durante el secado del orujo fresco. El calor transferido por unidad de masa de alimentación en las etapas de precalentamiento, calentamiento a velocidad constante y calentamiento a velocidad decreciente es 39.19 kJ/kg, 1598.80 kJ/kg y 67.94 kJ/kg de orujo fresco, respectivamente. Como es de esperar, la etapa de velocidad constante es la de mayor consumo energético (94%) ya que es donde se realiza toda la extracción de humedad. Las condiciones de ingreso al sistema de extracción están definidas, por lo que la función objetivo no afecta los resultados de la etapa de secado.

En la Figura 2 se representan las variaciones óptimas del rendimiento total y el flujo de producto líquido concentrado, en la Figura 3 la energía consumida en el evaporador y el flujo de solvente recuperado y en la Figura 4 se muestra la variación del volumen operativo y el rendimiento de cada tanque de extracción, en cada caso respecto al incremento del 50% del flujo de materia prima.

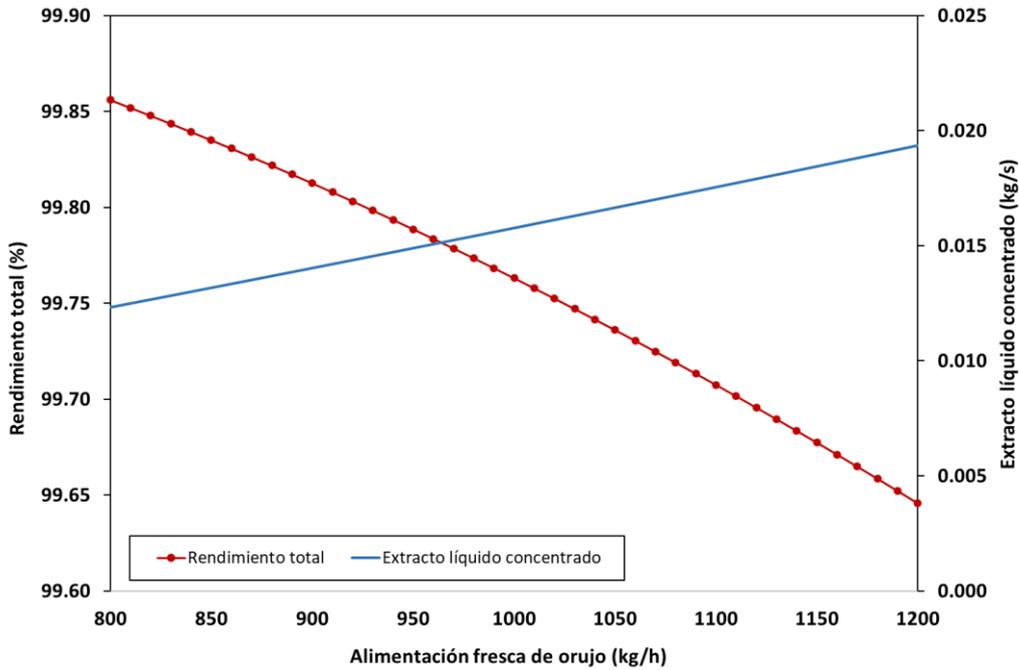


Figura 2. Rendimiento óptimo total y flujo de extracto concentrado en función de la alimentación de orujo.

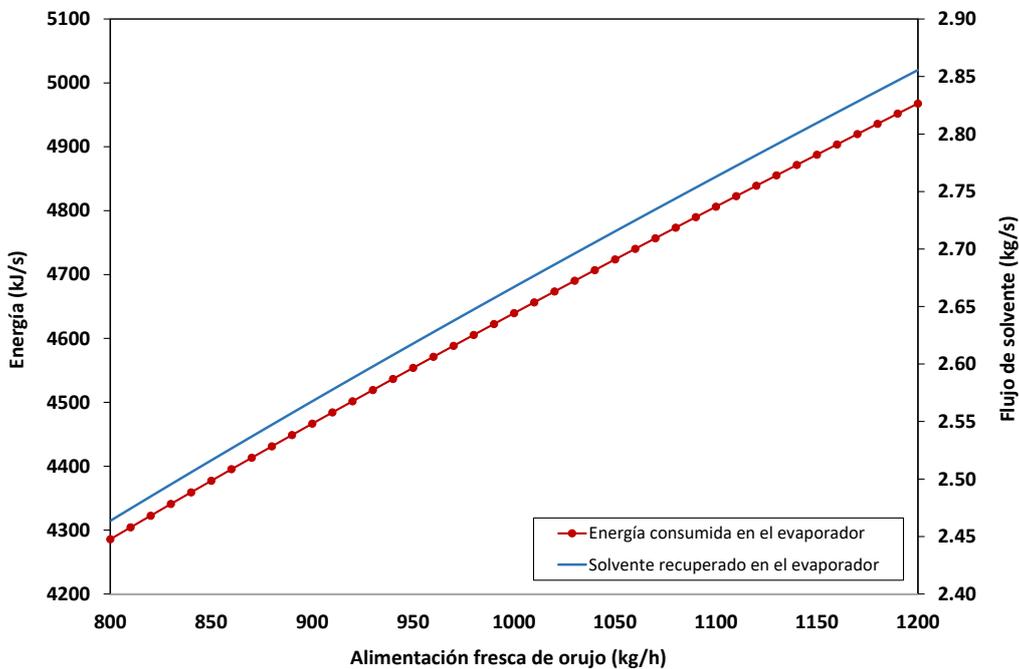


Figura 3. Flujo de solvente recuperado y energía consumida en el evaporador en función de la alim. de orujo.

Específicamente, en la Figura 2 se observa que el rendimiento óptimo total es muy elevado (>99.5%), disminuyendo levemente con el incremento de la alimentación de orujo fresco (50%). Para maximizar la

recuperación total, el extracto concentrado alcanza la máxima concentración de sólidos solubles permitida en todos los casos (40%) a la vez que se incrementa el flujo de producto final (57.11%).

Como es de esperar, la energía consumida en el evaporador es proporcional a la cantidad y calidad de producto, así como a la cantidad de solvente recuperado (Figura 3), lo que reduce el consumo de solvente fresco para un valor dado de alimentación. Específicamente, el solvente fresco representa entre el 0.27 y 0.36 % de la alimentación líquida del tanque T3.

En la Figura 4 se observa que el rendimiento individual también disminuye en los tres tanques siendo siempre mayor en el tercero ya que, al trabajar en contracorriente, se tiene una mayor diferencia de concentraciones (mayor fuerza impulsora). Particularmente, para 800 kg/s de orujo fresco, la diferencia de rendimiento entre el tanque T1 y el T2 es similar a la del T2 y el T3 (alrededor del 1%) llegando a 1.85% para el máximo caudal de orujo fresco analizado (1200 kg/s).

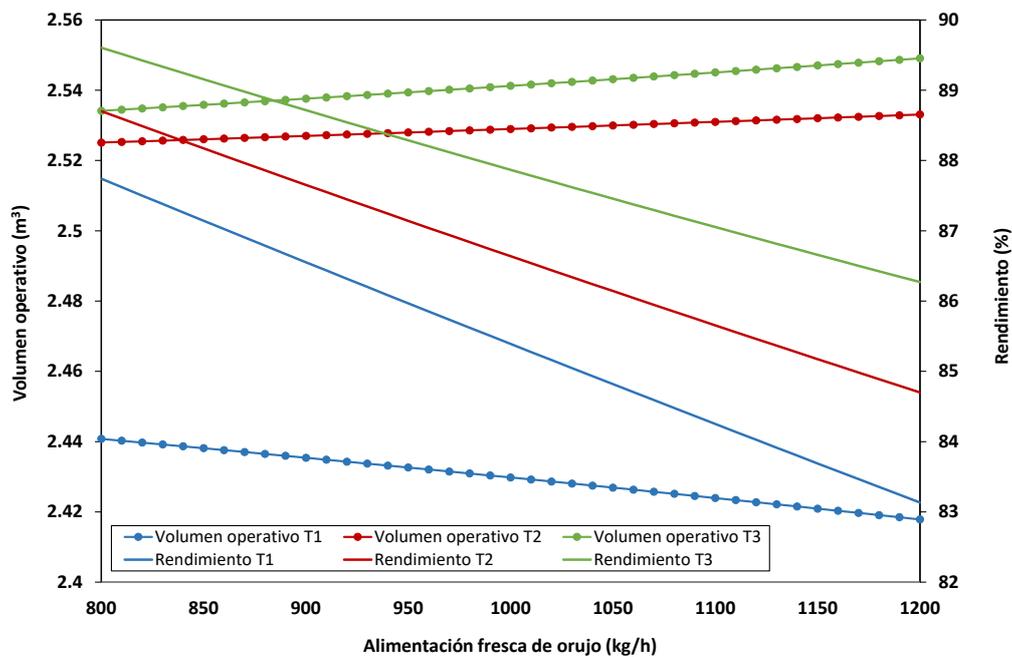


Figura 4. Volumen operativo y rendimiento de cada tanque en función de la alimentación de orujo.

Por otro lado, a mayor ingreso de orujo el volumen operativo de los tanques T2 y T3 aumenta, mientras que el del T1 disminuye. Este comportamiento se atribuye a la hipótesis establecida de que el volumen total de los tanques no debe superar los 10 m³ y el 75% de su capacidad, de manera que los volúmenes operativos individuales compensan sus tamaños para cumplir con dicha restricción en un escenario de máxima recuperación. Para 800 kg/h de alimentación, la diferencia de volumen operativo entre los tanques T1 y T2 es del 3.34%, y entre el T2 y el T3 es del 0.36% y se hace algo mayor para 1200 kg/h (4.55% y 0.63%, respectivamente).

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo consistió en analizar el proceso de extracción de polifenoles a partir de orujos tintos en base al modelado y la optimización matemática. En este aspecto, el modelo admite el análisis e identificación de tendencias para distintas condiciones de operación y variables de forma aceptable. Se observan elevadas recuperaciones globales (>99.5%) en todo el rango de alimentación analizado, redistribuyendo de manera óptima el volumen disponible entre las diferentes etapas de extracción. El consumo de energía en el evaporador está fundamentalmente asociado a la mejora de la calidad del producto y la recuperación de solvente, haciendo mínimo el consumo de solvente fresco.

En trabajos futuros, se estudiará la influencia de otras variables de proceso y diseño dándole más grados de libertad al modelo. Además, se pretende incorporar un modelo simplificado de costos con el fin de hacerlo más eficiente dentro del marco de la economía circular.

Reconocimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto UTN5237: “Estrategias de Diseño de Procesos de Bioingeniería Sustentables. Aplicaciones a Casos de Estudio en el marco de la bioeconomía.”, en el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), de la UTN-Rosario.

Referencias

- Bahr, I., Savino E.M., Bonfigli, M. (2019). “Optimización de un proceso de recuperación de compuestos bioactivos de subproductos de la industria vitivinícola”, *Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, JIT 2019*, p20.
- Bonfigli, M. (2020) “Modelado matemático y simulación de un secadero de túnel para la deshidratación de subproductos de la industria vitivinícola”, *Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, JIT 2020*, p35.
- Da Porto, C., Natolio, A. (2018). “Optimization of the extraction of phenolic compounds from red grape marc (*Vitis vinifera* L.) using response surface methodology”, *Journal of Wine Research*, 29: 1, 26–36.
- da Silva, D.J., de Oliveira, M.M., Wang, S.H. (2022). “Designing antimicrobial polypropylene films with grape pomace extract for food packaging”, *Food Packaging and Shelf Life* 34.
- Rodríguez, A.G., Rodrigues, M., Sotomayor, O. (2019). *Hacia una bioeconomía sostenible en América Latina y el Caribe: elementos para una visión regional*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).