

Modelo de Predicción de Viscosidad de Mostos de Fermentación de Alta Concentración de Sólidos

Mónica Guerrero¹, Luis Toselli¹, Romina Beltrán¹ y Patricia Maldonado²

¹ Grupo de Investigación en Simulación para Ing. Qca. – GISIQ - FRVM de la UTN, Av. Universidad 450, (X5900HLR) Villa María, Córdoba, Argentina.

² Laboratorio de Química, Carrera de Ingeniería Química, FRVM de la UTN.
email: guerrero.mp@gmail.com

Resumen - Se ha desarrollado un modelo de predicción de viscosidad de mostos de fermentación de alta concentración de sólidos en función de la temperatura a partir de datos experimentales propios. Para su determinación se trabajó con muestras de mostos con concentración de sólidos de 30% p/p obtenidas del proceso real a escala industrial. Para la medición se utilizó un viscosímetro rotacional debidamente calibrado generando una población total de veinticinco datos, cada uno de los cuales fue determinado como el valor promedio entre diez mediciones realizadas para cada temperatura abarcando el intervalo de operación comprendido entre 30 y 90°C. Con dicha información se propuso una correlación que responde a un aproximante de Padé tipo (1,1). El modelo presenta un error promedio absoluto de 2,5% y un R_a^2 de 0,97; resulta simple y de fácil aplicación y ha sido utilizado para el diseño de enfriadores del proceso considerado comprobándose su validez.

Palabras claves: aproximantes de Padé, viscosidad, mosto de fermentación

Abstract - It has been developed a model for predicting fermentation musts viscosity with high solids concentration as a function of temperature, from own experimental data. For its determination it has worked with samples of musts with solids concentration of 30% p/p, obtained from a real process of industrial scale. For measurement it was used a rotational viscometer calibrated properly, generating a population of twenty five data, each of which was determined as the average of ten measurements made for each temperature, comprising operating range between 30 and 90°C. With this information it was proposed a correlation that responds to a Pade approximant of type (1,1). The model has an absolute average error of 2.5% and 0.97 R_a^2 , is simple and easy to apply and has been used to design chillers of the process considered proving its validity.

Keywords: Padé approximants, viscosity, fermentation must

INTRODUCCIÓN

En un proceso de obtención de bioetanol mediante el método de molienda seca de maíz la disponibilidad de un mosto de alto contenido de sólidos para fermentación abarca las etapas previas de molido, premezcla y licuefacción mediante enzimas específicas que degradan la estructura del almidón. Cada uno de estos procedimientos involucra cambios térmicos progresivos. (Begea et al., 2010; Kelsall and Lyons, 2003).

La hidrólisis del almidón se completa con la gelatinización mediante cocción clásica con inyección directa de vapor (Jet Cooker) a temperaturas superiores a 100°C o bien por acción enzimática, durante tiempo

controlado, a valores cercanos a 85°C. Luego, en todos los casos, el mosto es enfriado a 32°C para el desarrollo de la sacarificación y fermentación simultánea (SFS). (Devantier et al., 2005; Novozymes, 2008; Power, 2003).

En todas las etapas consideradas el control riguroso de la variación de viscosidad resulta un factor clave para evitar serios problemas de flujo y, por ende, también de transferencia de calor. En particular, esto resulta de especial interés durante el súbito enfriamiento final, condición en la cual la viscosidad se incrementa rápidamente hasta casi duplicar su valor.

El objetivo de este trabajo consistió en el desarrollo de un modelo de predicción de viscosidad de mostos de fermentación de alta concentración de sólidos en función de la temperatura.

El mismo ha sido aplicado al diseño de equipos de termotransferencia y al desarrollo de modelos de simulación de procesos en el contexto de convenios vigentes con empresas regionales.

DESARROLLO

Los polinomios algebraicos tienen algunas ventajas distintivas en cuanto a su uso para aproximaciones, esto es: 1) resultan fáciles de evaluar en cualquier valor y 2) sus derivadas e integrales existen y son obtenidas sin mayor complejidad.

Existen suficientes polinomios como para aproximar cualquier conjunto de datos experimentales dentro de una tolerancia arbitraria. No obstante, la dificultad que presentan es su tendencia a oscilar, lo que causa con frecuencia que las cotas de error de las aproximaciones excedan significativamente el error de aproximación promedio (Gouy et al., 2002; Vajta, 2000).

Una técnica que resuelve el problema asociado con este error es la aproximación de Padé, que constituye la extensión natural del desarrollo de Taylor, la cual trabaja con funciones racionales y presenta la ventaja adicional de permitir la aproximación de funciones que pueden poseer discontinuidades infinitas cercanas.

Por otra parte la razón de aplicación de aproximantes de Padé es tener una forma rápidamente convergente de evaluar el valor de una función en un punto en particular o para crear una curva que muestre el comportamiento de la función en más de una región de interés.

La discusión de la convergencia de este método se complica por la aparición de “defectos”. Por esto se entiende un cero o un polo que están muy cerca uno del otro. No obstante grandes matemáticos contribuyeron a cimentar la teoría de la aproximación de Padé, tanto en relación a los aspectos algebraicos como a los primeros resultados sobre convergencia de sucesiones de estos aproximantes. En este último sentido destacan los clásicos teoremas de Markov, Stieltjes y Montessus de Ballore (Baker, 1999).

Para la determinación de los datos experimentales se trabajó con muestras de mosto con concentración de sólidos de 30% p/p obtenidas durante la operación del proceso real a escala industrial.

Para su tratamiento se utilizó un viscosímetro rotativo debidamente calibrado, apto para operar con sustancias líquidas y semilíquidas, con un rango de medición comprendido entre 10 a 100.000 cP.

La fase experimental concluyó generándose una población total de veinticinco datos, cada uno de los cuales fue determinado como el valor promedio entre diez mediciones realizadas para cada temperatura, abarcándose el intervalo de operación comprendido entre 30° y 90°C.

A partir de la información disponible se evaluaron modelos alternativos encontrándose finalmente como mejor opción de correlación la expresión:

$$\mu = \frac{483.109 - 2.6762T}{1 + 0,001899T} \quad (1)$$

Dicha estructura matemática responde al tipo general de un aproximante de Padé (1,1), en donde μ es la viscosidad absoluta expresada en cP y T la temperatura en °C.

RESULTADOS

La determinación de R^2 en los modelos lineales es un valor de importancia para establecer la bondad del mismo. No obstante, cuando es no lineal, su uso debe ser limitado y siempre resultará conveniente realizar un análisis estadístico global, calculando un valor corregido R_a^2 e incluyendo además el error absoluto promedio como una medida de la desviación entre el modelo real y el correlacionado (Guerrero et al., 2008; Valderrama y Álvarez, 2005):

$$\% |\overline{\Delta y}| = \frac{100}{n} \sum \frac{|y_{\text{exp}} - y_{\text{cal}}|}{y_{\text{exp}}} \quad (2)$$

Para el modelo planteado R_a^2 es de 0.97 y la desviación absoluta promedio es 2.5%.

La Tabla 1 muestra una serie de estadísticos específicos que permiten analizar las características generales del modelo como también el grado de no linealidad. El conocimiento de éste está relacionado con el proceso a seguir en la inferencia a los parámetros.

En la misma pueden observarse valores de IN (no linealidad intrínseca) y PE (efecto- parámetro) pequeños lo que indica que a pesar de ser un modelo no lineal, ésta no es tan marcada. (Bates and Watts, 1980).

En la Fig. 1 se grafican los resultados experimentales junto a los valores obtenidos para la correlación hallada en el intervalo de temperatura entre 30° y 90°C. En ésta se pone de manifiesto el adecuado ajuste entre ambos.

Si las observaciones provienen de distribuciones normales todas con la misma varianza, entonces los residuos deberían seguir una distribución aproximadamente normal.

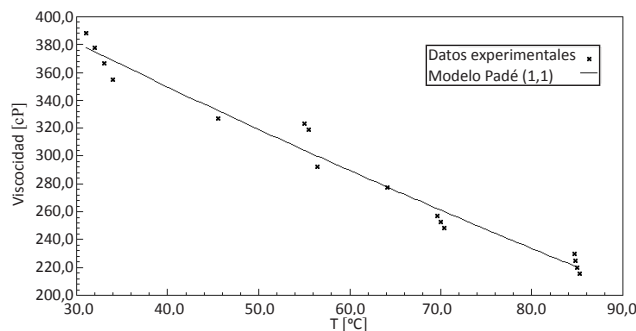


Figura 1 - Datos experimentales vs correlación

En la Fig. 2 se presenta un gráfico de probabilidad normal para el modelo en estudio donde se representan los residuales versus los valores que se esperarían si existiera normalidad.

Analizando el gráfico puede observarse que los residuos siguen una distribución muy próxima a la esperada.

CONCLUSIONES

De lo expuesto se plantean las siguientes conclusiones:

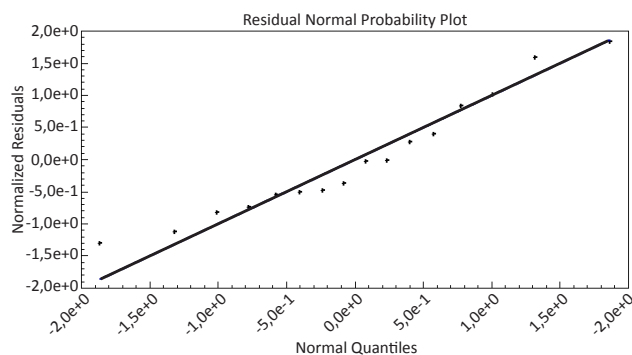


Figura 2 - Normalidad para residuales estandarizados

- 1) el aproximante de orden (1,1) obtenido resulta simple y de fácil aplicación,
- 2) los valores de viscosidad del producto han sido incorporados al banco de datos de simuladores existentes, y
- 3) el mismo fue utilizado para el diseño por simulación de enfriadores de placas en espiral (spiral plate) para el proceso considerado pudiendo comprobarse su validez.

REFERENCIAS

- Begea, Bâldea, Cîmpeanu, Stoicescu and Begea, "Utilization of Last Generation Enzymes for Industrial Use in Order to Obtain Bioethanol from Locally Available Agricultural Renewable Resources", *Romanian Agricultural Research*, 27, 115-120, (2010).
- Kelsall and Lyons, "The Alcohol Textbooks. Chapter 2: Grain dry milling and cooking procedures: extracting sugars in preparation for fermentation", Nottingham University Press: UK, 9-21, (2003).
- Devantier, Pedersen and 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).
- Novozymes Switzerland, "Viscosity reduction - High Gravity Fermentation", *Technical prospects*, (2008).
- Power, "The Alcohol Textbooks. Chapter 3: Enzymatic Conversion of Starch to Fermentable Sugars". Nottingham University Press: UK, 22-32, (2003).
- Gouy, Huvent and Ladureau, "Approximants de Padé", *Publications de Irem de Lille*, junio, (2002).
- Vajta, "Some remarks on Padé-approximations", *3rd Tempus-INTCOM Symposium, Veszprém, Hungary, September 9-14*, (2000).
- Baker, "Defects and the Convergente of Padé Approximants", *Kluwer Academic Publishers* 719, (1999).
- Guerrero, Toselli y Valderrama, "Correlación de Propiedades de Aceites Vegetales y Sebo Vacuno usando Aproximantes de Padé", *Información Tecnológica*: 19 (4), 19-24, (2008).
- Valderrama and Alvarez, "Correct way of Reporting Results when Modeling Supercritical Phase Equilibria using Equations of State", *Can. J. Chem. Eng.* 83, 1-4, (2005).
- Bates and Watts, "Relative Curvature Measures of Nonlinearity", *Journal of de Royal Statistical Society, Serie B* 42, 1-25, (1980).