

ESTUDIO DE PROCESOS INTENSIFICADOS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE COMPUESTOS DE USO INDUSTRIAL.

C. A. Mora Gardufó¹, K. R. Jalomo Fonseca¹, J. G. Segovia Hernández², A. G. Romero García³, A. E. García Hernández¹, G. Alvarez Bacame⁵, J. M. Amezcua Ortiz⁴, A. L. Rocha Rocha¹
¹Estudiante de la licenciatura en Ingeniería Química de la Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto., 36050, México
²Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto., 36050, México
³Residuos de Ingeniería Química de la Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Gto., 36050, México
⁴Departamento de Ingeniería Química, Electrónica y Biomédica División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guanajuato (UG) León, Gto. 37150, México.
⁵Estudiante de la licenciatura en Ingeniería Química de la Universidad de Sonora, Campus Hermosillo, Blvd. Luis Encinas J. Calle Av. Rosales 8, Centro, 83300 Hermosillo, Son.

Perfil del equipo de trabajo

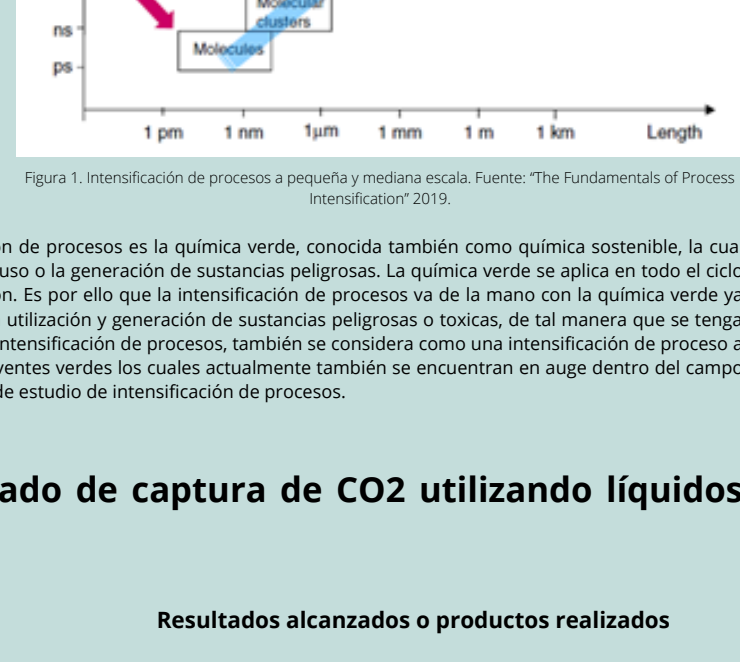
Objetivos por eje

Estudiantes de décimo semestre de la licenciatura en Ingeniería Química, con interés en el área de diseño de procesos, así como en la intensificación de los mismos, sustentados en la química verde y sus procesos para un mejor desarrollo sustentable.

- Educación: conocer metodologías de intensificación de procesos para el diseño de procesos sostenibles a través de herramientas computacionales como Aspen plus®, Matlab®, entre otros.
- Investigación: diseñar, simular y optimizar distintos procesos mediante el software Aspen Plus®.
- Comunicación: Generar información acerca del público.

Introducción

El término "Intensificación de Procesos" (IP), comenzó a aparecer en las publicaciones de Europa del Este a mediados de la década de 1960 y principios de la década de 1970, sin embargo, en Ingeniería Química, la primera aplicación de la intensificación de procesos tal como lo conocemos hoy estuvo marcada por el artículo sobre la aplicación de campos centrífugos (los llamados "HiGee") en procesos de destilación [1], publicado en 1983 por Colin Ramshaw. Los avances más notorios de investigación en procesos de intensificación se produjeron en los últimos años de 1990, y actualmente en particular, los primeros años del tercer milenio (años 2000-2021). Existen numerosas definiciones por distintos autores del concepto de intensificación de procesos, no obstante las más aceptadas entre los autores nos menciona a esta área como una herramienta empleada para desarrollar procesos, equipos y técnicas innovadoras que ofrecen mejoras sustanciales en la producción y procesamiento de productos químicos, principalmente mediante la disminución del volumen del equipo, consumo de energía o generación de residuos, obteniendo de esta manera la mayor cantidad de productos con menor consumo de materia prima, dando todo esto lugar a tecnologías más baratas, seguras y sostenibles. Es por ello que está recibiendo un interés considerable dentro de la ingeniería química en la última década. La intensificación de procesos debería verse como un "proveedor" de nuevos componentes básicos, a partir de los cuales se sintetizan los sistemas de procesos, como se muestra en la Figura 1.



Un concepto que es de suma importancia conocer dentro de la intensificación de procesos es la química verde, conocida también como química sostenible, la cual consiste en diseñar productos y procesos químicos para reducir o eliminar el uso o la generación de sustancias peligrosas. La química verde se aplica en todo el ciclo de vida de un producto, desde su diseño, fabricación, uso y utilización. Es por ello que la intensificación de procesos va de la mano con la química verde ya que ambos tienen el objetivo de diseñar procesos que reduzcan o eliminen la utilización y generación de sustancias peligrosas o tóxicas, de tal manera que se tenga un desarrollo sostenible, debido a esto último es que dentro del concepto de intensificación de procesos, también se considera como una intensificación de proceso la sustitución del empleo de sustancias peligrosas o tóxicas, por el uso de solventes verdes los cuales actualmente también se encuentran en auge dentro del campo de la investigación. En el presente trabajo se muestran cuatro distintos casos de estudio de intensificación de procesos.

CASO 1: Diseño del proceso intensificado de captura de CO2 utilizando líquidos eutécticos profundos

Descripción General del proyecto

El CO2 es un subproducto de muchos procesos industriales, como lo es la producción de amoníaco sintético, de hidrógeno, fermentación y síntesis de ciertos productos químicos con presencia de monóxido de carbono, siendo un gas que genera un gran impacto ambiental, como el calentamiento global, el cambio climático y las concentraciones de gases de efecto invernadero, debido a esto se han buscado distintas alternativas para mitigar las emisiones de CO2 y a su vez reducir el impacto ambiental una de ellas es la captura de dióxido de carbono. La captura de CO2 por emisiones causadas por combustión en los procesos industriales es llevada a cabo tradicionalmente empleando el líquido eutéctico profundo de Colina/Urea (C-U), mediante el uso del software computacional de Aspen plus®. Buscando obtener una pureza de al menos un 95% o más de CO2, y una recuperación del mismo de al menos el 95% al final del proceso. Algunas de las aplicaciones del CO2 recuperado en estado gaseoso son para la producción de productos químicos comerciales, principalmente urea y metanol, también se emplea en mataderos para el aturdimiento de animales, aunque el uso más variado de CO2 se da en estado líquido, alguno de los ejemplos de aplicación de este son como disolvente en el descafeinado de café para reducir la nicotina del tabaco, para limpiar el corcho y evitar el sabor a este que a veces se detecta en el vino embotellado, y en la extracción y fraccionamiento del lúpulo que se utiliza para la elaboración de la cerveza. Por todo lo mencionado anteriormente radica la rentabilidad de buscar recaptar el CO2 de los procesos industriales.

Resultados alcanzados o productos realizados

Se obtuvo el diseño y simulación del proceso de obtención de CO2 para una relación molar de C-U y agua de 1:2.5. La operación secuencial del proceso se muestra en la Figura 2, la cual consta en primera instancia de un absorbente, donde se lleva a cabo la absorción del CO2 con el líquido eutéctico C-U además de algunas trazas de N2 y O2, saliendo por la corriente de fondo, misma que ingresa a un primer tanque flash, donde este cumple con la función de eliminar casi en su totalidad las trazas de N2 y O2. De tal manera que se obtenga por la corriente "L" agua y C-U casi en su totalidad. Posteriormente esta corriente ingresa a un segundo tanque flash donde nuevamente se elimina otro porcentaje de las trazas de N2 y O2 para que finalmente esta corriente "L2" ingrese a una torre de desorción donde se separa el CO2 con una pureza del 95.67% en fracción mól y un porcentaje de recuperación total de CO2 del 95%.

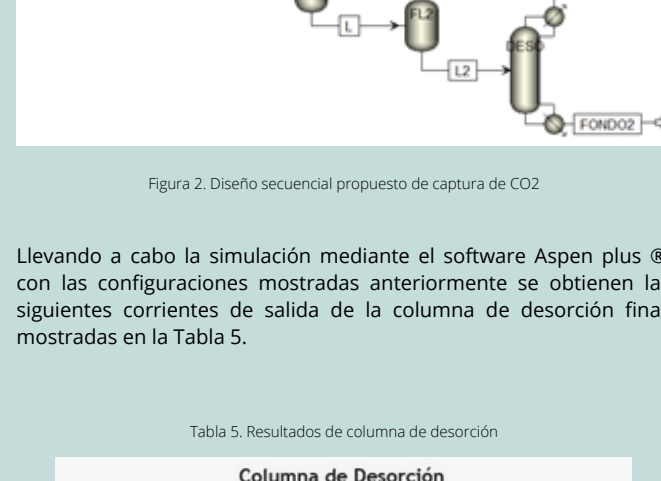


Tabla 1. Corrientes de Entrada

Corriente DES		Corriente ARE	
Temperatura (°C)	60	Temperatura (°C)	60
Presión (bar)	12-7	Presión (bar)	12-7
Flujo molar (kmol/h)	10000	Flujo molar (kmol/h)	3000
X C-U	0.3	X agua	0.000578
X agua	0.73	X CO2	0.034679
Relación molar	1:2.5	X N2	0.763784
		X O2	0.13507

Tabla 2. Configuración de columna de absorción

Etapas	30
Etapa alim. Aire	30
Etapa alim. C-U	1
Presión (bar)	12-7

Tabla 3. Configuración FL1 y FL2

Flash 1		Flash 2	
Presión (bar)	1.1	Presión (bar)	1
X vapor	0.02114	X vapor	0.001208

Tabla 4. Configuración de columna de desorción

Columna de Desorción	
Etapas	12
Etapa alimentación	6
Presión (bar)	1
Reflujo	0.7
Flujo des. (kmol/h)	110.03
Q (cal/s)	5550866.8
Q (kW)	23240.37

Llevando a cabo la simulación mediante el software Aspen plus®, con las configuraciones mostradas anteriormente se obtienen las siguientes corrientes de salida de la columna de desorción final, mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de columna de desorción

Corriente	DOMO	FONDO
CHCL. U	5.74E-40	2856.535
WATER	1.55E-94	7116.394
CO2	105.2269	0.00032847
N2	2.59904	5.20E-13
O2	2.16008	2.45E-12
Temperatura (°C)	-89.50106	107.9214
Presión (bar)	1	1

Se obtuvo un flujo de recuperación total de CO2 de 105.226 kmol/h, en la corriente del domo de la columna de desorción, de esta manera en contraste con el valor de CO2 capturado en la columna de absorción de 110.7843 kmol/h se logra obtener un porcentaje de recuperación y pureza del 95% y 96.67% respectivamente, el valor de recuperación podría aumentar, sin embargo, de realizar esto el valor de pureza de CO2 se reduciría alrededor del 91%, por ello se optó por una recuperación significativa (95%), aunque de esta manera se viera disminuido el flujo de CO2 a la salida ya que lo que se busca es una pureza mayor, puesto que esto a su vez significa una mayor variedad de aplicaciones del CO2 en distintos procesos industriales. Sin embargo, los valores de pureza y recuperación obtenidos son altos ya que casi se logra obtener una pureza del 97%. Cabe mencionar que la razón por la que la pureza no se alcanza en su totalidad al 99% es debido a que este es un proceso de absorción física y no química, y por lo tanto en la etapa de los tanques flash no se logra cumplir en su totalidad con la separación de O2 y N2. La química verde consiste en diseñar productos y procesos químicos para reducir o eliminar el uso o la generación de sustancias peligrosas, es por ello que al buscar emplear este tipo de solventes verdes como lo son los líquidos eutécticos se logra plantear una propuesta de un proceso intensificado como alternativa, en la cual se captura el CO2 que se obtiene como desecho de otros procesos para posteriormente utilizarlo como materia prima. De esta manera se pretende adecuar los procesos existentes de acuerdo con los principios de economía circular y química verde bajo enfoques de intensificación de procesos.

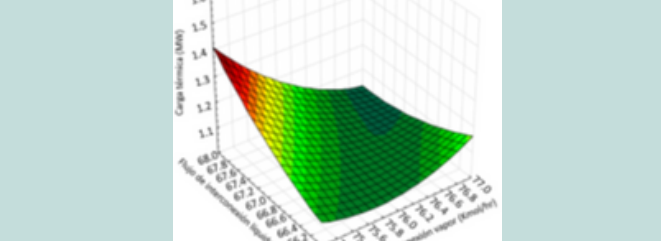
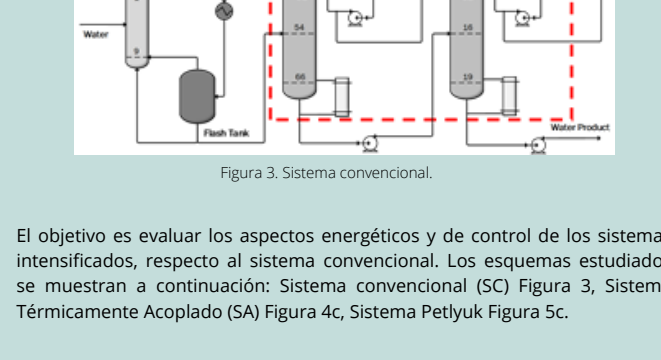
CASO 2: Efectos de la intensificación de los sistemas de separación y purificación de acetona, características y propiedades de control

Descripción General del proyecto

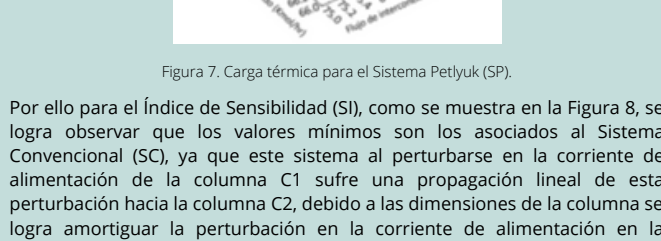
Este artículo presenta el diseño y optimización de sistemas de destilación convencional e intensificados para la separación de mezclas ternarias de la producción de Acetona. Tres casos de estudio fueron utilizados para demostrar las ventajas y limitaciones de las configuraciones de destilación convencionales e intensificadas en términos de la optimización simultánea de la composición de un compuesto clave y el consumo energético para su separación. Los resultados indican que el desempeño de estos esquemas de destilación puede variar sustancialmente cuando la pureza y eficiencia energética del proceso son los objetivos en conflicto. La secuencia convencional de destilación directa puede ser igual o incluso peor que el desempeño de algunos procesos intensificados en las mezclas analizadas. En este trabajo se resalta la importancia de realizar un diseño robusto de secuencias de separación multicomponente con la finalidad de evaluar sus ventajas y limitaciones.

Resultados alcanzados o productos realizados

Para la realización del análisis de sensibilidad se efectuó el estudio analizando las variables manipulables de cada sistema. Como se puede observar en la Figura 6, el Sistema Acoplado (SA) presenta un comportamiento lineal a las variaciones del flujo de interconexión vapor (V1), en este sistema podemos observar que para un flujo de interconexión de vapor de 10 kmol/h la carga térmica tiene un valor de 0.8643, siendo este valor el mínimo alcanzado por el sistema Petyuk (SP) presenta una carga térmica mayor que la convencional, siendo la carga térmica mínima alcanzada de 1.2675, como se puede observar en la Figura 7.



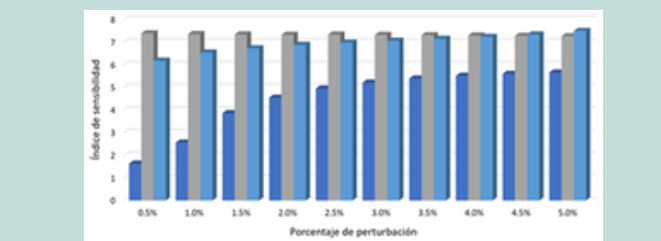
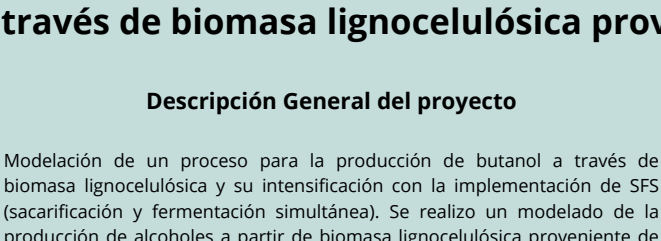
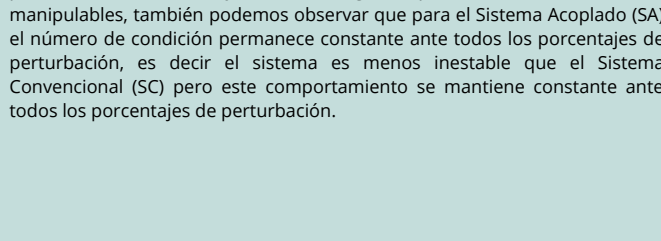
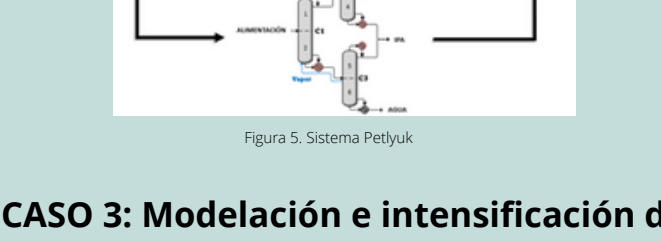
El objetivo es evaluar los aspectos energéticos y de control de los sistemas intensificados, respecto al sistema convencional. Los esquemas estudiados se muestran a continuación: Sistema convencional (SC) Figura 3, Sistema Térmicamente Acoplado (SA) Figura 4c, Sistema Petyuk (SP) Figura 5c.



Para el análisis del Número de Condición se puede observar en la Figura 9, que el sistema convencional es más inestable ante las perturbaciones de las variables manipulables ya que en todos los porcentajes de perturbación presenta los valores más grandes, así mismo, se puede observar que a perturbaciones grandes el Sistema Petyuk (SP) es el que presenta los menores valores de Número de Condición, esto se asocia a que los recios presentes en el sistema ayudan a amortiguar la perturbación de las variables manipulables, también podemos observar que para el Sistema Acoplado (SA) el número de condición permanece constante ante todos los porcentajes de perturbación, es decir el sistema es menos inestable que el Sistema Convencional (SC) pero este comportamiento se mantiene constante ante todos los porcentajes de perturbación.

Se llevó a cabo el análisis de dos sistemas intensificados y un sistema convencional para la purificación de acetona. Se realizó un análisis del consumo energético tomando como criterio la carga térmica. Además, se realizó un estudio de las propiedades de control de los sistemas utilizando como criterios el índice de sensibilidad y el número de. Para llevar a cabo la optimización de los flujos de interconexión para los sistemas: Térmicamente Acoplado (SA) y Petyuk (SP). Hay que considerar que la Acetona, Agua e IPA deben ser recuperados con una pureza molar de 99%, 98.9% y 62% respectivamente. Para ello se realizaron variaciones de 0.001% a 0.01% respecto al valor nominal. Una vez obteniendo los modelos óptimos de cada sistema de estudio se realizó un estudio de control a frecuencia cero, los resultados se obtienen en los modelos de control. Para ello se implementó una perturbación partiendo del punto de operación nominal. Con una magnitud de +0.5% de cada variable manipulable.

Por ello para el Índice de Sensibilidad (SI), como se muestra en la Figura 8, se logra observar que los valores mínimos son los asociados al Sistema Convencional (SC), ya que este sistema al perturbarse en la corriente de alimentación de la columna C1 sufre una propagación lineal de esta perturbación hacia la columna C2, debido a las dimensiones de la columna se logra amortiguar la perturbación en la corriente de alimentación en la columna C1 para posteriormente reducir el efecto de esta variación en la columna C2.



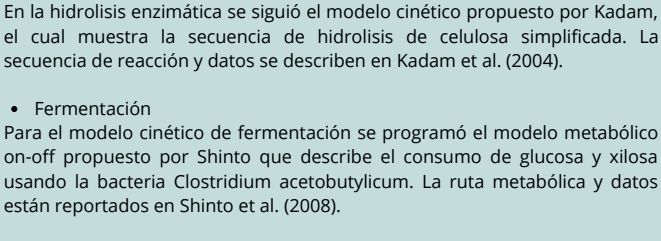
CASO 3: Modelación e intensificación de un proceso para producción de butanol a través de biomasa lignocelulósica proveniente de desechos agrícolas.

Descripción General del proyecto

Modelación de un proceso para la producción de butanol a través de biomasa lignocelulósica y su intensificación con la implementación de SF5 (sacarificación y fermentación simultánea). Se realizó un modelado de la producción de alcoholes a partir de biomasa lignocelulósica proveniente de desechos agrícolas, el bagazo de caña fue utilizado como materia prima para la extracción de azúcares recuperados por un pretratamiento e hidrólisis enzimática para su posterior fermentación. Para el pretratamiento fueron propuestos dos distintos procesos, base diluida y agua caliente, luego el proceso de hidrólisis fue mediante los enzimas de la economía circular para así tener productos y procesos limpios que permitan a la industria crecer y cubrir la demanda del mercado global, evitando afectar el medio ambiente y al personal. El caso de estudio es la producción del compuesto Metiltrióxosilano (MTES) a partir de la reacción de Metiltriclorsilano con Etanol simplificado los pasos intermedios de la reacción debido a los escasos estudios publicados de la cinética de la reacción en cuestión. Dicha reacción se simplifica como se muestra en la Ec. 1:

Modelo Convencional

Se monto una plataforma en Microsoft Excel® con los datos y modelos pertinentes, de tal forma que se pudiese saber el rendimiento de solventes en función de la composición de la materia prima y el flujo disponible.



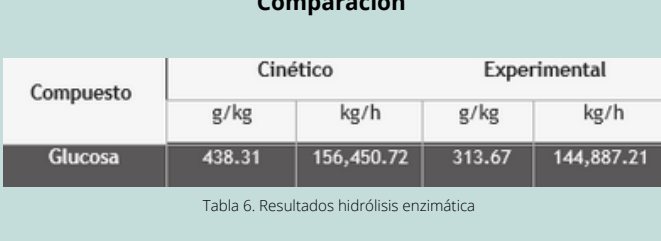
• Pretratamiento: Para la parte del pretratamiento se usaron dos propuestas donde se modelo la conversión de glucano a glucosa y xilano a xilosa, en cada una respectivamente, las composiciones de la materia prima y las conversiones de los pretratamientos, en agua líquida caliente y base diluida fueron recabadas de Goa et al. (2013).

El objetivo de este estudio es diseñar un proceso amigable con el medio ambiente que satisfaga las necesidades del mercado actual y que proporcione una pureza determinada del compuesto.

• Hidrólisis enzimática: Para el caso de las corrientes provenientes de los pretratamientos de agua caliente y base diluida, se modelo en base a los datos presentados en Goa et al., haciendo uso del coctel Cellic CTec2 Novozymes®.

Para el modelo cinético de fermentación se usaron los modelos matemáticos on-off propuesto por Shinto que describe el consumo de glucosa y xilosa usando la bacteria Clostridium acetobutylicum. La ruta metabólica y datos están reportados en Shinto et al. (2008).

• Fermentación: Se optó por una fermentación tipo ABE usando la bacteria Clostridium acetobutylicum, el modelo de producción de solventes en función de concentraciones de azúcares iniciales provenientes de la corriente de la hidrólisis, se determinó con los datos reportados en Fond et al., con esto se logró determinar la conversión de glucosa y xilosa a cada uno de los solventes en función del tiempo.



Modelo Intensivo

Se monto una plataforma en Microsoft Excel® con los datos y modelos pertinentes, de tal forma que se pudiese saber el rendimiento de solventes en función de la composición de la materia prima y el flujo disponible.

Este modelo se obtuvo mediante la programación integrada de los modelos cinéticos correspondientes a la etapa de hidrólisis enzimática y fermentación [12-15]. Se utilizó el entorno de programación Matlab (The MathWorks, Natick, MA).

• Fermentación: Se optó por una fermentación tipo ABE usando la bacteria Clostridium acetobutylicum, el modelo de producción de solventes en función de concentraciones de azúcares iniciales provenientes de la corriente de la hidrólisis, se determinó con los datos reportados en Fond et al., con esto se logró determinar la conversión de glucosa y xilosa a cada uno de los solventes en función del tiempo.

Tabla 6. Resultados hidrólisis enzimática

Compuesto	Cinético		Experimental	
	g/kg	kg/h	g/kg	kg/h
Glucosa	438.31	156.450.72	313.67	144.887.21

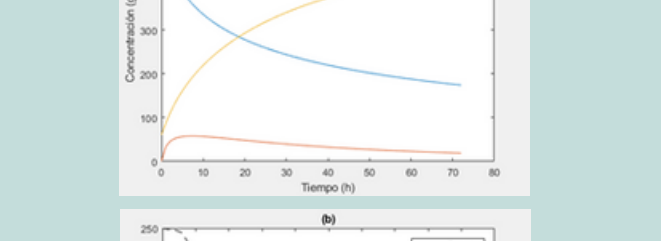
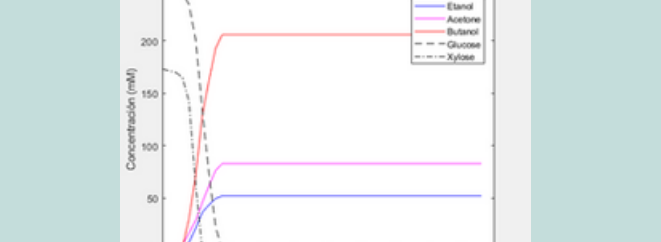
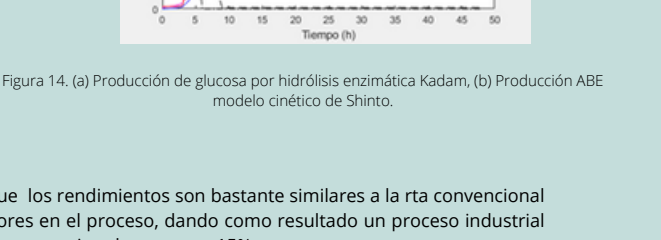


Tabla 7. Resultados fermentación

Compuesto	Cinético		Experimental	
	g/L	g/L	g/L	g/L
Acetona	4.88	4.45		
Butanol	15.24	16.13		
Etanol	2.4	2.65		



Las ventajas del método SF5 (sacarificación y fermentación simultánea) es que aunque los rendimientos son bastante similares a la ruta convencional (sacarificación y fermentación separadas) los costos se disminuyen por ser menos reactores en el proceso, dando como resultado un proceso industrial económicamente más atractivo, debido a que el costo por cantidad de productos disminuye aproximadamente un 15%.



CASO 4: Producción sustentable de metiltrióxosilano (MTES).

Descripción General del proyecto

En la actualidad, el estudio de nuevos materiales ha significado un gran avance y conlleva a su vez un avance tecnológico al ofrecer nuevas características y propiedades, así como mejoras a los materiales convencionales. Es por esto por lo que, las últimas décadas, suponen un gran auge al estudio de materiales novedosos y procesos de producción bajo el marco de la química verde, de ahí el interés de hacerlos partícipes de la economía circular para así tener productos y procesos limpios que permitan a la industria crecer y cubrir la demanda del mercado global, evitando afectar el medio ambiente y al personal. El caso de estudio es la producción del compuesto Metiltrióxosilano (MTES) a partir de la reacción de Metiltriclorsilano con Etanol simplificado los pasos intermedios de la reacción debido a los escasos estudios publicados de la cinética de la reacción en cuestión. Dicha reacción se simplifica como se muestra en la Ec. 1:

Resultados alcanzados o productos realizados

La reacción de obtención del compuesto de interés se lleva a cabo en un reactor tipo RCTA (REACTOR CONTINUO DE TANQUE AGITADO) de una capacidad de 212.85 L y un diámetro de 0.4487m esto fue calculado con la intención de cubrir una demanda diaria de 100 lb/mol de MTES, considerando la conversión lograda que fue del 66.67% con respecto al reactivo en exceso.

El objetivo de este estudio es diseñar un proceso amigable con el medio ambiente que satisfaga las necesidades del mercado actual y que proporcione una pureza determinada del compuesto.

El siguiente gráfico muestra la conversión de glucosa y xilosa en la producción de los alcoholes.

Para la obtención de este compuesto se debe de unir los modelos matemáticos de Shinto y Kadam, de manera que se ejecuten los modelos simultáneamente, esto con la finalidad de tener solo la entrada de la biomasa preparada y obtener directamente el producto ABE, ahorrándose un equipo en el proceso.

El siguiente gráfico se puede apreciar las concentraciones obtenidas para la producción y el consumo de reactivos por los modelos matemáticos de Kadam para la hidrólisis y de Shinto para la fermentación.

Tabla 8. Composición en estado estacionario VS número de plato.

El diseño de la columna de platos para la separación se llevó a cabo considerando los puntos de ebullición de los reactivos y productos, así como su equilibrio y sus correspondientes composiciones en líquido y vapor a calcular las composiciones en el equilibrio.

Se simuló en el software Matlab® un sistema de platos tradicional, donde los grados de libertad están representados por las variables: Tiempo de operación (ti), número de platos (Nt), plato de alimentación (Nf), coeficiente de retención en la zona de la columna (M, Mo, Mi), carga térmica (V) y la relación de reflujo (R) donde cada una de ellas forman pieza clave para la obtención del MTES a 98% y que nos garantizan las mejores condiciones de operación.

Para llevar a cabo la simulación del proceso de separación, primero se realizó un análisis termodinámico donde se estudió el equilibrio químico por etapas. Se utilizaron los parámetros de Antoine para calcular en cada etapa la "P" de equilibrio y sus correspondientes composiciones en líquido y vapor. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar cuáles variables dentro del código tienen un mayor efecto en el perfil de concentraciones dentro de la columna. En este punto, se hace una variación del reflujo que ingresa a la columna, del número de etapas y la etapa de alimentación, así como de factores de retención M, Mo y Mi, obteniendo como resultado distintos perfiles de composición VS número de plato. El resultado más aceptable fue de 32 platos, alimentado en el plato #15.

Se espera obtener un proceso convencional viable, que sea efectuado bajo las demandas de la química verde y que pueda ser intensificado para minimizar el impacto medioambiental y que pueda ser rentable del proceso.

Se simuló en el software Matlab® un sistema de platos tradicional, donde los grados de libertad están representados por las variables: Tiempo de operación (ti), número de platos (Nt), plato de alimentación (Nf), coeficiente de retención en la zona de la columna (M, Mo, Mi), carga térmica (V) y la relación de reflujo (R) donde cada una de ellas forman pieza clave para la obtención del MTES a 98% y que nos garantizan las mejores condiciones de operación.

CONCLUSION

La finalidad de la intensificación de procesos es el buscar, desarrollar e implementar nuevas tecnologías con aplicación en los procesos industriales, puesto que con estas tecnologías nuevas se busca diseñar equipos más eficientes, de menor consumo energético, y con uso de materias primas más verdes, puesto que al diseñar equipos eficientes en los aspectos mencionados anteriormente se va reduciendo el impacto ambiental, que es uno de los costos de los procesos de operación y el servicio del mismo, lo cual trae consigo un beneficio extra para las empresas. Además de que la seguridad mejora bastante, porque en lugar de tener dos o tres equipos, se tiene uno solo y el riesgo de operación se reduce a un solo equipo que se deba estar monitoreando, debido a esto es que es de mucha importancia el estudio de estas nuevas alternativas de procesos, así como la importancia de los investigadores de que dediquen tiempo de investigación e ingenio para el desarrollo de dichas tecnologías. Tal como se mostró en los resultados de los cuatro casos previamente mostrados en donde se analizaron e intensificaron procesos para una disminución de los factores mencionados anteriormente, de tal manera que estos contribuyan a un planeta para el desarrollo sostenible del país.

Bibliografía/Referencias

1. Ranjan, A. and Moholkar, V.S. (2012). Biobutanol: science, engineering, and economics. *Int. J. Energy Res.*, 36: 277- 323. https://doi.org/10.1002/er.1948
2. Charifilmagne M, Montegardig, John Mark Edrhum M, Ani, Omelia Kezia B, Castro, and Lara Louise R, Llanera (2017). Process Plant Design and Feasibility of An Acetone-Biobutanol-Ethanol (ABE) Fermentation Bio refinery using Sugarcane Bagasse and Clostridium acetobutylicum. *International Journal of Chemical Engineering and Applications vol. 8, no. 3*, pp. 162-168. doi:10.8178/ijcea.2017.8.3.649.
3. Dong H. et al. (2011) *Springer*, Berlin, Heidelberg, Liu CG., Huang H., Tsao G. (eds) *Biotechnology in China III: Biofuels and Bioenergy*. Advances in Biotechnology Engineering Biotechnology, vol. 112. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/10_2011_128
4. Qi, Q., & Liang, Q. (2015). Single-Cell Biorefinery of Lignocellulosics & White Biotechnology, 369-388. doi:10.1016/b978-0-444-63453-5.00011-2
5. Chikako, Shobunfudira, Katsunori, et al. (2013) *Biorefinery System for Lignocellulosic Biomass Using Steam Explosion, Intechopen*, doi: 10.5772/intechopen.38544
6. Hendrick, A. T. W. M., & Zeman, G. (2009). Pretreatments to enhance T. The digestibility of phytochemicals biomass. *Bioresour. Technol.* 100(11), 10-18. doi:10.1016/j.biortech.2008.05.027
7. Kumar, S., Bhatt, P., & Mutturi, S. (2020). Biotechnology, Functional and Preservative Properties of Phytochemicals, 369- 315. doi:10.1016/b978-0-12-818593-3.00009-9
8. Olofsson, K., Bertilsson, L., & Lidén, G. (2008). A short review on SSF - an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnology for Biofuels*, 1(1), 7. doi:10.1186/1754-6834-1-7
9. Balbastros, M. (2010). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioalcohol Production*, 159- 177. doi:10.1533/9781845699611.2.159
10. Guo, Y., Xu, J., Zhang, Y., Qu, Q., Yuan, Z., & Liu, Y. (2013). Effects of different pretreatment methods on chemical composition of sugarcane bagasse and enzymatic hydrolysis. *Bioprocess Technology*, 144, 396-400. doi:10.1016/j.biortech.2013.06.036
11. Fond, O., Engasser, J.-M., Matta-El-Amouri, G., & Pettidmange, H. (1986). The acetone butanol fermentation on glucose and xylose. I. Regulation and kinetics in batch cultures. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(2), 160-166. doi: 10.1002/bit.260280203
12. Kadam, Eric C., James D. (2005). Development and Validation of a Kinetic Model for Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass. *Biotechnol.* 20, 698-705.
13. Rathul Moyank, Amrita Ranjan & Vijayanand S. Moholkar (2013) Mathematical models of ABE fermentation: review and analysis. *Critical Reviews in Biotechnology*, 33(4), 419-447. DOI: 10.3109/07388511.2012.726208
14. Shinto H, Tashiro Y, Kobayashi K, Sekiguchi T, Hana T, Kurita Y, Okamoto M, Sonomoto K. Kinetic study of substrate dependency on higher butanol production from lignocellulose. *Appl Biochem Biotechnol*. 2011;164(1):1-7.
15. Williams L. Lubben. Design and control of the acetone process via dehydrogenation of 2-propanol. *AIChE J.* 1986;32(1):1206-1218, 2011.
16. Fernanda Paduotto Petagum, Antonio Marinho Barbosa Neto, Ireda Angélica Lucini Dalmon, and Mariana Conceição da Costa. "Gas Solubility Research, 50(3):1206-1218, Solvents: Review and Analysis". (2021)
17. Magdalena Pätzold, Sascha Siebenhaller, Selin Kara, Andreas Liese, Christoph Sydalt and Dirk Holtmann. "Deep Eutectic Solvents as Efficient Solvents in Biocatalysis". (2019).
18. Mohammed Awfulu Usman, Olumide Kayode Fagoreye, Tolulawale Olufunmilayo Ajayi, Abiola John Kehinde. "ASPEN plus simulation of liquid-liquid equilibria data for the extraction of aromatics from diesel". *Energy Conversion and Management*. 2019;193:1122-1132.
19. Arianna Núñez-Carbollo, Martha González-Martínez, Gustavo Saurá-Lara. "Proceso de recuperación de CO2.Generalidades".