

---

***INCERTIDUMBRE EN LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS PARA EL  
DESARROLLO DE BIOREFINERÍAS***

***UNCERTAINTY IN THE PROCESS INTEGRATION FOR THE BIOREFINERIES  
DEVELOPMENT***

*Meilyn González Cortés<sup>1\*</sup>, Julio Pedraza Gárciga<sup>1</sup>, Dennis Abel Clavelo Sierra<sup>1</sup>  
y Erenio González Suárez<sup>1</sup>*

---

*<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.*

Recibido: Febrero 24, 2015; Revisado: Marzo 30, 2015; Aceptado: Abril 15, 2015

---

**RESUMEN**

En el trabajo se muestra cómo los enfoques de diseño con grado óptimo de flexibilidad pueden reducir los costos adicionales de las estrategias que aplican factores de sobrediseño para considerar parámetros con incertidumbre que influyen en la viabilidad económica de un proyecto.

Se plantean los aspectos que tienen incertidumbres asociadas y que son elementos importantes en las configuraciones de integración de procesos bajo un esquema de biorefinería, que son: materia prima, tecnologías de conversión de la materia prima, y variedad de productos que pueden obtenerse.

Del análisis se obtiene que en las materias primas y productos con potencialidades en un esquema de biorefinería están presentes incertidumbres externas tales como disponibilidad, demanda y precios en el mercado, las que determinan su impacto en la biorefinería y que en los precios de los productos pueden identificarse límites mínimos y máximos que significan en intervalos que deben considerarse para la evaluación económica del proyecto y el análisis de sensibilidad ante condiciones variadas.

**Palabras clave:** incertidumbre, integración de procesos, biorefinería, diseño de procesos

## **ABSTRACT**

This paper presents how the design approaches with high level of flexibility can reduce the additional costs of the strategies that apply oversize factors to consider parameters with uncertainty that impact on the economic feasibility of a project.

The elements with associated uncertainties and that are important in the configurations of the process integration under a biorefinery scheme are: raw material, raw material technologies of conversion, and variety of products that can be obtained.

From the analysis it is obtained that in the raw materials and products with potentialities in a biorefinery scheme, there are external uncertainties such as availability, demands and prices in the market. Those external uncertainties can determine their impact on the biorefinery and also in the product prices we can find minimum and maximum limits that can be identified in intervals which should be considered for the project economic evaluation and the sensitivity analysis due to varied conditions.

**Key words:** uncertainty, process integration, biorefinery, process design.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El enfoque de diseño con flexibilidad, conocido también como diseño en condiciones de incertidumbre, ha sido estudiado por más de cuatro décadas. En las décadas de los 80 y 90, antes de que se desarrollaran las herramientas sistemáticas, el enfoque era utilizar los valores nominales de las incertidumbres para el diseño básico y luego aplicar factores de sobrediseño empíricos para tamaños de equipos para acomodar las incertidumbres.

La utilización de factores de diseño excesivo y el uso de valores nominales, ignora otros valores posibles de las incertidumbres, además de que el empleo de factores de sobrediseño no garantiza el funcionamiento viable en toda la incertidumbre y puede variar sino se tiene conocimiento sobre el grado de flexibilidad del diseño en cuestión, lo que puede resultar en costos adicionales innecesarios.

Sobre la base de los objetivos de diseño, los enfoques sistemáticos han sido por lo general agrupados en dos categorías. El primero, referido al diseño óptimo para un grado fijo de flexibilidad en las que el diseño debe ser factible en todos los valores de la incertidumbre en un conjunto discreto de escenarios (problema de diseño multiperíodo), y el segundo en el que el diseño debe ser factible en rangos especificados de un conjunto seminfinito de escenarios (problema general de diseño bajo incertidumbre). Estos enfoques son apropiados para el modelo determinista de la incertidumbre.

Los enfoques para el diseño con grado óptimo de flexibilidad, para reducir los costos adicionales, implica la consideración de estos aspectos dentro de la formulación del modelo de optimización.

El objetivo en el contexto de este trabajo es proponer una formulación que aborde esta problemática y sea adecuada para el diseño de configuraciones de biorefinería flexible en la cual se integren varios procesos para el intercambio eficiente de recursos materiales y energéticos.

## **2. DESARROLLO**

En el esquema de una biorefinería se involucran varios procesos para obtener diversos productos, con seguridad estos procesos comparten recursos comunes como son el agua, la energía térmica y de potencia, así como que en las etapas de un proceso se obtienen productos intermedios que constituyen materia prima para la obtención de otros; es de esta forma que los procesos están estrechamente vinculados y lograr un manejo eficiente de los recursos que ellos intercambian es lo que hace que estas tecnologías sean viables y sostenibles.

Cuando se trata la temática de la biorefinería existen varios elementos con incertidumbre que deben considerarse y que determinan las oportunidades de integración de procesos que pueden identificarse en cualquier caso de estudio. Estos elementos se describen a continuación y en la figura 1, se representan de forma esquemática Kamm (2004); (Sanders et al., 2007). Los elementos en los que puede identificarse incertidumbre son:

**Biomasa como materia prima:** puede ser diversa la materia prima empleada entre las que se encuentran biomasa forestal, residuos agrícolas y orgánicos, flujos de residuos agrícolas como algas, plantas lignocelulósicas, árboles de madera blanda y dura. La localización de la biorefinería puede determinar en gran medida el empleo de una biomasa u otra atendiendo a su disponibilidad en ese lugar.

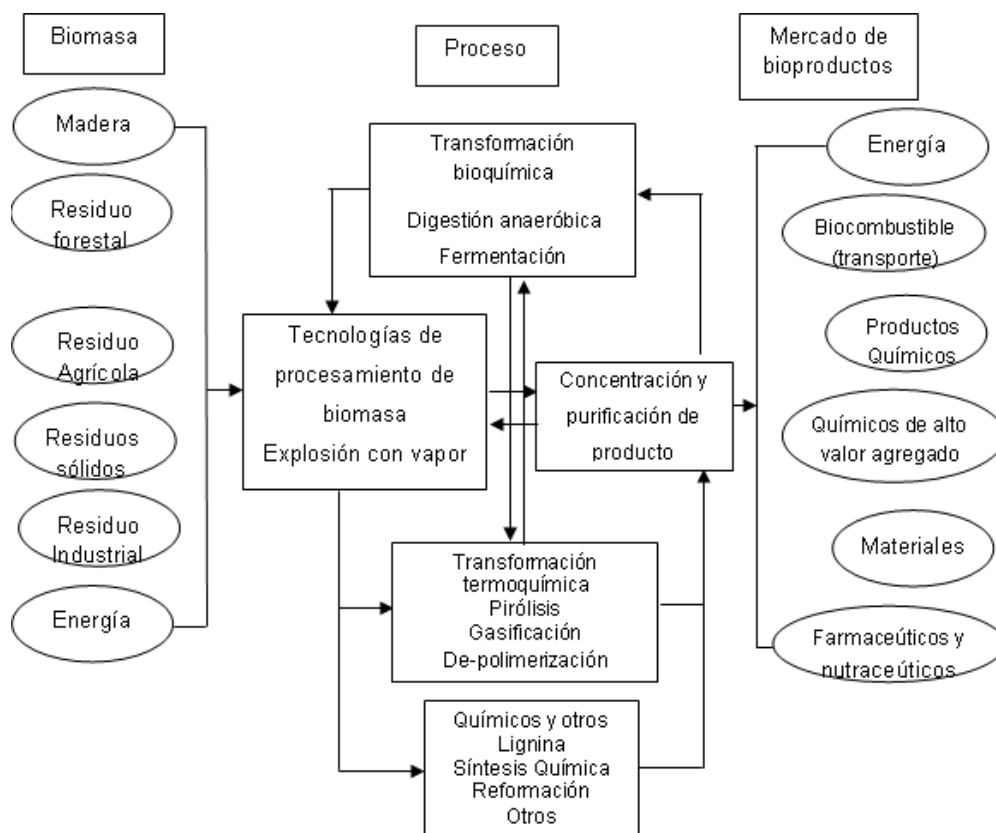
**Procesos de conversión:** el proceso de conversión de la biomasa a producto final involucra varios pasos y tecnologías que hacen la biorefinería a gran escala una industria en sí misma. Como ejemplos se pueden citar la gasificación, fermentación, hidrólisis, evaporación, destilación, catálisis, pirólisis, torrefacción y secado Rijkens (1984); (Huang et al., 2008). Esto significa que el diseño y optimización de una biorefinería tiene un alto impacto en las características energéticas y por ende en las oportunidades para la integración de procesos.

**Producto final:** Como se explicó anteriormente, existe una variedad de productos que pueden obtenerse en una biorefinería. Algunos son nuevos productos para los cuales el mercado futuro es aún desconocido. A su vez, pueden obtenerse productos en grandes cantidades o en pequeña escala (productos de alto valor agregado o productos químicos especiales). También la situación del mercado para estos productos, o sea la oferta y demanda de los mismos, puede determinar el destino de producción de la biorefinería a la obtención de productos que estén en mejores condiciones según este aspecto.

La selección de la materia prima, así como el proceso de conversión y los productos finales no puede ser realizada de forma separada. Algunas alimentaciones son sostenibles solo para algunos productos, y algunas tecnologías y procesos de conversión pueden ser usados solo o preferiblemente para algunos tipos de alimentaciones y/o productos finales.

La complejidad tecnológica y de funcionamiento integrado que se genera en las biorefinerías conduce a un interesante y complicado problema de optimización que es difícil de resolver debido a la incertidumbre en aspectos tales como los precios futuros de la energía, los costos de inversión, entre otros. Es por esto, que los estudios de optimización en diferentes niveles de estos parámetros deben ser realizados en el orden de identificar soluciones robustas que signifiquen en los aspectos técnicos, económicos

y ambientales con un grado de flexibilidad aceptable. (Cardona y Sánchez, 2007); (Ensinas et al., 2007); Ensinas (2008).



**Figura 1.** Posibilidades de materia prima, procesos y productos en la Biorefinería.

Como se ha expresado, las decisiones sobre el diseño de procesos químicos se basan en la información de entrada, la cual generalmente tiene incertidumbre o variaciones predecibles en determinados parámetros. El problema de considerar estos cambios de entrada en la etapa inicial de diseño se conoce como diseño con flexibilidad, Pham (2011).

Sobre la base de las fuentes de incertidumbre, los cambios de entrada se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Incertidumbre inherente a parámetros del modelo: ecuaciones de modelos que se emplean para describir matemáticamente los procesos y que se pueden obtener a partir de experimentos. Sus cambios se describen generalmente en rangos o en funciones de distribución de probabilidad.
- Incertidumbre inherente al proceso - flujos, temperaturas, presiones, que normalmente perturban o fluctúan cuando el proceso está en funcionamiento. Sus valores pueden ser obtenidos de los instrumentos de medición y se describen por funciones de distribución de probabilidad.
- Incertidumbres externas: disponibilidad, demanda, precios y calidades de materiales y productos. También pueden incluir condiciones ambientales. Los comportamientos

de estos aspectos dependen de condiciones en el mercado o condiciones ambientales. Pueden predecirse a partir de datos históricos.

- Incertidumbres discretas: Asociada a la disponibilidad de los equipos. Una incertidumbre de este tipo, por ejemplo, es la probabilidad y la frecuencia de fallo de un equipo. Se pueden estimar a partir de las bases de datos de fiabilidad.

Otra clasificación de los cambios en los parámetros de entrada se basa en la naturaleza de la incertidumbre y la forma de describirla. Hay dos categorías de esta clasificación: determinista y estocástica.

La incertidumbre determinista, es descrita por un conjunto finito de valores (escenarios) con probabilidades de ocurrencia; por lo tanto, se relaciona con las incertidumbres externas y discretas.

La incertidumbre estocástica tiene un comportamiento en las variaciones aleatorias continuas descritas por funciones de densidad de probabilidad conjunta. Por lo tanto, se relacionan con las incertidumbres asociadas al modelo y a los procesos, (Pham, 2011).

### **Incertidumbre en parámetros de materia prima y productos**

El diseño de configuraciones de biorefinería flexibles implica incertidumbres externas e incertidumbres inherentes al modelo. Las incertidumbres externas por lo general incluyen:

- Precios de la materia prima, así como su disponibilidad y composición
- Precios del producto, así como su demanda y especificaciones

Los valores de estos parámetros son inciertos ya que dependen de las condiciones del mercado, que cambian con el tiempo y varían de un parámetro a otro. La mayoría de sus cambios, por ejemplo, los precios pueden ser arbitrarios. Pero algunos de ellos, en particular la disponibilidad de los productos agrícolas, son estacionales y recurrentes.

Los intervalos en las incertidumbres externas se pueden reducir mediante análisis de los datos históricos del mercado y predecir tendencias futuras basadas en los mismos. Sin embargo, los niveles de incertidumbre no pueden reducirse aún más debido a que las incertidumbres dependen también de las condiciones externas.

Por otro lado, las incertidumbres inherentes a los modelos tienen características diferentes. Se obtienen a partir de experimentos; por lo tanto, sus niveles de incertidumbre pueden reducirse con más experimentos (aunque más experimentos significan mayores costos).

Como se mostró en la figura 1, las biorefinerías tienen la particularidad de que en las mismas se pueden obtener diversos productos en dependencia de la materia prima y las tecnologías de conversión que se empleen. Uno de los aspectos que puede determinar el uso de una tecnología de conversión sobre otras para la obtención de determinados productos es el precio que tengan los mismos en el mercado, lo cual impactará en las ganancias que se obtengan por la venta de estos en el esquema. En la tabla 1, se muestran un resumen de los estadísticos para precios de diferentes productos que se pueden obtener en una biorefinería que procese la biomasa cañera como materia prima. Como se puede observar en todos los límites mínimos y máximos de precios de productos que a su vez significan en un intervalo para este parámetro que es un aspecto importante en la evaluación económica de cualquier proyecto. En aquellos estudios en

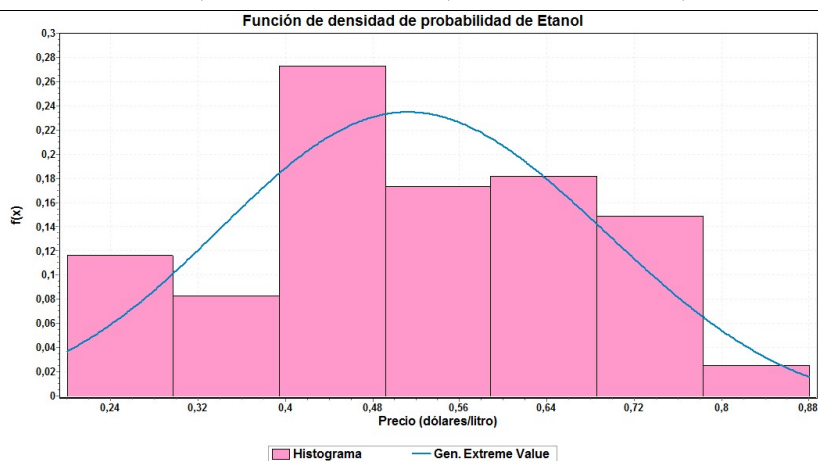
los que la incertidumbre no se considera es común que se tome el valor medio para la evaluación económica del proyecto.

Lo anterior limita el análisis, lo apropiado es tener la posibilidad de hacer el análisis considerando el intervalo para cada producto y obtener entonces los resultados que permitan hacer un análisis de sensibilidad ante condiciones variadas.

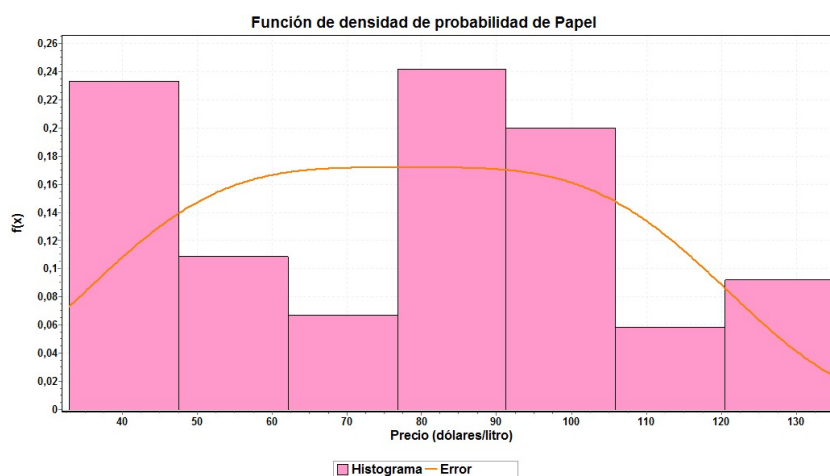
En la figura 2, se muestran los histogramas de frecuencia para los productos etanol y lignina en el orden de ejemplificar sobre el precio más probable para estos productos, pero que se pueda visualizar a la vez su distribución y frecuencia para otros precios.

**Tabla 1.** Datos estadísticos de productos con incertidumbre

	<i>Etanol, (\$/L)</i>	<i>Papel Cartón, (\$/t)</i>	<i>Lignina, (\$/t)</i>	<i>Furfural, (\$/t)</i>
Mín	0,20	33,00	190,00	650,00
Máx	0,88	135,00	1500,00	3000,00
Media	0,52	78,02	449,07	1324,69
Desviación típica	0,151	27,77	310,16	492,03
Límite inferior	0,48	71,49	325,79	1129,13
Límite superior	0,55	84,55	572,35	1520,25



(a) Histograma precio etanol



(b) Histograma precio papel cartón

**Figura 2.** Histograma de frecuencia para los precios de productos, (a) etanol, (b) papel cartón

### Optimización de esquemas de procesos integrados en condiciones de incertidumbre.

El término flexibilidad implica la posibilidad de un proceso para ser operable de forma viable y rentable en diversos escenarios de incertidumbre.

Si el proceso es operable bajo cualquier nivel de incertidumbre entonces se puede expresar que es completamente flexible. Si el proceso es operable en algunos escenarios de incertidumbre, es parcialmente flexible.

La figura 3, muestra un esquema de la curva de equilibrio entre el nivel de ganancia y flexibilidad. A medida que aumenta el nivel de flexibilidad, se necesitan mayores costos de capital porque los tamaños de equipos se incrementan y más equipos se emplean para dar cabida a las gamas más amplias de los valores de incertidumbre. Además, los ingresos del proceso aumentan, ya que el proceso tiene la posibilidad de operar en escenarios adicionales.

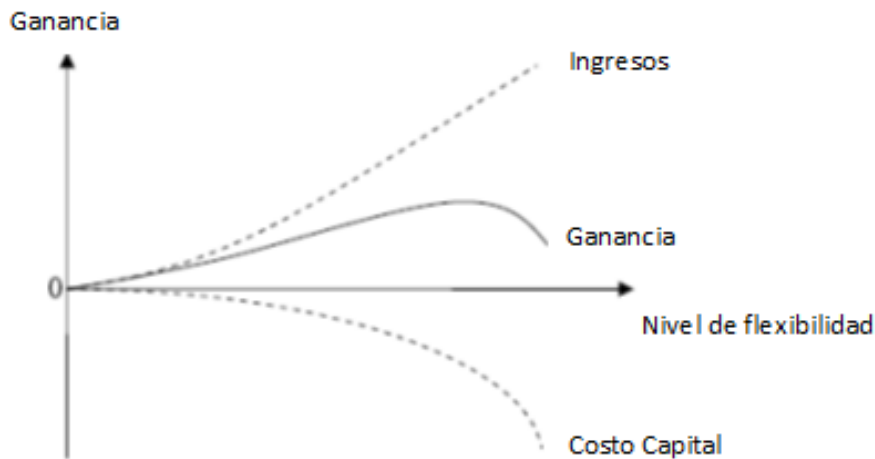


Figura 3. Relación ganancia vs flexibilidad

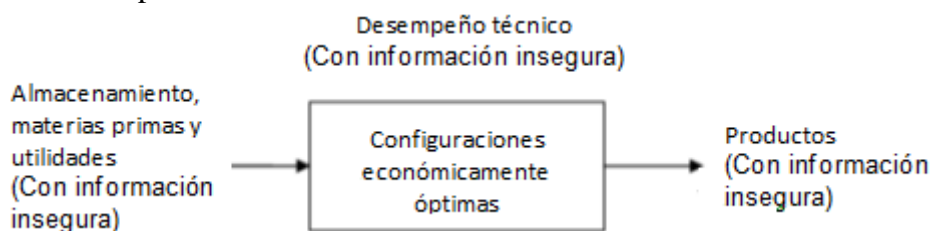
Como resultado, la ganancia- que es una combinación del costo de capital y los ingresos - tiene un valor máximo en un determinado nivel de flexibilidad. El objetivo del problema es obtener el diseño con el máximo beneficio. En otras palabras, el problema es el diseño con un nivel óptimo de flexibilidad.

El problema general, de diseño de configuración con un nivel óptimo de flexibilidad, puede enunciarse como sigue:

Se da una superestructura del diagrama de flujo con ecuaciones del modelo. También se da información sobre las relaciones disponibles, características y precios de las materias primas, servicios, productos y otras materias primas. Estos parámetros pueden contener incertidumbre o variaciones predefinidas que se modelan como incertidumbre determinista, es decir, que se describe en rangos o conjuntos discretos con probabilidades de ocurrencia. El problema es entonces diseñar una configuración (es decir, determinar los tamaños de equipos) con un nivel de flexibilidad con el fin de maximizar el valor esperado de la ganancia que se deriva de los ingresos y costos de capital anualizados.

El proceso no necesita funcionar en todos los valores de las entradas con incertidumbre; en cambio puede estar inactivo en algunos escenarios, si la economía no se ve

favorecida o si no se cumplen requerimientos del mismo. La figura 4, resume el planteamiento del problema.



**Figura 4.** Diseño de la configuración con un nivel óptimo de flexibilidad

Particularmente para el problema de la configuración de la biorefinería diseñada con un nivel óptimo de flexibilidad, la información dada es:

- Disponibilidad de biomasa (alimentación), características y precios con incertidumbre.
- Demanda de biocombustible (y otros productos), especificaciones y precios con incertidumbre.
- Utilidad y otras materias primas (ej. hidrógeno, ácido, enzimas, etc.) disponibilidad y precios con incertidumbre.
- Parámetros de eficiencia técnica con incertidumbre (rendimiento, conversión, ecuaciones de diseño)

La ecuación de ganancia se formula de la siguiente forma:

$$[\text{Ganancia}] = [\text{venta del producto}] - [\text{costo que operación}] - [\text{costo del capital anual}]$$

La venta del producto es el ingreso anual por la venta de productos, que son una función de los precios del producto y de las producciones.

El costo de operación incluye costos anuales de almacenamiento, químicos, utilidades y mano de obra. Este segundo término es una función de sus precios y relaciones de producción. Los costos anuales son importantes para la depreciación de la inversión y dependen de los tamaños del equipamiento.

### 3. CONCLUSIONES

1. En la biorefinería se involucran varios procesos con incertidumbre para obtener diversos productos que deben considerarse y que determinan las oportunidades de integración de procesos que pueden identificarse en cualquier caso de estudio.
2. En la interacción de procesos bajo el esquema de una biorefinería se pueden identificar niveles de incertidumbre en aspectos tales como: biomasa como materia prima, las tecnologías de conversión y los productos finales que pueden generarse.
3. En las materias primas y productos con potencialidades en un esquema de biorefinería están presentes incertidumbres externas tales como disponibilidad, demanda y precios en el mercado, las que determinan su impacto en la biorefinería



4. En los precios de productos pueden identificarse límites mínimos y máximos de precios que significan en un intervalo para este parámetro que deben considerarse para la evaluación económica del proyecto y obtener resultados que permitan hacer un análisis de sensibilidad ante condiciones variadas.

## **REFERENCIAS**

- Cardona, C.A. and Sánchez, Ó.J., Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities., *Bioresource Technology*, Vol. 98, 2007, pp. 2415–2457.
- Ensinas, A.V., Thermal integration and thermoeconomic optimization applied to sugar and ethanol industrial process., PhD Thesis (School of Mechanical Engineering, State University of Campinas (in Portuguese)), (2008).
- Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Lozano, M.A. and Serra, L.M., Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, 2007, pp. 2978–2987.
- Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U.W. and Ramarao, B.V., A review of separation technologies in current and future biorefineries., *Separation and Purification Technology*, Vol. 62, 2008, pp. 1–21.
- Kamm, B., Kamm, M., Principles of biorefineries., *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 64, 2004, pp. 137-145.
- Pham, V. and El-Halwagi, M. Process synthesis and optimization of biorefinery configurations., *AIChE Journal*, Vol. 58, No. 4, 2011, pp. 1212-1221. [CrossRef]
- Rijkens, B.A. Hydrolyses processes for lignocellulosic material. Presentado en: CECD Workshop Cellulose Programme, Brunscheweig, 1984.
- Sanders, J., Scott, E., Weusthuis, R., Mooibroek, H., Bio-refinery as the Bio-inspired Process to Bulk Chemicals. *Macomol Biosci*, Vol. 7, 2007, pp. 105-117.