

ANÁLISIS DINÁMICO PARA UN PROCESO DE PURIFICACIÓN DE FURFURAL Y SUS SUBPRODUCTOS

Flores Cordero, Ernesto (1), Segovia-Hernández, Juan Gabriel (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [e.florescordero@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de ciencias naturales y exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [gsegovia@ugto.mx]

Resumen

El furfural es compuesto químico que fue catalogado como uno de los 30 principales compuestos potenciales obtenidos a partir de biomasa, gracias a que es un químico de plataforma para una multitud de productos químicos y combustibles (aditivos). Actualmente el único proceso que produce furfural de manera industrial a partir de biomasa es el proceso, Quaker Oats, creado en 1921, el cual continúa sin modificación alguna. En este proceso se generan subproductos de alto valor agregado (metanol y ácido acético), los cuales se desechan. Este trabajo presenta la evaluación económica, el impacto ambiental, la seguridad y el control, de un proceso único y novedoso para la purificación del furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido; evaluado a partir del uso de tres extractantes diferentes: tolueno, benceno y cloruro de butilo. De acuerdo con los resultados obtenidos el proceso de purificación que utiliza cloruro de butilo es el más barato, el que tiene menor impacto ambiental, el más seguro y el más controlable, brindando un gran aporte para su posible implementación industrial.

Abstract

Furfural is a chemical compound that was cataloged as one of the 30 main potential compounds obtained from biomass, thanks to the fact that it is a platform chemical for a multitude of chemical products and fuels (additives). Currently, the only process that produces industrial furfural from biomass is the process, Quaker Oats, created in 1921, which continues without any modification. In this process, byproducts of high added value (methanol and acetic acid) are generated, which are used as waste flowrate. This work presents the economic evaluation, environmental impact, safety and dynamic analysis of a novel process for the purification of furfural and its byproducts obtained from biomass using liquid-liquid extraction; evaluated from the use of three different entrainers: toluene, benzene and butyl chloride. According to the results obtained, the purification process using butyl chloride is the cheapest, which has the lowest environmental impact and the safety index and the better dynamic behavior, providing a great contribution for its possible industrial implementation.

Palabras Clave

Furfural; Biorrefinería; Control; Procesos; Sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Actualmente nuestra sociedad enfrenta grandes desafíos gracias al desarrollo que hemos generado, por lo que se está buscando la generación de tecnologías análogas a las convencionales, como lo son, las biorrefinerías. Una biorrefinería es una instalación que integra los procesos de conversión de biomasa y el equipo para producir combustibles, energía y productos químicos de manera secundaria a partir de biomasa [1]. El furfural es un aldehído orgánico líquido de fórmula $C_5H_4O_2$. Este se obtiene a partir de las pentosas de materia prima renovable lignocelulósica, principalmente de mazorcas de maíz y bagazo [2]. El furfural se utiliza como un extractante para el refinamiento de los aceites lubricantes, como fungicida, nematocida y como materia prima en la síntesis de diversos productos químicos tales como nylons, lubricantes y solventes, adhesivos, medicinas y plásticos [2][3]. El primer proceso con el cual se obtuvo furfural a nivel industrial vía biomasa, fue desarrollado por la compañía Quaker Oats en el año 1921, el cual continúa vigente hasta la fecha debido a su baja inversión de capital, fácil implementación y materias primas de bajo costo [4][5]. El proceso tradicional de furfural a partir de biomasa tiene dos pasos que involucran unidades de reacción y purificación. En la etapa de reacción, la biomasa se pretrata a través de una etapa de pretratamiento, ya que esta es rica en celulosa y se introduce en una serie de reactores para ser hidrolizada a pentosas, que luego se deshidrata a furfural, empleando una solución acuosa, con ácido sulfúrico o fosfórico, como catalizador. Posteriormente, se produce una corriente de vapor compuesta aproximadamente de un 6% de furfural, un 4% de subproductos (de ácido acético y metanol) y un 90% de agua. Esta corriente se licua y se alimenta a una serie de columnas de destilación, en donde se obtiene el compuesto de interés (furfural) y los subproductos, que por lo general se tratan como desechos que simplemente se envían a una planta de tratamiento de aguas residuales u, ocasionalmente, al mar [3][5]. Los procesos de producción de furfural han mostrado pocas mejoras en el pasado, pero en los últimos años, se han reportado varios procesos en la literatura y a escala piloto gracias a los bajos rendimientos de producción y a su tecnología ineficiente de purificación [3][5]. Lamentablemente la mayoría se centran específicamente en la etapa de reacción [5][6] y otros pocos en la purificación [3-6]. En consecuencia, es esencial desarrollar un nuevo proceso de producción de furfural para hacer que esta alternativa renovable sea competitiva con los productos derivados del petróleo [5]. Como lo único que se recupera y se purifica en el proceso convencional y en los actuales a partir de biomasa, es el furfural; olvidando y desechando los subproductos alto valor agregado, este trabajo tiene como objetivo evaluar los aspectos económicos, ambientales, de seguridad y de control de un proceso completamente nuevo de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido, para garantizar la posible implementación industrial (Imagen 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis que se llevó a cabo fue un estudio de control típico (Imagen 2) en tres procesos de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos a partir de biomasa, utilizando extracción líquido-líquido con tres diferentes solventes; tolueno, benceno y cloruro de butilo (Imagen 2). Este se realizó a través de la simplificación del sistema ajustándolo a su forma lineal para demostrar la secuencia de purificación con mayor estabilidad y controlabilidad; haciendo uso de material computacional; ©ASPEN Plus, ©Excel y ©Matlab.

De manera práctica el diseño y compensación del sistema de control se parte de un modelo matemático del sistema de control y se ajustan los parámetros de un compensador, a través de un programa para computador. Una vez obtenido un modelo matemático satisfactorio, el diseñador debe construir un prototipo y probar el sistema en lazo abierto. Si se asegura la estabilidad absoluta en lazo abierto, el diseñador cierra el lazo y prueba el comportamiento del sistema en lazo cerrado [7]. La elección de la secuencia adecuada se basa en los mejores resultados en la evaluación de los aspectos económicos, el impacto ambiental, la seguridad y el control, los cuales están en función del extractante que vaya a ser empleado; tolueno, benceno o cloruro de butilo [5][9].

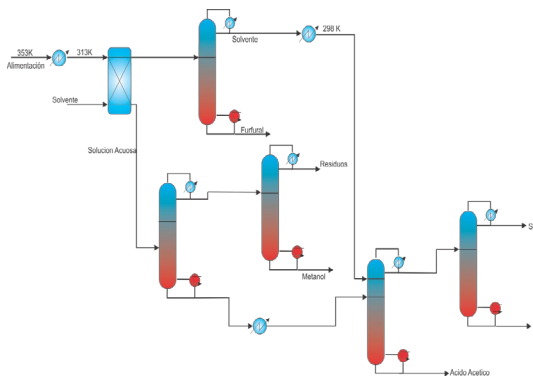


IMAGEN 1. Esquema general del proceso de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido. Estas secuencias cuentan con una columna de extracción líquido-líquido y columnas convencionales de destilación.

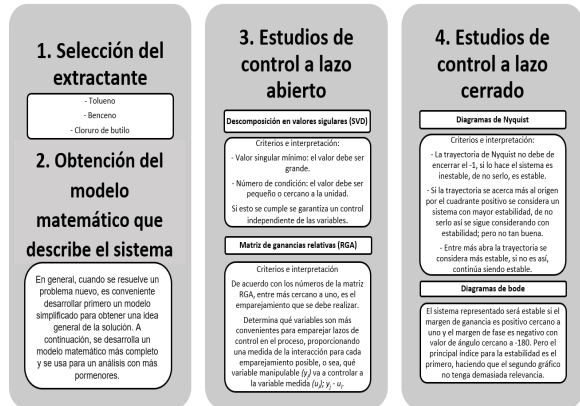


IMAGEN 2: Estudio típico de control acoplado al proceso de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido [7][8].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio típico de control fueron: la respuesta dinámica de los tres casos a través de ASPEN Plus, y se generó la matriz de transferencia lineal (como modelo simplificado del sistema) de cada una de las secuencias, a partir de la perturbación de -5% de las variables manipulables (y_j), las cuales fueron las cargas térmicas (y_{Qj}) de la corriente de salida correspondiente a cada compuesto (furfural, metanol, ácido acético y agua) y el reflujo para el extractante (y_{Rj}). Y, de igual forma, la medición de la variable de control (medible, u_j), o sea, la concentración a la salida de los cinco compuestos (u_{xi}). Una vez obtenida la matriz de transferencia (Matriz 5x5), se obtuvieron los resultados de las diferentes pruebas de control, a lazo abierto SVD (imagen 3) y RGA y a lazo cerrado se obtuvieron los diagramas de Nyquist y Bode (imagen 4 y 5) (a partir del emparejamiento del RGA junto sus parámetros del controlador Proporcional Integral; PI) del furfural y extractante de manera de ejemplo. Todo esto con el fin de demostrar la secuencia con mayor estabilidad y controlabilidad. De igual forma, de manera concreta y sintetizada, la Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para cada proceso de purificación, de un estudio típico de control, junto con lo reportado por Jasso (2018) [10] en donde se evaluó los costos, el impacto ambiental y la seguridad. De acuerdo con el proceso de purificación se utilizó el mismo diagrama de flujo (imagen 1 y 2) y solo cambio el diseño de cada equipo respecto al extractante utilizado.

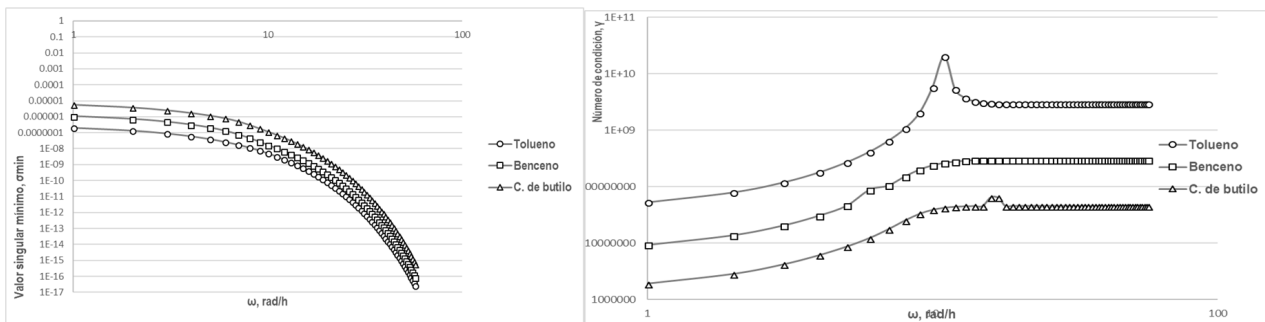


IMAGEN 3: Gráfico del valor singular mínimo y gráfico del número de condición.

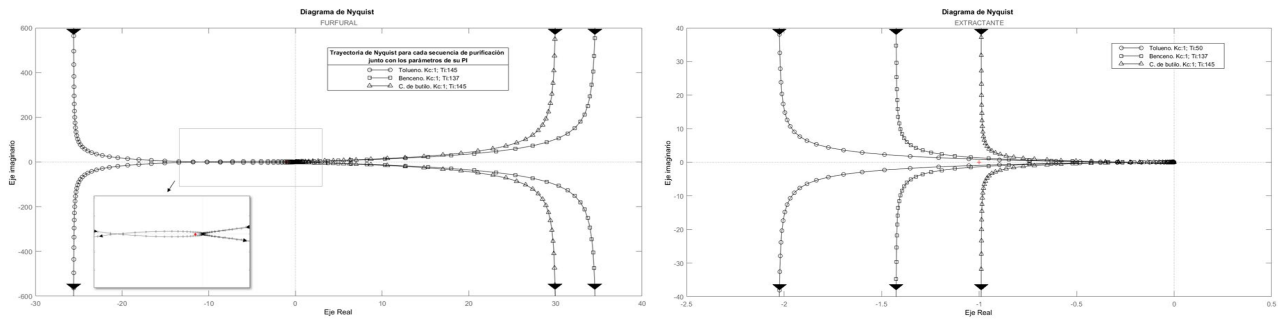


IMAGEN 4: Diagramas de Nyquist de cada secuencia de purificación junto con los parámetros de su controlador PI.

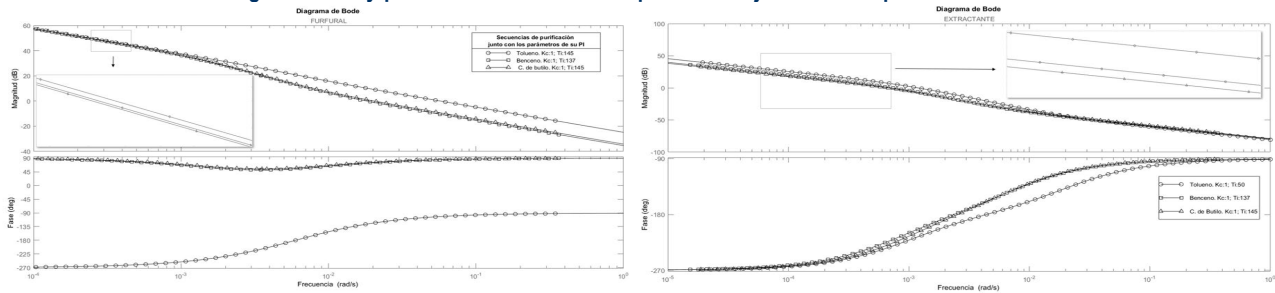


IMAGEN 5: Diagramas de Bode de cada secuencia de purificación junto con los parámetros de su controlador PI.

Tabla 1: Resultados de la evaluación económica, del impacto ambiental, de la seguridad y el control del proceso de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido

Secuencia (solvente)		Tolueno	Benceno	Cloruro de butilo
Evaluación con su respectivo análisis				
Seguridad	Probabilidad de muerte a 50 metros de distancia de la planta	0.00434 %	0.01833 %	0.0034521 %
Impacto ambiental	Eco-indicador (puntos/año)	5.939E+07	6.105E+07	5.508E+07
Económico	Tac (dls/año)	140,504,587.1	145,283,069.8	127,327,092.7
	ROI (dls/año)	5.4722	5.3262	6.157
Control	SVD	Menos controlable	Controlable	Más controlable
	RGA	$Y_{Q1} - U_{xf}, Y_{Q2} - U_{xm}, Y_{Q3} - U_{xaa}, Y_{R1} - U_{xb}, Y_{Q4} - U_{xa}$	$Y_{Q1} - U_{xf}, Y_{Q2} - U_{xm}, Y_{Q3} - U_{xaa}, Y_{R1} - U_{xb}, Y_{Q4} - U_{xa}$	$Y_{Q1} - U_{xf}, Y_{Q2} - U_{xm}, Y_{Q3} - U_{xaa}, Y_{R1} - U_{xb}, Y_{Q4} - U_{xa}$
	Nyquist	No estable	Estable	Más estable
	Bode	Menos estable	Estable	Más estable

Con este trabajo se logra demostrar la evaluación económica, el impacto ambiental, la seguridad y el control de un proceso único de purificación de furfural y sus subproductos obtenidos de biomasa utilizando extracción líquido-líquido, con tres solventes diferentes; tolueno, benceno y cloruro de butilo. Estos estudios demostraron que el proceso de purificación que utiliza cloruro de butilo es el mejor económicamente viable, el que tiene menor impacto ambiental, el más seguro y el más controlable. Este trabajo es apoyado de acuerdo con lo

reportado en la literatura para un proceso de purificación de furfural con extracción líquido-líquido, en donde solo se purifica este. Ellos concluyen que de igual forma el cloruro de butilo es el mejor económicamente viable y el que tiene menor impacto ambiental [5].

CONCLUSIONES

Este trabajo proporciona un gran aporte, ya que en la actualidad no existe proceso que purifique los subproductos de alto valor agregado del proceso de producción del furfural vía biomasa. Este aporte demuestra que este proceso novedoso cumple con los puntos necesarios de un proceso químico sustentable (económicamente viable, bajo impacto ambiental, seguro y controlable), y es un buen comienzo para continuar con las investigaciones necesarias para que se pueda implementar industrialmente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios primeramente por brindarme todo lo necesario en esta vida. De igual manera a mis padres, familiares y amigos, que siempre están apoyándome en todo lo necesario. Al Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández por aceptarme y confiar en mí; y a su grupo de trabajo de investigación, los cuales siempre me brindan su apoyo y conocimientos. También a la Universidad de Guanajuato por su apoyo en mi formación académica y del verano de investigación. Y a la fundación Telmex-Telcel por tenerme como becado.

REFERENCIAS

1. De Jong, W. & Marcotullio, G. (2010). Overview of Biorefineries based on Co-Production of Furfural, Existing Concepts and Novel Developments. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8(69), 1-24.
2. Rural Industries Research and Development Corporation. (2006). *Furfural chemicals and biofuels from Agriculture*. Kingston, Aust: Wondur Business and Technology Services.
3. Nhiena, L., Longa, N., Kimb, K. & Leea, M (2011). Design and optimization of intensified biorefinery process for the production of furfural through a systematic procedure. Submitted to *Biochemical Engineering Journal*. Manuscrito.
4. Zeitsch, KJ. (2000). *The chemistry and technology of furfural and its many by- products*. Netherlands: Elsevier Science.
5. Nhiena, L., Longa, N., Kimb, K. & Leea, M (2017). Techno-economic assessment of hybrid extraction and distillation processes for furfural production from lignocellulosic biomass. *Biotechnology for Biofuels*, 10(81), 1-12.
6. Marcotullio, G. (2011). *The chemistry and technology of furfural production in modern lignocellulose-feedstock biorefineries*. Italia: Process and Energy Department. Faculty Delft University of Technology.
7. Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson educación.
8. Alvarez, L. & Espinosa, J. (2012). Methodology based on svd for control structure design. *Latin American Applied Research*, 42, 245-25.
9. Luyben, W. (2008). Effect of Solvent on Controllability in Extractive Distillatio. *Ind. Eng. Chem*, 47, 4425-4439.
10. Jasso, M. (2018). *Diseño de sistemas intensificados de separación para la purificación de furfural*. Tesis de Licenciatura: Guanajuato. Universidad de Guanajuato.