

BIORREFINERÍAS: INNOVACIÓN SOSTENIBLE DESDE LA BIOMASA

Heriberto Alcocer-García ^{a,*}, Maricruz Juárez-García ^b

^a Universidad de Guanajuato, Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, Guanajuato, Guanajuato, México. h.alcocer@ugto.mx

^b Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Química, Guanajuato, Guanajuato, México

Resumen

Actualmente existe una transición de productos de origen fósil a productos de origen renovable, esto con la intención de asegurar la sostenibilidad y tener un menor impacto ambiental. Las biorrefinerías son participantes activos en esta transición ya que toman residuos vegetales (biomasa lignocelulósica) y los transforman a bio-combustibles y/o bioproductos. En este trabajo, se realiza una descripción de la importancia de las biorrefinerías, así como a los retos a los que se enfrentan. Además, se muestran dos estudios con enfoques diferentes sobre biorrefinerías. En el primero se hace uso de la intensificación de procesos para la obtención de un bio-producto (ácido levulínico) mediante el uso de la destilación reactiva, encontrando que su producción es factible y que genera un ahorro del 24% en el consumo energético, comparada con una tecnología convencional. En el segundo, se realiza una investigación de la coordinación de mercados para biorrefinerías multiproducto para el caso específico del estado de Guanajuato, encontrando que se podría generar un mercado de 3.57 billones de dólares al año.

Palabras clave: Biorrefinerías; Destilación Reactiva; Mercado coordinado

BIOREFINERIES: SUSTAINABLE INNOVATION FROM BIOMASS

Abstract

Currently there is a transition from products of fossil origin to products of renewable origin, this with the intention of ensuring sustainability and having a lower environmental impact. Biorefineries are active participants in this transition since they take plant waste (lignocellulosic biomass) and transform them into biofuels and/or bioproducts. In this work, a description of the importance of biorefineries is made, as well as the challenges they face. In addition, two studies with different approaches on biorefineries are shown. In the first, the intensification of processes is used to obtain a bio-product (levulinic acid) using reactive distillation, finding that its production is feasible and that it generates a saving of 24% in energy consumption. compared to conventional technology. In the second, an investigation of the coordination of markets for multi-product biorefineries is carried out for the specific case of the state of Guanajuato, finding that a market of 3.57 billion dollars per year could be generated.

Keywords: Sustainability; Biorefineries; Reactive Distillation; Coordinated market

1. Introducción

La sostenibilidad desempeña un papel fundamental en la sociedad y la industria, ya que pretende satisfacer las necesidades actuales sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras. En general, la sostenibilidad aborda los efectos perjudiciales de las actividades humanas sobre el medio ambiente y busca mitigarlos a través de prácticas sostenibles. A través de este enfoque, la sostenibilidad no solo contribuye a un planeta más saludable, sino que también ofrecen ventajas a las industrias, incluida la mejora de la eficiencia, la minimización de la generación de residuos, la reducción de los costos, la mejora de la reputación y el aumento de la competitividad (El Baz et al., 2022). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) propone 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que abordan las dimensiones económica, social y ambiental para construir un futuro equitativo y sostenible. Por lo tanto, es imperativo diseñar procesos químicos sostenibles que se alineen con los ODS (Segovia-Hernández et al., 2023) mediante el uso eficiente del agua (Objetivo 6) y la energía (Objetivos 7 y 13), incorporando productos a partir de fuentes renovables como los bioproductos (Objetivos 9 y 12),

minimizando la generación de residuos (Objetivos 9 y 12) y reduciendo el impacto ambiental (Objetivo 13). Esto promueve el crecimiento económico, el bienestar social, la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales (Boodhoo y Harvey., 2013).

En la búsqueda de contribuir a la sostenibilidad de los procesos, han surgido alternativas viables para sustituir los productos de origen fósil por productos de origen biológico (Popa, 2018). Una de las alternativas sostenibles para lograr esta transición es el uso de la biomasa lignocelulósica como materia prima para compuestos en biocombustibles y/o bioproductos.

La biomasa lignocelulósica está formada esencialmente por los mismos elementos químicos (carbono, hidrógeno y oxígeno) que el petróleo crudo pero que se puede obtener a partir de residuos vegetales. Esto abre la posibilidad de obtener productos basados en biomasa lignocelulósica en un esquema de biorrefinería que puede reemplazar directamente derivados de petróleo crudo químicamente idénticos, así como derivados de petróleo crudo químicamente diferentes que tengan una funcionalidad similar (Sadhukhan, 2014). La biomasa

lignocelulósica se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es una fuente clave de azúcares fermentables como la glucosa, la hemicelulosa contiene varios tipos de azúcares como la xilosa y la lignina que proporciona estructura está formada por tres monómeros fenilpropanoides o monolignoles (Popa, 2018).

A lo largo de la historia, se han utilizado diferentes tipos de biomasa, pudiéndolas clasificar en biomasa de primera, segunda, tercera y cuarta generación. De primera generación se consideran materias que se derivan de partes alimenticias de las plantas con un alto contenido de azúcares y almidones, en este caso la tecnología que se utiliza reside en la fermentación (Cavalett y col., 2011). La segunda generación se refiere a la utilización de residuos agrícolas y forestales que están compuestos principalmente por celulosa por lo cual también reciben el nombre de materiales lignocelulósicos (Hassan y col., 2019), aquí se encuentra el rastrojo de maíz, la pata de trigo y cebada, el bagazo de caña y materiales leñosos de residuos forestales. En la tercera generación se refieren a un tipo de biomasa adaptado o modificado para mejorar los rendimientos del proceso de biorefinación y aquí se encuentran principalmente algas por

su rápida tasa de crecimiento, capacidad para la fijación de CO₂ y porque no compiten con la alimentación ni necesitan extensiones grandes de suelo para su cosecha (Chowdhury y Loganathan, 2019). La materia prima de cuarta generación se obtiene de organismos genéticamente modificados, principalmente algas, pero también se utilizan cianobacterias. Estas modificaciones permiten mejorar en la eficiencia de la fotosíntesis, aumentar la penetración de la luz y reducir la fotoinhibición de las algas (Abdullah y col., 2019).

Conociendo esta clasificación podemos destacar que la biomasa lignocelulósica, derivada de residuos agrícolas y forestales, se conecta con la economía circular al proporcionar una fuente renovable de materia prima que no compite con los alimentos. Esto promueve la reutilización y valorización de residuos, reduciendo el impacto ambiental y mejorando la sostenibilidad (Sherwood, 2020). Además, al utilizar biomasa residual, se evita el uso de tierras agrícolas para cultivos alimentarios, contribuyendo a la preservación de los ecosistemas y promoviendo un uso más sostenible y eficiente de los recursos naturales (Nanda y col., 2015).

Una biorrefinería es una red de instalaciones que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para producir biocombustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa (Moncadam y col., 2016). Una biorrefinería funciona de manera análoga a las refineras de petróleo actuales, pero en lugar de utilizar petróleo, produce múltiples combustibles y productos químicos a partir de biomasa (Cherubini, 2010; Morais y Bogel-Lukasik, 2013), como se muestra en la Figura 1.

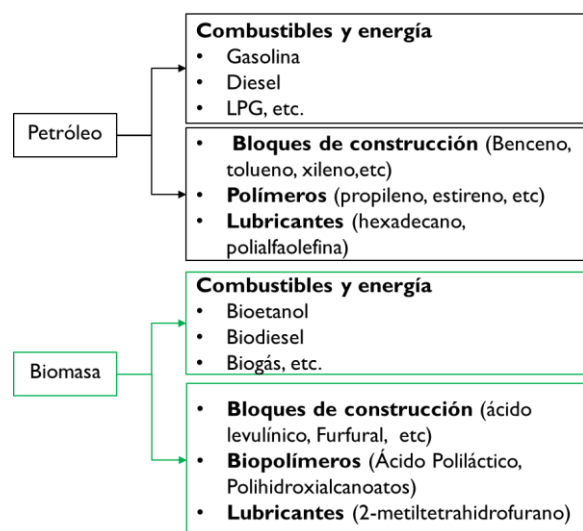


Figura 1. Similitudes entre productos de una refinería y una biorrefinería.

Cuando se comparan la biomasa y el petróleo crudo, se resaltan características como renovabilidad, almacenamiento, sustituibilidad, abundancia y carbono neutral (cero emisiones), generando diferencias

notables entre estas materias primas (Moncadam y col., 2016).

Una biorrefinería, al igual que la refinería de petróleo actual, es una instalación o una red de instalaciones que integran procesos y equipos para convertir la biomasa lignocelulósica en biocombustibles para el transporte, energía y productos químicos (Cherubini, 2010). Se prevé que las industrias de biorrefinería surjan como complejos industriales dispersos, revitalizando las zonas rurales. A diferencia de las refineras de petróleo, que suelen ser a gran escala, se espera que las biorrefinerías incluyan instalaciones de varios tamaños. Múltiples bio-industrias pueden colaborar para utilizar plenamente todos los componentes de la biomasa lignocelulósica, creando sistemas bio-industriales integrados. La disponibilidad localizada de recursos de biomasa lignocelulósica en muchos países puede contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados (Cherubini, 2010).

Aunque los biocombustibles han sido de gran interés entre estos productos, se enfrentan a considerables desafíos económicos asociados con su producción. Una estrategia prometedora para abordar estos desafíos implica la implementación de biorrefinerías

que puedan generar simultáneamente productos de valor agregado (productos químicos) y biocombustibles a partir de recursos de biomasa de manera integrada y eficiente, logrando beneficios económicos y ambientales adicionales (De Bhowmick y col., 2018).

El objetivo de este artículo es resaltar la importancia de la implementación y el estudio de las biorrefinerías para lograr un futuro sostenible. Para ello, se presenta una breve descripción histórica, seguida de dos estudios que exploran aspectos relacionados con su implementación. Finalmente, se concluye con un análisis de los desafíos y oportunidades actuales en este campo.

2. Contexto de las biorrefinerías

Probablemente el primer antecedente de un bio-producto es el etanol producido mediante la fermentación de diferentes materiales vegetales ricos en azúcares, estos primeros intentos datan de miles de años antes de Cristo en las civilizaciones antiguas como la egipcia y la china (Cartaxo Taveira y col., 2021). Pero no fue sino hasta el siglo XIX e inicios del siglo XX que se dieron los desarrollos más importantes en el contexto de las biorrefinerías. Estos grandes desarrollos

surgieron en gran medida gracias a los ingenios azucareros, las grandes demandas de azúcar en el mercado hicieron dar grandes avances en el proceso de producción de azúcar.

Un proceso importante que debe mencionarse es el proceso de sacarificación de la madera que comenzó a destacarse en las décadas entre 1900 y 1920 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1956). Mediante este proceso la madera es hidrolizada para obtener azúcares fermentables para posteriormente obtener productos como etanol, ácidos orgánicos y otros bioproductos. La síntesis de otros bioquímicos o bioproductos comenzó a proliferar de manera paralela (Gavrilescu, 2014).

Se han identificado alrededor de 300 potenciales productos que pueden obtenerse en una biorrefinería. Sin embargo, se han seleccionado algunos productos principales o “bio-bloques” que se consideran como “la base” para generar otros productos derivados. Entre estos se encuentran el etanol, furfural, hydroximetilfural, sorbitol, xilitol, ácido furandicarboxílico, glicerol, isopreno, biohidrocarburos y ácido levulínico (Schlosser y Blahusiak, 2011).

Además de la síntesis química de todos estos compuestos, se han patentado numerosos procesos para la producción de estos mediante la ruta de la biomasa, y actualmente existen procesos económicamente viables para la producción de algunos de estos. A nivel mundial se tiene numerosos casos de éxito de biorrefinerías en operación, como Bio-on en Italia, Clariant en Alemania, Green Plains y POET en USA, los ingenios Manuelita y Providencia en Colombia, mientras que, en Brasil, que es reconocido por su gran producción de etanol a partir de caña de azúcar, se encuentran empresas como Raízen y Cosan. En México se encuentra el grupo BioFields donde una de sus ramas de negocios se dedica a los bio combustibles.

Sin embargo, no todos los proyectos de biorrefinerías han logrado tener éxito. Por ejemplo, en 2015 la compañía estadounidense DuPont anunció la apertura de una planta de bioetanol celulósico en Nevada, Iowa. Con una capacidad para producir 30 millones de galones de bioetanol al año y un proceso de fermentación de \$200 millones de dólares, sería para este año la más grande del mundo. Sin embargo, durante dos años el proceso sufrió ajustes, pero no se logró la producción del biocombustible con un valor competitivo para el mercado y para finales del 2017 se

decidió abandonar el proyecto (BioEconomia.info, 2021). En 2018 la compañía alemana VERBIO adquirió el proyecto, su propósito era transformar la planta de bioetanol a una planta de producción de gas natural a partir de celulosa, la primera en Estados Unidos. Se instalaron fermentadores anaerobios con un valor de \$50 millones de dólares destinados a transformar 100,000 toneladas métricas de rastrojo de maíz en gas natural. VERBIO señaló que la antigua planta de etanol celulósico se transformaría en una planta convencional de bioetanol a partir de maíz, además los granos de destilería, un subproducto del proceso, serían usados para la producción de biogás y el humus generado se devolvería a los campos de maíz como fertilizante (McCoy, 2022). A través de este ejemplo, resulta evidente que el diseño de estos bioprocesos debe tener un enfoque más holístico y que mediante acciones como economía circular se puede llegar a diseño económicamente factibles de estas biorrefinerías.

3. Estudios relacionados con las biorrefinerías.

Como se mencionó anteriormente, una biorrefinería al igual que una refinería puede incluir más de un producto. Por tanto, dentro de una biorrefinería existen distintas plantas, cada una de ellas dedicada a la producción exclusiva de un bioproducto o biocombustible. Bajo este enfoque, los estudios relacionados con biorrefinerías pueden incluir múltiples perspectivas, algunas de ellas se mencionan a continuación:

A) Estudios enfocados en mejorar o diseñar una planta o parte de ella para la producción de solo un bioproducto (Arenas-Grimaldo y col., 2024; González-Navarrete y col., 2022; Vázquez-Castillo y col., 2019). Estos estudios buscan encontrar procesos económicos, que reduzcan el consumo de energía y minimicen el impacto ambiental, resaltando así la viabilidad del bioproducto seleccionado.

B) Estudios que contemplan la integración de más de 1 bioproducto. Si bien en una biorrefinería se pueden obtener más de 1 bioproducto, no siempre es del todo claro si es viable el poder producirlos todos simultáneamente o en qué relación deben de ser producidos, es por ello por lo que estos estudios buscan encontrar una propuesta que

garantice una viabilidad económica y ambiental (Caceres-Barrera y col., 2024).

C) Estudios que analizan la viabilidad, logística e impacto de las biorrefinerías en un lugar en específico (Alcocer-Garcia y col., 2022; Hernández-Camacho y col., 2024; Santibañez-Aguilar y col., 2014).

En cada una de las perspectivas descritas anteriormente, se colocaron algunas referencias que muestran investigaciones bajo cada enfoque. Sin embargo, actualmente las investigaciones respecto a biorrefinerías abarcan un gran número de aportaciones.

En este documento es muestran dos ejemplos simples que contemplan al enfoque A) y C), respectivamente: i) la modificación de un proceso existente para la producción de un bioproducto, y ii) la implementación de un mercado coordinado para biorrefinerías en un lugar específico.

3.1. Destilación reactiva para la producción de ácido levulínico.

En este caso de estudio no se contempla el análisis de una biorrefinería completa. Sino se centra en una pequeña parte que pudiera ser incorporada en un esquema más complejo. Es importante visualizar que al igual que una

refinería de petróleo, las biorrefinerías pueden incorporar numerosos procesos. En este contexto, la producción de ácido levulínico (AL) podría ser incorporada en una biorrefinería.

El AL es un bioproducto que se destaca como uno de los principales doce bio-bloques principales derivados de la biomasa lignocelulósica (Werpy y col., 2004).

Para obtener el AL, la biomasa lignocelulósica debe someterse a un pretratamiento térmico y enzimático. En este proceso, los componentes estructurales de la biomasa lignocelulósica, que son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, son separados (Alcocer-García y col., 2019).

Además, la hidrólisis ayuda a dividir la celulosa en monómeros de glucosa. A partir de la glucosa, se realiza una hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico diluido como catalizador y se obtiene el ácido levulínico como producto principal y ácido fórmico como subproducto (Girisuta y col., 2006).

Después de la hidrólisis ácida se genera una corriente con un exceso de agua, lo que aumenta el consumo energético durante la etapa de purificación del ácido levulínico. Por lo que, es crucial explorar alternativas más sostenibles para mejorar la eficiencia del

proceso. La intensificación de procesos puede ser una solución efectiva para este problema.

Existen diferentes maneras de llevar a cabo la intensificación a procesos de separación, incluyendo columnas de destilación térmicamente acopladas (Alcocer-García y col., 2024; Santaella y col., 2017), columnas de pared divisoria (Quiroz-Ramírez y col., 2018; Triantafyllou y Smith, 1993) y columnas Petlyuk (Hernández y col., 2006), que han demostrado ahorros hasta del 30 % en el consumo energético. Sin embargo, estas estrategias solo abordan la integración másica y energética en la zona de separación, dejando de lado la zona reactiva. Por otro lado, existe otra estrategia de intensificación, llamada destilación reactiva (por sus siglas en inglés RD) donde la reacción química y la destilación se realizan en un solo equipo. Esta integración reduce el coste de capital y el consumo energético en la separación, lo que también disminuye el impacto ambiental y mejora la sostenibilidad general del proceso (Pushkala y Panda, 2023).

La RD se emplea en reacciones rápidas, evitando concentraciones elevadas que podrían inducir reacciones secundarias no deseadas. Además, es útil para la separación de azeótropos, basada en las diferencias en las velocidades de reacción de sus componentes.

No obstante, la aplicación de la RD está condicionada por varias restricciones. Es esencial que exista un rango operativo común tanto para la destilación como para la reacción, lo que implica temperaturas y presiones similares. Asimismo, la secuencia de puntos de ebullición debe ser adecuada; el producto principal debe ser el componente más ligero o pesado, mientras que los subproductos deben cambiar de fase a temperaturas intermedias (Solis-Sanchez y col., 2022). Siempre y cuando se cumplan estas características, la RD puede aplicarse a cualquier proceso que requiera reacción y separación, ofreciendo una solución eficiente y versátil para diversas aplicaciones industriales.

La RD ha resultado factible para la producción de bioproductos como el ácido láctico (González-Navarrete y col., 2022), biodiésel (Kiss, 2014) y levulinato de etilo (Vázquez-Castillo y col., 2019), por mencionar algunos.

Por tanto, en este primer estudio se muestran resultados del trabajo de Solis-Sanchez y col. (2022) donde se implementó la intensificación de procesos mediante el uso de una columna de destilación reactiva al proceso de producción y purificación del ácido levulínico.

En la Figura 2, se muestran los dos esquemas estudiados:

- Esquema convencional. Este proceso consiste en un reactor donde se introducen glucosa y ácido sulfúrico diluidos, posteriormente la corriente resultante es separada en 3 columnas de destilación, Figura 2A.
- Esquema intensificado. Este proceso se introducen glucosa y ácido sulfúrico diluidos en una columna de destilación reactiva, seguida de 2 columnas de destilación donde se separan el resto de los componentes de la mezcla, Figura 2B.

La producción estimada de ácido levulínico es de 5×10^7 Kg/año, esta se fijó ya que en la literatura se estima que la producción a esta escala se ve favorecida por la economía de escala (Alcocer-García y col., 2019; Nhien y col., 2016). En una etapa preliminar se estableció la factibilidad de la implementación de la RD, donde los resultados indican que la conversión de glucosa a ácido levulínico es comparable utilizando RD y un reactor convencional.

Posteriormente, se realizó una optimización, utilizando el método de evolución diferencial con lista tabú, tomando como función objetivo

la minimización de la carga térmica (Solis-Sanchez y col., 2022).

Los resultados mostraron que mediante la implementación de la RD se observan reducciones del 23% en los costos de equipos y del 24% en el consumo energético con la destilación reactiva. La reducción en costo se debe a la eliminación de un equipo, en este caso al llevarse a cabo la reacción en la primera columna de destilación el reactor es eliminado, como se muestra en la Figura 2.

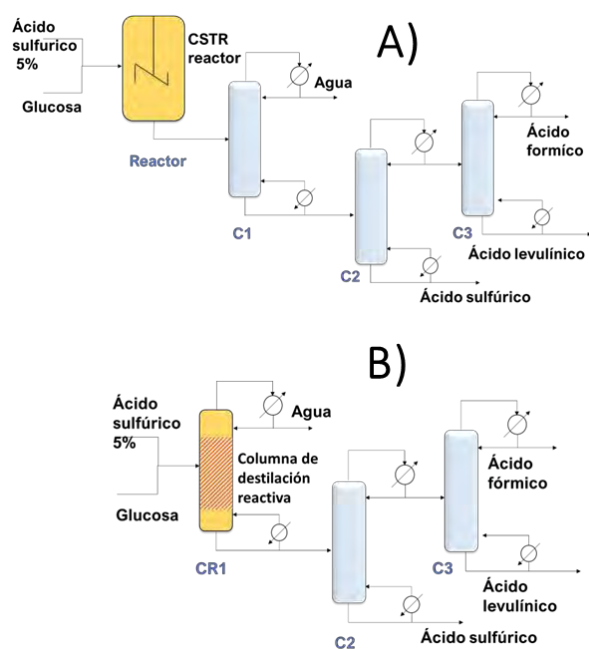


Figura 2. A) Esquema convencional: reactor y columnas de destilación, B) Esquema intensificado: Columna de destilación reactiva y columnas de destilación (Solis-Sanchez y col., 2022).

Por otra parte, la energía necesaria para realizar la reacción en reactor del sistema convencional es mayor que la requerida en la columna de destilación reactiva (CR1), como se muestra en la Figura 3. La ventaja de la utilización de la columna de destilación reactiva es que la energía requerida para la reacción también es utilizada para la eliminación del agua.

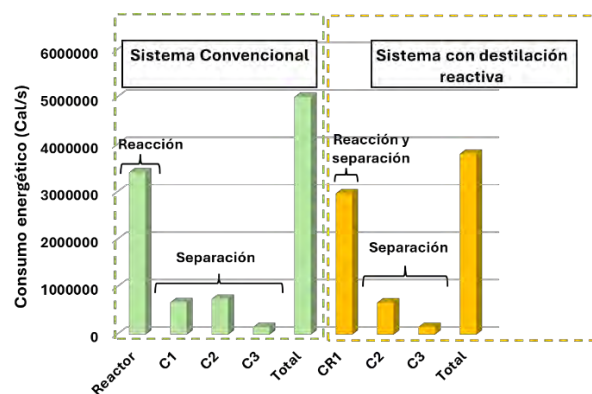


Figura 3. Comparación energética entre el esquema convencional y el que utiliza destilación reactiva (Solis-Sanchez y col., 2022).

Los esquemas a detalle se muestran en las Figuras A1 y A2 en Información Adicional. Al igual que un análisis más detallado puede ser encontrado en el trabajo publicado de Solis-Sanchez y col. (2022).

3.2. Coordinación de mercados para el ácido levulínico y Furfural

En la implementación de una biorrefinería, existen varias partes involucradas: producción (tecnologías), recolección, transporte, procesamiento y disposición final. Sin embargo, actualmente no existen mercados coordinados que conecten todas las partes involucradas en la cadena de suministro de biomasa. Para abordar esta brecha, Alcocer-Garcia y col. (2022) propusieron un marco de coordinación de mercado para la producción de ácido levulínico y furfural a partir de biomasa lignocelulósica, con el objetivo de utilizarlos como materia prima para producir el 2-metiltetrahidrofurano un valioso aditivo de gasolina. Este sistema coordina el suministro (biomasa), intercambio, transporte y transformación de productos, permitiendo que las partes interesadas obtengan el mayor beneficio. Considerando un sistema que comprende un conjunto de ubicaciones geográficas (nodos) N , productos P , proveedores S , consumidores D , proveedores de transporte L y proveedores de transformación (tecnología) T . Los productos comprenden los diferentes tipos de flujos de desechos y productos derivados. Los proveedores de transporte ofrecen

alternativas para mover los productos entre las ubicaciones, y los proveedores de tecnología ofrecen las alternativas de procesamiento para generar nuevos productos de mayor valor agregado.

La coordinación del mercado se lleva a cabo a través de un operador de sistema independiente (por sus siglas en inglés ISO), quien recopila información de ofertas (incluyendo las ofertas y los parámetros de capacidad) y resuelve un problema de liquidación del mercado, determinando las asignaciones óptimas y los precios del mercado. La solución del ISO encuentra el suministro óptimo, la demanda, las rutas de transporte y las transformaciones de productos que maximizan el bienestar social en toda la red del mercado. En este contexto, el bienestar social es equivalente al beneficio total colectivo asignado a las partes interesadas.

La Figura 4, muestra la coordinación entre los involucrados en la cadena de suministro y como el sistema ISO, obtiene una solución que maximiza los beneficios de todas las partes involucradas.

La información completa sobre la programación matemática, costos de biomasa, costos de transporte, costos de

tecnologías y resultados completos se encuentra disponibles en Alcocer-Garcia y col. (2022).

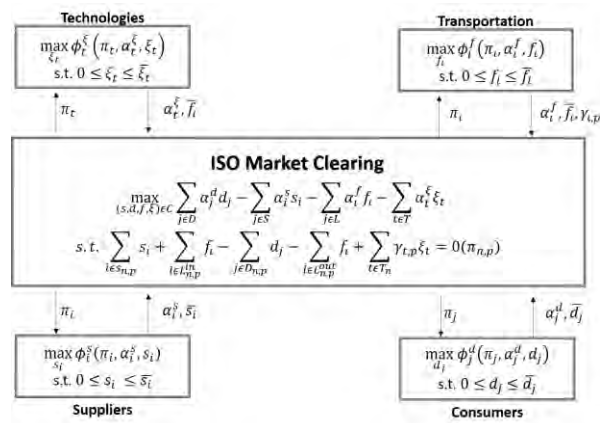


Figura 4. Ilustración de la coordinación del mercado Alcocer-Garcia y col. (2022).

El estudio toma como región de análisis es el estado de Guanajuato, México. Involucra 4 posibles ubicaciones para biorrefinerías (puntos verdes en Figura 5), 1277 proveedores de biomasa ubicados en los 46 municipios del estado de Guanajuato (puntos negros en Figura 5), el punto final de disposición de los bioproductos es la refinería Ing. Antonio M. Amor (punto rojo en Figura 5). Las biomásas utilizadas fueron rastrojo de maíz, paja de sorgo y paja de trigo, estas fueron seleccionadas al ser las más abundantes de esta región de análisis.

Los resultados muestran, que este marco podría producir 330 kilotoneladas de ácido levulínico y 394 kilotoneladas de furfural

anualmente a partir de residuos agrícolas. La biorrefinería propuesta generaría un valor total de 3.57 billones de dólares al año, utilizando el 64.65% del suministro disponible de biomasa. Además, este mercado podría evitar la emisión de 850 kilotoneladas de CO₂ al año. En la Figura 5, se muestra el mejor de los resultados de la coordinación de materias primas, resaltando que toda la biomasa utilizada debe de dirigirse a una única biorrefinería y esta debe de operar a su máxima capacidad.

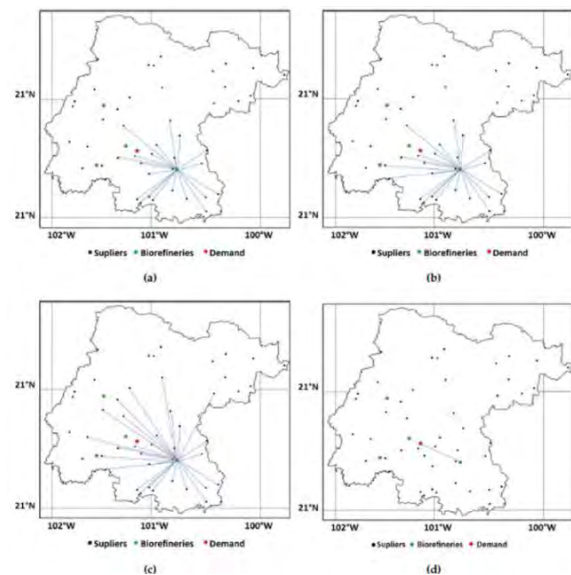


Figura 5. Flujos de transporte despejados para diferentes biomásas y productos derivados: A) Rastrojo de maíz de maíz, B) Paja de sorgo, C) Paja de trigo y D) Productos derivados Alcocer-Garcia y col. (2022).

4. Retos y oportunidades

Probablemente el reto más importante para las biorrefinerías es lograr competitividad y factibilidad económica, esto tiene que ver en gran medida de la eficiencia de los procesos, ya que estos están en desarrollo o en fase de comercialización implica menor eficiencia que los procesos convencionales basados en gas y petróleo. En el caso de los biocombustibles los procesos productivos han sido objeto de numerosas investigaciones para poder alcanzar procesos térmicamente eficientes sobre todo en las unidades de separación.

Otro reto es lograr que las biorrefinerías operen bajo modelos de economía circular y que abonen a las metas y objetivos contra el cambio climático, y aunque las biorrefinerías buscan ser más sostenibles, el uso intensivo de recursos y energía puede tener impactos ambientales si no se gestionan adecuadamente.

Además de todo, la operación en gran escala de las biorrefinerías no debe comprometer la seguridad alimentaria, por lo cual se debe encontrar fuentes de biomasa alternas que permita la producción en gran escala de bioproductos que satisfagan las demandas del

mercado pero que no comprometan directamente el suministro de alimentos.

Entre las oportunidades se encuentra que diversificando el portafolio de productos de una biorrefinería se puede lograr mejores márgenes de ganancia y nuevas oportunidades de mercado. También la instalación de biorrefinerías puede fortalecer las comunidades donde se instalen generando así desarrollo social y económico mediante la generación de empleos y fomentando la inversión en infraestructura. Cabe mencionar también que mediante las biorrefinerías se puede ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, promoviendo así la seguridad energética a nivel local y nacional.

Por tanto, la necesidad del diseño económicamente factible de las biorrefinerías es imperativo para la aceptación e implementación amplia de los bioprocesos en el escenario industrial. Sin embargo, el desarrollo y diseño sostenible de la cadena de suministro para las biorrefinerías puede ser la clave del éxito de estas.

En general la cadena de valor se puede dividir en tres etapas: materia prima (producción y transporte), transformación o producción, y distribución y mercado. Pero la planeación

estratégica de la cadena de valor se debe plantear desde el primer eslabón como se muestra en la Figura 6, donde actúan agricultores y productores de biomasa, pasando por centros de recolección, centros de procesamiento o biorrefinerías, la distribución y mercado al consumidor final. También se deben considerar aspectos como transporte entre cada eslabón, la selección adecuada de las tecnologías de procesamiento, la distribución de los productos de valor generados hacia los mercados, así como la geolocalización y dimensionamiento de todos los procesos involucrados.

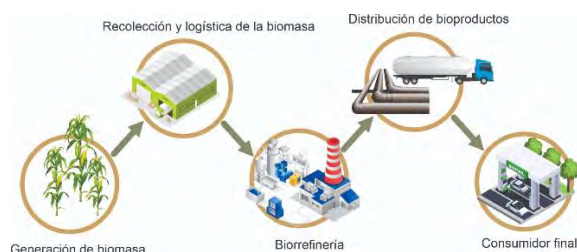


Figura 6. Eslabones de la cadena de suministro de las biorrefinerías.

En México, por ejemplo, un país agricultor y con grandes recursos forestales donde varios sectores económicos dependen de estas actividades, el introducir un nuevo uso para estos recursos se debe planear para que resulte en un esquema equilibrado entre todas las actividades que se benefician de esta materia prima.

En México, gracias a los múltiples climas y suelos se producen gran variedad de cultivos. Algunos son destinados para la alimentación humana como los cereales y otros al forraje como la alfalfa y la avena. De estos cultivos se obtienen residuos o esquilmos, siendo los principales el maíz, sorgo, trigo y cebada (Gonzalez, 2008). Del 100 por ciento de estos residuos el maíz aporta el 68%, el sorgo el 19%, el trigo 11%, la cebada el 2% (Bravo y col., 2016). Solo para estos desechos existe ya una cadena que integra eslabones de producción, comercialización, distribución y consumo, cuyo fin es principalmente alimento para ganado. Además, existe la opción de valorizar desechos agrícolas como los desechos de aguacate, caña de azúcar y cítricos. También desechos forestales y municipales pueden iniciar la cadena. Incluso la producción de biomasa destinada puede ser una opción factible mientras no compita con la alimentación de la población. Ya sea que estas materias primas estén dentro de una cadena productiva existente o no, se debe ser cuidadoso en la planeación para que se incorporen en una nueva cadena productiva, en este caso de la biorefinación, utilizando no solo objetivos económicos, sino también ambientales y sociales, sin dejar provistas a actividades como la ganadera y la alimentación humana, además siempre

buscando el mayor beneficio para el productor.

Los centros de recolección de biomasa son un eslabón clave para la cadena, estos deben ser estratégicamente localizados en el mapa para conectar la producción de biomasa con las biorrefinerías. El modo de trabajo de estos centros se debe enfocar en el respaldo al productor por lo que sería interesante que los mismos productores se organizaran para llevar a cabo esta tarea. Así también aspectos importantes por considerar para este eslabón es la intermitencia de la producción de biomasa, como se sabe los ciclos agrícolas son anuales o semestrales, y no se tiene una recolección constante de residuos durante todo el año.

El siguiente eslabón es la biorrefinería como tal, con todos sus aspectos técnicos y de operación como ya se han discutido. Lo importante a destacar aquí es la operación de estas y que tiene que estar acoplada a la producción de biomasa. Es decir que debe ajustarse a la disponibilidad de biomasa por parte de los centros de recolección. Y aquí se pueden proponer distintos esquemas de trabajo como operación discontinua o flexibilidad en el diseño que permita procesar distintas biomasa para una operación continua durante el año. Misma tarea que

involucra a los centros de recolección que deberán diversificar los residuos que puedan recolectar y almacenar.

Una vez obtenidos los productos de valor, estos se deben canalizar al mercado y al consumidor final. Por lo cual se debe tener en cuenta las demandas de estos productos para hacer el diseño de la cadena. Entonces se debe lograr un dimensionamiento de la cadena que logre un equilibrio entre la demanda de los productos obtenidos en la biorrefinería como la disponibilidad de la biomasa, pero buscando la factibilidad económica y ambiental.

5. Conclusiones

Las biorrefinerías emergen como una solución integral y sostenible para la producción de energía y materiales, respondiendo a la urgente necesidad de procesos alineados con los ODS y de independencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, estas se enfrentan a desafíos que limitan su implementación. Es por ello, son fundamentales las investigaciones que reduzcan esta brecha. En este trabajo se muestran dos casos de estudios con enfoques distintos sobre biorrefinerías.

En el primer caso de estudio, se demuestra la importancia de la intensificación de procesos. Específicamente, mediante el uso de la destilación reactiva para la producción del ácido levulínico, demostrando que es una tecnología viable y permite un ahorro energético del 24% en comparación con tecnologías convencionales.

Por otra parte, la implementación eficiente de la cadena de suministro involucrada en una biorrefinería es fundamental para la viabilidad económica de la misma y asegurar el mayor impacto en todas las partes involucradas. En el segundo caso de estudio se implementó la coordinación de mercados para biorrefinerías multiproducto en el estado de Guanajuato, encontrando que podría generarse un mercado de 3.57 billones de dólares al año. Además, este mercado podría evitar la quema de residuos agrícolas y evitar la emisión de 850 kilotoneladas de CO₂ al año.

Por consiguiente, las biorrefinerías poseen un enorme potencial para revolucionar la producción sostenible de energía y materiales. No obstante, es imperativo que se enfrenten adecuadamente los desafíos tecnológicos, económicos y regulatorios para maximizar sus beneficios. La intensificación de procesos y la coordinación de mercados

emergen como enfoques prometedores, que no solo pueden ser implementados exitosamente en diversas aplicaciones industriales, sino que también ofrecen soluciones eficientes y versátiles para un futuro más sostenible.

Además, de demostrar su eficiencia energética o su viabilidad económica, es necesario crear un marco regulatorio favorable y políticas de apoyo para garantizar el éxito de las biorrefinerías. La creación de incentivos y la eliminación de barreras regulatorias pueden facilitar la adopción de estas tecnologías y fomentar la inversión en el sector.

Referencias

- Abdullah, B., Syed Muhammad, S. A. F., Shokravi, Z., Ismail, S., Kassim, K. A., Mahmood, A. N., y Aziz, M. M. A. (2019). Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 37–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.018>
- Alcocer-García, H., Segovia-Hernández, J. G., Prado-Rubio, O. A., Sánchez-Ramírez, E., y Quiroz-Ramírez, J. J. (2019). Multi-

objective optimization of intensified processes for the purification of levulinic acid involving economic and environmental objectives. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 136, 123–137.

Alcocer-García, H., Segovia-Hernández, J. G., Sánchez-Ramírez, E., Caceres-Barrera, C. R., y Hernández, S. (2024). Sequential Synthesis Methodology in the Design and Optimization of Sustainable Distillation Sequences for Levulinic Acid Purification. *BioEnergy Research*, 17, 1724-1738. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10765-0>

Alcocer-Garcia, H., Segovia-Hernandez, J. G., Sanchez-Ramirez, E., Tominac, P., y Zavala, V. M. (2022). Coordinated markets for furfural and levulinic acid from residual biomass: A case study in Guanajuato, Mexico. *Computers & Chemical Engineering*, 156, 107568. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107568>

Arenas-Grimaldo, C., Avendaño-Guerrero, J. G., Molina-Guerrero, C. E., y Segovia-Hernández, J. G. (2024). Design and control of a distillation sequence for the purification of bioethanol obtained from sotol bagasse (*Dasylirium* sp.). *Chemical Engineering*

Research and Design, 203, 11–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.12.039>

Boodhoo, K., y Harvey, A. (2013). Process Intensification for Green Chemistry: Engineering Solutions for Sustainable Chemical Processing. In *Process Intensification for Green Chemistry: Engineering Solutions for Sustainable Chemical Processing*. <https://doi.org/10.1002/9781118498521>

Bravo, M. B., Muro, L. R., García, J. A. E., y Izquierdo, A. V. (2016). Estructura y funcionamiento de la cadena productiva de esquilmos agrícolas como forraje en la región de El Bajío, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 20(39), 451–464.

Caceres-Barrera, C. R., Sánchez-Ramírez, E., Juárez-García, M., Alcocer-García, H., y Segovia-Hernández, J. G. (2024). Optimization of Separation Processes in Multiproduct Biorefinery Design to Produce Furan-Based Compounds and Their Derivatives Using Performance Indicators. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(48), 20950-20962. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c02646>

Cartaxo Taveira, I., Nogueira, K., Oliveira, D., y Silva, R. (2021). Fermentation:

Humanity's Oldest Biotechnological Tool. *Frontiers for Young Minds*, 9, 568656. <https://doi.org/10.3389/frym.2021.568656>

Cavalett, O., Junqueira, T., Dias, M., Jesus, C., Mantelatto, P., Cunha, M., Franco, H., Cardoso, T., Filho, R., Rossell, C., y Bonomi, A. (2011). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 399-410. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>

Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>

Chowdhury, H., y Loganathan, B. (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 20, 39–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogs.2019.09.003>

De Bhowmick, G., Sarmah, A. K., y Sen, R. (2018). Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. *Bioresource Technology*, 247, 1144–1154.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.163>

El Baz, J., Tiwari, S., Akenroye, T., Cherrafi, A., y Derrouiche, R. (2022). A framework of sustainability drivers and externalities for Industry 4.0 technologies using the Best-Worst Method. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130909. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130909>

Girisuta, B., Janssen, L. P. B. M., y Heeres, H. J. (2006). A kinetic study on the decomposition of 5-hydroxymethylfurfural into levulinic acid. *Green Chemistry*, 8(8), 701-709.

Gonzalez, S. (2008). *Aprovechamiento de esquilmos y subproductos en la alimentación del ganado*. SAGARPA. Dirección General de Apoyo Para El Desarrollo Rural. México. <https://www.gob.mx/agricultura>

González-Navarrete, C., Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2022). Innovative Reactive Distillation Process for the Sustainable Purification of Lactic Acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(1), 621–637. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04050>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1956). *La sacarificación de la madera*. Unasylva, 10. <https://www.fao.org/4/x5378s/x5378s03.htm1>

Hassan, S. S., Williams, G. A., y Jaiswal, A. K. (2019). Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 590–599. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.041>

Hernández, S., Segovia-Hernández, J. G., y Rico-Ramírez, V. (2006). Thermodynamically equivalent distillation schemes to the Petlyuk column for ternary mixtures. *Energy*, 31(12), 2176–2183.

Hernández-Camacho, N. V., Gómez-Castro, F. I., Ponce-Ortega, J. M., y Martín, M. (2024). Production of methanol from renewable sources in Mexico: Supply chain optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 188, 108780. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108780>

Kiss, A. A. (2014). *Process intensification technologies for biodiesel production:*

reactive separation processes. Springer Science & Business Media.

Moncadam, J., Aristizábal-Marulanda, V., y Cardona, C. A. (2016). Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>

Morais, A. R. C., y Bogel-Lukasik, R. (2013). Green chemistry and the biorefinery concept. *Sustainable Chemical Processes*, 1, 1–3.

Nanda, S., Azargohar, R., Dalai, A. K., y Kozinski, J. A. (2015). An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 925–941. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.058>

Nhien, L. C., Long, N. V. D., y Lee, M. (2016). Design and optimization of the levulinic acid recovery process from lignocellulosic biomass. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 126–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.09.013>

Popa, V. (2018). *Biomass as Renewable Raw Material to Obtain Bioproducts of High-Tech Value*. In *Biomass as Renewable Raw*

Material to Obtain Bioproducts of High-Tech Value.

Pushkala, S. P., y Panda, R. C. (2023). Design and analysis of reactive distillation for the production of isopropyl myristate. *Cleaner Chemical Engineering*, 5, 100090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100090>

Quiroz-Ramírez, J. J., Sánchez-Ramírez, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2018). Energy, exergy and techno-economic analysis for biobutanol production: a multi-objective optimization approach based on economic and environmental criteria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1663-1684. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1486-6>

Sadhukhan, J. (2014). Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches. *Applied Energy*, 122, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.051>

Santaella, M. A., Jiménez, L. E., Orjuela, A., y Segovia-Hernández, J. G. (2017). Design of thermally coupled reactive distillation schemes for triethyl citrate production using

economic and controllability criteria. *Chemical Engineering Journal*, 328, 368–381.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.015>

Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., y El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270–294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>

Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., y Sánchez-Ramírez, E. (2023). Challenges and opportunities in process intensification to achieve the UN's 2030 agenda: Goals 6, 7, 9, 12 and 13. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 192, 109507. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109507>

Sherwood, J. (2020). The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, 300, 122755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122755>

Solis-Sanchez, J. L., Alcocer-Garcia, H., Sanchez-Ramirez, E., y Segovia-Hernandez, J. G. (2022). Innovative reactive distillation process for levulinic acid production and purification. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 28–40.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.04.041>

Triantafyllou, C., y Smith, R. (1993). The Design and Optimization of Dividing Wall Distillation Columns. *Energy Efficiency in Process Technology*, 351–360.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-1454-7_32

Vázquez-Castillo, J. A., Contreras-Zarazúa, G., Segovia-Hernández, J. G., y Kiss, A. A. (2019). Optimally designed reactive distillation processes for eco-efficient production of ethyl levulinate. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(7), 2131–2140.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6033>

Vázquez-Castillo, J. A., Contreras-Zarazúa, G., Segovia-Hernández, J. G., y Kiss, A. A. (2019). Optimally designed reactive distillation processes for eco-efficient production of ethyl levulinate. *Journal of*

Chemical Technology & Biotechnology, 94(7), 2131–2140.

Werpy, T., Holladay, J., y White, J. (2004). Top Value Added Chemicals From Biomass: I. Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas.
<https://doi.org/10.2172/926125>

Información Adicional

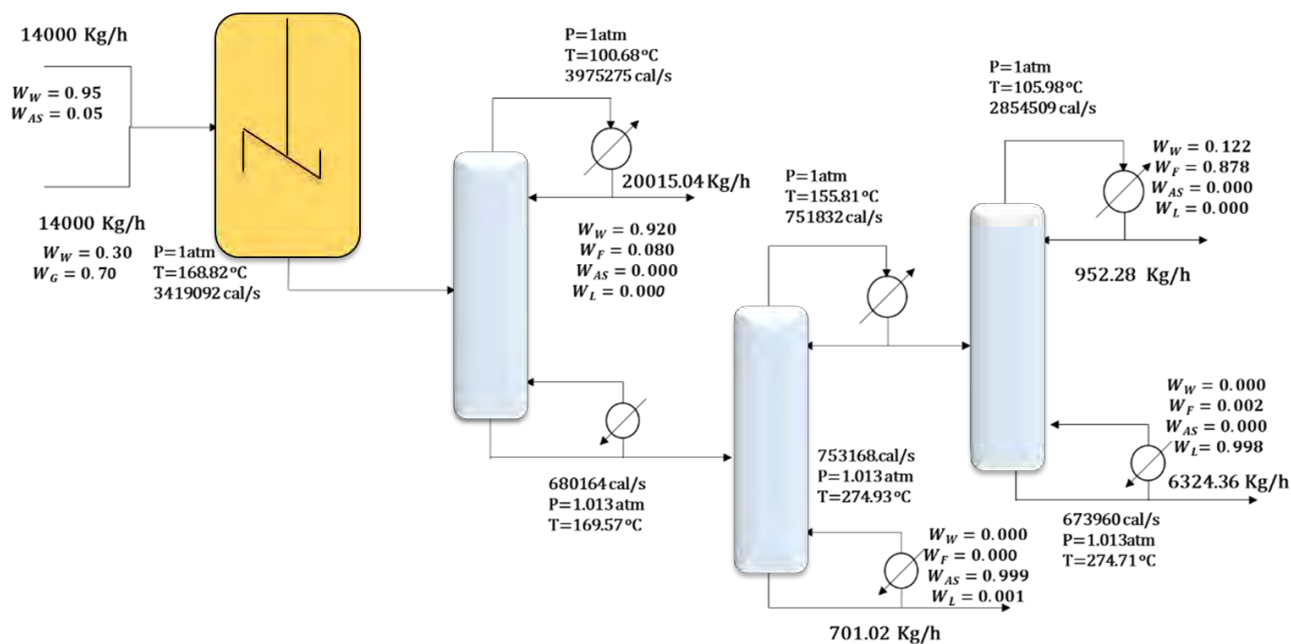


Figura A1. Configuración convencional óptima.

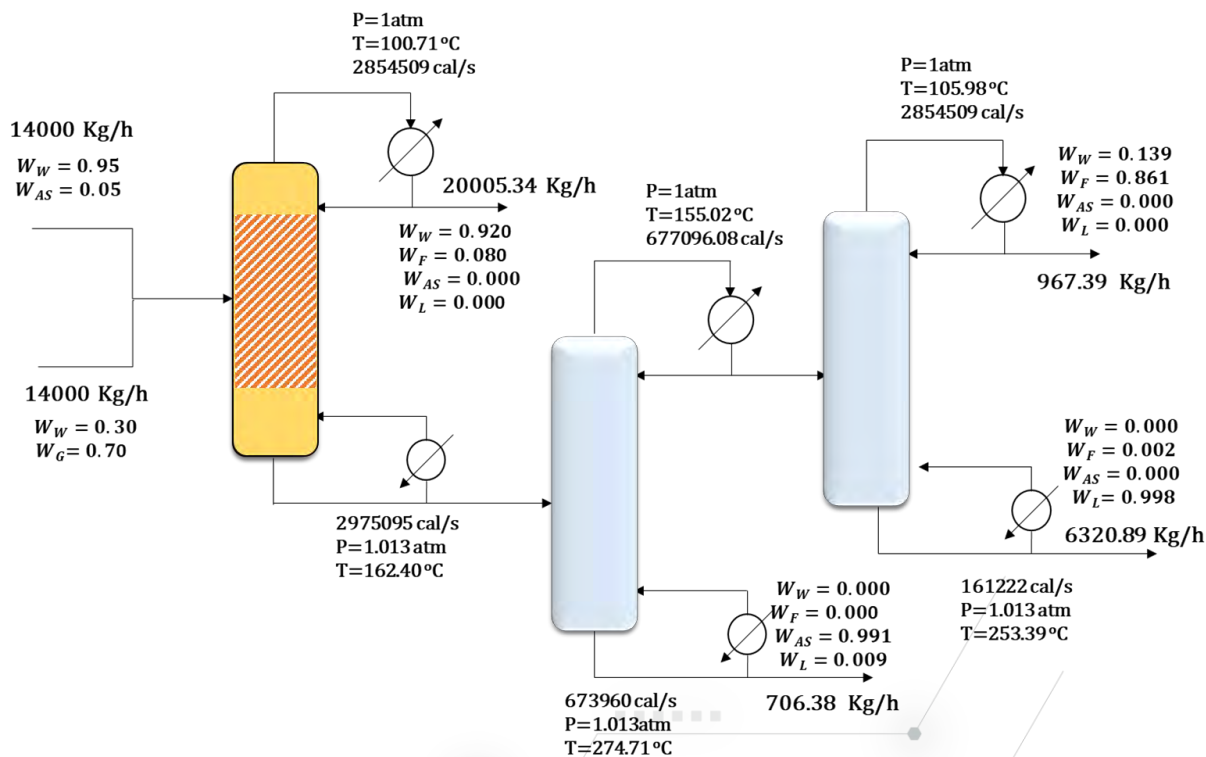


Figura A2. Configuración con destilación reactiva óptima.