



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD
TECNO-ECONÓMICA DE UNA BIORREFINERÍA A
PARTIR DE MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR**

TESIS presentada por:

MCIQ. Tania Méndez Romero

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Química como requisito para obtener el grado de:**

DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

**Asesor: DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
AGUSTÍN JAIME CASTRO MONTOYA
Coasesor: DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES NOÉ AGUILAR
RIVERA**

Morelia, Michoacán Febrero del 2020

Índice

Índice de figuras.....	i
Índice de tablas.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Justificación de la investigación.....	4
4. Hipótesis.....	5
5. Objetivos.....	6
5.1. Objetivo general.....	6
5.2. Objetivos particulares.....	6
6. Antecedentes y marco teórico.....	7
6.1. Concepto de biorrefinería.....	8
6.2. Agroindustrias: Generación de biomasa.....	8
6.3. Producción de biocombustibles y productos químicos a partir de la biomasa.....	10
6.4. Bioproductos químicos.....	11
6.5. Producción de ácidos orgánicos a partir de fuentes de carbono renovables.....	13
6.5.1. Ácido láctico.....	13
6.5.2. Fermentación bacteriana.....	14
6.5.3. Recuperación del producto.....	14
6.5.4. Ácido Succínico.....	14
6.5.5. Fermentación para producir ácido succínico.....	15
6.5.6. Etanol como biocombustible.....	16
6.6. Producción de caña de azúcar en el mundo.....	16
6.7. La caña de azúcar en México.....	17
6.8. Proceso de producción de azúcar a partir de la caña.....	18
6.9. Propiedades químicas de la sacarosa.....	20
6.10. Producción de azúcar en México.....	21
6.11. Melaza de caña de azúcar.....	23
6.12. Clasificación de las melazas.....	25
6.13. Producción de melaza en México.....	25
6.14. Precio de la melaza en México.....	26

6.15.	Datos generales de la producción mundial de melaza.....	27
7.	Metodología	28
8.	Resultados	30
8.1.	Análisis tecno-económico de multi-escenarios de biorrefinerías	30
8.1.1.	Pretratamiento	31
8.1.2.	Dilución de las melazas.....	32
8.1.3.	Fermentación de las melazas	33
8.1.4.	Fermentación alcohólica	33
8.1.5.	Fermentación láctica	34
8.1.6.	Fermentación para producir ácido succínico.....	35
8.2.	Purificación de los productos de la biorrefinería.....	36
8.2.1.	Etanol	36
8.2.2.	Ácido Láctico.....	37
8.2.3.	Ácido Succínico	39
8.3.	Caso base de producción: Melazas producidas en el estado de Michoacán.....	40
8.3.1.	Balance de materiales para los escenarios propuestos	41
8.3.2.	Balance energético para los escenarios propuestos	41
8.4.	Análisis económico en Aspen Process Economic Analyzer (APEA)	43
8.4.1.	Escenario 1	43
8.4.2.	Escenario 2	44
8.4.3.	Escenario 3	45
8.4.4.	Escenario 4.....	46
8.4.5.	Escenario 5	46
8.4.6.	Escenario 6.....	47
8.4.7.	Escenario 7.....	48
8.4.8.	Escenario 8.....	49
8.5.	Inversión total y utilidad neta de las configuraciones de la biorrefinería.....	50
8.6.	Análisis ambiental mediante el software WAR de los escenarios propuestos de una biorrefinería basada en melazas de caña de azúcar	52
8.6.1.	Análisis impacto ambiental producción de etanol a partir de melazas.....	54
8.6.2.	Análisis impacto ambiental producción de ácido láctico a partir de melazas ..	57
8.6.3.	Análisis impacto ambiental producción de ácido succínico a partir de melazas...	59
8.6.4.	Comparativo del PEI entre procesos individuales ajustados a la escala final de la biorrefinería.....	61
8.7.	Análisis integral de las biorrefinerías de etanol, ácido láctico y ácido succínico.....	62

9.	Conclusiones generales	66
10.	Referencias	68

Índice de figuras

No.	Título	Página
Figura 1	Esquema general de una biorrefinería	1
Figura 2	Diagrama de rutas del ácido succínico hacia productos químicos de interés.	15
Figura 3	Regiones del cultivo de la caña en México.	18
Figura 4	Diagrama de bloques del proceso de obtención de azúcar a partir de la caña	19
Figura 5	Molécula de sacarosa	20
Figura 6	Estados con mayor producción de azúcar en México	22
Figura 7	Gráfico de la producción en toneladas de melaza en México	25
Figura 8	Producción de alcohol a partir de la melaza obtenida en los ingenios azucareros del país	26
Figura 9	Diagrama de la metodología propuesta para el diseño de la biorefinería a partir de melaza	28
Figura 10	Diagrama del proceso de transformación de melazas en productos de interés	30
Figura 11	Reacción de hidrólisis de la sacarosa presente en las melazas	32
Figura 12	Pretratamiento y acondicionamiento de las melazas	32
Figura 13	Dilución de las melazas	32
Figura 14	Reacción principal en el fermentador	34
Figura 15	Diagrama del proceso de fermentación alcohólica	34
Figura 16	Diagrama del proceso de la fermentación láctica	35
Figura 17	Reacción principal del proceso de fermentación láctica	35
Figura 18	Diagrama del proceso de fermentación para producir ácido succínico	36
Figura 19	Reacción principal de la producción de ácido succínico	36
Figura 20	Diagrama de la deshidratación del etanol por destilación extractiva con etilenglicol	37
Figura 21	Diagrama de la etapa 1 del proceso de purificación de ácido láctico	38
Figura 22	Reacción de esterificación	38
Figura 23	Reacción de hidrólisis	38
Figura 24	Diagrama de la etapa 2 del proceso de purificación del ácido láctico	39
Figura 25	Diagrama del proceso de purificación del ácido succínico	40
Figura 26	Balance de energía para los escenarios propuestos	42
Figura 27	Análisis económico correspondiente al escenario 1	44
Figura 28	Análisis económico correspondiente al escenario 2	45
Figura 29	Análisis económico correspondiente al escenario 3	45
Figura 30	Análisis económico correspondiente al escenario 4	46
Figura 31	Análisis económico correspondiente al escenario 5	47
Figura 32	Análisis correspondiente al escenario 6	48
Figura 33	Análisis económico correspondiente al escenario 7	49
Figura 34	Análisis económico correspondiente al escenario 8	49
Figura 35	Inversión total requerida para cada escenario de producción	50
Figura 36	Utilidad neta obtenida por cada uno de los escenarios de la biorrefinería	51
Figura 37	Biorrefinería general basada en melazas de caña de azúcar	52
Figura 38	Configuraciones propuestas de las biorrefinerías con base en la producción de melazas del estado de Michoacán	53
Figura 39	Impactos ambientales totales en la producción de etanol a diferentes escalas	55
Figura 40	Impactos ambientales individuales de la producción de etanol	56
Figura 41	Comparativa de los impactos asociados por el proceso y por la energía requerida para la producción de etanol	56
Figura 42	Impactos ambientales totales en la producción de ácido láctico	57
Figura 43	Impactos ambientales individuales en la producción de ácido láctico	58
Figura 44	Comparativa de impactos ambientales por proceso contra impactos ambientales por requerimientos energéticos	58

Figura 45	Impactos ambientales totales en la producción de ácido succínico	59
Figura 46	Impactos ambientales individuales en la producción de ácido succínico	60
Figura 47	Comparación de impactos ambientales por proceso contra impactos ambientales por energía requerida	60
Figura 48	PEI de procesos individuales a la máxima escala considerada	61
Figura 49	PEI por biorrefinería propuesta	62
Figura 50	Impactos ambientales por categoría de cada biorrefinería propuesta	63
Figura 51	Comparación de impactos ambientales por proceso integrado	63
Figura 52	Factibilidad técnica y económica de las configuraciones propuestas	65

Índice de tablas

No.	Título	Página
Tabla 1	Utilización de la melaza para la obtención de diversos productos	9
Tabla 2	Tecnologías necesarias para la obtención de diversos productos en una biorefinería	12-13
Tabla 3	Datos del cultivo de caña de azúcar alrededor del mundo	16 -17
Tabla 4	Tomada y modificada de CONADESUCA	22
Tabla 5	Constituyentes principales de la melaza de caña de azúcar	24
Tabla 6	Composición de las melazas	31
Tabla 7	Parámetros cinéticos considerados para cada etapa de fermentación	33
Tabla 8	Balance de materiales de los escenarios propuestos (1 al 4)	41
Tabla 9	Balance de materiales de los escenarios propuestos (5 al 8)	41
Tabla 10	Precios considerados para insumos, materias primas y productos	43
Tabla 11	Impacto ambiental generado y utilidad neta para cada biorrefinería	64

Resumen

Las melazas de caña de azúcar son un residuo resultante del proceso de producción de azúcar. En promedio, en la última cosecha y procesamiento de caña de azúcar se produjeron más de 2 millones de toneladas de melazas, solo el 3.25 % fue aprovechado para otros fines. Debido a la composición mayoritaria de sacarosa en las melazas, este residuo tiene gran potencial para convertirse en materia prima principal de una biorrefinería. Una biorrefinería consiste en la producción de biocombustibles y bioproductos de alto valor agregado a partir de materias primas de origen renovable y sustentable.

En este trabajo de investigación, se diseñaron distintas configuraciones de biorrefinería para producir etanol, ácido láctico y ácido succínico, lo anterior debido a su relevancia actual.

Para cada escenario se distribuyeron en diferentes proporciones la producción anual de melazas correspondiente al estado de Michoacán; esto es 150 toneladas por día para cada escenario de biorrefinería, distribuidos en distintas proporciones para cada línea de proceso. Mediante el software de simulación Aspen Plus, se evaluaron parámetros tecno-económicos, así como también se analizó el impacto ambiental de los ocho escenarios propuestos.

La producción de etanol y ácido láctico son los procesos que requieren mayor energía para el proceso de purificación. Por el otro lado, la producción de ácido succínico muestra los requerimientos energéticos más bajos pero un menor desempeño en el rendimiento por kilogramo de melaza procesada.

Los escenarios 3 y 4 mostraron los mejores desempeños en los tres aspectos analizados. El escenario 3 registró una utilidad neta de 3,785,407.99 USD/año y el escenario 4 una utilidad neta de 6,660,300.37 USD/año. Los impactos ambientales de ambos escenarios son relativamente aceptables, por lo tanto cualquiera de estas dos configuraciones aportaría resultados positivos si se integran a las líneas de procesamiento de los ingenios azucareros mexicanos.

Palabras clave: Aspen Plus, Simulación, Etanol, Ácido láctico, Ácido succínico

Abstract

Sugarcane molasses are the largest produced waste in sugarcane mills. On average, more than 2 million tons of molasses were produced in the last harvesting cycle and sugarcane transformation, only 3.25% was used for other processes. Molasses composition is rich in sucrose and other components that may be used in fermentation purposes, therefore this residue has great potential to become the main raw material of a biorefinery. A biorefinery is based in the production of biofuels and high value bio-products of high added value from renewable and sustainable raw materials.

In this work, it was developed different biorefinery configurations to produce ethanol, lactic acid and succinic acid, due to their current relevance in the different markets and contexts. For each scenario, the annual production of molasses corresponding to the state of Michoacán was distributed in different proportions: 150 tons per day for each biorefinery scenario were designated in several quantities for each process line.

Through the Aspen Plus simulation software, techno-economic parameters were evaluated, and the environmental impact of the eight scenarios proposed was also analyzed.

The production of ethanol and lactic acid are the most energy demanding processes because of the purification stages. On the other hand, the production of succinic acid shows the lowest energy requirements but a lower yield performance per kilogram of transformed molasses. Scenarios 3 and 4 showed the best performances in the three aspects analyzed. Scenario 3 has a net profit of USD 3,785,407.99 / year and Scenario 4 a net profit of USD 6,660,300.37 / year. The environmental impact of both problems are relatively acceptable, therefore, either of these two configurations provides positive results if they are integrated into the processing lines of Mexican sugarcane mills.

1. Introducción

Una biorrefinería es un conjunto de procesos para la conversión y transformación de la biomasa en productos de interés económico. El concepto de biorrefinería es análogo al concepto de las refinerías de petróleo, las cuales generan diversos tipos de combustibles y productos provenientes del petróleo.

Este tipo de configuraciones procesan desde materiales lignocelulósicos, cultivos desarrollados exclusivamente para este fin y residuos de las industrias agrícolas. La naturaleza de las materias primas es una característica esencial para aprovechar integralmente el potencial de estas fuentes renovables. En la Figura 1 se muestra un esquema general de una biorrefinería, las materias primas tienen diversos orígenes, como se mencionó anteriormente.

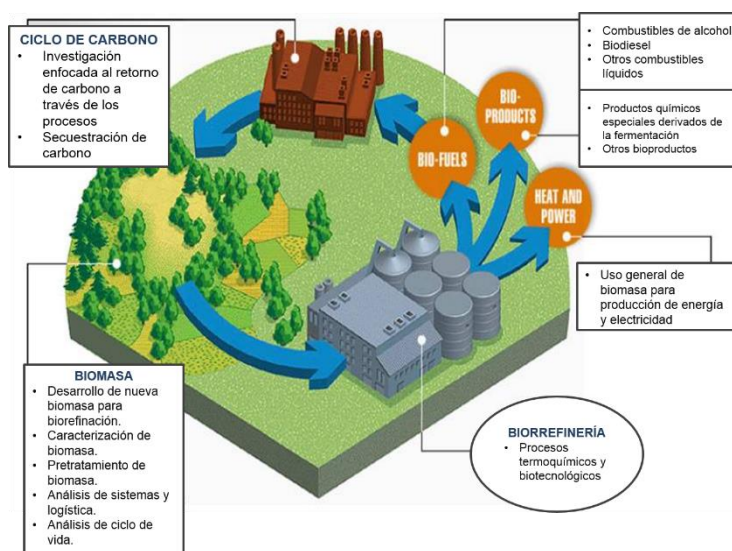


Figura 1. Esquema general de una biorrefinería.

Las melazas son un residuo de la industria cañera, con alto contenido de azúcares, potencialmente fermentables por los microorganismos adecuados, se considera como una materia prima central para el desarrollo de una biorrefinería para la producción de etanol, ácido láctico y ácido succínico y otros productos de interés.(1)

Su disponibilidad es relativamente alta, solamente el 3.25% de su generación a nivel nacional durante cada zafra de la caña es utilizado para fines locales de producción de alcohol, alimento para ganado, entre otros.

A diferencia de los materiales lignocelulósicos, las melazas contienen en su composición carbohidratos disponibles sin necesidad de pretratamientos previos sofisticados; solo es necesario un pretratamiento de hidrólisis para el desdoblamiento de la sacarosa para obtener azúcares fermentables.

Las melazas de caña de azúcar tienen potencial de convertirse en una materia prima en el concepto reciente biorrefinerías.

2. Planteamiento del problema

La problemática ambiental, social y económica derivada de la dependencia hacia los combustibles y productos de origen fósil, ha traído consigo la necesidad de desarrollar alternativas sustentables para la generación de productos similares a éstos.

La agroindustria del azúcar en México se enfrenta a una serie de dificultades que han mermado y retrasado su camino hacia la sustentabilidad. Una de estas problemáticas es el desaprovechamiento de residuos dentro del proceso de obtención de azúcar. El desarrollo incipiente de las biorrefinerías en México y la utilización de materias primas provenientes de actividades agrícolas representan un reto importante a enfrentar en la actualidad.

3. Justificación de la investigación

México cuenta con diversas actividades del sector primario que aportan un porcentaje significativo al PIB del país. Dichas actividades y agroindustrias generan cultivos, biomasa en general y residuos como es el caso de la industria de caña de azúcar; los cuales pocas veces son aprovechados en nuevas rutas de procesamiento para la obtención de productos energéticos y de interés.

La melaza es un residuo de la industria cañera y su uso como materia prima central en una biorrefinería generaría nuevos productos de valor agregado para los ingenios azucareros.

Esta propuesta pretende diseñar una biorrefinería mediante la simulación de procesos, para lo cual se seleccionaron los productos a generar y las etapas del proceso necesarias para su obtención; así como también se realizarán los análisis pertinentes de cuestiones ambientales, económicas, técnicas, entre otras, de toda la biorrefinería propuesta.

4. Hipótesis

Si la melaza de caña de azúcar se utiliza como materia prima central en el diseño conceptual de una biorefinería para la obtención de biocombustibles y productos químicos de alto valor agregado; entonces es posible, mediante la simulación de procesos, seleccionar las mejores rutas de procesamiento, con base en los análisis ambientales, económicos y técnicos pertinentes.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Diseñar una biorrefinería basada en el uso de la melaza de caña de azúcar como materia prima para la obtención de biocombustibles y productos de alto valor agregado, con base en la simulación procesos.

5.2. Objetivos particulares

- Recopilar la información sobre la producción, uso y disponibilidad de la melaza de caña de azúcar en México.
- Seleccionar los biocombustibles y productos químicos de alto valor agregado a generar a partir de la melaza.
- Revisar la información sobre las rutas establecidas para la producción de biocombustibles y productos químicos elegidos.
- Diseñar y simular por separado las rutas de producción para la generación de los productos principales de las configuraciones de biorrefinerías.
- Integrar y simular las configuraciones propuestas mediante el software Aspen Plus para la generación de productos de alto valor agregado y biocombustibles.
- Efectuar el análisis técnico de cada propuesta de biorrefinería en el software Aspen Plus.
- Analizar el desempeño económico de cada propuesta de biorrefinería mediante el software Aspen Plus.
- Evaluar el impacto ambiental de los escenarios propuestos a través de la integración del software WAR y el software Aspen Plus.
- Seleccionar las configuraciones finales de la biorrefinería de acuerdo a los parámetros establecidos y al desempeño tecno-económico mostrado.

6. Antecedentes y marco teórico

A principios del siglo XX, una gran cantidad de productos industriales; solventes, tintes, fibras se fabricaban a partir de materias primas como la madera, algunos cultivos o recursos de origen renovable. Después de la Segunda Guerra Mundial, debido al auge de los yacimientos de hidrocarburos y de la industria petroquímica dichos productos empezaron a producirse a partir de materias primas de origen fósil.

La crisis energética de la década de los años setenta, redirigió el enfoque de producción de nuevo hacia la utilización de recursos biológicos para la producción tanto de combustibles como de productos químicos; sin embargo, este enfoque volvió a fracasar debido a la disminución en el precio del petróleo.

No obstante, de acuerdo a Fahd y col. (2011), actualmente, el consumo primario de energía proviene de fuentes fósiles tales como petróleo (33%), carbón (24%) y gas natural (19%). Mientras que las fuentes de energía alternativas son la energía nuclear (5%), energía hidroeléctrica (6%) y biomasa (13%). (2)

Las problemáticas aunadas a la dependencia hacia los combustibles fósiles, justifican el retomar el camino de la utilización de recursos renovables como el caso de la biomasa.

La biomasa es una fuente natural renovable que puede ser utilizada como materia prima para la producción de biocombustibles y químicos de alto valor agregado.

La energía producida por la biomasa tiene la ventaja, respecto a los combustibles fósiles, de generar bajas emisiones de gases de efecto invernadero, ya que el dióxido de carbono que se forma durante la conversión a energía es consumido subsecuentemente por la biomasa cultivada.

Cabe destacar, que a diferencia de los hidrocarburos, la biomasa ofrece una amplia gama de materias primas a explotar; es decir, en el mundo la biomasa tiene una distribución más equilibrada y equitativa de potenciales recursos energéticos a diferencia del petróleo.

6.1. Concepto de biorrefinería

De acuerdo a Ohara (2003), una biorrefinería produce combustibles, solventes, plásticos y alimentos. El concepto de biorrefinería nace, de acuerdo a Cherubini (2010), de la fuerte dependencia hacia los combustibles fósiles y sus derivados. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) han influido seriamente en el clima del planeta debido a distintas actividades como: transporte, incremento de la población y demanda de energía per cápita, cambio de uso de suelo para la producción de alimentos, la industrialización a gran escala y el consumo excesivo de recursos a una velocidad mayor a la velocidad de regeneración de los recursos renovables. A fin de reducir esta dependencia y mitigar las problemáticas mencionadas, es necesario explorar cadenas alternativas de producción.

El crecimiento económico sustentable no puede estar basado en el procesamiento de materias primas limitadas como el petróleo. La producción de energía podría sustentarse en diversas alternativas de producción como la solar, la nuclear, la eólica, biomasa, entre otras; mientras que la economía de las sustancias solamente se sustenta en la biomasa, principalmente aquella proveniente de las plantas o residuos relacionados con ellas. (kamm 2004).

Una biorrefinería, entonces, deberá combinar todas las tecnologías necesarias (convencionales o no convencionales) con el fin de procesar recursos no limitados o de producción sustentable y renovable para satisfacer las necesidades que ya cubre la industria petroquímica. Las configuraciones y distribuciones de las biorrefinerías varían de acuerdo a las características físicas y químicas de la materia prima, además de las metas económicas deseadas, rendimientos, entre otras variables.

6.2. Agroindustrias: Generación de biomasa

Las actividades agrícolas satisfacen necesidades básicas para el humano como alimento, vestimenta, vivienda, recursos medicinales, entre otros. Estas actividades generan residuos poco aprovechados, los cuales representan un potencial de transformación de las agroindustrias hacia procesos sustentables.

En el caso de México, el cultivo y procesamiento de la caña de azúcar es una actividad económica que genera millones de empleos al año y aporta 0.4 % al PIB.

La melaza de caña de azúcar es un residuo del proceso de producción de azúcar, generado después de la etapa de evaporación y cristalización del jugo de caña. Por cada tonelada de azúcar se producen 300 kg de melaza. Este residuo se encuentra disponible en prácticamente todos los ingenios azucareros del país y representa una plataforma de producción para la obtención de biocombustibles y productos químicos.

Con anterioridad la melaza ha sido utilizada para diversos fines, principalmente para la producción de etanol, levaduras, entre otras actividades. En la Tabla 1 se muestra algunos autores que han utilizado a la melaza para la obtención de biocombustibles y sustancias químicas.(3,4)

Tabla 1.Utilización de la melaza para la obtención de diversos productos.

Utilidad de la melaza	Autores	Año
Producción de sorbitol a partir de <i>Zymomonas mobilis</i> . Los autores proponen a la melaza como una excelente fuente de carbonos.	Barrow, Grant, Leigh, Rogers, Warr	1984
Producción continua de hidrógeno a partir de melazas (<i>Enterobacter aerogenes</i>)	Tanisho, Ishiwata	1994
Hidrólisis enzimática de melazas	Najafpour, Shan	2002
Producción de sorbitol a partir de <i>Zymomonas mobilis</i> en melaza de caña de azúcar	Cazzetta, Celligoi, Buzato, Scarmino, da Silva	2004
Producción de etanol. Los autores proponen utilizar la melaza debido a su alta concentración de azúcares fermentables.	Quintero, Montoya, Sánchez, Cardona	2006
Producción de biohidrógeno a partir de melazas por fermentación anaerobia en un reactor escala piloto	Ren, Li, Wang, Liu	2006
Melaza como sustrato para la producción de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Fajardo Castillo, Sarmiento Forero	2007
Producción de 2,3-butanodiol a partir de melazas (<i>Enterobacter aerogenes</i>)	Jung, Park, Lee,	2013
Melaza como fuente de carbono para el crecimiento de bacterias reductoras de sulfatos (SRB)	Teclu, Tivchev, Laing, Wallis	

En lo general, la melaza ha sido utilizada para procesos de fermentación y obtención de etanol en su gran mayoría. Es factible considerar esta materia prima como una plataforma importante de azúcares para integrarla en procesos de biorrefinería.

6.3. Producción de biocombustibles y productos químicos a partir de la biomasa

Actualmente, la reducción en el consumo de combustibles fósiles es uno de los temas transversales en los esfuerzos que se realizan mundialmente para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Existen diversas alternativas y varios frentes de acción contra el llamado cambio climático; las biorrefinerías que se desarrollan alrededor de los distintos tipos de biomasa utilizada como materia prima para producir biocombustibles y productos químicos de alto valor agregado, juegan un papel clave en lograr esta reducción en un futuro próximo.

Las estrategias en el desarrollo de una biorrefinería tienen como metas principales:

- El uso de combustibles provenientes de fuentes renovables: meta energética.
- El establecimiento de una industria basada en productos químicos provenientes de la biomasa: meta económica.

La meta energética se enfoca en los esfuerzos de producción de etanol, biodiesel y algunos otros tipos de combustible como el butanol, hidrógeno, biogas, entre otros. El combustible obtenido se considera de bajo precio o debe ajustarse a los precios de combustible de cada nación para lograr ser competitivo; por lo tanto, es necesario implementar nuevas plataformas de producción para justificar el desarrollo de una biorrefinería en el aspecto económico.

Los bioproductos químicos, procedentes de la biomasa, satisfacen las necesidades económicas de una biorrefinería; se producen a bajo volumen pero los precios en el mercado son elevados en comparación de otros enseres. No obstante, existe una amplia gama de este tipo de químicos y uno de los retos principales es determinar hacia dónde dirigir los procesos de producción en una biorrefinería.

De esta manera, una biorrefinería que integra procesos para la obtención de biocombustibles y bioproductos ofrece una tasa alta de retorno de la inversión y satisface los objetivos energéticos, económicos, ambientales, entre otros requeridos por las problemáticas mencionadas con anterioridad.

6.4. Bioproductos químicos

La conversión de la biomasa hacia productos químicos representa uno de los procesos más complejos y menos desarrollado en una biorrefinería.

Primordialmente, es necesaria la identificación de un grupo principal de productos químicos y sus intermediarios correspondientes que sean análogos a aquellos utilizados en la industria petroquímica.

Por un lado, la producción de biocombustibles existen distintos tipos de tecnologías desarrolladas y probadas, las cuales convergen en una sola meta; el combustible. Por otro lado, para la producción de químicos, los esfuerzos radican en el desarrollo de una sola tecnología que sea capaz de generar varios tipos de productos; es decir, la producción de químicos es divergente comparada con la producción de biocombustibles.

En el 2004, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) emitió una lista de productos químicos que se podrían obtener a partir de los carbohidratos provenientes de la biomasa. Esta lista fue desarrollada a través de distintos criterios de selección (Werpy, Petersen; 2004):

1. El compuesto o la tecnología ha recibido atención significativa en la literatura.
2. El compuesto ilustra una amplia tecnología aplicable a múltiples productos.
3. La tecnología ofrece sustitutos directos para los petroquímicos existentes.
4. La tecnología es aplicable a un gran volumen de productos.
5. Un compuesto exhibe un fuerte potencial como plataforma de producción.
6. El escalamiento piloto de la tecnología o de la producción del compuesto está en marcha.
7. La producción comercial del compuesto proveniente de una fuente renovable se encuentra bien establecida.

De acuerdo a algunos de los puntos de la lista anterior, los productos propuestos como metas principales en una biorrefinería son los siguientes:

- Ácidos: succínico, fumárico y málico
- Ácido 2,5 furanodicarboxílico

- Ácido 3-hidroxipropiónico
- Ácido aspártico
- Ácido glucárico
- Ácido glutámico
- Ácido itacónico
- Ácido láctico
- Ácido Levulínico
- 3-hidroxi butirolactona
- Glicerol
- Sorbitol
- Xilitol/arabitol

En la Tabla 2 se enlistan las tecnologías requeridas para la obtención de sustancias químicas y biocombustibles en una biorrefinería.

Tabla 2. Tecnologías necesarias para la obtención de diversos productos en una biorrefinería.

Compuesto	Tecnología necesaria para la producción en la biorrefinería
Etanol	Deshidratación selectiva del alcohol; producción bioquímica mejorada de alcohol a partir de la biomasa; desarrollo óptimo de organismos fermentadores.
Furanos	Deshidratación selectiva de carbohidratos; nuevos sistemas de catálisis y reacción para la deshidratación; separación reactiva; oxidación selectiva de alcoholes; catálisis mejorada para la oxidación y deshidratación; sistemas catalíticos para las reacciones en solución acuosa.
Glicerol y derivados	Reacciones en solución acuosa; reducciones y oxidaciones selectivas de polioles; conversiones biológicas mejoradas de polioles.
Biohidrocarburos	Producción mejorada de hidrocarburos; ingeniería de organismos para la conversión de azúcares a hidrocarburos; optimización de la velocidad, rendimiento y tolerancia del producto.
Ácido láctico	Optimización de la bioconversión de los carbohidratos; bioprocesos rápidos, de alto rendimiento; ingeniería de organismos para producir un solo material.
Ácido Succínico	Bioconversión de carbohidratos; optimización de rendimiento, velocidad y separación; ingeniería de organismos para la producción óptima de un solo material.
Ácido/aldehído hidroxipropiónico	Optimización de la bioconversión de carbohidratos; bioprocesos de alta velocidad, rendimiento; ingeniería de organismos para producir un solo material; deshidratación selectiva de alcoholes;

	reducciones selectivas de grupos carbonilos; nuevos catalizadores selectivos para la hidrogenación; procesos químicos en solución acuosa.
Ácido levulínico	Deshidrataciones selectivas de carbohidratos; separaciones mejoradas de productos; esquemas de utilidad para los co-productos de la biorefinería; catalizadores mejorados para os procesos de conversión de carbohidratos.
Sorbitol	Hidrogenólisis selectiva de polioles; nuevos catalizadores para la reducción de derivados de carbohidratos; deshidratación selectiva de polioles; valoración de la tecnología de conversión química y bioquímica; tecnología de rompimiento/formación de enlaces para los polioles.
Xilitol	Hidrogenólisis selectiva de polioles; nuevos catalizadores para la reducción de derivados de carbohidratos; deshidratación selectiva de polioles; valoración de la tecnología de conversión química y bioquímica; tecnología de rompimiento/formación de enlaces para los polioles.

6.5. Producción de ácidos orgánicos a partir de fuentes de carbono renovables

De acuerdo a Tsao, Cao, Du, & Gong, (1999), el uso de ácidos orgánicos en diversas industrias es de gran relevancia en la actualidad debido a sus múltiples aplicaciones. Sin embargo, el reto es producir una gran variedad de estos ácidos a partir de fuentes renovables de azúcares y además que los procesos de producción sean competitivos con los procesos tradicionales.(5,6)

6.5.1. Ácido láctico

Actualmente, el 70% de la producción de ácido láctico se destina a la industria alimenticia. El consumo mundial de ácido láctico va en aumento (6%) cada año, lo cual lo convierte en un intermediario químico de suma importancia no solo para la industria alimenticia, sino también para otro tipo de mercados no alimentarios.

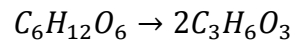
El ácido láctico es considerado un componente primordial para la producción de ácido poliláctico (PLA). El ácido láctico puede ser obtenido mediante procesos biológicos a partir de fuentes de carbohidratos. Los usos del ácido láctico pueden extenderse a aplicaciones como polímeros biodegradables, solventes, compuestos químicos oxigenados, entre otros.

El ácido láctico es producido industrialmente por vías químicas y biológicas. La ruta química más utilizada es la hidrólisis del lactonitrilo derivado del acetaldehído y el cianuro de

hidrógeno. Por otro lado, la producción biológica de ácido láctico se lleva a cabo principalmente mediante la fermentación bacteriana de azúcares simples.

6.5.2. Fermentación bacteriana

El ácido láctico es producido por diversas especies de bacterias, levaduras y hongos a través de una ruta metabólica fermentativa. La reacción de la fermentación de hexosas para la producción de ácido láctico se expresa de la siguiente manera:



Esta bioconversión no produce dióxido de carbono como producto secundario.

6.5.3. Recuperación del producto

Algunos métodos para extraer el ácido láctico después de la fermentación son: extracción con solventes, electrodiálisis, adsorción por intercambio iónico y ósmosis.

6.5.4. Ácido Succínico

El ácido succínico es un producto químico intermediario o también conocido como bloque constructor para aplicaciones en la industria alimenticia y farmacéutica, así como también en la producción de solventes, surfactantes, plásticos biodegradables e ingredientes para estimular el crecimiento de plantas y animales.

El ácido succínico se produce en la fermentación bacteriana de carbohidratos; sin embargo, un detalle de este proceso lo hace sumamente atractivo para su explotación a gran escala: los requerimientos de CO₂ como co-substrato para su obtención.

Durante la fermentación alcohólica se forman dos moles de CO₂ /mol de glucosa, por lo tanto, este gas de efecto invernadero podría ser aprovechado para cubrir los requerimientos en la fermentación del ácido succínico.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de las rutas del ácido succínico hacia otros productos químicos básicos o productos químicos especializados. (Zeikus, Jain, & Elankovan, 1999)

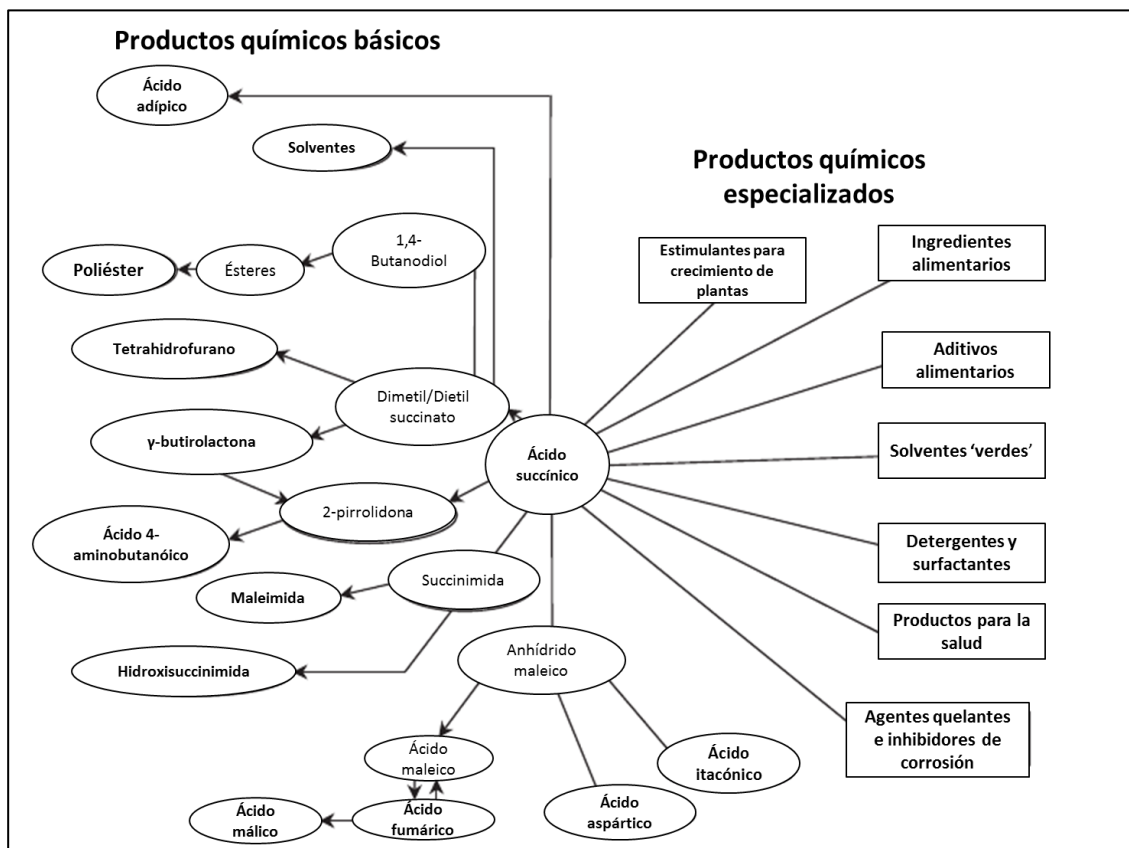


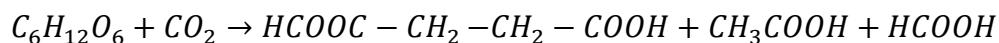
Figura 2. Diagrama de rutas del ácido succínico hacia productos químicos de interés.

6.5.5. Fermentación para producir ácido succínico

Los microorganismos responsables de la fermentación de azúcares para la obtención de ácido succínico son bacterias, entre las cuales podemos destacar a *Escherichia coli*, *Actinobacillus succinogenes* y algunas clases de *Lactobacillus*. La mayoría de estos microorganismos son capaces de utilizar una gran variedad de sustratos como arabinosa, celobiosa, fructosa, galactosa, glucosa, lactosa, maltosa, manosa, sacarosa, xilosa, entre otros.

Todas las bacterias encargadas de la producción de ácido succínico forman otras mezclas de ácidos, tales como ácido acético y ácido fórmico.

La reacción estequiométrica en la obtención de ácido succínico es:



6.5.6. Etanol como biocombustible

La transformación bioquímica de la biomasa en combustible es representada en su mayoría por la producción de etanol. La información en la literatura sobre procesos y tecnología para producir etanol combustible es extensa, así como también, datos sobre los costos, infraestructura necesaria, balances másicos y energéticos, entre otros. Algunos desarrollos tecnológicos recientes, proponen al etanol como una plataforma de producción, es decir, como materia prima para la obtención de precursores de otros productos químicos (olefinas).

Tal es el caso de la deshidratación del etanol para producir etileno, o la oxidación a través de catalizadores para la obtención de ácido acético y acetato de etilo. (7,8,9)

6.6. Producción de caña de azúcar en el mundo

El 75% del azúcar producida en el mundo proviene de la caña de azúcar. El 25% restante se obtiene de a partir de la remolacha azucarera.

La siembra de la caña y su posterior procesamiento, representa una actividad económica muy valiosa en el mundo. La caña se cultiva en 130 países, para la cual se destinan 25.4 millones de hectáreas de territorio mundial.

La producción global es aproximadamente de 80 t/ha. Los principales países productores de caña, dentro de los cuales se encuentra México, son Brasil, India, China, Tailandia y Pakistán. En la Tabla 3 se muestran más datos referentes al cultivo de la caña y producción azucarera.

Tabla 3. Datos del cultivo de caña de azúcar alrededor del mundo.

País	Área sembrada (millones de ha)	Producción (millones de toneladas)	Productividad (t/ha)
Brasil	5.343	386.2	72.3
India	4.608	289.6	62.8
China	1.328	92.3	65.5
Tailandia	0.970	64.4	66.4
Pakistán	1.086	52.0	47.9
México	0.639	45.1	70.6
Colombia	0.435	36.6	84.1
Australia	0.423	36.0	85.1
Estados Unidos	0.404	31.3	77.5
Filipinas	0.385	25.8	67.1
Indonesia	0.350	25.6	73.1

Cuba	0.654	22.9	35.0
Sudáfrica	0.325	20.6	63.4
Argentina	0.295	19.2	65.2
Myanmar	0.165	7.5	45.4
Bangladesh	0.166	6.8	41.2
Producción mundial	25.4	1333.2	80.4

Actualmente, uno de los retos mundiales es convertir los ingenios azucareros convencionales en biorrefinerías para la producción de energía, alimento, biocombustibles, sustancias químicas, biomateriales, entre otros.

6.7.La caña de azúcar en México

El cultivo, cosecha y procesamiento de la caña de azúcar en México se distribuye en 15 estados de la República (6 zonas geográficas): Campeche, Colima, Chiapas, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz. El rendimiento de producción nacional de caña es de 70 t/ha, por debajo de la media mundial.

En la Figura 3 se muestra un mapa de las regiones geográficas donde se distribuyen 55 ingenios azucareros con una extensión territorial de cultivo de la caña de 780 000 ha aproximadamente.

La agroindustria de la caña en México es afectada por una problemática de cuestiones sociales, económicas, legislativas, ambientales y culturales. Dicha problemática ha estancado el cultivo y procesamiento de la caña, colocando a México en bajos niveles de competitividad en los últimos años respecto al mercado mundial.

Algunos autores sugieren la reestructuración de los objetivos principales de los ingenios azucareros, así como también, la extensión del territorio de cultivo para incrementar la cosecha de la caña. El aprovechamiento y desecho de los residuos de la industria azucarera es uno de los frentes a atacar, debido a la poca claridad de las rutas de manejo y procesamiento de éstos.(10,11,12)

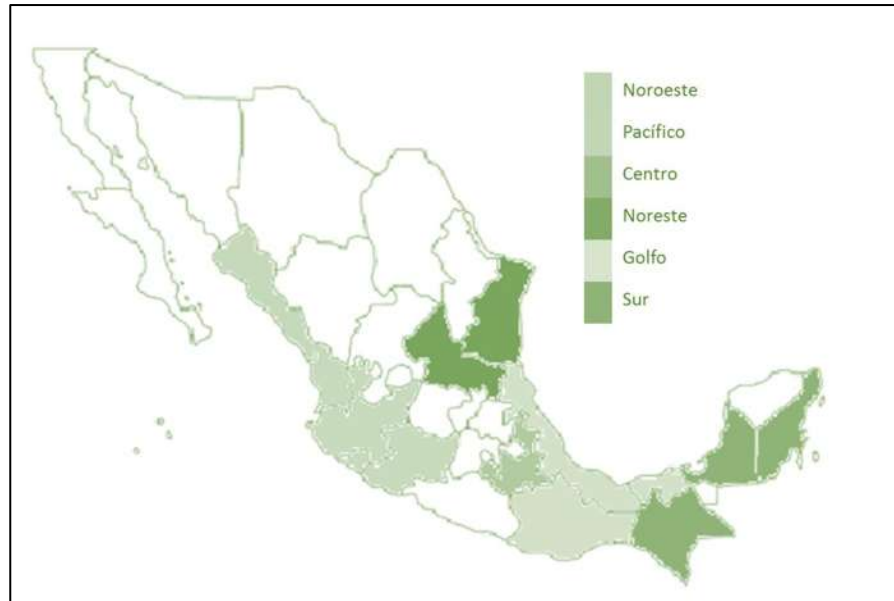


Figura 3. Regiones del cultivo de la caña en México.

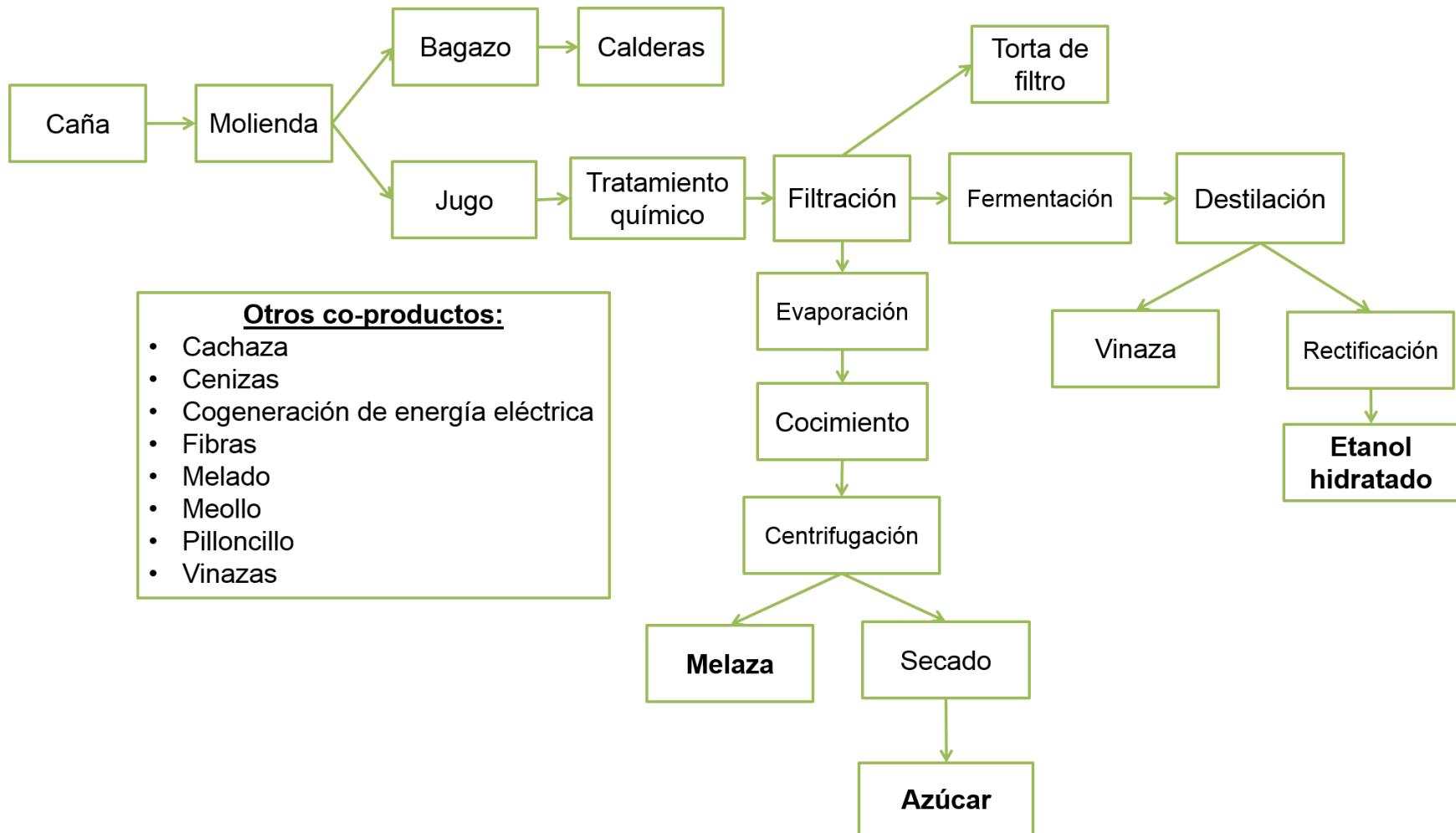
6.8. Proceso de producción de azúcar a partir de la caña

La producción de azúcar en México es una de las actividades económicas más importantes del país. Los ingenios azucareros han utilizado más o menos el mismo proceso de extracción de jugo y posterior obtención de azúcar desde hace décadas.

Las etapas de este proceso radican, de manera general, en la extracción del jugo de la caña mediante una etapa de molienda. Posteriormente, el jugo rico en sacarosa atraviesa una serie de operaciones unitarias para su final concentración y obtención de la azúcar común o de mesa.

Por otro lado, algunos residuos propios del mismo proceso como el bagazo de caña de azúcar obtenido después de la molienda, es usado como combustible sólido para la generación de vapor en las calderas que alimentan al proceso en general, así como también la generación energía eléctrica que se integra a la red de distribución local.

En la Figura 4 se presenta un diagrama de bloques de las etapas involucradas en la producción de azúcar; así como también, la obtención de otros residuos como la melaza y bagazo, y co-productos como el etanol.



1.

Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de obtención de azúcar a partir de la caña. Tomado y modificado de [5

6.9. Propiedades químicas de la sacarosa

La sacarosa es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa (dextrosa) y una de fructosa (levulosa). Contiene en su estructura molecular 12 átomos de carbono, 22 átomos de hidrógeno y 11 de oxígeno con fórmula condensada $C_{12}H_{22}O_{11}$. Su peso molecular es de 342.30 g/mol y tiene una estructura cristalina en su forma sólida. En la Figura 5 se muestra la estructura molecular de la sacarosa. (14)

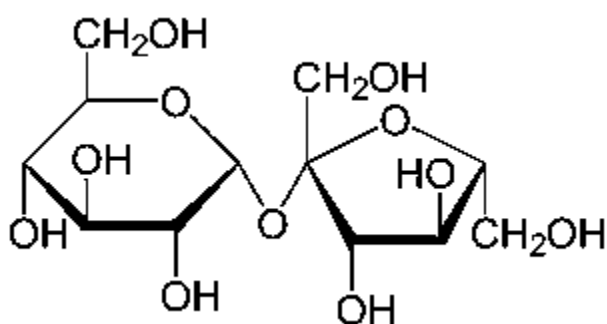


Figura 5. Molécula de sacarosa.

La sacarosa en su forma cristalina es un sustrato interesante para la transformación en productos químicos o parte de rutas biotecnológicas.

La reactividad de la molécula de sacarosa radica en sus carbonos primarios, es fácilmente atacada por ácidos, oxidantes y álcalis. Es un compuesto higroscópico; fermentable pero en altas concentraciones resiste la descomposición bacteriana.

Los usos de la sacarosa son variados; como endulzante, preservante, antioxidante, excipiente, agente tensoactivo y granulador en algunos productos. También tiene usos en la industria cosmética.

La solubilidad de la sacarosa es otra propiedad que resulta conveniente; a 40 °C y bajas concentraciones de sales (presentes en un medio acuoso) la solubilidad disminuye, sin embargo, la solubilidad incrementa cuando las concentraciones de sales minerales también lo hace.

Otras propiedades tecnológicas de la sacarosa se enumeran a continuación:

2. La molécula de sacarosa es una materia prima para procesos de conversión microbiana y uno de los sustratos más importantes para la producción de sustancias como ácidos orgánicos y alcoholes.
3. A partir de la sacarosa se produce energía pero también posee masa, lo cual confiere una transferencia de masa a otros productos y procesos.
4. La sacarosa puede someterse a dos reacciones que pueden resultar de gran importancia: la inversión o hidrólisis en la presencia de ácidos de Lewis; o la inversión simple en presencia de agua que deriva en dos azúcares sencilla, la D-glucosa y la D-fructosa; la pirólisis o caramelización de la sacarosa también tiene aplicaciones en diversos procesos, ésta ocurre a temperaturas por encima de los 140 °C en presencia de catalizadores ácidos o salinos.
5. La molécula de sacarosa es biodegradable, esto representa una ventaja importante frente de compuestos de origen fósil. Las aplicaciones de esta condición pueden enfocarse en la producción de detergentes.
6. La toxicidad de la sacarosa es nula, apta para consumo humano y útil en aplicaciones en el ramo farmacéutico, alimenticio o cosmético.

6.10. Producción de azúcar en México

Los estados con mayor producción de azúcar, de acuerdo a las zafras históricas promedio de los últimos diez años son Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí y Chiapas. Tal como se muestra en la Figura 6, se alcanzó un volumen de producción nacional promedio en toneladas de 7,000,267 de azúcar.

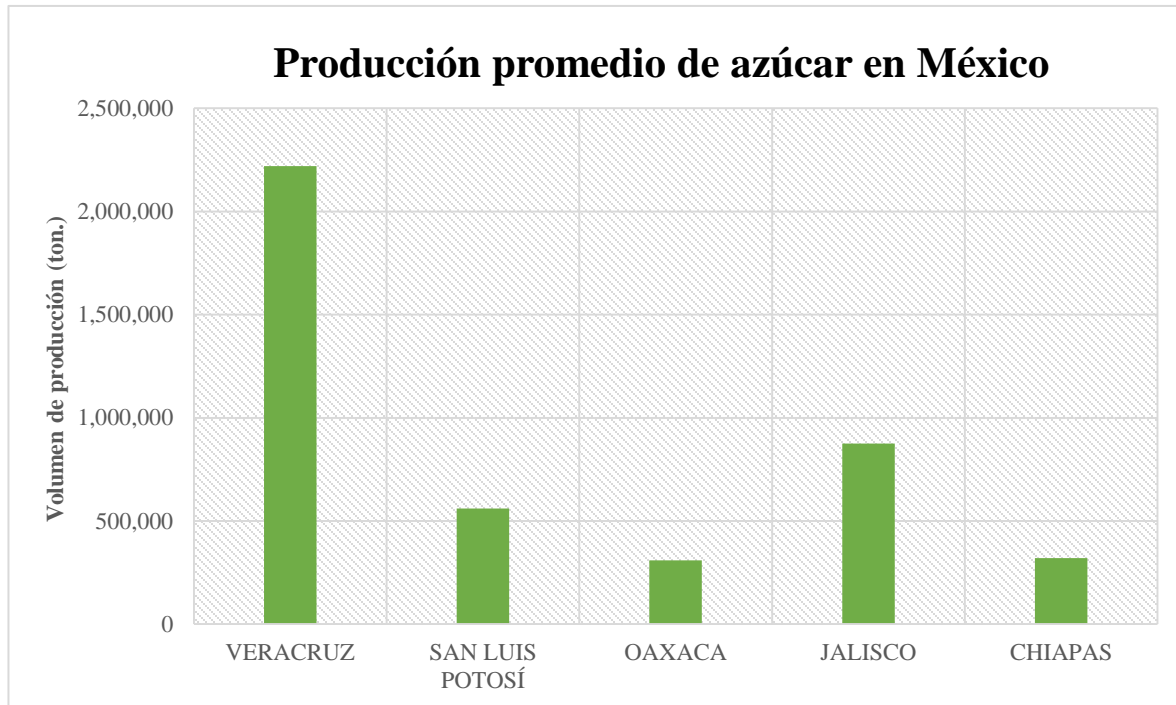


Figura 6. Estados con mayor producción de azúcar en México.

En la zafra del 2017-2018 se realizó la molienda de 51,981,003 toneladas de caña. El estado de Veracruz destaca como la región en donde más se cultiva caña, seguido por Jalisco y San Luis Potosí.(15,16)

México cuenta con un aproximado de 790,000 hectáreas de caña de azúcar, de las cuales se produjeron en la última zafra registrada 6, 184,344 toneladas de azúcar. En la Tabla 4 se muestra el desglosado del consolidado nacional promedio histórico de producción de azúcar.

Tabla 4. Tomada y modificada de CONADESUCA

Superficie sembrada (ha)	790,281
Caña molida (ton)	55,714,811
Rendimiento por ha cosechada (t/ha)	70.50
Azúcar producida (ton)	6,184,344
Rendimiento de azúcar producida por ha (ton/ha)	7.826
Azúcar refinada (ton)	1,984,641
Azúcar estándar (ton)	3,457,421
Azúcar blanco especial (ton)	652,752
Azúcar mascabado (ton)	89,530

6.11. Melaza de caña de azúcar

La melaza o miel de caña es un producto líquido espeso derivado de la cristalización del jugo de caña de azúcar. Tiene un aspecto similar a la miel de abeja; sin embargo, su color es oscuro, prácticamente negro.

La composición de la melaza es muy heterogénea y cambia dependiendo del tipo de caña de azúcar, el tipo de suelo, clima, periodo de cultivo, entre otros factores. Los principales azúcares que componen a la melaza son la sacarosa (60-63% en peso), glucosa o dextrosa (6-9% en peso) y fructosa (5-10% en peso). En la Tabla 5 se presentan los constituyentes principales de la melaza en porcentaje en peso. (18,19)

La melaza de caña de azúcar es generada durante la cristalización del azúcar por evaporación. Debido al continuo proceso de evaporación-centrifugación, las melazas son un líquido viscoso, marrón y con altas concentraciones de impurezas y sales minerales. No obstante, también se considera que las melazas contienen vitaminas esenciales para los procesos de fermentación. La biotina, el ácido pantoténico y el inositol se consideran de suma importancia para el crecimiento de microorganismos.

El contenido de cenizas es un factor importante a considerar también, debido a que si su contenido en las melazas es mayor al 10% se presentarían problemas de incrustación en tuberías y equipos de destilación; sin embargo, la composición de cenizas en las melazas se encuentra dentro de las concentraciones deseadas.

A diferencia de los materiales lignocelulósicos, las melazas no requieren de pretratamientos agresivos o costosos, ya que los azúcares se encuentran disponibles de forma casi directa y solo son necesarios algunos ajustes en el pH de la solución y la adición de algunos minerales y fuentes de nitrógeno para ser utilizadas como sustrato por distintas especies de microorganismos.

Tabla 5. Constituyentes principales de la melaza de caña de azúcar.

	Constituyentes	Contenido (p/p)
Componentes mayores	Materia seca	78%
	Proteínas	3%
	Sacarosa	60-63%
	Otros azúcares reductores	3-5%
	Sustancias disueltas	4-8%
	Agua	16%
	Grasas	0.40%
	Cenizas	9%
Contenido de minerales	Calcio	0.74%
	Magnesio	0.35%
	Fósforo	0.08%
	Potasio	3.67%
Contenido de aminoácidos	Glicina	0.10%
	Leucina	0.01%
	Lisina	0.01%
	Treonina	0.06%
	Valina	0.02%
Contenido de vitaminas	Colina	600 ppm
	Niacina	48.86 ppm
	Ácido Pantoténico	42.90 ppm
	Piridoxina	44 ppm
	Riboflavina	4.40 ppm
	Tiamina	0.88Pm

La melaza es considerada un residuo de la industria azucarera y no se tienen datos ni rutas específicas de aprovechamiento. La mayoría de los ingenios azucareros del país no registran el uso de melazas en sus líneas productivas ni reciben ingresos por la venta de este residuo.

Para llevar a cabo los procesos de fermentación es necesario diluir las melazas a las concentraciones requeridas por el tipo de microorganismos a emplear. Generalmente, las melazas se diluyen hasta un 18% de concentración de azúcares. (20,21,22)

6.12. Clasificación de las melazas

Las melazas se pueden clasificar de acuerdo a su contenido de azúcares, de acuerdo con la Asociación Americana de Control Oficial de Alimentos (AAFCO):

- Melaza Superior Blackstrap: Su contenido de azúcares totales es de 53.5% o más.
- Melaza Blackstrap: Su contenido de azúcares totales es 48.5% a 53.5%.

6.13. Producción de melaza en México

La producción de melaza en México, según datos recopilados de la CONADESUCA se muestra en la Figura 7.

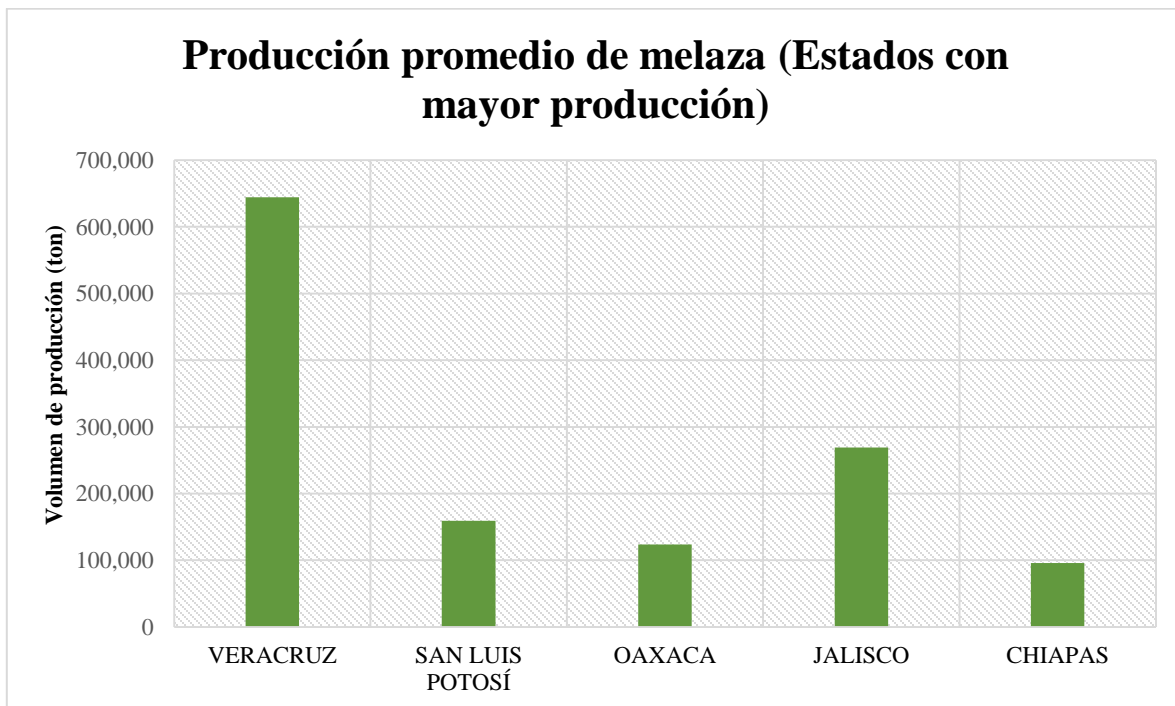


Figura 7. Gráfico de la producción en toneladas de melaza en México.

De acuerdo a la Unión Nacional de Cañeros, en el año 2018 se produjeron un poco más de 2 millones de toneladas de melaza (consolidado nacional) con una concentración de 85 ° BRIX. Se producen 37.191 kg de melaza/tonelada de caña y solamente el 3.6% de esa cantidad fue empleada para la producción de alcohol.

Solamente algunos ingenios azucareros del país reportan datos sobre el uso de la melaza para la producción de alcohol, tal como se muestra en la Figura 8.

La información anterior demuestra que el 96.4% de la melaza producida no es aprovechada y por lo tanto representa un residuo a explotar para su transformación en productos de alto valor agregado.



Figura 8. Producción de alcohol a partir de la melaza obtenida en los ingenios azucareros del país.

6.14. Precio de la melaza en México

Del año 2005 al año 2011, el precio de la melaza se incrementó 112% al aumentar de 1200 a 2544 pesos la tonelada. México es un país exportador de melaza de caña, sin embargo, las exportaciones de ésta han disminuido en los últimos 10 años. Los países a los cuales se exporta melaza son Estados Unidos y Reino Unido. El consumo de melaza local no se encuentra debidamente registrado; por lo cual se considera que es un residuo de poco interés para industrias de transformación.(24,25)

6.15. Datos generales de la producción mundial de melaza

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha recopilado datos de la producción de melaza en el mundo. Durante los años 2000 y 2007 la producción mundial de melaza incrementó de 45.1 a 59.7 millones de toneladas.

Durante el año 2007 se exportaron 6 millones de toneladas en el mundo y en el 2010 se registró una baja en las exportaciones al estimarse que solo se exportaron 5.5 millones de toneladas.

El principal productor de melaza en el mundo es Brasil, seguido por India, China y Estados Unidos. México ocupó el séptimo lugar en el año 2010.

El precio de la melaza a nivel mundial, de acuerdo con datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la tonelada de melaza se comercializaba en 137.8 dólares/tonelada en el año 2008. Mientras que para el año 2011, el precio de la tonelada de melaza aumentó más del 50%, ubicándose en 209.4 dólares.(28,29,30)

7. Metodología

En la Figura 9 se muestra un diagrama de la metodología de acuerdo a los objetivos establecidos previamente.

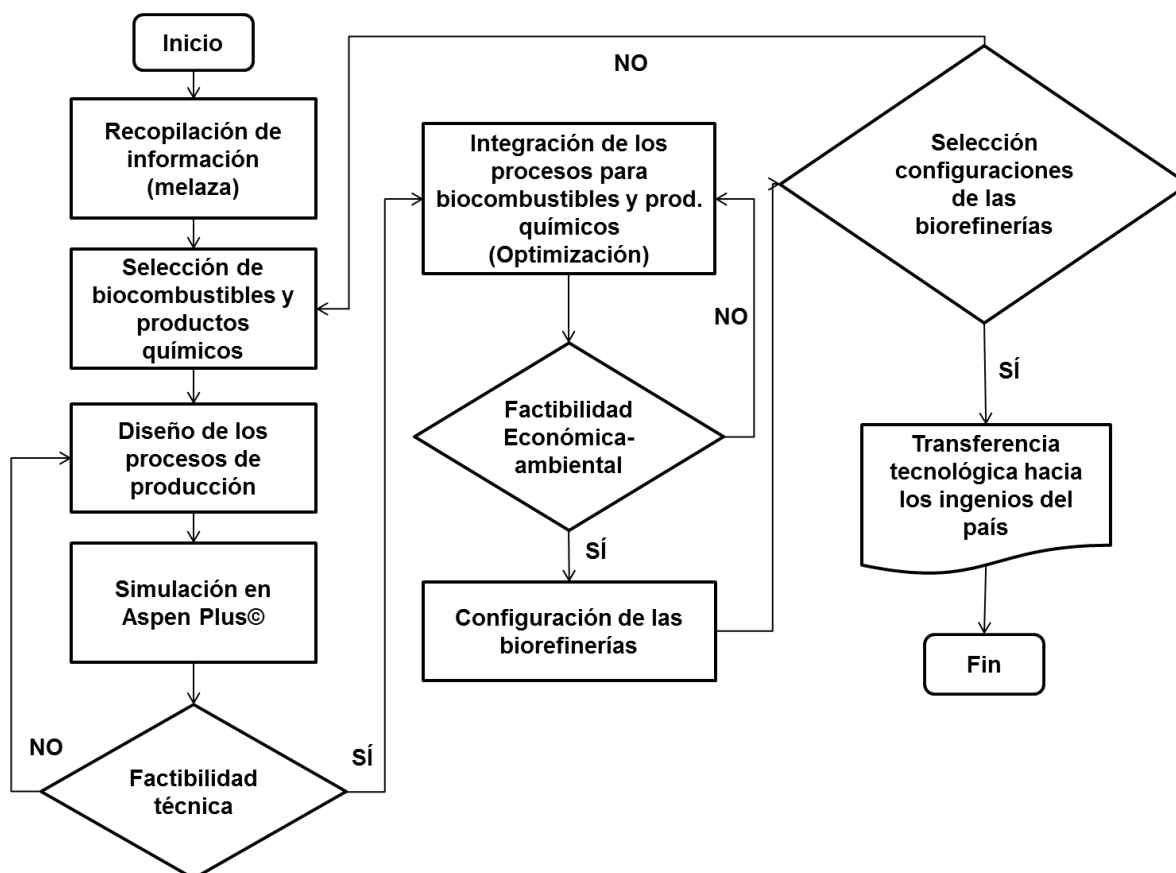


Figura 9. Diagrama de la metodología propuesta para el diseño de la biorefinería a partir de melaza.

1. Recopilación de información acerca de la melaza: Uso, disponibilidad, datos estadísticos, características físico-químicas, entre otros. Así mismo recopilación de información acerca de los procesos que utilicen una plataforma de azúcar para la producción de biocombustibles y productos químicos.
2. Selección de biocombustibles y productos químicos: La selección de los dos principales productos de la biorefinería se lleva a cabo a través del análisis de distintas fuentes de información principalmente artículos científicos. Esta selección se efectúa

a partir de la evaluación de distintos factores: factores energéticos, económicos, ambientales, entre otros.

3. Diseño de los procesos de producción: Se proponen cada una de las etapas que conforman a los procesos de obtención de biocombustibles y productos químicos; así como también el tratamiento de residuos, cogeneración de energía, entre otros.
4. Simulación de los procesos en ASPEN PLUS: Los procesos propuestos se simularan en Aspen Plus con el fin de obtener los balances energéticos y de masa de cada uno de los procesos, entre otras variables relevantes para la configuración de la biorrefinería.
5. Factibilidad técnica: El análisis de factibilidad técnica permite determinar si los procesos propuestos son los adecuados, tomando en cuenta datos termodinámicos, balances de masa y energía, entre otros.
6. Integración de los procesos para biocombustibles y productos químicos: Esta etapa de la metodología está determinada por el análisis de factibilidad técnica, si los procesos son técnicamente factibles se procede a la unión de las rutas de producción de biocombustibles y productos químicos en un solo proceso global.
7. Factibilidad económica y ambiental: Una vez realizada la integración de los procesos es necesario el análisis de costos y cuestiones económicas, así como también de cuestiones ambientales (emisiones de GEI) mediante el software WAR
8. Configuración de las biorefinerías: Se identifican las distintas configuraciones que cumplen con la factibilidad técnica, económica y ambiental establecidas.
9. Selección de las configuraciones de la biorrefinería: La selección de las biorrefinerías optimizadas se realiza con el objetivo principal de ser aplicada en la siguiente etapa de transferencia tecnológica de acuerdo a los parámetros establecidos o a los escenarios reales de los ingenios azucareros del país.

8. Resultados

8.1. Análisis tecno-económico de multi-escenarios de biorrefinerías

Consideraciones generales de la materia prima:

- La concentración de las melazas antes de ingresar a la etapa de pretratamiento es de 560 g/L (Unión Nacional de Cañeros, 2017).
- Las melazas consideradas para la simulación de las etapas de fermentación contienen los nutrientes mínimos requeridos para llevar a cabo este proceso. Con la única variable de agregar un controlador de pH así sea requerido por el proceso en particular.

En la Figura 10 se muestra el diagrama general del proceso de transformación de melazas en productos de interés previamente establecidos.

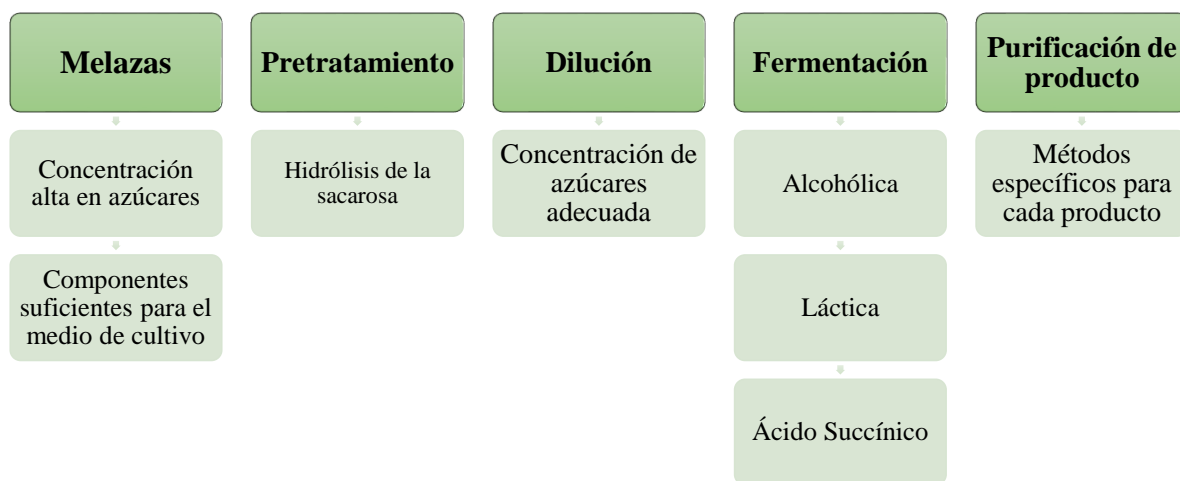


Figura 10. Diagrama del proceso de transformación de melazas en productos de interés.

El modelo termodinámico elegido para el proceso de simulación es el ‘Non-Random two liquid’, NRTL por sus siglas en inglés. Este modelo termodinámico demuestra correlacionarse adecuadamente para los coeficientes de actividad para fase líquida y la ecuación de estado Hayden-O’Connell es la adecuada para modelar la fase vapor. (Moncada et al. 2013)

8.1.1. Pretratamiento

La composición de las melazas considerada para la simulación en Aspen Plus© se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición de las melazas.

Componente	Porcentaje (p/p %)
Agua	37.7
Azúcares Totales	
Sacarosa	25.2
Fructosa	19.2
Glucosa	17.9

Como se observa en la Tabla 6, las melazas cuentan con un 25.2% de sacarosa con el potencial de ser desdoblada en azúcares de seis carbonos, fácilmente fermentables por los microorganismos adecuados. Para esta descomposición o hidrólisis de la sacarosa, en Aspen Plus se utiliza un reactor estequiométrico que opera a una temperatura de 60 °C y una presión de 1 atm, en presencia de agua.

La reacción efectuada en el reactor estequiométrica se muestra en la Figura 11:

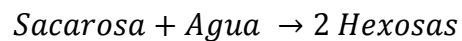


Figura 11. Reacción de hidrólisis de la sacarosa presente en las melazas.

En la Figura 12 se muestra el esquema seguido por las melazas en la etapa de pretratamiento y acondicionamiento de la biorrefinería.

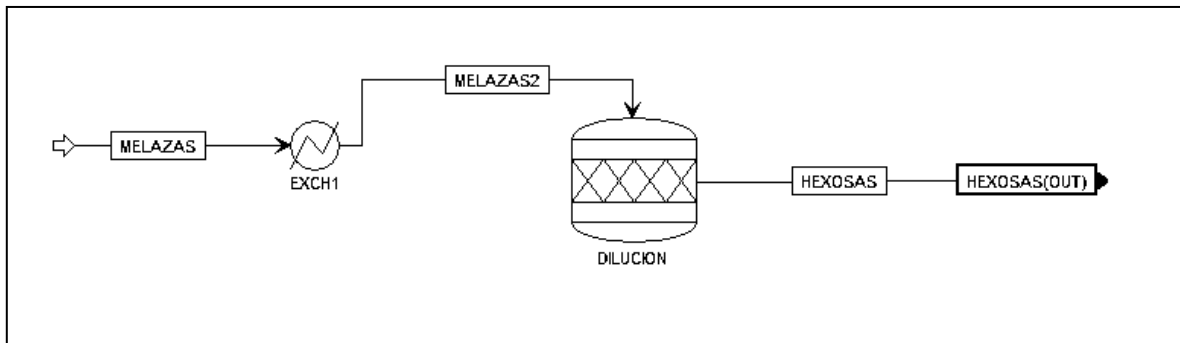


Figura 12. Pretratamiento y acondicionamiento de las melazas.

8.1.2. Dilución de las melazas

La etapa consiguiente al pretratamiento de las melazas, es la etapa de dilución. Esta etapa es necesaria para disminuir la alta concentración de azúcares presente en la corriente original de melazas. La concentración deseada de las melazas es de 150 g/L para la fermentación alcohólica ya que el microorganismo seleccionado es más resistente a altas concentraciones de sustrato (*Saccharomyces cerevisiae*). Por otro lado, para la producción de los dos ácidos orgánicos es necesaria una concentración de 100 g/L, debido a que las bacterias seleccionadas para las etapas fermentativas son sensibles a altas concentraciones de sustratos (*Lactobacillus casei* y *Actinobacillus succinogenes*).

En un tanque agitado, como se muestra en el diagrama de la Figura 13, es llevado a cabo este proceso, donde se agrega el volumen de agua necesario para alcanzar las condiciones de dilución previamente descritas. Posteriormente, cada corriente de melazas diluidas se transportará hacia la etapa de fermentación correspondiente.

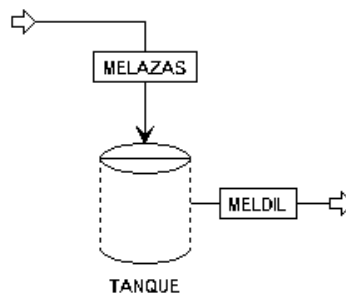


Figura 13. Dilución de las melazas.

8.1.3. Fermentación de las melazas

Para las etapas de los tres procesos de fermentación se asume que estos siguen una cinética tipo Arrhenius, descrita previamente por (Brandam, Castro-Martínez, 2008) y los parámetros termodinámicos fueron calculados por (Arni, 1999). La ecuación 1 muestra la dependencia de la velocidad específica con respecto de la temperatura de crecimiento.

$$\mu = Ae^{-Ea/RT}$$

Ecuación 1. Modelo cinético de Arrhenius para bioprocesos.

Los parámetros cinéticos considerados para la etapa de la fermentación correspondiente se reportan en la Tabla 7. Se consideraron los siguientes microorganismos:

Tabla 7. Parámetros cinéticos considerados para cada etapa de fermentación.

Microorganismo	Etapas de fermentación	Energía de activación (kcal/mol)	Facto pre-exponencial	Temperatura de fermentación (°C)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Etanol	15.6	1.05x10 ⁹	30
<i>Lactobacillus casei</i>	Ácido láctico	19.48	1.38x10 ⁹	37
<i>Actinobacillus succinogenes</i>	Ácido succínico	19.48	1.38x10 ⁹	37

8.1.4. Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica se efectúa en un reactor continuo, como se muestra en la figura 8. La cinética de fermentación sigue una cinética tipo Arrhenius establecida para bioprocesos. Los parámetros cinéticos correspondientes a *Saccharomyces cerevisiae* fueron reportados previamente por (Ortiz et. al., 2010). Las melazas diluidas entran al reactor a condiciones estándar de temperatura y presión. El reactor continuo opera a una temperatura de 30 °C y a una presión de 1 atm, condiciones requeridas por la levadura.

La reacción global que se lleva a cabo en el reactor se presenta en la Figura 14.

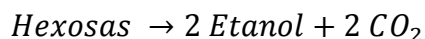


Figura 14. Reacción principal en el fermentador.

La solución obtenida a la salida del fermentador es una corriente compuesta por hexosas, etanol y agua. Es necesario purgar dicha corriente para posteriormente ser enviada a la etapa de purificación. A través de la purga se separan las hexosas que no fueron transformadas por la levadura y la corriente del fermentado se transporta a un depurador para liberar el dióxido de carbono producido en la fermentación. Después de estas dos etapas, como se muestra en la Figura 15, la corriente diluida de etanol tiene las condiciones adecuadas para ingresar a la etapa de purificación.

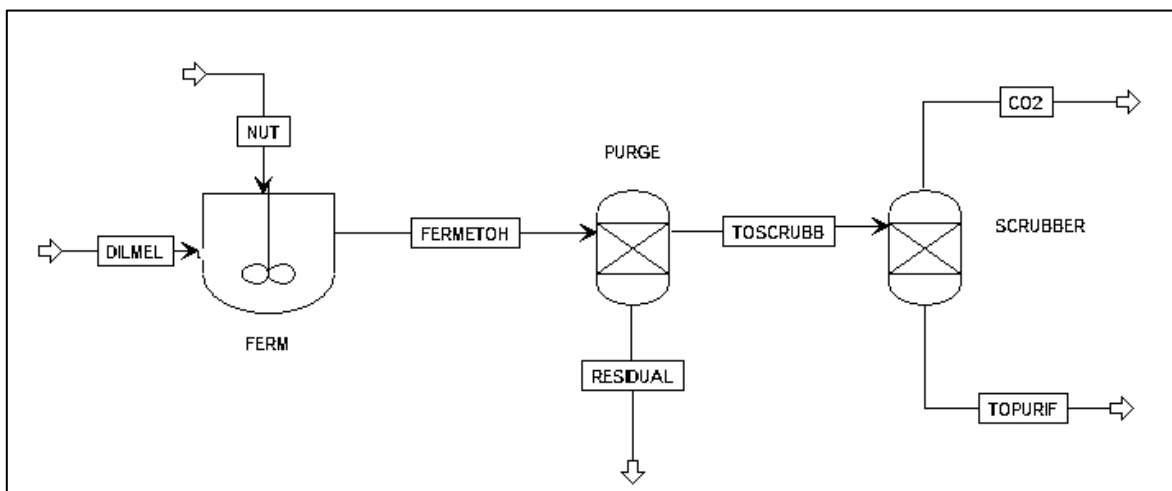


Figura 15. Diagrama del proceso de fermentación alcohólica.

8.1.5. Fermentación láctica

El microorganismo elegido para transformar los carbohidratos de seis carbonos es una bacteria denominada *Lactobacillus casei*. Esta bacteria necesita una temperatura de 37 °C y una presión de 1 atm para alcanzar condiciones óptimas de crecimiento. En la Figura 16, se muestra el diagrama del proceso de fermentación láctica. Las melazas diluidas hasta una concentración de 100 g/L entran al fermentador, a su vez, otra corriente que contiene un controlador de pH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ingresa también al reactor. Una vez efectuada la fermentación, el caldo de cultivo se transporta hacia una purga para separar las hexosas que no fueron transformadas por el microorganismo.

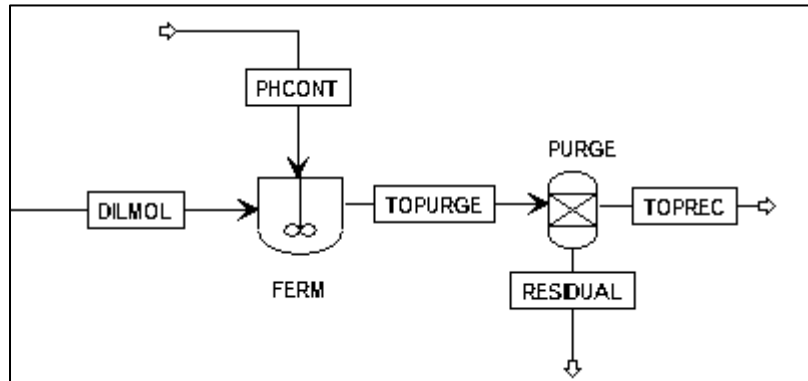


Figura 16. Diagrama del proceso de la fermentación láctica.

La reacción principal considerada en el reactor de fermentación se muestra en la Figura 17:

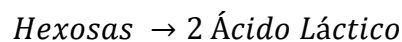


Figura 17. Reacción principal del proceso de fermentación láctica.

8.1.6. Fermentación para producir ácido succínico

El microorganismo seleccionado para transformar las melazas en ácido succínico es la bacteria *Actinobacillus succinogenes*. La reacción principal llevada a cabo en el reactor continuo de la Figura 18, produce una mezcla de tres ácidos: ácido succínico, ácido fórmico y ácido acético. El reactor opera una temperatura de 30 °C y a una presión de 1 atm. Este tipo de fermentación requiere de un co-sustrato, en este caso de dióxido de carbono para garantizar el crecimiento óptimo de la bacteria elegida. El dióxido de carbono proviene de la fermentación alcohólica. De manera similar al proceso de fermentación láctica, se emplea un controlador de pH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Posteriormente, la corriente del fermentado se transporta a una purga para retirar los carbohidratos que no reaccionaron.

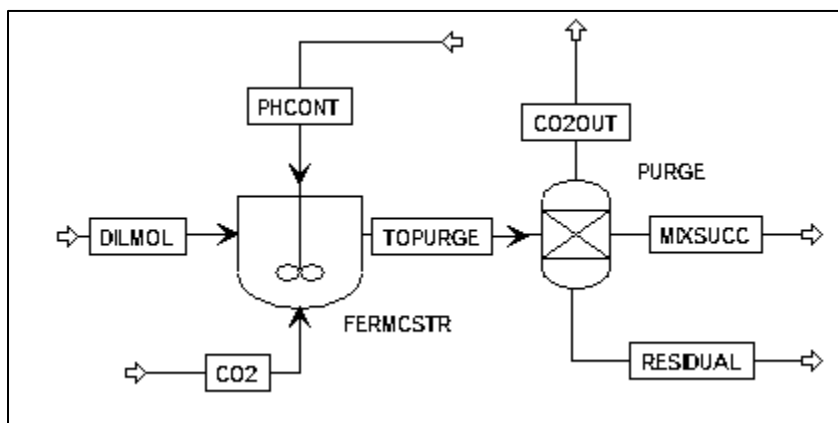


Figura 18. Diagrama del proceso de fermentación para producir ácido succínico.

La reacción llevada a cabo dentro del fermentador es la que se muestra en la Figura 19:

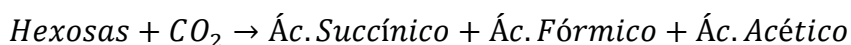


Figura 19. Reacción principal de la producción de ácido succínico.

8.2. Purificación de los productos de la biorrefinería

8.2.1. Etanol

La deshidratación del etanol es de suma importancia para ser utilizado como combustible en motores convencionales. Existen diversas tecnologías a través de las cuales se modifica el azeótropo formado por la mezcla de etanol y agua, una de estas tecnologías de separación es la destilación con solvente o destilación extractiva. Este método de separación consiste en agregar un solvente a la mezcla binaria que no forme azeótropo con ninguno de los dos componentes. El solvente modifica las volatilidades relativas de la mezcla azeotrópica facilitando la separación a través de columnas de destilación. El solvente seleccionado para la simulación de la destilación extractiva es el etilenglicol.

En la Figura 20 se presenta el tren de purificación de etanol. La primera columna se denomina columna de concentración y es la encargada de llevar la mezcla diluida de etanol-agua hasta el punto azeotrópico de 96 % en peso. La segunda columna de destilación, denominada como

columna de separación, se efectúa el rompimiento del azeótropo agregando el solvente previamente mencionado. Finalmente, en la tercera columna, denominada como columna de recuperación, el solvente y el agua que se recuperó de la mezcla binaria se separan a fin de que el solvente pueda ser recirculado a la columna de separación.

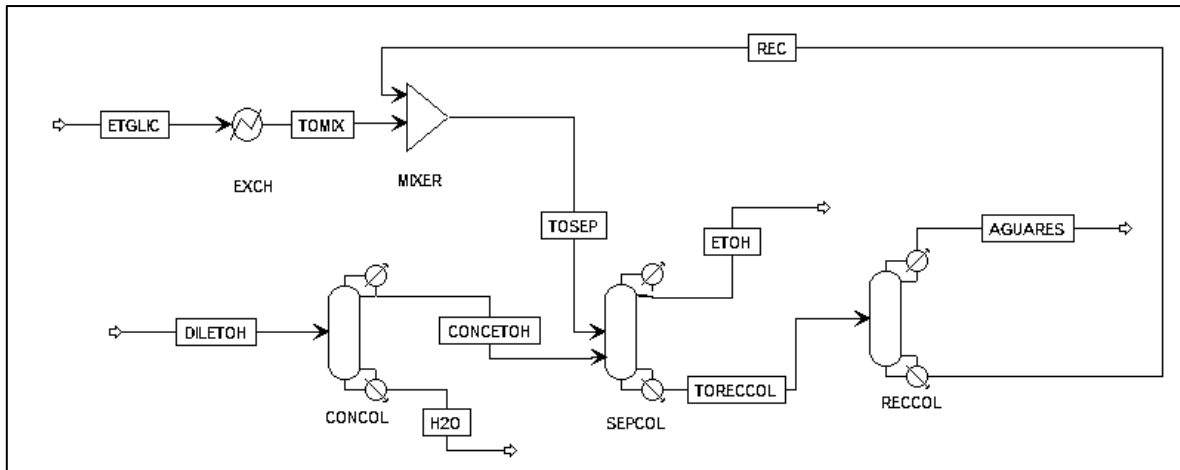


Figura 20. Diagrama de la deshidratación del etanol por destilación extractiva con etilenglicol.

8.2.2. Ácido Láctico

Después del fermentador, la corriente acuosa de ácido láctico mezclada con hidróxido de calcio se dirige hacia una etapa de precipitación con ácido sulfúrico. En este reactor, el ácido sulfúrico reacciona con el hidróxido de calcio formando un compuesto conocido como 'gypsum' o sulfato de calcio hidratado. Posteriormente, el sulfato de calcio se separa de la solución de ácido láctico a través de filtración. La siguiente etapa consiste en un evaporador que se encarga de concentrar la solución de ácido láctico, eliminando la mayor cantidad de agua posible. La primera etapa de la purificación del ácido láctico se presenta en la Figura 21.

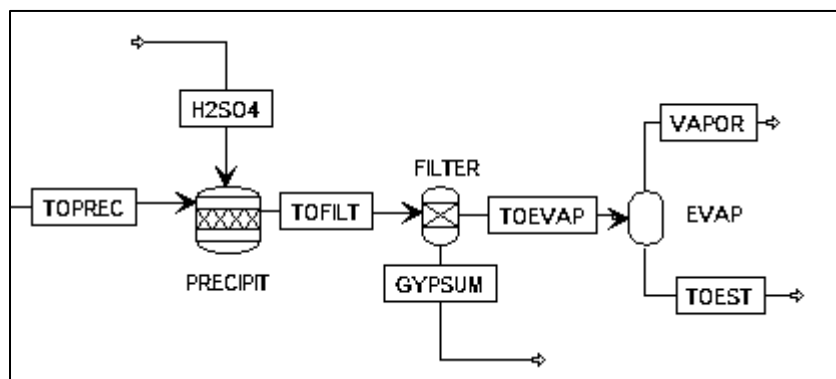


Figura 21. Diagrama de la etapa 1 del proceso de purificación de ácido láctico.

Ahora bien, hasta este punto la corriente del producto aún no tiene las características necesarias para su comercialización. Para lograr lo anterior, es necesario una reacción de esterificación del ácido láctico utilizando metanol. La reacción principal en el reactor de esterificación es la que se muestra en la Figura 22.

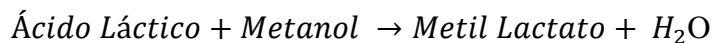


Figura 22. Reacción de esterificación.

La corriente de salida del reactor de esterificación se dirige a una columna para recuperar el metil lactato. Después, la corriente de salida de la columna se transporta al reactor de hidrólisis donde se lleva a cabo la reacción de la Figura 23.

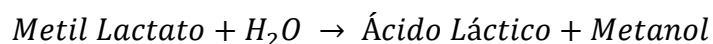


Figura 23. Reacción de hidrólisis.

Hasta este punto del proceso de purificación, el ácido láctico se encuentra en mayor proporción en relación al agua, sin embargo aún no se ha alcanzado la composición de 88% en peso de ácido láctico (composición grado alimenticio). Para lograr lo anterior se coloca una columna de destilación para separar el metanol y concentrar el ácido láctico hasta la concentración deseada. Los pasos descritos previamente se muestran en la Figura 24.

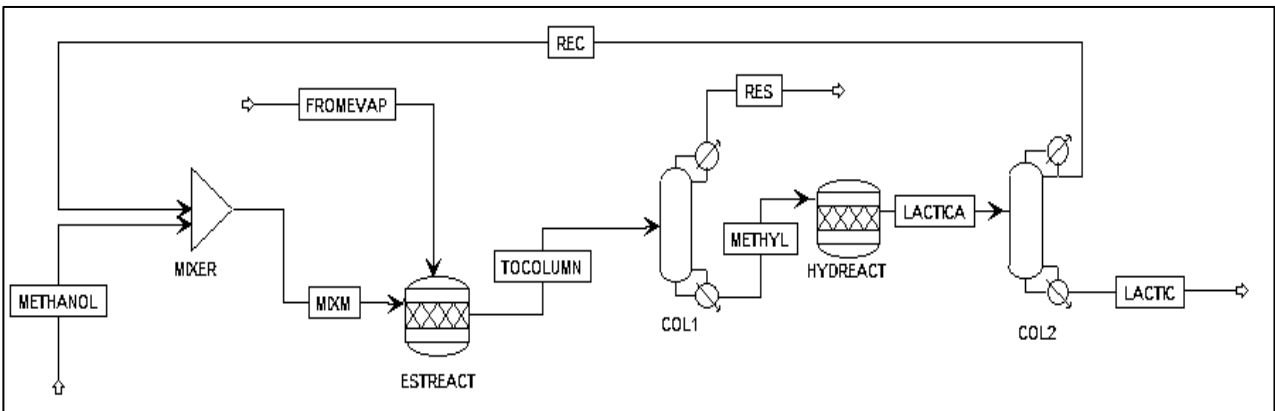


Figura 24. Diagrama de la etapa 2 del proceso de purificación del ácido láctico.

8.2.3. Ácido Succínico

El ácido succínico comúnmente se comercializa en estado sólido (cristales de ácido succínico). Al finalizar la etapa de fermentación, la mezcla ternaria de los ácidos previamente mencionados se dirigen hacia tres etapas: evaporación, cristalización y secado.

La primera etapa de evaporación es necesaria para separar los dos ácidos con puntos de ebullición inferiores al del ácido succínico. El evaporador opera a una temperatura de 119 °C, la corriente de salida se dirige hacia el cristalizador. En esta segunda etapa, se agrega HCl para disminuir el pH de la solución de ácido succínico e impurezas. A una temperatura de 4 °C, solo el ácido succínico es cristalizado y se asume que las trazas de los ácidos que no lograron separarse a través de la evaporación son solubles en agua. Finalmente, la tercera etapa, consiste en el secado del ácido succínico cristalizado.

En la Figura 25 se muestran las 3 etapas descritas anteriormente.

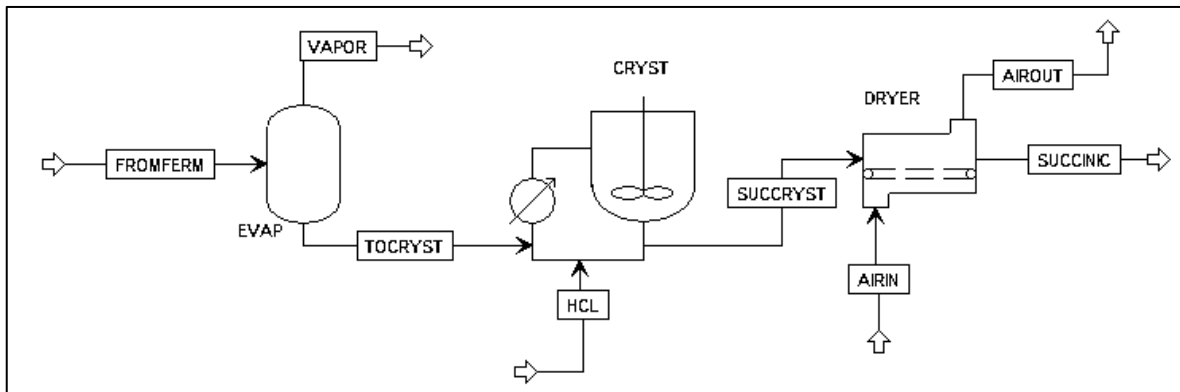


Figura 25. Diagrama del proceso de purificación del ácido succínico.

8.3. Caso base de producción: Melazas producidas en el estado de Michoacán

El caso base propuesto para desarrollar distintas configuraciones de la biorrefinería a partir de melazas es la zafra correspondiente al Estado de Michoacán durante el ciclo de corte 2016-2017. Durante este ciclo de procesamiento de la caña de azúcar se generaron 58, 158 toneladas de melazas.

Para cada una de las configuraciones propuestas se destinó una cantidad máxima de melazas a transformar de 150 toneladas por día para asegurar disponibilidad durante 365 días. Las cantidades de melazas asignadas a cada línea de proceso difieren para cada configuración con la finalidad de identificar el impacto económico de acuerdo a este parámetro.

Los tres productos de la biorrefinería; etanol, ácido láctico y ácido succínico, se obtuvieron en una primera instancia a través de procesos de fermentación que siguen una cinética de tipo Arrhenius para bioprocesos y se purificaron por medio de procesos tecnológicos convencionales. En el caso del etanol, se simularon dos procesos de deshidratación distintos con el fin de demostrar que el método convencional tiene ciertas ventajas contra otros métodos menos convencionales.

8.3.1. Balance de materiales para los escenarios propuestos

En la Tabla 8 y Tabla 9 se encuentra de manera condensada los balances de materia para los ocho escenarios propuestos de las biorrefinerías basadas en melazas:

Tabla 8. Balance de materiales de los escenarios propuestos (1 al 4).

Proceso	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
	Melazas	Producto	Melazas	Producto	Melazas	Producto	Melazas	Producto
Etanol	100 ton/día	22.52 ton/día	50 ton/día	10.94 ton/día	25 ton/día	5.28 ton/día	-	-
Ácido láctico	25 ton/día	8.1 ton/día	50 ton/día	13.17 ton/día	62.5 ton/día	18.3 ton/día	75 ton/día	20.22 ton/día
Ácido succínico	25 ton/día	2.7 ton/día	50 ton/día	4.25 ton/día	62.5 ton/día	5.72 ton/día	75 ton/día	6.43 ton/día

Tabla 9. Balance de materiales de los escenarios propuestos (5 al 8).

Proceso	Escenario 5		Escenario 6		Escenario 7		Escenario 8	
	Melazas	Producto	Melazas	Producto	Melazas	Producto	Melazas	Producto
Etanol	75 ton/día	18.71 ton/día	75 ton/día	18.71 ton/día	75 ton/día	18.71 ton/día	75 ton/día	18.71 ton/día
Ácido Láctico	50 ton/día	13.17 ton/día	75 ton/día	20.22 ton/día	-	-	25 ton/día	8.1 ton/día
Ácido Succínico	25 ton/día	2.7 ton/día	-	-	75 ton/día	6.43 ton/día	50 ton/día	4.25 ton/día

8.3.2. Balance energético para los escenarios propuestos

En la Figura 26 se muestran los requerimientos energéticos totales por escenario de producción.

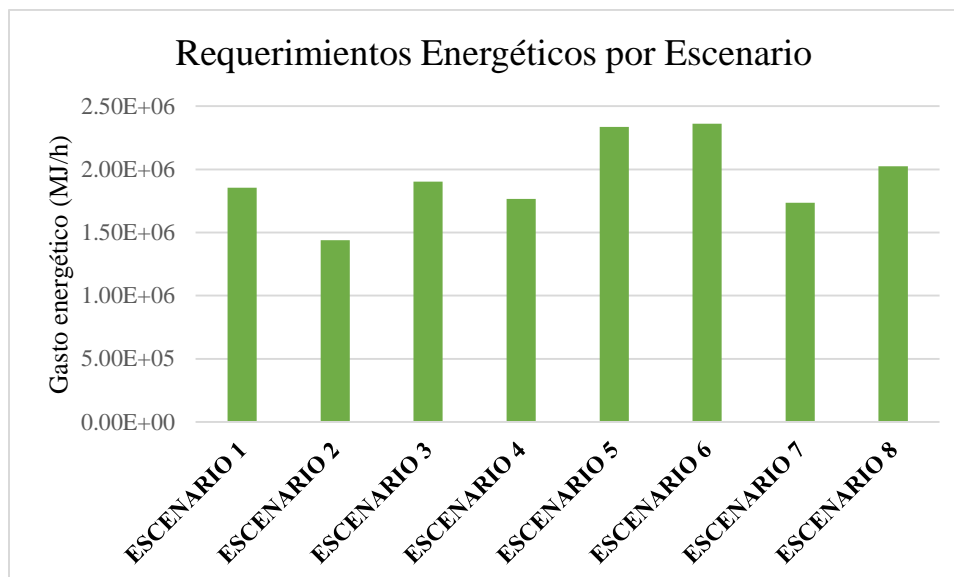


Figura 26. Balance de energía para los escenarios propuestos.

Los escenarios 5 y 6 requieren de un mayor gasto energético. Al escenario 5 se le asigna una mayor cantidad de melazas a los dos procesos con un gasto energético considerable (etanol y ácido láctico). El escenario 6, a pesar de ser una configuración de solo dos procesos, es el escenario con mayor cantidad de energía requerida debido a la alta demanda energética de las etapas de purificación. La configuración número 2 es la que requiere menor cantidad de energía para producir, mientras que los escenarios 1, 4 y 7 tienen requerimientos energéticos similares.

La tendencia observada es que al aumentar la cantidad de melazas asignadas a los procesos de ácidos orgánicos, sobretodo en el caso del ácido láctico, la demanda energética aumenta cerca de un 28% al comparar el escenario 1 (con menor cantidad de melazas asignadas) con los escenarios más demandantes que tienen 3 veces más cantidad de melazas asignadas para este proceso. El proceso de ácido láctico requiere de múltiples etapas para su producción y purificación, de ahí que la demanda de energía sea alta en comparación con el proceso de ácido succínico.

En el caso del etanol, al comparar el escenario que procesa menos melazas (escenario 3) contra el escenario que procesa más melazas para obtener etanol (escenario 1), se observa que el requerimiento energético se cuadruplica, lo cual tiene un impacto directo de los costos de operación.

8.4. Análisis económico en Aspen Process Economic Analyzer (APEA)

El análisis de la factibilidad económica; esto es que los escenarios analizados operen en condiciones de utilidades positivas, se analiza con el Aspen Process Economic Analyzer (APEA). Los parámetros económicos considerados para este análisis son adecuados para el caso mexicano. Las estimaciones se calcularon en dólares estadounidenses. Se seleccionó un periodo de 20 años con un impuesto sobre la renta de 40%. El método de depreciación en línea recta se utilizó para este estudio.

El precio de las melazas se tomó con base en el mercado nacional. Otros insumos requeridos por los procesos de biorrefinería, servicios de electricidad, vapor, agua y costos por supervisores y operadores están acorde a las condiciones de México.

Además, otros costos referentes a los equipos, costos de capital, costos de operación, y otros datos y correlaciones necesarias para determinar el desempeño económico de los escenarios se obtuvieron del APEA. (32)

Otros precios considerados para el análisis económico se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Precios considerados para insumos, materias primas y productos

Item	Price	Unit
Melazas	150	USD/ton
Microorganismos	0.03	USD/kg
Etilenglicol	1.43	USD/kg
Controlador de pH	0.08	USD/kg
H ₂ SO ₄	0.027	USD/kg
Metanol	0.45	USD/kg
HCl	0.027	USD/kg
Etanol	0.7	USD/L
Ácido láctico	2500	USD/ton
Ácido succínico	3000	USD/ton

(ALIBABA 2017; ICIS 2017)

8.4.1. Escenario 1

En la Figura 27 se muestra el reporte ejecutivo de los costos principales de la biorrefinería así como también las ventas totales de productos.

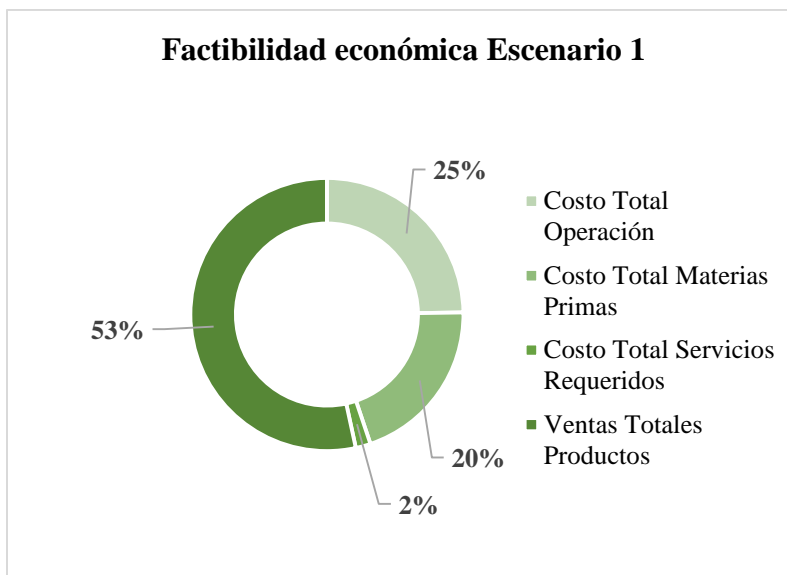


Figura 27. Análisis económico correspondiente al escenario 1.

Se observa que el porcentaje de ventas de productos es mayor al porcentaje total de costos totales de la biorrefinería. De acuerdo a lo mencionado previamente, este escenario asigna mayor cantidad de melazas al proceso de producción de biocombustibles que a los procesos de los ácidos orgánicos. Algunas biorrefinerías que emplean materiales lignocelulósicos como materia prima principal, presentan un porcentaje de costos por materias primas arriba del 50%. En este caso, el porcentaje del costo de materias primas es del 44%.

8.4.2. Escenario 2

La Figura 28 muestra la distribución de los costos de producción y ganancias por ventas de productos. Este escenario presenta un balance negativo, ya que el porcentaje por ventas obtenidos es menor que el porcentaje requerido de costos de producción. Es decir, en este escenario no existe una utilidad neta positiva.

El desempeño negativo de este escenario se atribuye a que debido a que se incrementó el flujo asignado para los dos procesos de ácidos orgánicos, estos procesos requieren de un costo mayor de operación, así como de insumos y materias primas necesarias para generación de los productos. Ahora bien, a pesar de que el proceso de ácido láctico presenta resultados positivos, no solo en este sino en todos los escenarios, en esta ocasión este proceso no pudo fungir su acción como soporte principal económico de la biorrefinería.

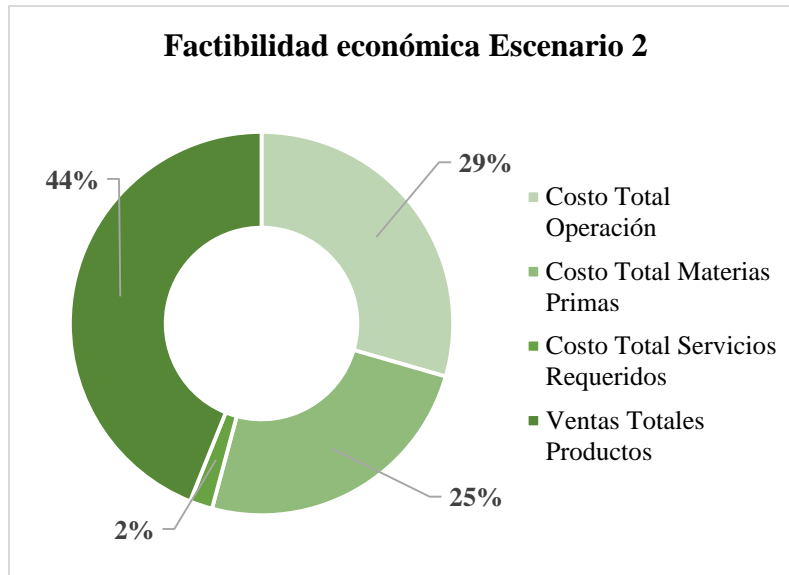


Figura 28. Análisis económico correspondiente al escenario 2.

8.4.3. Escenario 3

La Figura 29 muestra que la factibilidad económica para este escenario es positiva; es decir, el porcentaje de ganancias obtenidas por ventas de producto es mayor que el porcentaje total de costos requeridos para la producción.

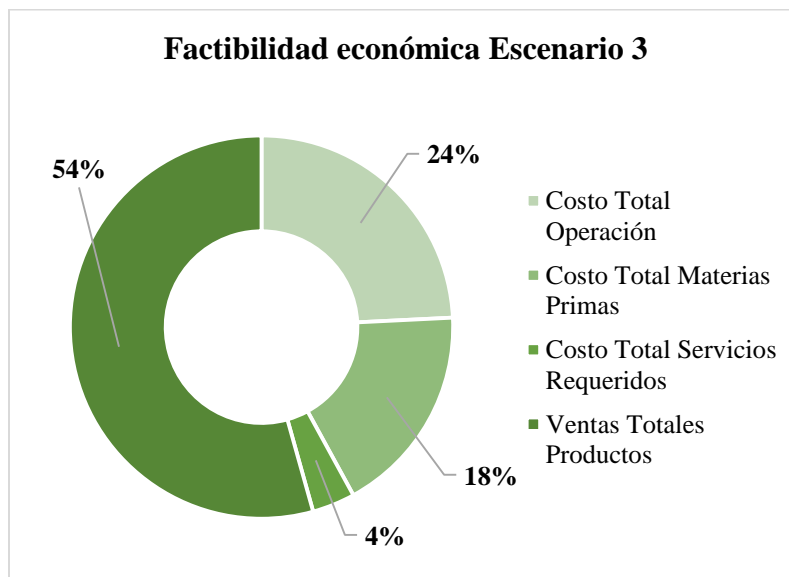


Figura 29. Análisis económico correspondiente al escenario 3.

Este escenario mejora las condiciones del escenario I, esto es consecuencia de que la utilidad neta se incrementa al producir un volumen mayor de ácidos orgánicos. El costo total de operación también sufrió un incremento de 1% en relación del escenario 1.

8.4.4. Escenario 4

El escenario 4, mostrado en la Figura 30, es una simulación basada en solo la producción de ácidos orgánicos. Se eligió este escenario para comprobar la carga económica que ejerce la producción de etanol sobre las configuraciones de las biorrefinerías.

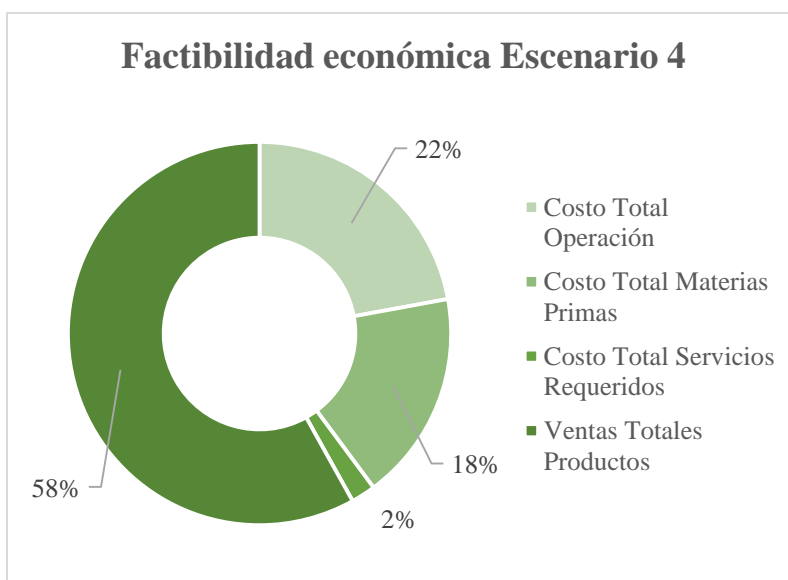


Figura 30. Análisis económico correspondiente al escenario 4.

En este escenario se presenta la utilidad neta más alta de todos los escenarios simulados. La ausencia de la línea de proceso de etanol resta 'presión' económica a los procesos de ácidos orgánicos. Sin embargo, el concepto de biorrefinería estaría parcialmente representado ya que es necesario contar con un producto que satisfaga las necesidades energéticas de la biorrefinería.

8.4.5. Escenario 5

En la Figura 31, se observa la diferencia entre el porcentaje total de los costos requeridos por la biorrefinería y el porcentaje total obtenido por las ventas totales de productos; esta

diferencia es favorable para los objetivos planteados anteriormente, sin embargo es mucho menor en comparación con el escenario 1.

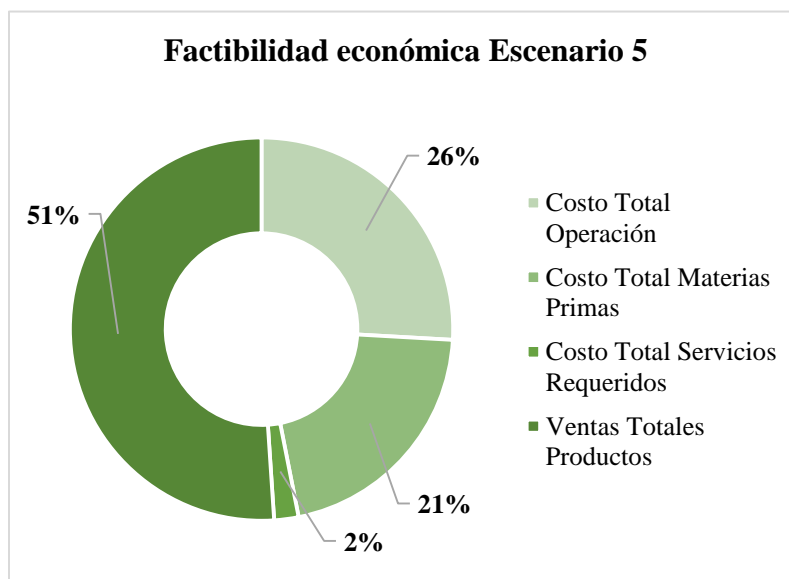


Figura 31. Análisis económico correspondiente al escenario 5.

8.4.6. Escenario 6

En este escenario, mostrado en la Figura 32, solamente se tomaron en cuenta dos líneas de proceso: etanol y ácido láctico, con la misma cantidad de melazas asignada a cada línea de procesamiento. Al finalizar el análisis económico se logra una utilidad neta positiva debido a que el ácido láctico se produce en un volumen aceptable que permite soportar económicamente hablando al etanol. Por otro lado, se produce un volumen menor de etanol en comparación al escenario 1 pero que bien podría satisfacer las demandas energéticas de la biorrefinería.

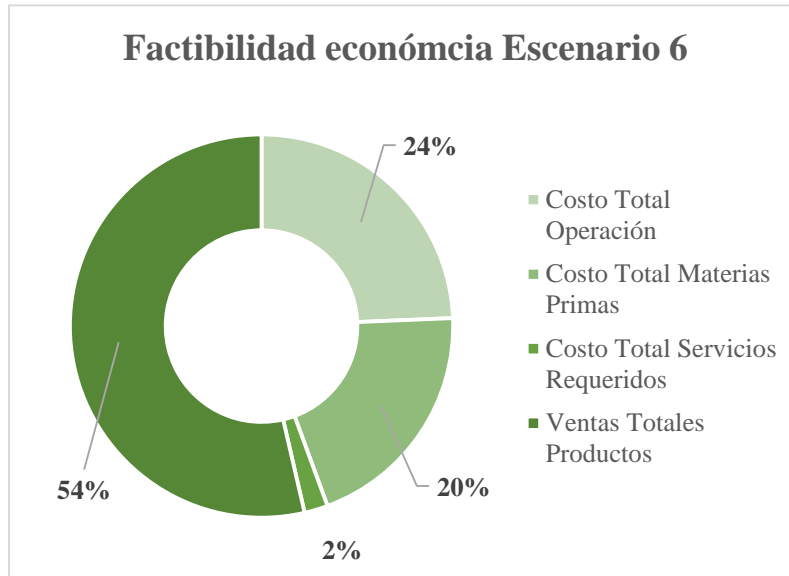


Figura 32. Análisis correspondiente al escenario 6.

8.4.7. Escenario 7

Como se aprecia en la Figura 33, el escenario 7, junto con el escenario 2, presentan resultados negativos, obteniendo una utilidad neta negativa al final del balance efectuado. El escenario 7, de manera similar al escenario 6, solamente cuenta con dos líneas de proceso: etanol y ácido succínico, con la misma cantidad de melazas asignadas a cada proceso. La producción de etanol no tiene el mismo soporte económico que en el escenario anterior, aun cuando la producción de ácido succínico es menos costosa, no obstante debido a que este ácido se produce en una mezcla ternaria de otros ácidos, su volumen de producción se ve seriamente restringido por la etapa de purificación.

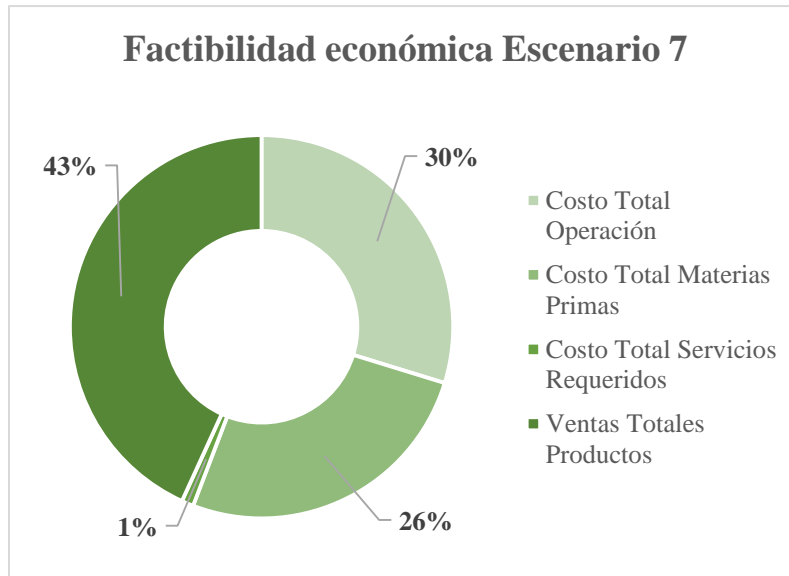


Figura 33. Análisis económico correspondiente al escenario 7.

8.4.8. Escenario 8

En el último escenario planteado, mostrado en la Figura 34, tenemos de nuevo las tres líneas de proceso propuestas, esta vez favoreciendo la producción de ácido succínico a través de una asignación mayor de materia prima en comparación con su línea análoga de ácido láctico. Los resultados son positivos y favorables en el aspecto económico de la biorrefinería.

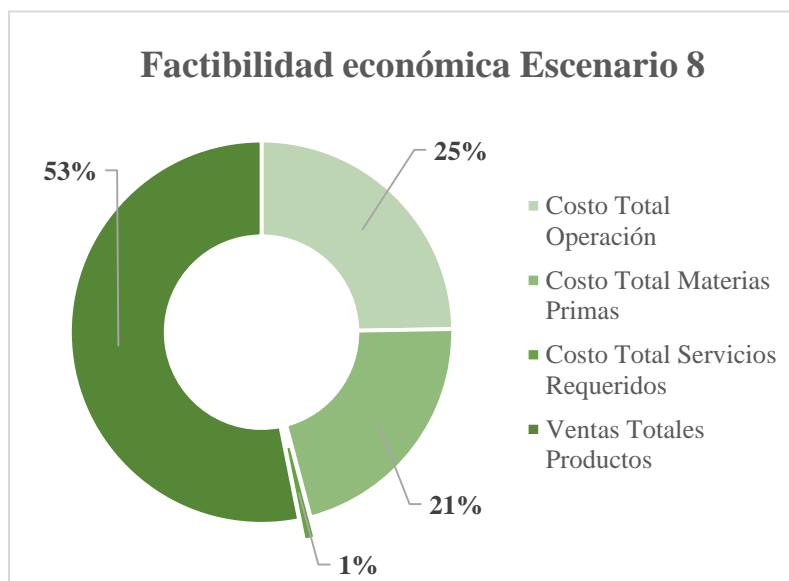


Figura 34. Análisis económico correspondiente al escenario 8.

8.5. Inversión total y utilidad neta de las configuraciones de la biorrefinería.

La Figura 35 muestra la inversión total por escenario. En general, la inversión total supera los 20 millones de dólares en casi todos los escenarios, a excepción de los escenarios 4 y 7. El escenario número 6, a pesar de solo tener dos líneas de proceso, tiene una inversión similar a la de los demás escenarios debido a que los procesos más costosos son los del etanol y ácido láctico.

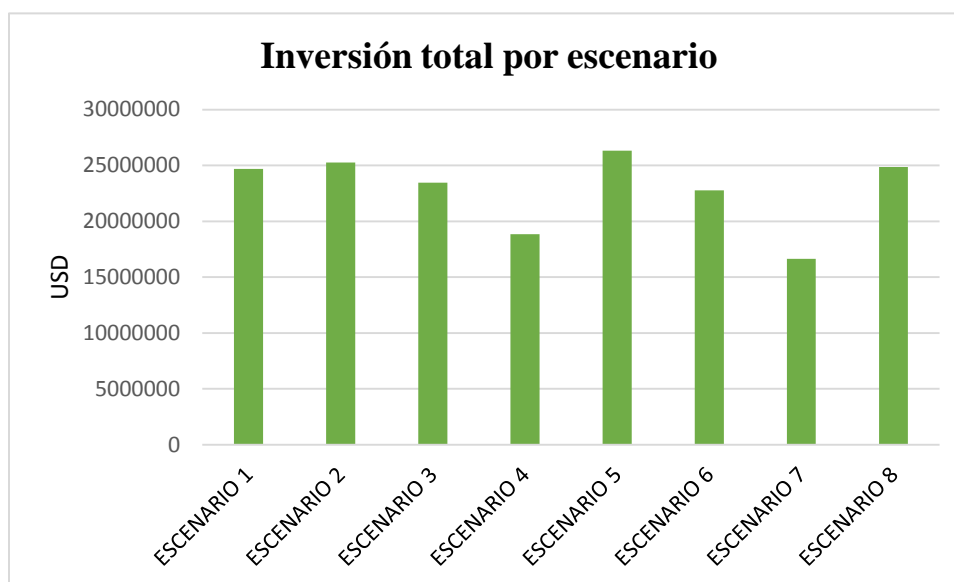


Figura 35. Inversión total requerida para cada escenario de producción.

La utilidad neta de cada uno de las configuraciones propuestas se observa en la Figura 36. Los peores escenarios son el 2 y el 7, los mejores escenarios, son el 3 y el 4. El escenario 2 tiene un impacto negativo debido a la producción del ácido succínico, ya que de una cantidad considerable de melazas solo se obtiene un volumen pequeño de producto, esto aunado a los altos costos de procesamiento de las otras líneas de proceso. El escenario 4 tiene resultados positivos debido a que solo se consideran como productos principales a los dos ácidos orgánicos, como se ha observado en los resultados anteriores, el ácido láctico asume el rol de soporte económico de la biorrefinería. La configuración número 3 presenta una utilidad neta aceptable, aunque se pierde ganancias por ventas en la línea del etanol (poco volumen de producción), por otro lado tampoco esta línea de producción ejerce demasiada presión económica en la producción de los ácidos orgánicos.

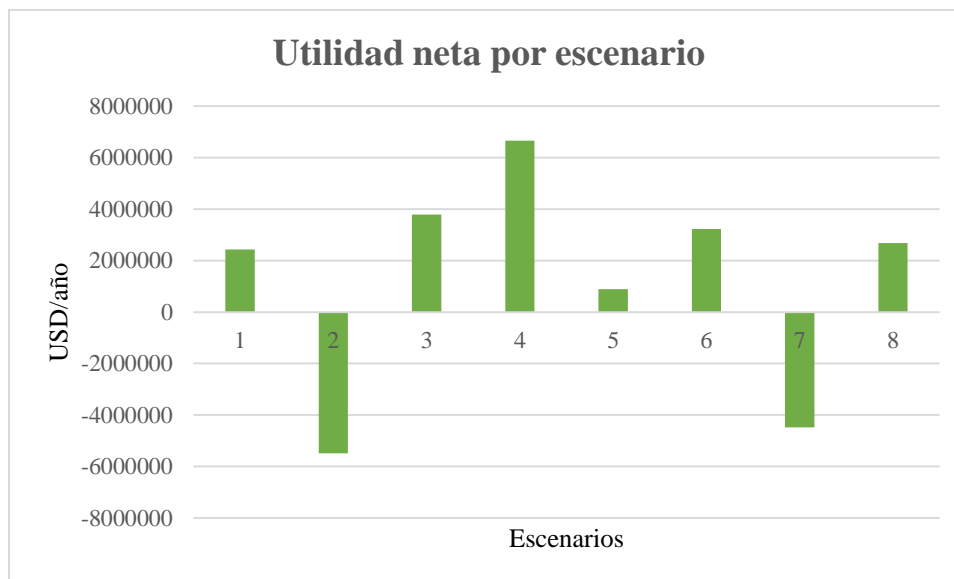


Figura 36. Utilidad neta obtenida por cada de uno de los escenarios de la biorrefinería.

8.6. Análisis ambiental mediante el software WAR de los escenarios propuestos de una biorrefinería basada en melazas de caña de azúcar

En la Figura 37 se muestra la configuración general de una biorrefinería basada en melazas de caña de azúcar. Sobre esta configuración se propone evaluar ocho escenarios de producción, basados en la producción de melazas del Estado de Michoacán.

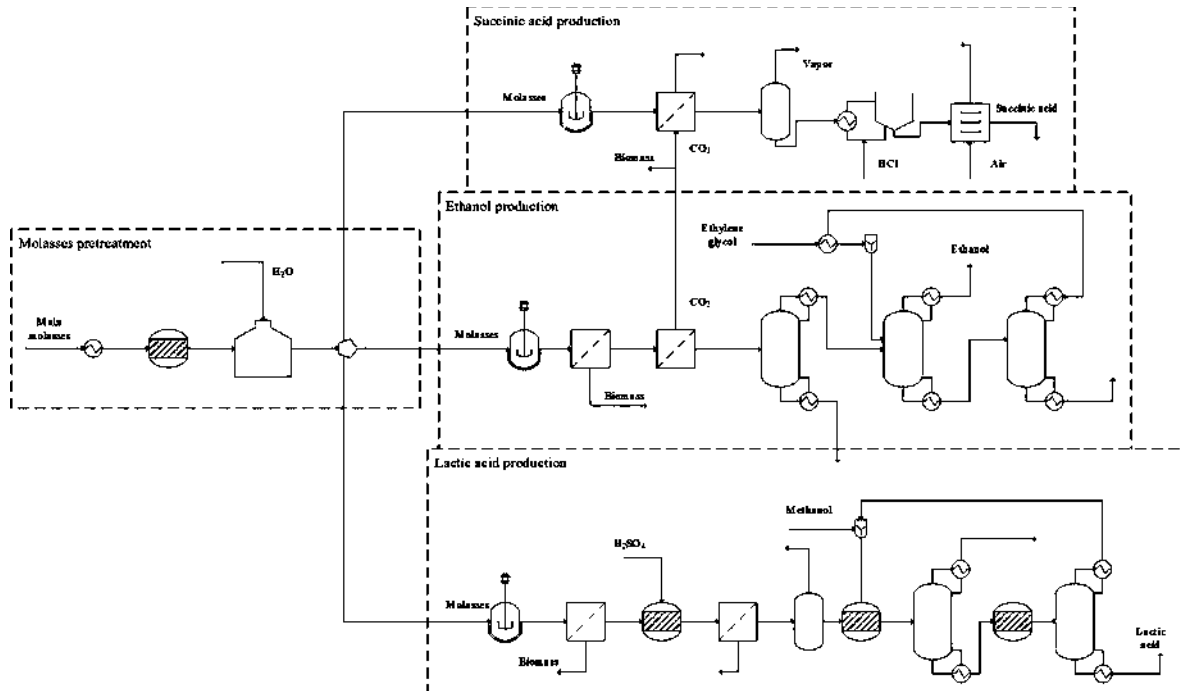


Figura 37. Biorrefinería general basada en melazas de caña de azúcar.

En promedio, las zafas de los tres ingenios azucareros que operan en el estado, tienen una producción de 55, 000 toneladas de melazas durante el periodo de procesamiento de la caña de azúcar.

Los ocho escenarios propuestos y sus distribuciones de flujos de melazas para cada línea de proceso se muestran en la Figura 38.

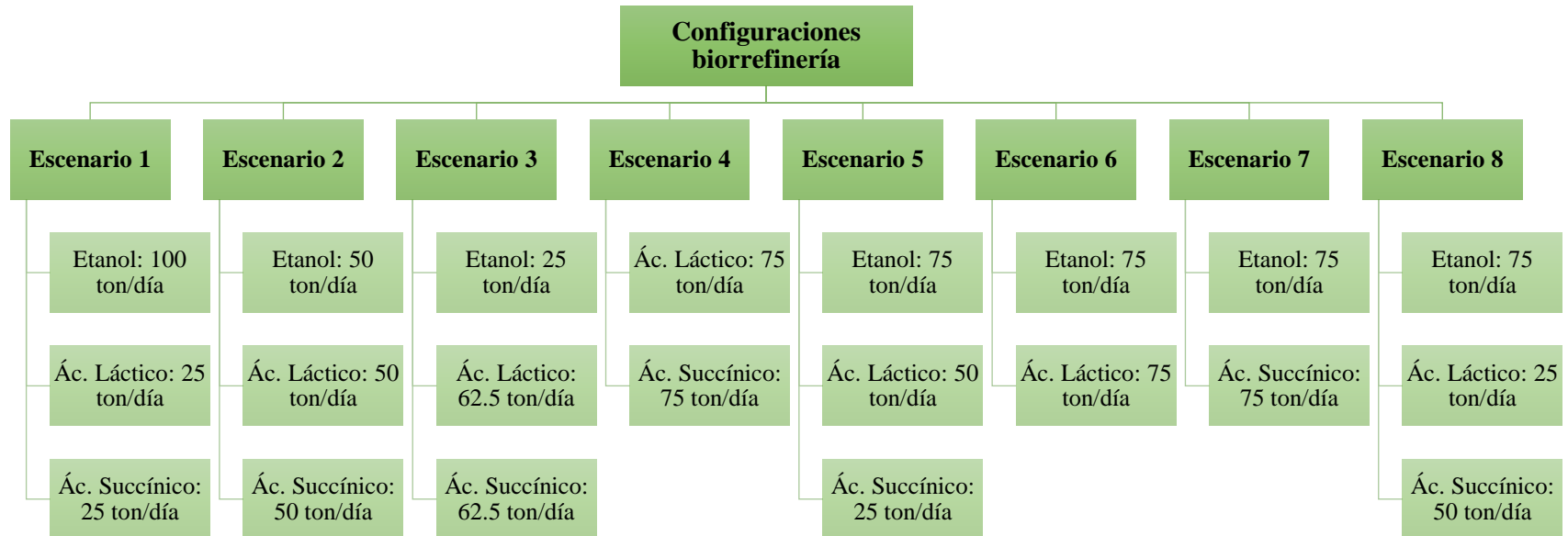


Figura 38. Configuraciones propuestas de las biorrefinerías con base en la producción de melazas del estado de Michoacán.

El análisis económico previamente realizado a través de APEA, demuestra que los escenarios número 3 y 4 son los que tienen una rentabilidad más elevada debido a su alto volumen de producción de ácido láctico (producto de alto valor agregado). El proceso de ácido succínico, a pesar de ser un producto de mayor precio que el etanol y ácido láctico, es restringido en su producción de altos volúmenes debido a la mezcla ternaria de ácidos producidos en la etapa de fermentación.

El análisis ambiental se efectuó a través del software WAR, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Este software estima el impacto ambiental potencial (PEI), basándose en la premisa del daño que ocasionarían las sustancias involucradas en los procesos si son liberadas al ambiente. El PEI se divide en 8 categorías de impacto: Potencial de Toxicidad Humana por Ingestión (HTPI), Potencial de Toxicidad Humana por Exposición Dérmica (HTPE), Potencial de Toxicidad Terrestre (TTP), Potencial de Toxicidad Acuática (ATP), Potencial de Calentamiento Global (GWP), Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP), Potencial de Oxidación Fotoquímica (PCOP) y Potencial de Acidificación (AP).

El impacto de cada categoría se establece de acuerdo a la contribución de cada componente presente en los procesos de producción, basado en los balances de masa y energía correspondientes. La suma de todos los impactos es el PEI; “el efecto que tendría un componente químico si simplemente fuera emitido hacia el ambiente”.

8.6.1. Análisis impacto ambiental producción de etanol a partir de melazas

En la Figura 39 se muestra el impacto ambiental potencial, PEI por sus siglas en inglés (Potential Environmental Impact), de la producción de etanol a partir de melazas de caña de azúcar, asumiendo que solamente este producto sea generado a partir de distintas escalas.

Se observa que el impacto ambiental aumenta conforme el incremento en la escala del proceso. Lo anterior se atribuye a la necesidad de incrementar los volúmenes de insumos y sustancias químicas requeridas por el proceso de producción.

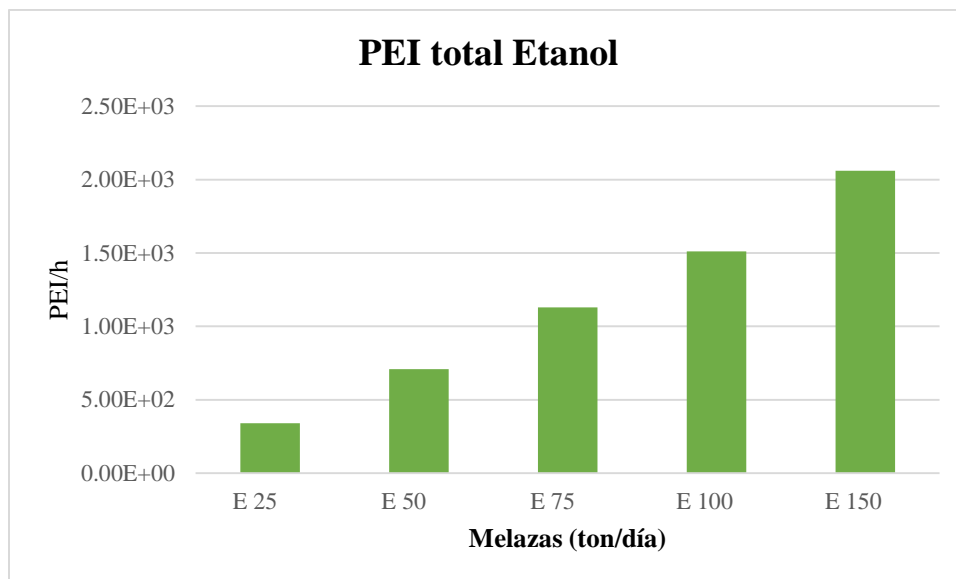


Figura 39. Impactos ambientales totales en la producción de etanol a diferentes escalas.

En la Figura 40 se muestran los impactos ambientales atribuidos a cada categoría cuantificada por el algoritmo WAR. Se observa que las categorías de Potencial por Calentamiento Global (GWP), Potencial de Oxidación Fotoquímica (PCOP) y Potencial por Acidificación (AP) son los más significativos.

Al igual que los impactos ambientales totales, los impactos individuales aumentan proporcionalmente con la escala del proceso y se tornan más severos debido a los requerimientos de insumos y a la generación de residuos. En el caso del Potencial por Calentamiento Global, la fermentación alcohólica genera dióxido de carbono (gas que contribuye en mayor medida a la concentración de gases de efecto invernadero), el cual no es aprovechado por ningún otro proceso de producción y es liberado al ambiente.

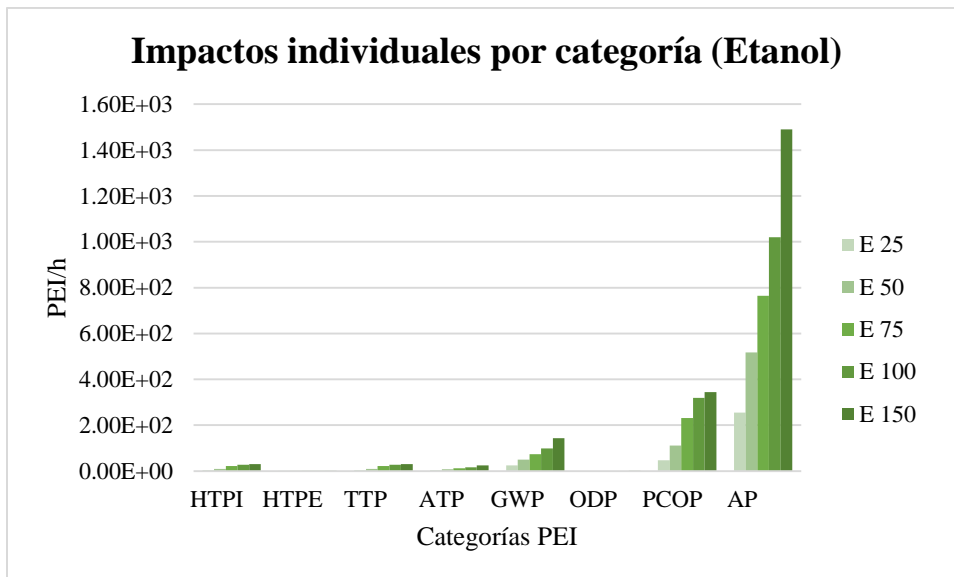


Figura 40. Impactos ambientales individuales de la producción de etanol.

La Figura 41 es una comparación entre los impactos ambientales potenciales asignados al proceso y a los impactos ambientales potenciales atribuidos a la energía requerida para los procesos de producción. Como se indica, los impactos ambientales requeridos por el proceso son mayores a los generados por los requerimientos energéticos.

Es pertinente realizar una integración energética del proceso de producción de etanol para reducir estos impactos.

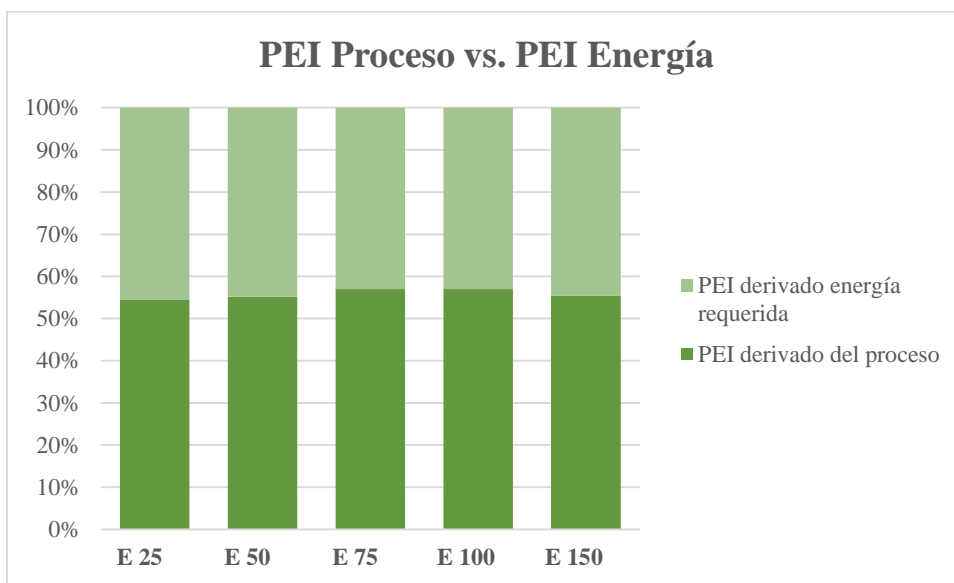


Figura 41. Comparativa de los impactos asociados por el proceso y por la energía requerida para la producción de etanol.

8.6.2. Análisis impacto ambiental producción de ácido láctico a partir de melazas

En la Figura 42 se muestra el PEI del proceso de producción de ácido láctico utilizando todas las melazas disponibles en el estado Michoacán. De manera similar al caso del etanol, los PEI del ácido láctico aumentan proporcionalmente con la escala del proceso.

Los impactos ambientales aumentan en promedio un 60% conforme la escala aumenta en incrementos de 25 toneladas de melazas por día procesadas.

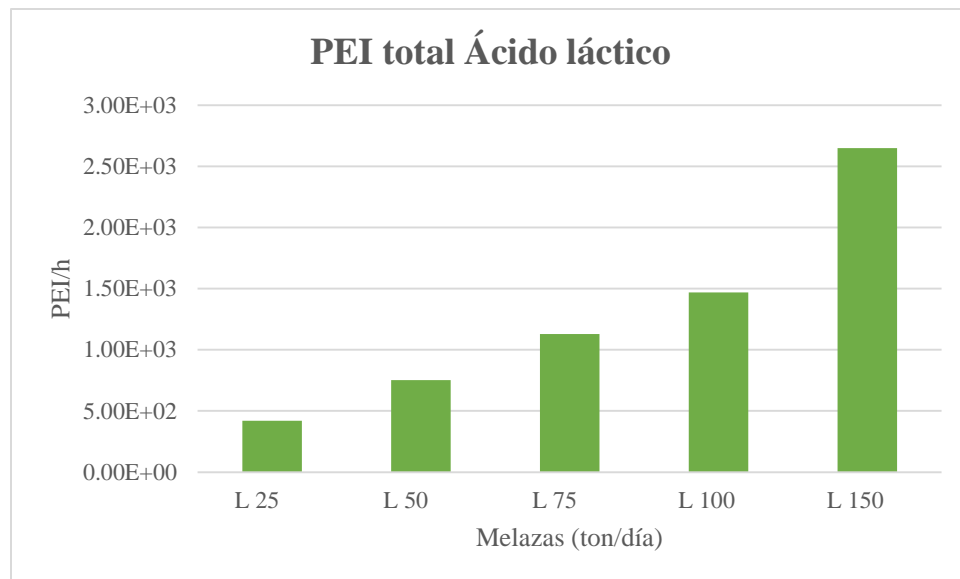


Figura 42. Impactos ambientales totales en la producción de ácido láctico.

Los impactos individuales de los PEI para el ácido láctico se muestran en la Figura 43. Los impactos más significativos son los correspondientes al GWP y AP, con un leve aumento en la escala más grande para el Potencial de Toxicidad Humana por Ingestión (HTPI) y el Potencial de Toxicidad Terrestre (TTP).

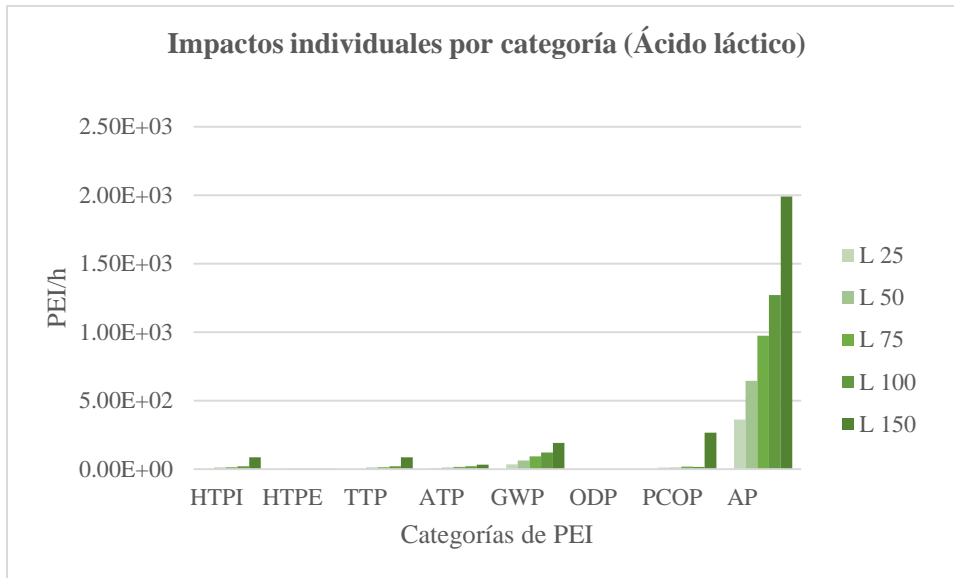


Figura 43. Impactos ambientales individuales en la producción de ácido láctico.

En la Figura 44 se observa la comparación entre los impactos generados por el proceso y los impactos generados por la energía requerida por el proceso. El porcentaje de repercusión de los dos ámbitos es muy similar; es decir, el 50% de los PEI provienen del proceso de transformación y el otro 50% se deriva del impacto producido por la energía que requieren los procesos.

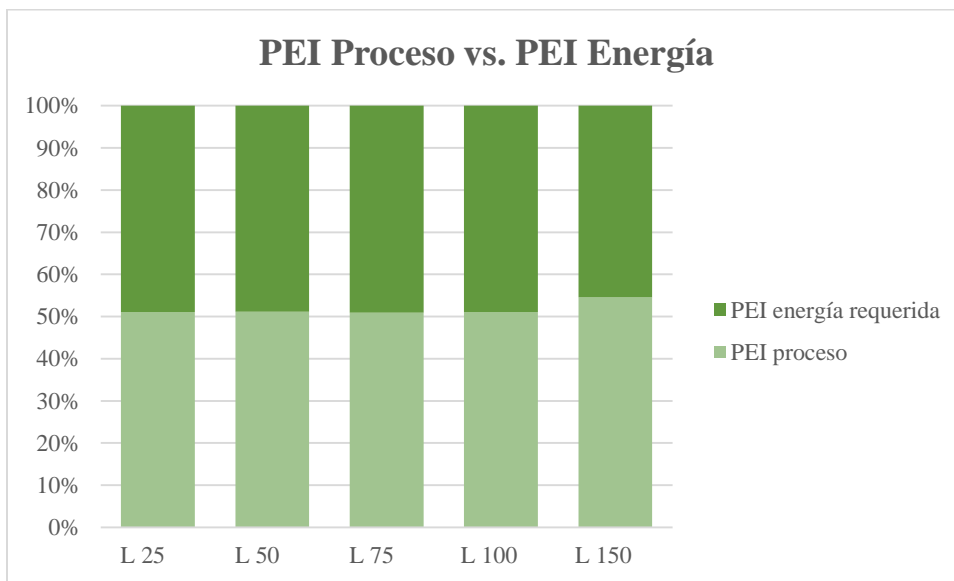


Figura 44. Comparativa de impactos ambientales por proceso contra impactos ambientales por requerimientos energéticos.

8.6.3. Análisis impacto ambiental producción de ácido succínico a partir de melazas

Los PEI de la producción de ácido succínico se muestran en la Figura 45. Estos escenarios de producción se efectuaron bajo la premisa de solo producir este ácido a partir de las melazas sin tomar en cuenta el concepto de biorrefinerías.

A diferencia de la producción de etanol y ácido láctico, el proceso de ácido succínico es levemente más benévolo ambientalmente hablando. Esto consecuencia de que se trata de un proceso más simplificado y con menos etapas de producción y purificación comparado con los anteriores.

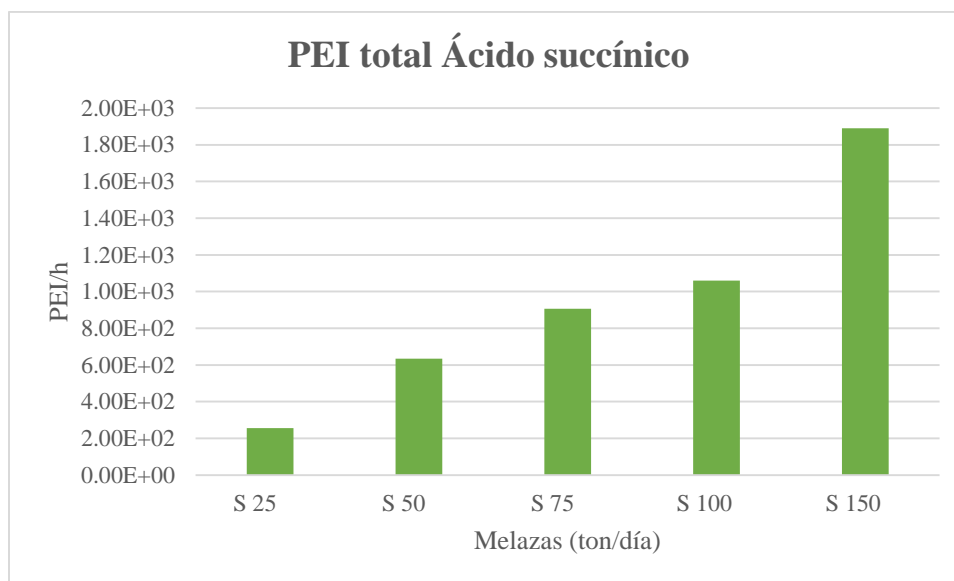


Figura 45. Impactos ambientales totales en la producción de ácido succínico.

Por otro lado, en la Figura 46 se muestran los impactos individuales en las diferentes categorías de PEI. Como se observa, en casi todas las categorías hay una repercusión conforme la escala aumenta. La producción de ácido succínico requiere de un co-sustrato como el CO₂ para la etapa de fermentación (gas de efecto invernadero). Así mismo, el ácido succínico se forma como producto de una mezcla de tres ácidos: ácido fórmico y ácido acético, de alta toxicidad humana y toxicidad terrestre.

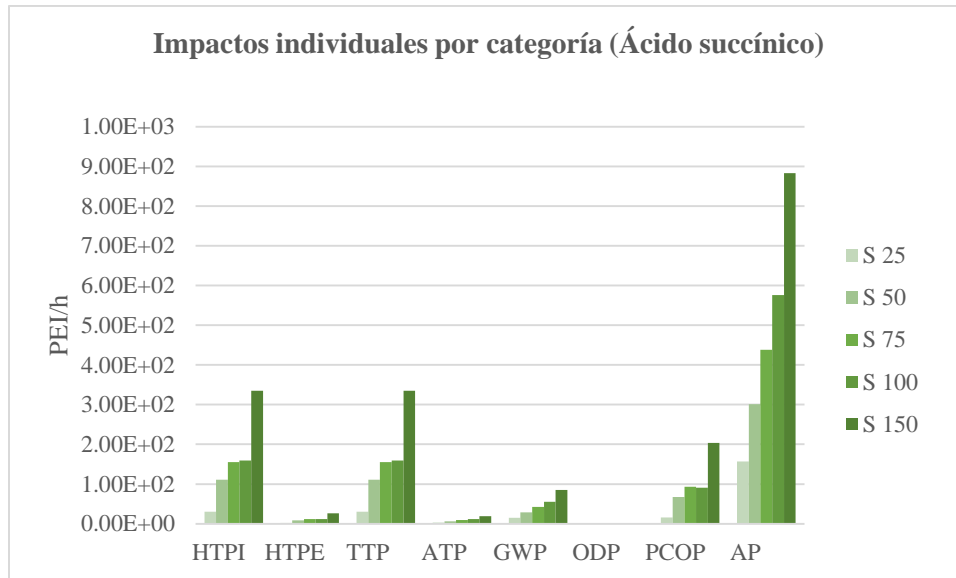


Figura 46. Impactos ambientales individuales en la producción de ácido succínico.

La comparativa de los PEI del proceso y los PEI de la energía requerida tiene un comportamiento similar a los procesos de etanol y ácido láctico, esto se muestra en la Figura 47.

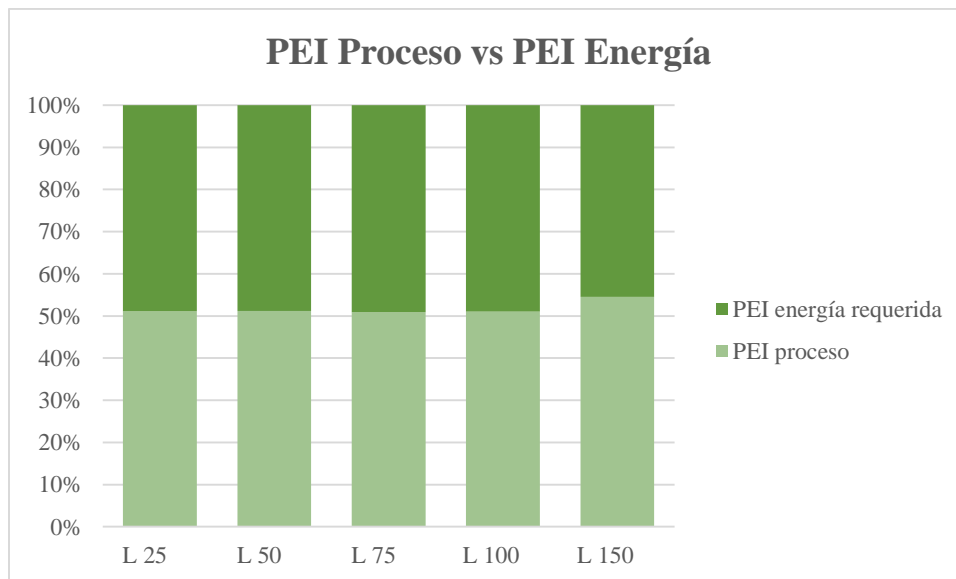


Figura 47. Comparación de impactos ambientales por proceso contra impactos ambientales por energía requerida.

8.6.4. Comparativo del PEI entre procesos individuales ajustados a la escala final de la biorrefinería

Una vez analizados los procesos que conformarán las biorrefinerías, se realiza un comparativo de la escala final fijada para cada escenario propuesto. La escala de todas las biorrefinerías es de 150 toneladas por día de melazas, que será distribuida de manera arbitraria a través de los distintos escenarios.

En la Figura 48, se muestra como producir ácido láctico a partir de todas las melazas disponibles tiene un impacto ambiental mayor en comparación del etanol y el ácido succínico.

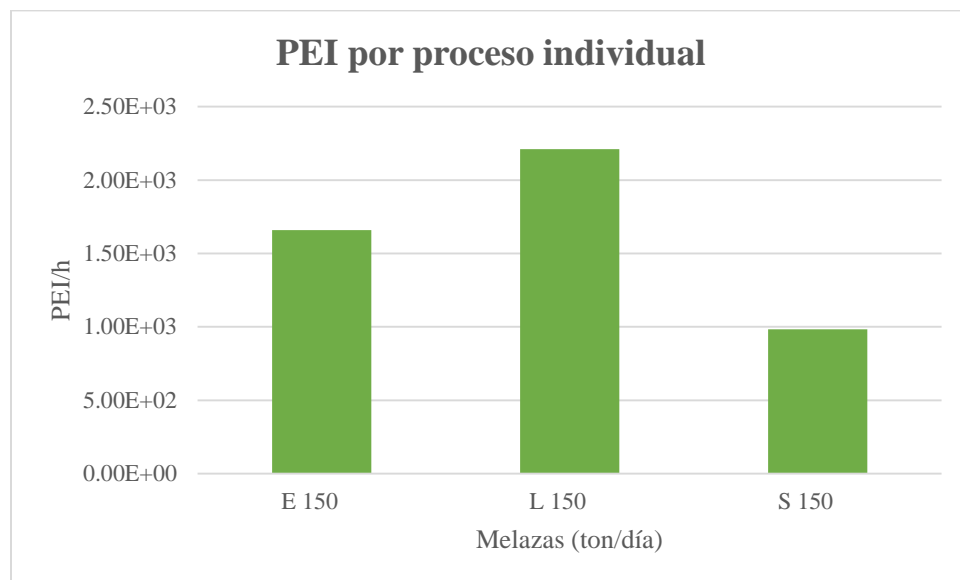


Figura 48. PEI de procesos individuales a la máxima escala considerada.

8.7. Análisis integral de las biorrefinerías de etanol, ácido láctico y ácido succínico

Ahora bien, si se integran los tres procesos de producción individuales en una sola configuración, con la única modificación de atribuir más o menos melazas (según sea el caso) a cada proceso de producción, se obtiene un análisis ambiental como el de la Figura 49.

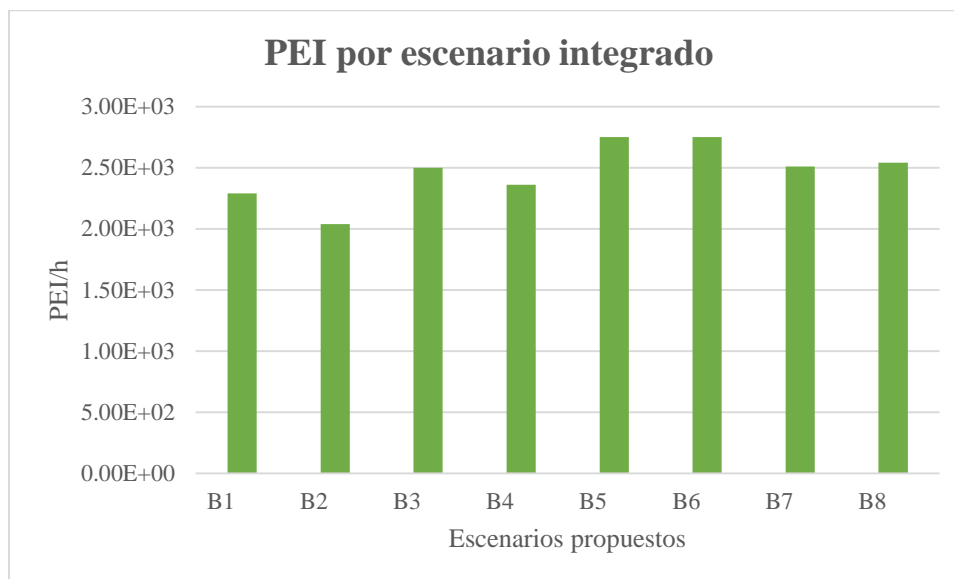


Figura 49. PEI por biorrefinería propuesta.

Las configuraciones con menor impacto ambiental negativo son las biorrefinerías 1 y 2. Los escenarios de producción 5 y 6 son los de mayor impacto ambiental.

Las biorrefinerías donde el ácido láctico o el etanol se producen en mayor volumen, o donde se asignan mayor cantidad de melazas a estos procesos, son aquellas configuraciones de mayor impacto negativo.

En la Figura 50, se muestran los impactos individuales por cada biorrefinería propuesta. El impacto por Potencial de Acidificación (AP) es bastante evidente, debido al potencial de contaminación por parte de los ácidos producidos y de los insumos requeridos.

El caso particular del Potencial de Calentamiento Global (GWP) se observa que si se favorece la producción en mayor escala de ácido succínico y de etanol, puede omitirse o reducirse en gran medida la liberación de gases de efecto invernadero (CO_2).

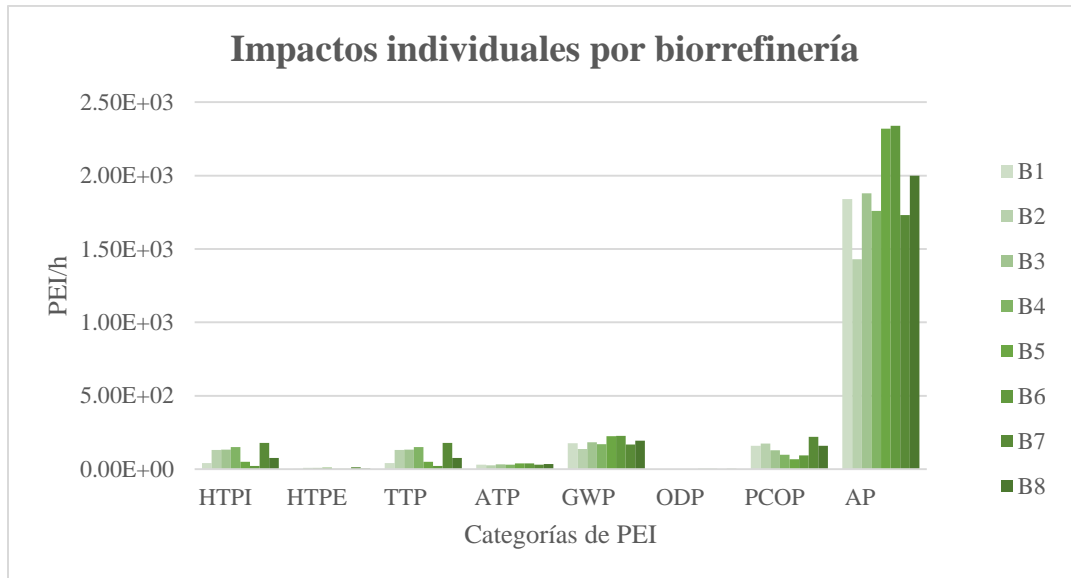


Figura 50. Impactos ambientales por categoría de cada biorrefinería propuesta.

Si se integran los tres procesos en el concepto de biorrefinería se obtiene una reducción de los PEI correspondientes a la energía requerida en los procesos de producción. A diferencia de los procesos individuales, menos del 50% (en la mayoría de los escenarios propuestos) de los PEI provienen de cuestiones derivadas de los requerimientos energéticos.

Por otro lado, los PEI del proceso se incrementan debido a los diferentes insumos y sustancias químicas requeridas como consecuencia de la diversificación de la producción, tal como se muestra en la Figura 51.

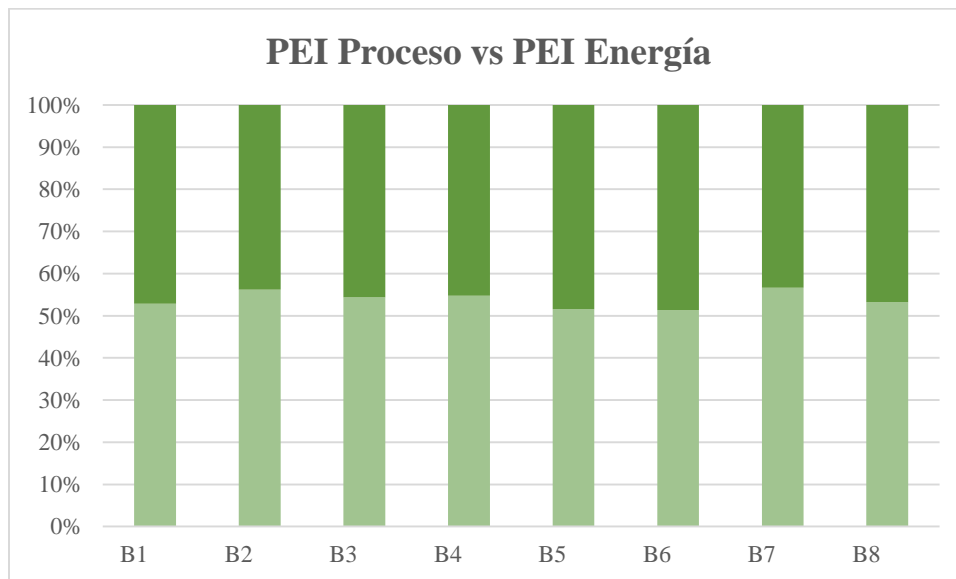


Figura 51. Comparación de impactos ambientales por proceso integrado

A pesar de que los PEI de la mayoría de las biorrefinerías son ligeramente mayores que los PEI de los procesos individuales a la máxima escala, se encuentran algunas ventajas en la reducción de PEI por concepto de energía al efectuar la integración. A su vez la producción se diversifica y no queda limitada a la oferta de un solo producto.

En la Tabla 11 se muestra una comparación del impacto ambiental potencial de las biorrefinerías analizadas y de la utilidad neta generada por cada una de éstas.

Tabla 11. Impacto ambiental generado y utilidad neta para cada biorrefinería.

Caso	Impacto Ambiental (PEI)	Utilidad Neta (USD)
Biorrefinería 1	2290	2434867.14
Biorrefinería 2	2040	-5494288.2
Biorrefinería 3	2500	3785407.99
Biorrefinería 4	2360	6660300.37
Biorrefinería 5	2750	886901.45
Biorrefinería 6	2750	3227047.99
Biorrefinería 7	2510	-4483852.26
Biorrefinería 8	2540	2681530.88

De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, no hay una correlación directa entre la utilidad neta generada positiva con un impacto ambiental negativo y viceversa. El peor escenario en el aspecto económico es el escenario con mejor impacto ambiental generado (B2). Los escenarios con el PEI más alto es el B5 y el B6, sin embargo los dos tienen utilidades positivas.

El escenario número 4 se mantiene como el mejor escenario; no obstante, en esta configuración solo se toma en cuenta la producción de ácidos orgánicos dejando de lado la producción de biocombustibles.

En la Figura 52 se muestra la factibilidad técnica y la factibilidad económica de los 8 escenarios propuestos para biorrefinerías basadas en melazas. Los únicos dos escenarios que no cumplen o no alcanzan la factibilidad económica son los escenarios 2 y 7. Por otro lado, el mejor escenario es el número 4, ya que con esta configuración se obtiene la mayor utilidad neta en comparación con las demás propuestas.

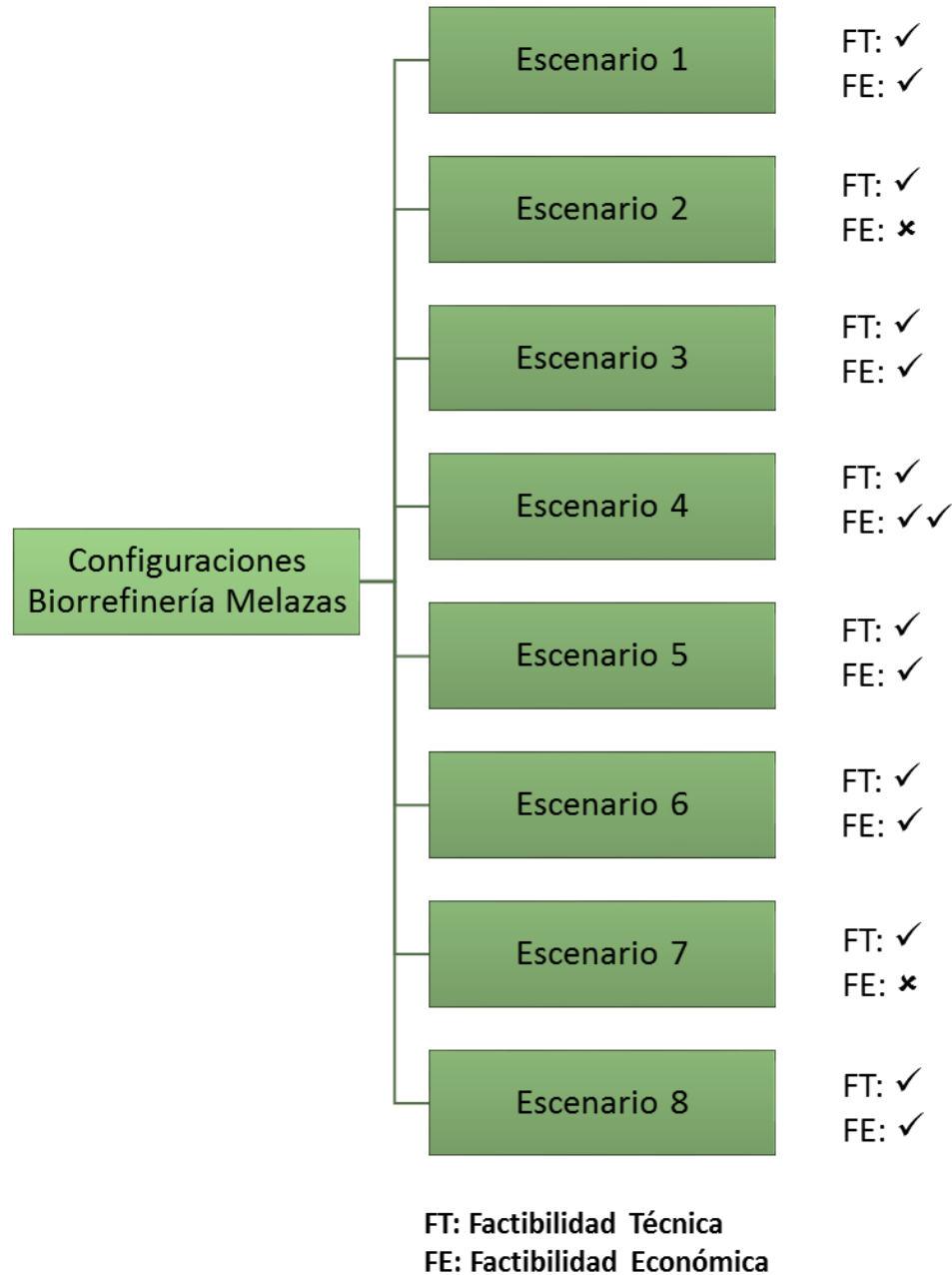


Figura 52. Factibilidad técnica y económica de las configuraciones propuestas.

9. Conclusiones generales

En este trabajo de investigación, mediante un software de simulación de procesos (Aspen Plus), se diseñaron diferentes escenarios de producción de biocombustibles y bioproductos a partir de la melaza de caña de azúcar. Así mismo, se determinó la factibilidad técnica, económica y ambiental de los ocho escenarios propuestos.

Las eficiencias de cada una de las biorrefinerías simuladas, para los productos etanol y ácido láctico, se encuentran acorde a las referencias revisadas. Sin embargo, la eficiencia de la producción de ácido succínico es baja debido a la producción de otros dos ácidos en la etapa de fermentación. No obstante, la obtención de ácido succínico, ácido fórmico y ácido acético cuenta con el potencial de diversificar la oferta de productos ofrecidos por la biorrefinería de melazas.

A través del software utilizado, es posible elegir cuales de los escenarios analizados representa la mejor versión de biorrefinería. El desempeño por proceso para cada escenario es analizado a continuación:

- Etanol: Solo en el escenario 1, donde se destinan más melazas a la producción de etanol, el análisis económico de este proceso presenta resultados positivos de factibilidad económica. El escenario 2 presenta un desempeño menor comparado con los dos escenarios propuestos. El escenario 3, a pesar de solo destinarse un 16% de la producción total de melazas, se obtiene resultados relativamente aceptables ya que los costos de operación, materias primas y de inversión total disminuyen considerablemente.
- Ácido láctico: En los cuatros escenarios de biorrefinería, la producción de ácido es la más rentable a pesar de ser el proceso más caro. El mejor escenario es número 4 ya que se asigna la mitad de las melazas producidas a este proceso. El peor escenario es el número 1, donde se produce menos ácido láctico y por lo tanto las ventas por producto son menores en comparación de los demás escenarios. La producción de ácido láctico puede ser considerada como el pilar de la biorrefinería ya que aporta en gran medida al ámbito económico. Una de las desventajas de esta línea de proceso es la cantidad de residuos y de insumos que se requieren para su purificación.

- **Ácido succínico:** En todos los escenarios, la producción de ácido succínico alcanza resultados favorables en el aspecto económico. El escenario con los mejores indicadores económicos es el número 4. El peor escenario es el 8, ya que la producción de ácido succínico es insuficiente para garantizar la rentabilidad de esta configuración.

El análisis ambiental efectuado para cada uno de los escenarios propuestos es parte clave para seleccionar las mejores configuraciones. La demanda de energía por los procesos de purificación es la parte que contribuye en mayor proporción al impacto ambiental negativo. Esto podría reducirse a través del diseño y simulación de etapas de purificación con mejores rendimientos y menos emisión de residuos contaminantes.

Por otro lado, las configuraciones propuestas y elegidas de acuerdo a los mejores parámetros de desempeño tienen el potencial de trasladarse al caso elegido de dos maneras: 1) Integrándose la configuración de las etapas propuestas al ingenio azucarero, en su línea final de operación, o 2) Diseñando una planta completamente nueva, tomando en cuenta otras variables de ingeniería de proyectos de plantas como son: ubicación, logística de transporte, escalamiento, capacidad de la planta, distribución final de los productos, entre otros.

Finalmente, este trabajo de investigación es susceptible a ser optimizado y aumentado en varias de las líneas exploradas. Además es importante resaltar la necesidad de analizar procesos de purificación innovadores, donde se reduzcan costos operacionales, ya que de acuerdo a los resultados mostrados y discutidos estas etapas son las de mayor consumo energético, y por lo tanto las de mayor costo.

10. Referencias

1. Aguilar-Rivera, N., Rodríguez L., D. A., Enríquez R., V., Castillo M., A., & Herrera S., A. (2012). The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends. *Sugar Tech.* <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0151-3>
2. Aguilar, N., Rodríguez, D., Castillo, A., & Herrera, A. (2012). Sucroquímica , alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias*, *12*(1), 7–15.
3. Arni, S., Molinari, F., Del, B. M., & Converti, A. (1999). Improvement of alcohol fermentation of a corn starch hydrolyzate by viscosity-raising additives. *Starch/Staerke*, *51*(6), 218–224. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-379X\(199906\)51:6<218::AID-STAR218>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(199906)51:6<218::AID-STAR218>3.0.CO;2-7)
4. Aspen Technology, I. . (2000). Aspen Plus ® User Guide. *Aspen Technology, Inc.*, 936.
5. Avantium, J., & Jungmeier, G. (2015). *Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries* *Biore nery Concepts in Comparison to Petrochemical Re neries*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00001-X>
6. Borodina, I., & Nielsen, J. (2014). Advances in metabolic engineering of yeast *Saccharomyces cerevisiae* for production of chemicals. *Biotechnology Journal*, *9*(5), 609–620. <https://doi.org/10.1002/biot.201300445>
7. Bozell, J. J., & Petersen, G. R. (2010). Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. *Green Chemistry*, *12*(4), 539. <https://doi.org/10.1039/b922014c>
8. Brandam, C., Castro-Martínez, C., Délia, M.-L., Ramón-Portugal, F., & Strehaiano, P. (2008). Effect of temperature on *Brettanomyces bruxellensis* : metabolic and kinetic aspects. *Canadian Journal of Microbiology*, *54*(1), 11–18. <https://doi.org/10.1139/W07-126>
9. Cañeros, U. N. De, Cnpr, A. C., Por, P., Caña, T. D. E., Brix, M. A., & Fab, A. A. (2016). Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR, 0–1.

10. Castañeda-ayarza, J. A., Augusto, L., & Cortez, B. (2017). Final and B molasses for fuel ethanol production and some market implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(March 2015), 1059–1065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.010>
11. CONADESUCA. (2017). Retrieved from www.siiba.conadesuca.gob.mx/informa/
12. FAOSTAT. (2016). FAOSTAT. *FAOSTAT*.
13. Ferna, C. L. (2012). Use of sugarcane molasses “ B ” as an alternative for ethanol production with wild-type yeast *Saccharomyces cerevisiae* ITV-01 at high sugar concentrations, 605–614. <https://doi.org/10.1007/s00449-011-0633-9>
14. Jacques, K. A., T.P. Lyons, & Kelsall, D. R. (2003). *The Alcohol Textbook: A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. Text* (Vol. 3). [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)89840-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)89840-2)
15. Lee, H. (2015). *DEVELOPMENT OF LACTIC AND SUCCINIC ACID BIOREFINERY CONFIGURATIONS FOR INTEGRATION INTO A THERMOMECHANICAL PULP MILL*.
16. Linko, M. H. Y. (1996). ORIGINAL PAPER Effect of temperature and various nitrogen sources on L (#) -lactic acid production by *Lactobacillus casei*, 307–313.
17. Mandegari, M. A., Farzad, S., van Rensburg, E., & Görgens, J. F. (2017). Multi-criteria analysis of a biorefinery for co-production of lactic acid and ethanol from sugarcane lignocellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.1801>
18. Merwe, A. B. Van Der, Cheng, H., Görgens, J. F., & Knoetze, J. H. (2013). Comparison of energy efficiency and economics of process designs for biobutanol production from sugarcane molasses. *Fuel*, 105, 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.058>
19. Moncada, J., El-halwagi, M. M., & Cardona, C. A. (2013). Bioresource Technology Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery : Colombian case. *Bioresource Technology*, 135, 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>
20. Ortiz-mu, B., Torrestiana-sanchez, B., & Aguilar-uscanga, M. G. (2010). Kinetic study on ethanol production using *Saccharomyces cerevisiae* ITV-01 yeast isolated from sugar cane molasses ~ a Octavio Carvajal-Zarrabal , b, (February), 1361–1367.

- <https://doi.org/10.1002/jctb.2441>
21. Pelayo-ortiz, C., & Corona-gonza, R. I. (2008). Kinetic study of succinic acid production by *Actinobacillus succinogenes* ZT-130, *43*, 1047–1053. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.05.011>
 22. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Plant Design and Economics for Chemical Engineers.*
 23. Quintero, J. A., Moncada, J., & Cardona, C. A. (2013). Bioresource Technology Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia : A process simulation approach. *Bioresource Technology*, *139*, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.048>
 24. Rendon-sagardi, M. A., Sanchez-ramirez, C., Cortes-robles, G., Alor-hernandez, G., & Cedillo-campos, M. G. (2014). Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. *Applied Energy*, *123*, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.023>
 25. Rodrigues, G., Rampon, D. S., & Pereira, L. (2017). Applied Catalysis A , General Production of 5- (hydroxymethyl) -furfural from water-soluble carbohydrates and sugarcane molasses. *Applied Catalysis A, General*, *545*(July), 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.07.049>
 26. SAGARPA. (2016). NOTA INFORMATIVA Noviembre 2016.
 27. Sánchez, Ó. J., & Group, F. (2010). *PROCESS SYNTHESIS FOR FUEL ETHANOL PRODUCTION.*
 28. Senties-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., Valdez-Balero, A., Victoria Silva-Rojas, H., & Trejo-Téllez, L. I. (2014). The Agro-Industrial Sugarcane System in Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science*, *6*(4). <https://doi.org/10.5539/jas.v6n4p26>
 29. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. (2017). Retrieved from <http://www.economia-sniim.gob.mx/2010prueba/IngredientesMes.asp>
 30. Tan, K. T., Ñ, K. T. L., & Mohamed, A. R. (2008). Role of energy policy in renewable energy accomplishment : The case of second-generation bioethanol, *36*, 3360–3365. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.016>
 31. van der Merwe, A. B. (2010). Evaluation of Different Process Designs for Biobutanol

Production from Sugarcane Molasses, (March), 159.

32. Vargas Santillán, A., Farias Sanchez, J. C., Pineda Pimentel, M. G., & Castro Montoya, A. J. (2016). Olefins and Ethanol from Polyolefins: Analysis of Potential Chemical Recycling of Poly(ethylene) Mexican Case. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 14(6). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2015-0217>
33. Werpy, T., & Petersen, G. (2004). *Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I— Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. *Top Value Added Chemicals From Biomass Volume I: Results of Screening for Potential Candidates. Other Information: PBD: 1 Aug 2004.* <https://doi.org/10.2172/15008859>

