

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

C. A. Mora Garduño<sup>1</sup>, K. R. Jalomo Fonseca<sup>1</sup>, J. G. Segovia Hernández<sup>2</sup>, A. G. Romero García<sup>3</sup>, A. E. García Hernández<sup>1</sup>, G. Alvarez Bacame<sup>5</sup>, J. M. Arnezquita Ortiz<sup>4</sup>, A. L. Arzola Rocha<sup>1</sup>  
 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 & Centro, 83300 Hermosillo, Son.

## Perfil del equipo de trabajo

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, interesados en la química verde y sus procesos para un mejor desarrollo sustentable.

## 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 mencionan 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.



Figura 1. Intensificación de procesos a pequeña y mediana escala. Fuente: "The Fundamentals of Process Intensification" 2019.

## 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 8. 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 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 recuperar el CO2 de los procesos industriales.

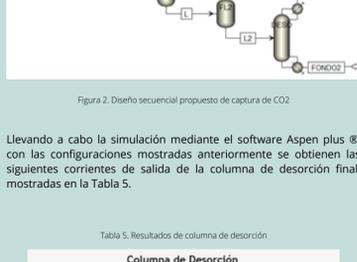


Figura 2. Diseño secuencial propuesto de captura de CO2

Llevando a cabo la simulación mediante el software Aspen plus 8, 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

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

### 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 "1" 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 "1.2" 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%.

Para cada una de las unidades del diseño secuencial explicado anteriormente se realizó un análisis de sensibilidad, en la simulación, en donde se fueron cambiando los valores de las variables, de tal manera que se obtuviera el arreglo secuencial donde se obtuviera el mayor porcentaje de recuperación y pureza de CO2. En las Tablas 1 a 4 se muestran los datos de las configuraciones óptimas para cada unidad, así como para las corrientes de entrada.

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	0.75	X CO2	0.034879
Relación molar	1:2.5	XN2	0.763784
		XO2	0.13507

Tabla 2. Configuración de columna de absorción

Columna de Absorción	
#Etapas	30
Etapas alim. Aire	30
Etapas 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	0.0214	X vapor	0.001208

Tabla 4. Configuración de columna de desorción

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

### Conclusión

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 mejor 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.

Para este trabajo se tomaron los flujos y composiciones de alimentación previamente definidos por L. Luyben et al. (Figura 3). Considerando un flujo de alimentación en este estudio de 51.96 kmol/h. La composición del flujo para la corriente de alimentación fue de 67% mol de IPA y 35% mol de agua; 320 K y 0.999 at. Todas las configuraciones propuestas fueron simuladas mediante el uso de Aspen Plus V11. Mediante el uso de las propiedades físicas del modelo termodinámico UNIQUAC. Los objetivos de purezas mínimas fueron fijados en 99% para la acetona, 98.9% para el agua y 62% de IPA en el destilado.

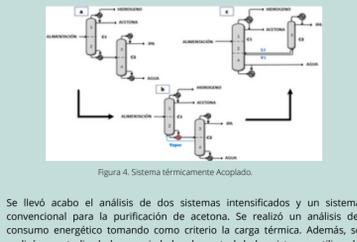


Figura 3. Sistema convencional.

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 (Figura 5).



Figura 4. Sistema térmicamente Acoplado.

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 escalonadas de 0.001% 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 medio de los modelos matemáticos. Para ello se implementó una perturbación partiendo del punto de operación nominal. Con una magnitud de +0.5% de cada variable manipulable.



Figura 5. Sistema Petyuk

### 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 en 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.

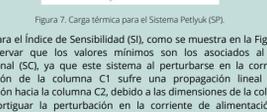


Figura 6. Carga térmica para el Sistema Térmicamente Acoplado (SA)

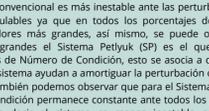


Figura 7. Carga térmica para el Sistema Petyuk (SP)

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.

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 recintos 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.

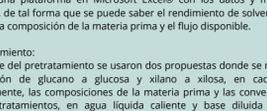


Figura 8. Índice de sensibilidad de los sistemas.

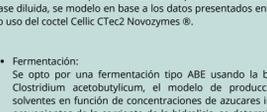


Figura 9. Número de Condición de los sistemas.

## 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 Metiltrióxosilano 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:

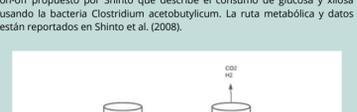
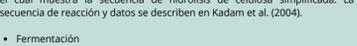


Figura 10. Esquema del proceso de la ruta convencional.

### Modelo intensificado

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).

• Hidrólisis enzimática  
 En la hidrólisis enzimática se siguió el modelo cinético propuesto por Kadam, el cual muestra la secuencia de hidrólisis de celulosa simplificada. La secuencia de reacción y datos se describen en Kadam et al. (2004).

• Fermentación  
 Para el modelo cinético de fermentación se usó el modelo metabólico 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).



Figura 11. Esquema del proceso de la ruta intensificada

Para el modelo intensificado se deben 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.

### Comparación

Compuesto	Cinético		Experimental	
	g/kg	kg/h	g/kg	kg/h
Glucosa	438.31	156,450.72	313.67	144,887.21

Tabla 6. Resultados hidrólisis enzimática

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		

Tabla 7. Resultados fermentación

### Conclusion

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 Metiltrióxosilano 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:



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.  
 2. Caracterización y sostenibilidad: El modelo de aplicación que se va desde la resina de silicio, aceite de fenilmetil silicona, así como agente impermeabilizante. El MTES como activo en este último caso permite que el recubrimiento respire y así se minimice el deterioro o daño en la interfaz del recubrimiento y la superficie.  
 Otra aplicación importante es hidratar a su metal alcalino; produciendo alcoholatos de sílice de metales alcalinos aplicados a la industria de la construcción como recubrimiento para algunos materiales.



Figura 13. Composición en estado estacionario VS número de plato.

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, los costos 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.

### Conclusion

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 y calcular las composiciones en el equilibrio. Se simuló en el software Matlab 8.0 una columna de platos tradicional, donde los grados de libertad están representados por las variables: Tiempo de operación (t), número de platos (N), 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 el definir ciertas 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.

### Bibliografía/Referencias

- Ranjani, 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>
- Charlilimgne M., Montezaghe, J, Jón Mark Eðrúm M., Ani, Onelia Kezia B. Castro, and Lara Louise R. Llanera (2017). Process Plant Design and Feasibility of an Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Fermentation Biorefinery 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.
- 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](https://doi.org/10.1007/10_2011_128)
- Choi, Q., & Liang, Q. (2015). Single-Cell Biorefinery of Lignocellulosics & White Biotechnology, 369-388. doi:10.1016/b978-0-444-63453-5.00011-2
- Schikao, Shohachiro, Nakamura, A. (2021) Biorefinery system of lignocellulosic biomass Using Steam Explosion, Intechopen, doi: 10.5772/intechopen.98544
- Henriksen, A. T., W. M., & Zeman, G. (2009). Pretreatments to enhance T. The digestibility of phytochemicals biomass. *Bioresour. Technol.* 100(1), 10-18. doi:10.1016/j.biortech.2008.05.027
- 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
- Olofsson, K., Bertilsson, M., & 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
- Ballesteros, M. (2010). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioalcohol Production*, 159-177. doi:10.1533/9781845699611.2.159
- Gao, Y., Xu, J., Zhang, Y., Yu, 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
- Fond, O., Engasser, J.-M., Matta-El-Amouri, G., & Pettdemange, 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
- Tadani, Kadam, Eric C., James D. (2005). Development and Validation of a Kinetic Model for Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass. *Biotechnol.* 20, 698-705.
- Rahul Moyank, Amrita Ranjan & Vijayanand S. Moholkar (2013) Mathematical models of ABE fermentation: review and analysis, *Critical Reviews in Biotechnology*, 33(4), 419-447. DOI: 10.3109/07388551.2012.726208
- Shinto H, Tashiro Y, Kobayashi G, Sekiguchi T, Hana T, Kuruya Y, Okamoto M, Sonomoto K. Kinetic study of substrate dependency for higher butanol production from lignocellulosic biomass. *Bioprocess Technology* 2008; 19(12): 2607-2611.
- Fernanda Luyben Petalquin, Antonio Marinho Barbosa Azevedo, Irene Angela Lucini Dal