

PROCESO DE SEPARACIÓN INTENSIFICADO PARA LA PURIFICACIÓN DE FURFURAL: ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DINÁMICO

Ramón Álvarez David (1), Segovia Hernández Juan Gabriel (2)

1 [Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Villahermosa] | [David_leo_5@hotmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [gsegovia@ugto.mx]

Resumen

La reciente crisis de los recursos no renovables, ha centrado el estudio de investigación en alternativas como el uso de recursos renovables, fuente importante y de relevancia como la biomasa. Aquellas plantas industriales que utilizan esta fuente se les conoce como biorefinerías, análogas a una refinería de petróleo. El furfural es uno de los compuestos químicos que surge de la biomasa de alta importancia, el cual es usado como materia prima en la producción de biocombustibles y productos químicos de alto valor agregado. La intensificación del proceso convencional (Quaker Oats) se centra en mejorar aspectos económicos, dinámicos, ambientales y de seguridad del proceso con el uso de técnicas estocásticas. Se verificó si dicho proceso novedoso es viable en cuanto al control a nivel industrial es por ello que se utilizará el programa ASPEN PLUS 8.8 para el estudio dinámico de ambos. Se buscaron los parámetros óptimos para los controladores de lazo cerrado PI. Los resultados en el proceso intensificado (integración de calor) muestra una inestabilidad impidiendo encontrar los valores óptimos de K_c y τ_i para su control; en contraste al proceso convencional el cual, si convergió, pudiéndose encontrar los parámetros necesarios para que estabilice el sistema por completo.

Abstract

The recent crisis of non-renewable resources has focused research on alternatives such as the use of renewable resources, important source and of relevance biomass. Industrial plants that use biomass are known as biorefineries, analogous to oil refinery. Furfural is one of the high importance chemical compound that comes from the biomass. It is used as raw material in the production of biofuels and high added value chemical products. The intensification of the conventional process (Quaker Oats) focuses on improving economic, dynamic, environmental and safety aspects of the process with the use of stochastic techniques. It is verified if this novel process is viable in terms of dynamic behavior using ASPEN PLUS 8.8 simulator will be used for the control study. The optimal parameters for controllers PI in closed loop operation were found. The results in the intensified process (heat integration) show an instability and K_c and τ_i optimal values are not found. In contrast, the conventional process is converged and it is able to find the necessary parameters to stabilize the system.

Palabras Clave

Furfural; IAE Integral Absoluta del error; K_c Ganancia Proporcional; τ_i Tiempo de integración; PI Control Proporcional Integral

INTRODUCCIÓN

Importancia y Producción de Furfural

En la actualidad los combustibles fósiles son la principal fuente de energía eléctrica que mueven a una sociedad moderna e industrial como lo es México [1].

Los usos desmedidos de los recursos no renovables han provocado una notaría escases en los últimos años, crisis que ha promovido en el ámbito de la investigación optar por alternativas: Energías renovables, haciendo énfasis en los recursos basados en biomasa. Las biorefinerías es el proceso industrial análogo a una refinería de petróleo. Estas producen compuestos químicos de relevancia económica e industrial, entre ellos el furfural.

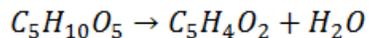
El Furfural (Furan-2-Metanal, $C_5H_4O_2$) se utiliza como un extractaste para el refinamiento de aceites lubricantes, como fungicida, nematocida y como materia prima (hasta el 65% de todo el furfural producido) para la producción de alcohol de furfural, por tanto es hoy en día un compuesto de alto valor agregado.

En el año de 1921 es construida la primera planta para la purificación de furfural por la compañía Quaker Oats, este proceso es conocido con el mismo nombre de la compañía, y es el proceso más ampliamente usado hasta el día de hoy [2].

La producción de furfural requiere de materias primas ricas en pentosas. El contenido de pentosa de las materias primas más importantes se menciona a continuación: Mazorca de maíz 30-32%, Cascara de avena 29-32%, Cascara de almendra 30%, Semilla de salvado de trigo 27-30% [2]. Actualmente, la mayoría del Furfural en el mercado mundial es producido en China por un gran número de pequeños productores con capacidad de pocos kilotonnes por año; Mientras que la planta de furfural más grande de 35 kilotonnes por año se localiza en República Dominicana [3].

El proceso tradicional de producción de furfural (Quaker Oats), consta de dos pasos involucrados los cuales son una etapa de reacción y la segunda etapa de separación. En el primero a la biomasa se le da un pretratamiento con ácido sulfúrico para

posteriormente ser introducida a un reactor. En este la reacción de hidrolisis se lleva a cabo. La reacción para producción de furfural puede expresarse como:



Posteriormente una corriente de vapor con una composición aproximada de 6% de furfural, 4% de productos secundarios (ácido acético y metanol) y 90% de agua es producida. Esta corriente es condensada y alimentada a una serie de columnas de destilación para obtener los productos deseados [2].

Intensificación de Procesos

La filosofía de intensificación de procesos se ha caracterizado por cuatro lineamientos: *menor tamaño, menor costo, más seguro, menor energía. De hecho, el tamaño de equipo, los costos y la seguridad del proceso son los incentivos más importantes de la intensificación de procesos.*

- *Integración de Calor*

Los sistemas de destilación azeotrópicos heterogéneos se usan comúnmente en la industria de procesos químicos para separar las mezclas de ebullición cercana y azeotrópicas (como lo es nuestra mezcla) mediante la adición de un arrastrador para alterar la volatilidad relativa entre los componentes involucrados; pero este tipo de columna requiere de una inversión considerable en cuanto a su operación. Para ello se utilizan las columnas de destilación azeotrópicas heterogéneas de pared divisoria (HADWDC, por sus siglas en inglés) pueden lograr reducciones considerables en inversión de capital y costo de operación en comparación con la convencional. Aun así, sigue siendo una unidad con una inversión de capital costosa, además de un uso excesivo y constante de energía y operación lo cual no es nada alentador. Para ello propone I&EC® el uso de Recompresión de Vapor (VRHP vapor recompression heat pump) que consiste en el uso del vapor de cabeza de la columna de destilación para después recomprimirlo a una presión y temperatura elevadas y posteriormente utiliza para proporcionar calor a los dos rebobinadores inferiores o dos secciones de extracción a lo largo de la pared divisoria

mejorando así el desempeño en estado estacionario del HADWDC considerablemente.

Se han desarrollado diversos tipos de esquemas de proceso y se pueden dividir en general en las siguientes categorías (Figura 1): *columnas de destilación asistida por VRHP, columnas de destilación integradas térmicamente internas, y columnas de destilación integradas térmicamente externamente.*

Aunque la combinación propuesta depende en gran medida de los costos detallados de las utilidades y de las condiciones de funcionamiento, resulta en una reducción sustancial del TAC (Costo total anual).

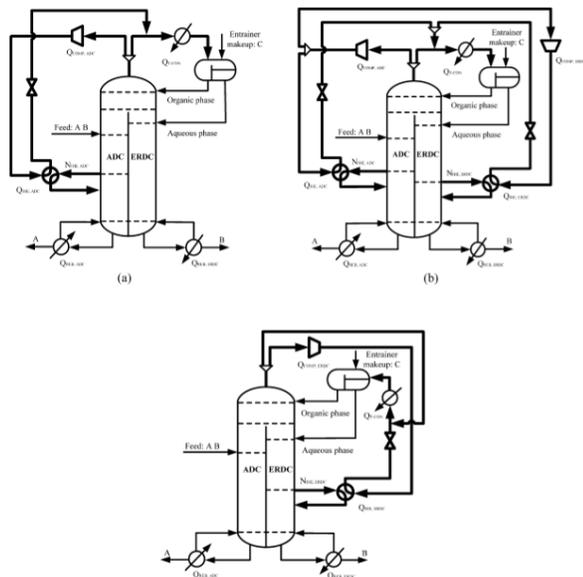


Figura 1: Diferentes esquemas de proceso de una HADWDC incorporando la VRHP: HADWDC-VRHP: (a) HADWDC-VRHP(ADC), (b) HADWDC-VRHP(ADC-ERDC), and (c) HADWDCVRHP(ERDC). (Shi, 2015)

Así pues debido a que el proceso convencional para purificar el Furfural suele tener desventajas en cuanto a costos de inversión, operación y gasto excesivo en el uso de energía, surge como alternativa de solución este nuevo proceso intensificado que no hace más que comprimir el calor de vapor desprendido por el mismo proceso para reutilizarlo y así obtener ventajas económicas, de seguridad y ambientales [4].

Estudio del desempeño Dinámico

No sólo es importante que el nuevo proceso intensificado tenga ventajas económicas en cuanto a ahorro de energía. Es necesario que se realice un estudio dinámico de éste para verificar que dicho proceso sea viable en cuanto a su control a nivel industrial.

- *Sistema de control de procesos*

El objetivo del control automático de procesos es mantener en determinado valor de operación las variables del proceso tales como: temperaturas, presiones, flujos y compuestos. *El sistema está compuesto técnicamente de: Sensor, el transmisor (TI), el controlador (TIC o TRC) y la válvula o elemento final de control [5]*

Dentro de estos sistemas de control existen las siguientes variables que debemos definir:

- **Variable controlada:** es aquella variable que se mide y se controla.
- **Variable manipulada:** Es aquella que se opera variando los caudales a través del elemento final de control. Manipulando estas corrientes se consigue controlar la variable deseada.
- **Perturbaciones:** son variables que afecta al sistema
- **Set Point:** el valor deseado de la variable controlada [5].

Un servomecanismo retroalimentado realiza una comparación de la información de salida con el Set Point, donde surge un error (IAE Error de Integración Absoluta) o diferencia entre ambos, accionando la válvula para reducir ese error lo menor posible. *En este estudio dinámico se utilizó un Servomecanismo retroalimentado Proporcional Integral PI pues es el más usado a nivel industrial.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el programa ASPEN 8.8™ para realizar el estudio dinámico de ambos procesos. Y Excel 2013® para registrar los datos. Después de que se realizaron los modelos respectivos del proceso se realiza la siguiente metodología:

- 1) Exportar el archivo de ASPEN PLUS 8.8™ a ASPEN DYNAMICS 8.8™
- 2) Insertar el controlador PI, cerrar el lazo heurístico y especificar el tipo de acción que realiza. Los lazos a sintonizar son los que indica la heurística, es decir los que nos indica que el apareamiento debe ser entre la variable a controlar con la variable manipulable más cercana, en este caso la pureza del destilado: con el reflujo, y la pureza del fondo con el Reboiler.
- 3) Insertar el contabilizador IAE y posteriormente configurarlo al Set Point deseado, en este caso se modificó la pureza inicial de salida al 1% en el proceso convencional y al 0.5% en el que usa integración de calor.
- 4) Fijar un valor de K_c y uno de τ_i . Es importante mencionar que el tiempo de las corridas debe de ser el mismo en todas las corridas puesto que el IAE está en función del tiempo, en este caso se eligieron en el proceso convencional 10 hrs. y en la integración de calor 20 hrs por cuestiones de variaciones de estabilidades en cuanto a ambos procesos.
- 5) Se varían los parámetros (K_c , τ_i) con el fin de registrar los IAEs y encontrar el mínimo.
- 6) Se realiza esto con las 4 corrientes de salidas (2 de metanol y 2 de furfural respectivamente para cada proceso).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambos procesos el convencional y con integración de calor, la variable controlada es la pureza de la corriente de salida de los productos (Furfural y Metanol), pero la variable manipulada será, en el caso de metanol, la relación de reflujo y en el caso de furfural será el reboiler (es decir las más cercanas a la variable controlada). Pues si se varían estas con el elemento final de control (válvula) se conseguirá mantener la consigna (Set point) lo más estable posible. En este caso la perturbación será el cambio de Set Point en la pureza de salida, pues en todo proceso industrial

se puede modificar la pureza y esto se realiza en producciones por lotes.

Proceso Convencional Quaker Oats

En el proceso convencional la pureza inicial, Set Point e IAE en cada corriente de salida, la de metanol y Furfural se muestran en la Tabla 1, con **una perturbación en la pureza inicial de 1%**.

IAE Óptimos 'Quaker Oats'					
	Pureza inicial	Set Point	τ_i	K_c	IAE
Fur	0.995591	0.98563589	0.5	250	0.000081997165186529
Met	0.99694	0.986971	1	250	0.000571973580169678

Tabla 1: IAE Óptimos obtenidos para el proceso convencional.

Se observó en este proceso que a mayores valores de ganancia y menores de tiempo de integración se logra una estabilización ante la perturbación del set point en menor tiempo. El Furfural llega al punto de consigna en menos de 0.1 hrs mientras que el Metanol converge y estabiliza poco antes de las 0.5 hrs. Mostrándose graficas Pureza-Tiempo como las siguientes:



Figura 1: Respuesta de los IAE's óptimos para el diseño Quaker Oats con respecto a pureza-tiempo.

- *Proceso Integración de Calor*

En el proceso que utiliza integración de calor se buscó que el diseño alcanzara las purezas más aproximadas al proceso anterior para que el estudio de comparación fuese apropiado. Las purezas en fracción masa se muestran en la Tabla 2 con sus respectivos Set Point e IAE.

Se presentaron complicaciones al probar los parámetros para que se estabilizara en caso de perturbación, es por esta razón que el porcentaje de modificación para el set point no es de 1% como el primer proceso si no de 0.5% pues no soportó una perturbación tan elevada; no se encontró ningún IAE óptimo en ese porcentaje. Con respecto a la **perturbación al 0.5%** no se estabilizó por completo a la variable que se pretendía controlar, el punto de consigna variaba en los últimos 2 decimales de la pureza provocando oscilaciones pequeñas. Se procedió a elegir la que estabilizara con oscilaciones menores en un menor tiempo, no se puede tomar el valor de IAE como un óptimo pero en este caso de estudio se optara por seleccionarlo como el valor más apropiado.

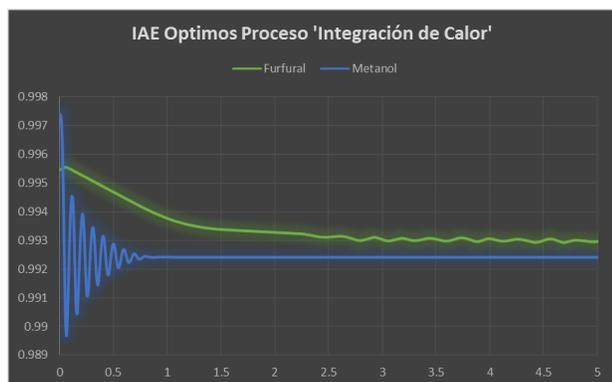


Figura 2: Respuesta de los IAE's óptimos para el diseño que utiliza integración de calor con respecto a pureza-tiempo.

CONCLUSIONES

Después de analizar detalladamente el comportamiento dinámico de ambos procesos, se determinó que el proceso convencional (Quaker Oats) proporciona un buen desempeño dinámico pues se estabilizó por completo ante la perturbación dada, recordando que presenta

desventajas económicas en cuanto a su inversión en operaciones.

A pesar de que el proceso con 'integración de calor' es eficiente y atractivo como manera óptima del convencional, se puede notar que presenta complicaciones en el control para eliminar perturbaciones. Esto no significa que este proceso no es el mejor, pues presenta indicios de estabilización. Estas complicaciones se pueden generar por las siguientes posibilidades:

Tabla 2: IAE Óptimos para el proceso que utiliza integración de calor

IAE Óptimos 'Integración de Calor'					
	Pureza inicial	Set Point	τ_i	Kc	IAE
Fur	0.995476	0.99298731	50	250	0.002871479506551695
Met	0.997397	0.992410	1	250	0.000585229311413256

- El tipo de lazo que se utilizó no es el correcto para el control de este proceso.
- La variable manipulada no es la adecuada para mantener la variable controlada.
- Los parámetros de las unidades y equipos en el proceso no son los adecuados.

Se extiende la presente investigación para que en el futuro se determine cuál es la verdadera causa de la inestabilidad y lograr así que este proceso intensificado además de cumplir las mejoras, económicas y ambientales sea seguro en cuanto a su desempeño dinámico y por ende control industrial.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco al asesor Segovia Hernández Juan Gabriel por apoyarme durante mi primer trabajo de investigación. A el CCYTET por el apoyo económico. A el ITVH por apoyarme institucionalmente durante todo este proceso. Además agradezco a la Lic. Aracely por su apoyo incondicional. A mis padres por guiarme en esta experiencia nueva para mí. ¡Muchas gracias!

REFERENCIAS

[1] Secretaría de energía. (20 de Julio de 2015). Secretaría de Energía de México. Obtenido de www.gob.mx/sener

[2] Zeitsch, K. (2000). The Chemistry and Technology of Furfural and its Many By-Products, Volume 13. México: Elsevier Science.

[3] Yu-Ti Tseng, J. D.-Y. (2016). Design and control of a continuous multi-product process with product distribution switching: sustainable manufacture of furfuryl alcohol and 2-methylfuran. Chemical Engineering and Processing. Elsevier Science.

[4] L. Shi, K. H. (2015). Application of Vapor Recompression to Heterogeneous Azeotropic Dividing-Wall Distillation Columns. Industrial y engineering chemistry research, 11592-11609.

[5] Smith, C. A. (1991). Control automatico de procesos(1st ed.). México: Limusa.