

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad



ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE UNA BIORREFINERÍA AVANZADA PARA LA REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS DE LA ZMG A TRAVÉS DE UN ESQUEMA DESIGN FOR SIX SIGMA (DFSS)

**TESIS para obtener el GRADO de
MAESTRO EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD**

Presenta: **I.Q. PABLOS HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

Director **DR. ÓSCAR ARIEL ROJAS REJÓN**

Asesor **DR. VÍCTOR SEVILLA GÜITRÓN**

Tlaquepaque, Jalisco. 8 de diciembre de 2023.

Tabla de contenidos

Resumen.....	22
Abstract	24
CAPÍTULO I: ETAPA DE DEFINICIÓN	27
1. Fundamentación del trabajo	27
1.1. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación	27
1.2. Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio	34
1.2.1. Entorno del objeto de estudio	34
1.2.2. Validación y alcance de las condiciones del escenario	43
1.3. Objetivos de la investigación	47
1.3.1. Objetivo general	47
1.3.2. Objetivos particulares	48
1.4. Relevancia y pertinencia del trabajo	48
1.5. Cronograma de trabajo.....	52
1.6. Conclusión del capítulo	53
CAPÍTULO II: ESTADO DE ARTE	54
2. Marco conceptual de referencia	54
2.1. Estado de la cuestión	54
2.1.1. Análisis de ciclo de vida mediante la implementación de sistemas ISO	54
2.1.2. Sistemas de calidad relacionados con plataformas de biorrefinación: revisión de literatura	62
2.1.3. Diseño de procesos a través de <i>Design For Six Sigma (DFSS)</i>	68
CAPÍTULO III: ETAPA DE MEDICIÓN	74
3. Marco metodológico de referencia	74
3.1. Análisis de referencia: primera hipótesis	74
3.2. Definición de línea base y estrategia de investigación	75

3.2.1.	Validación del sistema de medición.....	76
3.2.2.	Tamaño de planta	80
3.2.3.	Descripción de los procesos involucrados y mapeo de la cadena de valor (VSM) 86	
3.3.	Metas de información.....	89
3.3.1.	Creación del diseño conceptual	90
3.3.2.	Metodología del Análisis Tecno-económico	94
3.3.3.	Valor Presente Neto (VPN).....	98
3.3.4.	El concepto de sostenibilidad y el método de análisis de proceso (MAP)	101
3.3.5.	Análisis y ponderación de indicadores.....	103
3.4.	Conclusiones del capítulo	108
CAPÍTULO IV: ETAPA DE ANÁLISIS y DISEÑAR		109
4.	Estrategia de investigación	109
4.1.	Diseño conceptual y análisis bidimensional del esquema BIORREF 1	110
4.1.1.	Descripción del esquema BIORREF 1	110
4.1.2.	Análisis tecno-económico del escenario BIORREF 1	116
4.1.3.	Análisis de indicadores económicos y ambientales para el escenario BIORREF 1 120	
4.2.	Diseño conceptual y análisis bidimensional del esquema BIORREF 2	125
4.2.1.	Descripción del esquema BIORREF 2	125
4.2.2.	Análisis tecno-económico del escenario BIORREF 2	134
4.2.3.	Análisis de indicadores económicos y ambientales para el escenario BIORREF 2 144	
4.3.	Conclusiones del capítulo	147
CAPÍTULO V: Conclusiones y trabajo a futuro		148
5.	Conclusiones generales	148
5.1.	Aspectos de mejora para futuras investigaciones	150
5.2.	Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación.....	151
6.	Productos académicos generados	153

7. Bibliografía	154
8. APÉNDICES	182
8.1. APÉNDICE A: Detalles del esquema BIORREF 1 y BIORREF 2	182
8.1.1. Etapa de preconcentración	183
8.1.2. Etapa Plataforma <i>S. boulardii</i>	183
8.1.3. Etapa de hidrólisis proteica	185
8.1.4. Etapa Plataforma <i>L. plantarum</i>	185
8.1.5. Etapa de PTAR (sólo para BIORREF 1)	187
8.1.6. Etapa de fermentación oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)	188
8.1.7. Etapa de captura de CO ₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)	190
8.1.8. Etapa de cogeneración (sólo para BIORREF 2)	190
8.2. APÉNDICE B: Detalles del cálculo del esquema BIORREF 1 para una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC	192
8.3. APÉNDICE C: Detalles del cálculo del esquema BIORREF 2 para una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC	197
8.4. Apéndice D: Diagramas de proceso en SPD para BIORREF 1 y BIORREF 2	203
8.4.1. Diagrama de proceso de la etapa preconcentración (BIORREF 1 y BIORREF 2)	203
8.4.2. Diagrama de proceso de la etapa Plataforma <i>S. boulardii</i> (BIORREF 1 y BIORREF 2)	204
8.4.3. Diagrama de proceso de la etapa Hidrólisis Proteica (BIORREF 1 y BIORREF 2)	204
8.4.4. Diagrama de proceso de la etapa Plataforma <i>L. plantarum</i>	205
8.4.5. Diagrama de proceso de la etapa PTAR (sólo para BIORREF 1)	205
8.4.6. Diagrama de proceso de la etapa Fermentación Oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)	206
8.4.7. Diagrama de proceso de la etapa Captura de CO ₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)	206
8.4.8. Diagrama de proceso de la etapa Cogeneración (sólo para BIORREF 2)	207

LISTA DE TABLAS

Tabla i Estrategias F-D y A-D para el desarrollo del modelo de biorrefinerías en México	33
Tabla ii Estrategias F-O y A-O para el desarrollo del modelo de biorrefinerías en México	34
Tabla iii Producción industrial de diferentes tipos de queso (en miles de toneladas) durante el periodo 2010-2021. Adaptado de CANILEC (2021)	40
Tabla iv Acta constitutiva del proyecto de investigación	50
Tabla v Terminología común empleada en la metodología de evaluación de ciclo de vida de un producto/proceso. Adaptado de Katakjwala y Mohan (2021) y Finkbeiner et. al (2006)	60
Tabla vi Parámetros más frecuentes en la medición de las dimensiones tecno-económica, ambiental y social de una plataforma de biorrefinación. Adaptado de Watanabe et. al (2016)	64
Tabla vii Documentos institucionales en los laboratorios de Ingeniería Química, Ingeniería de Alimentos e Ingeniería en Biotecnología del ITESO	78
Tabla viii Estratificación de la producción anual de LS (millones de litros, periodo 2010-2021) y RMC (miles de toneladas, periodo 2013-2022) en México y Jalisco	80
Tabla ix Elementos de estadística descriptiva en la generación de residuos de tipo LS y RMC para el escenario nacional	81
Tabla x Tamaño de planta propuesto para un escenario nacional y estatal en la revalorización de residuos tales como LS y RMC	84
Tabla xi Matriz de sensibilidad en las condiciones de frontera para LS y RMC del sistema de biorrefinación para el escenario estatal	85

Tabla xii Variables que componen la dimensión de la inversión total de capital (ITC) y contribuciones al costo de producción (CDP). Recuperado de Sevilla-Güitrón (2014), Seider et. al (2009) y Kobe (1958).	96
Tabla xiii Valores de Tasa Mínima Aceptable (MACRR) de retorno de inversión y niveles de riesgo. Adaptado de Bidar y Shahraki (2018)	98
Tabla xiv Parámetros financieros empleados en el análisis tecno-económico en los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2.....	99
Tabla xv Principales costos implicados en la simulación de los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2	101
Tabla xvi Marco de sostenibilidad para los dominios tecno-económico y ambiental	106
Tabla xvii Función dimensional y factores de escalamiento para la conversión de los indicadores del marco de sostenibilidad.....	107
Tabla xviii Valores relevantes en el análisis de flujo de efectivo descontado considerando VPN=0 para el esquema BIORREF 1	118
Tabla xix Valor de los indicadores económicos y ambientales iniciales, homogenizados y su correspondiente porcentaje de contribución para el esquema de producción BIORREF 1	121
Tabla xx Coeficientes de rechazo en las etapas de purificación de ácido láctico (nanofiltración). Recuperado de Arellano (2013), Alexandri et. al (2018) y Davey, Leak y Patterson (2016).....	128
Tabla xxi Características y especificaciones del sistema MEC (celdas de electrólisis microbiana) para el escenario BIORREF 2 (Khan et al., 2017; Beegle y Borole, 2018; Munoz-Cupa et. al, 2021; Ayala, 2022)	130

Tabla xxii Aplicaciones industriales del CO ₂ así como su pureza (%) y presión mínima requerida (Hunt et. al, 2010; Ho, Lizuka y Shibata, 2019).....	133
Tabla xxiii Valores relevantes en el análisis de flujo de efectivo descontado considerando VPN=0 para el esquema BIORREF 1 y BIORREF 2	139
Tabla xxiv Análisis de sensibilidad de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de efluentes para el esquema BIORREF 2	142
Tabla xxv Valor de los indicadores económicos y ambientales iniciales, homogenizados y su correspondiente porcentaje de contribución para el esquema de producción BIORREF 2	144
Tabla xxvi Fracciones de separación para la etapa de preconcentración	183
Tabla xxvii Reacciones y conversiones de la plataforma S. bouldarii	183
Tabla xxviii Fracciones de separación para la etapa Plataforma S. bouldarii	183
Tabla xxix Reacciones y conversiones de hidrólisis proteica	185
Tabla xxx Fracciones de separación para la etapa de Hidrólisis Proteica	185
Tabla xxxi Reacciones y conversiones de la plataforma L. plantarum	185
Tabla xxxii Fracciones de separación para la etapa de Plataforma L. plantarum.....	186
Tabla xxxiii Reacciones y conversiones de la etapa PTAR	187
Tabla xxxiv Fracciones de separación para la etapa PTAR	188
Tabla xxxv Reacciones y conversiones de la etapa fermentación oscura y MEC.....	188
Tabla xxxvi Fracciones de separación para la etapa fermentación oscura y MEC	189
Tabla xxxvii Reacciones y conversiones de la etapa de captura de CO ₂ y MFC	190
Tabla xxxviii Fracciones de separación para la etapa de captura de CO ₂ y MFC.....	190
Tabla xxxix Reacciones y conversiones de la etapa de cogeneración.....	190

Tabla xl Equipos y operaciones unitarias para las etapas del esquema BIORREF 1	192
Tabla xli Cargas térmicas para la integración energética y cálculo de MER para el esquema BIORREF 1	194
Tabla xlii Detalles de la red de intercambiadores de calor y cargas térmicas para el esquema BIORREF 1	195
Tabla xliii Equipos y operaciones unitarias para las etapas del esquema BIORREF 2.....	197
Tabla xliv Cargas térmicas para la integración energética y cálculo de MER para el esquema BIORREF 2	200
Tabla xlv Detalles de la red de intercambiadores de calor y cargas térmicas para el esquema BIORREF 2	201

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Distribución de producción bruta (A) y población ocupada (B) según entidad federativa. Recuperado de Data México (2022).....	36
Gráfico 2 Diagrama de Pareto (priorización) según la distribución de producción bruta (A) y población ocupada en la industria alimentaria (B)	37
Gráfico 3 Valor de ventas de diversas empresas de la industria de los alimentos.....	38
Gráfico 4 Giro y aportación en el Producto Interno Bruto (PIB) de la industria alimentaria. Adaptado de CANILEC (2021).....	39
Gráfico 5 Tendencia en la producción de cerveza en la República Mexicana durante el periodo 2013-2022.....	42
Gráfico 6 Prueba de bondad de ajuste en Minitab para los niveles de producción LS y RMC en un escenario nacional.....	83
Gráfico 7 Representación de variación por causas especiales en la producción de LS y RMC para el escenario nacional.....	86
Gráfico 8 Precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos) a través de distintas capacidades de planta para el escenario BIORREF 1	116
Gráfico 9 Contribuciones al CTP para el esquema BIORREF 1 con una capacidad de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente	117
Gráfico 10 Valor de sostenibilidad global para el escenario BIORREF 1	123
Gráfico 11 Precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos) a través de distintas capacidades de planta para el escenario BIORREF 2.....	134

Gráfico 12 Superficies de respuesta asociadas al precio mínimo de venta para los esquemas BIORREF 1 (A) y BIORREF 2 (B)	135
Gráfico 13 Contribuciones al CTP para el esquema BIORREF 2 con una capacidad de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente	138
Gráfico 14 Superficie (A) y contorno de respuesta (B) para el superávit energético en BIORREF 2	141
Gráfico 15 Análisis de sensibilidad de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de efluentes para el esquema BIORREF 2	143
Gráfico 16 Valor de sostenibilidad global para el escenario BIORREF 2	146
Gráfico 17 Curva compuesta de integración energética para el esquema BIORREF 1	196
Gráfico 18 Curva compuesta de integración energética para el esquema BIORREF 2	202

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Árbol CTQ de la dimensión tecno-económica.....	46
Figura 2 Árbol CTQ de la dimensión ambiental	47
Figura 3 Ejemplo del cronograma de trabajo para las etapas de definición, estado de arte y medición del ciclo DMADV.....	53
Figura 4 Conjunción de tres dominios en un análisis de sostenibilidad.....	58
Figura 5 Cadena de valor de una biorrefinería. Adaptado de Katakojwala y Mohan (2021)	62
Figura 6 La estrategia DFSS en las fases de diseño de un proceso, producto o servicio. Adaptado de Yang y El-Haik (2009).....	69
Figura 7 Diagrama de flujo del proceso de jerarquía analítica en un proyecto DFSS. Adaptado de Bañuelas y Antony (2004).	73
Figura 8 Documentos de calificación/validación para distintos equipos de medición en los laboratorios de IQ, IBT e IA.....	77
Figura 9 Políticas de uso los laboratorios de Química (A), Ingeniería en Alimentos (B) e Ingeniería en Biotecnología (C)	79
Figura 10 Value Stream Mapping (VSM) de estado actual para el sistema de biorrefinación en el esquema BIORREF 1.....	88
Figura 11 Representación gráfica del Método de Análisis de Proceso (MAP). Adaptado de Sánchez et. al (2014)	90
Figura 12 Diagrama de bloques simple de un sistema de biorrefinación. Adaptado de Sevilla-Güitrón (2014)	92

Figura 13 Perspectiva del NREL en el diseño conceptual y análisis tecno-económico de bioprocesos. Adaptado de Ayala (2022)	94
Figura 14 Diagrama de bloque de los esquemas de biorrefinería multietapa-multiproducto para el escenario BIORREF 1	110
Figura 15 Diagrama de Ishikawa de la dimensión de sustentabilidad ambiental para el escenario BIORREF 1	124
Figura 16 Diagrama de bloque de los esquemas de biorrefinería multietapa-multiproducto para el escenario BIORREF 2	126
Figura 17 Diagrama de proceso de la etapa preconcentración (BIORREF 1 y BIORREF 2)	203
Figura 18 Diagrama de proceso de la etapa Plataforma <i>S. boulardii</i> (BIORREF 1 y BIORREF 2)	204
Figura 19 Diagrama de proceso de la etapa Hidrólisis Proteica (BIORREF 1 y BIORREF 2)	204
Figura 20 Diagrama de proceso de la etapa Plataforma <i>L. plantarum</i>	205
Figura 21 Diagrama de proceso de la etapa PTAR (sólo para BIORREF 1)	205
Figura 22 Diagrama de proceso de la etapa Fermentación Oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)	206
Figura 23 Diagrama de proceso de la etapa Captura de CO ₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)	206
Figura 24 Diagrama de proceso de la etapa Cogeneración (sólo para BIORREF 2)	207

“Sus decisiones marcan a México y sus acciones invitan al resto”
- Anónimo

Dedicado a todas las personas que hicieron posible este trabajo

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Gloria y José Bruno. Gracias por acompañarme y ser mi motivación para ser un mejor ingeniero, maestro e hijo, pero sobre todo un mejor ser humano.

A mis hermanos, Bruno y Diego, quienes aportan tiempo, enseñanzas, esfuerzo y que, gracias a ellos, soy lo que soy hasta el día de hoy.

A mis hermanas, Isabella y Melissa, por enseñarme a escuchar y a perder el miedo a equivocarme.

A Gabriela, por apoyarme y amarme de una manera que jamás creí merecer en esta vida.

Al ITESO, por ser mi alma máter y mi segundo hogar. Por creer firmemente en que el mundo no necesita a los mejores del mundo, sino a los mejores para el mundo.

Al Dr. Óscar Rojas, Dr. Víctor Sevilla y Dra. Olga Ayala, quienes fungieron como colegas, maestros, amigos y guías en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros del ITESO que aportaron tiempo, conocimientos y experiencias en los desafíos de este trabajo: Dr. Fernando Hernández, Mtro. Andrés Herrera, Dr. José Pablo Torres, Mtro. Sergio Mañón, Dr. Ignacio Álvarez, Mtro. Carlos Fájér y Dr. Juan Pablo Zatarain.

A las personas especiales en mi vida: Jesús Urbar, Noemí González, Odette Blanco, María José González, Alam Gómez, Marielisa Mendoza y María José Dávalos. Gracias por creer en mi potencial y apoyarme en proyectos personales y profesionales. Gracias por enseñarme a vivir la vida un día a la vez durante las complejidades de la vida. Este logro es tanto suyo como mío.

NOMENCLATURA

°C: Grado centígrado

μ : Media poblacional

2G: Segunda generación

3P: *People, Planet, Profits*

ACV: Análisis de ciclo de vida

ACVS: Análisis de Ciclo de Vida Social

AHP: Proceso de Jerarquía Analítica

BF: Modelo de biorrefinería

BP: Bioproductos

CANILEC: Cámara Nacional de Industriales de la Leche

CCC: Curva compuesta caliente

CCF: Curva compuesta fría

CDI: Costos Directos de Inversión

CDP: Costos de Producción

CEDRSSA: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía
Alimentaria

CEN: *The European Committee for Standardization*

CFI: Costo de Financiamiento

CH₄: Metano

CI: Costos Indirectos

CIATEJ: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco

CINVESTAV: Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

CM: Costos de Manufactura

CMNUCC: Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO₂: Dióxido de carbono

COP: Conferencia por Partes sobre el cambio climático

CT: Capital de Trabajo

CTO: Costo Total

CTP: Costo total de producción

CTQ: Atributos críticos de calidad

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DCFRR: Tasa de Retorno de Flujo de Efectivo Descontado

DDE: Diseño de Experimentos

DFSS: *Design For Six Sigma*

DMADV: Definir, medir, analizar, diseñar y verificar

DPTI: Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

DQO: Demanda química de oxígeno

EMIM: Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FE: Flujo de efectivo

FIFO: *First In First Out*

FODA: Fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades

GEI: Gases Efecto Invernadero

GII: Generadores Internos de Impacto

H0: Hipótesis nula

H1: Hipótesis alternativa

H₂: Hidrógeno gaseoso

He: Helio

HP: Vapor de alta presión

IA: Ingeniería en Alimentos

IB: Ingeniería en Biotecnología

ICF: Inversión de Capital Fijo

ICHEME: Instituto de Ingenieros Químicos

IDI: Investigación, Desarrollo e Innovación

IIEG: Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco

ILCD: *International Reference Life Cycle Data System*

IMP: Impuestos

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IQ: Ingeniería Química

ISO: *International Organization for Standardization*

ITC: Inversión Total de Capital

ITESO: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

k ton: kilotoneladas

Kg/h: kilogramos por hora

kW: kilowatt

L/h: Litros por hora

LP: Vapor de baja presión

LS: Lactosuero

M L: Millones de litros

MAP: Método de Análisis de Proceso

MARR: Tasa Mínima de Retorno Aceptable

MCDM: Análisis de Decisión Multicriterio

MEC: Celdas de Electrólisis Microbiana

MER: *Maximum Energy Recovered*

MFC: Celdas Microbianas de Combustible

MS: Marco de sostenibilidad

NaCl: Cloruro de Sodio

NH₃: Amoniac

NOM: Norma Oficial Mexicana

NREL: *National Renewable Energy Laboratory*

O₂: Oxígeno

OF: Orientaciones Fundamentales

ONG: Organizaciones No Gubernamentales

PAM: Método de Análisis de Proceso

PAP: Proyecto de Aplicación Profesional

PBA: Cromatografía de Intercambio Iónico

PBP: *Payback period*

pH: Potencial de hidrógeno

PIB: Producto interno bruto

PNOs: Procedimientos Normalizados de Operación

PT: Paja de trigo

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

QFD: Función de despliegue de calidad

REI: Receptores Externos de Impacto

RMC: Residuo de malta cervecera

ROI: *Return of Investment*

SAGARPA: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

SHCP: Secretaría de Hacienda y Crédito Público

SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

SPD: SuperPro Designer

TAR: Tratamiento de Aguas Residuales

TIR: Tasa interna de retorno

TOG: Trabajo de Obtención de Grado

Ton: Toneladas

UAG: Universidad Autónoma de Guadalajara

USD: Dólares americanos

VPN: Valor presente neto

VSM: Mapeo de la cadena de valor

ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara

α : Nivel de significancia

Resumen

El presente documento propone el desarrollo de un marco de sostenibilidad (MS) bidimensional y el diseño conceptual de un complejo de biorrefinación que produce invertasa grado farmacéutico (>99.9999%) así como una serie de bio-productos de alto valor agregado a través de dos escenarios denominados como BIORREF 1 y BIORREF 2. La materia prima procede de desechos originarios de la industria láctea (i.e., lactosuero [LS]) y la industria cervecera (i.e., residuo de malta cervecera, [RMC]) de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), con un tamaño de planta teórico de 3,000-99,000 L/h y 12,000-23,000 kg/h, respectivamente. Este análisis bidimensional construye, a través del Método de Análisis de Proceso (PAM), un diseño conceptual del complejo de biorrefinación para cada etapa del proceso (i.e., modelos matemáticos de balances de materia y energía), dimensionamiento de equipos y modelos de costos asociados, permitiendo de esta forma un análisis robusto de tecnologías convencionales y emergentes.

Se articulan las relaciones existentes entre las etapas del proceso con una serie de generadores internos de impacto (GII) y receptores externos de impacto (REI) con el fin de establecer una serie de impactos ambientales y económicos del complejo BIORREF 1 y BIORREF 2 como funciones de proceso. Dicha acción concluyó en la migración de dichos impactos en un total de seis indicadores económicos y siete indicadores ambientales en una unidad dimensional monetizada (USD/kg bioproductos).

Consecutivamente, se desarrolló el escenario BIORREF 1 a través de la implementación, transformación y bio-aumentación altamente selectiva del RMC y LS en plataformas *S. boulardii* y *L. plantarum*, cuyos principales productos fueron enzima invertasa

y ácido láctico. Se analiza asimismo la producción de biogás y el tratamiento de aguas residuales a través de un esquema tradicional.

El escenario BIORREF 2 se basa en el concepto de bio-procesamiento consolidado donde se maximiza la conversión de materia prima y se incluyen tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales, tales como la implementación de una etapa de fermentación oscura, celdas de electrólisis microbiana (MEC) y celdas de combustible microbianas (MFC), intensificando la producción de hidrógeno que permitirá obtener un análisis paramétrico relacionado al superávit energético generado en este escenario. Cabe destacar que BIORREF 2 tiene un aprovechamiento integral de las corrientes que contienen gases efecto invernadero (i.e., CO₂), las cuales se someten a etapas de purificación y compresión para su venta como coproducto. Los residuos sólidos también son intensificados y considerados como productos de bajo valor agregado.

Finalmente, los esquemas de BIORREF 1 y la mayoría de los esquemas de BIORREF 2 son capaces de tener una recirculación parcial o total del agua tratada ya que cumplen con las especificaciones de la NOM-CCA-007-ECOL/1993. Para el escenario puntual de 75,000/17,500, se obtuvieron valores de sostenibilidad global para BIORREF 1 y BIORREF 2 de 221,078.42 y 220,499.34 USD/kg bioproductos, mientras que el precio mínimo de venta para ambos escenarios fue de 10,011.93 y 10,042.18 kg/bioproductos, respectivamente.

Abstract

The present document proposes the development of a two-dimensional Sustainability Framework (SF) and the conceptual design of a biorefinery complex that produces pharmaceutical-grade invertase (>99.9999%) and a series of high-value bio-products through two scenarios referred to as BIORREF 1 and BIORREF 2. The raw material comes from waste generated by the cheese industry (i.e., whey [LS]) and the beer industry (i.e., spent brewer's malt [RMC]) in Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), with a theoretical plant size of 3,000-99,000 L/h and 12,000-23,000 kg/h, respectively. This two-dimensional analysis constructs, through the Process Analysis Method (PAM), a conceptual design of the biorefinery complex for each stage of the process (i.e., mathematical models of material and energy balances), equipment sizing, and associated cost models, thus allowing a robust analysis of conventional and emerging technologies.

The existing relationships between process stages are articulated with a series of internal impact generators (IIG) and external impact receptors (EIR) to establish a series of environmental and economic impacts of BIORREF 1 and BIORREF 2 scenarios as process functions. This action resulted in the migration of these impacts into a total of six economic indicators and seven environmental indicators in a monetized dimensional unit (USD/kg bioproducts).

Subsequently, BIORREF 1 scenario was developed through the highly selective implementation, transformation, and bio-augmentation of RMC and LS into *S. boulardii* and *L. plantarum* platforms, with the main products being invertase enzyme and lactic acid. The production of biogas and wastewater treatment through a traditional scheme is also analyzed.

BIORREF 2 scenario is based on the concept of consolidated bioprocessing, where the conversion of raw materials is maximized, and emerging technologies for wastewater treatment are included, such as the implementation of a dark fermentation stage, microbial electrolysis cells (MEC), and microbial fuel cells (MFC), intensifying hydrogen production that allows for a parametric analysis related to the energy surplus generated in this scenario. It is noteworthy that BIORREF 2 makes comprehensive use of streams containing greenhouse gases (i.e., CO₂), which undergo purification and compression stages for sale as a byproduct. Solid waste is also intensified and considered low-value-added products.

Finally, BIORREF 1 schemes and most of BIORREF 2 scenarios are capable of partial or total recirculation of treated water as they meet the specifications of NOM-CCA-007-ECOL/1993. For the specific scenario of 75,000/17,500, global sustainability values for BIORREF 1 and BIORREF 2 were obtained at 221,078.42 and 220,499.34 USD/kg bioproducts, while the minimum selling price for both scenarios was 10,011.93 and 10,042.18 kg/bioproducts, respectively.

Palabras clave:

- Biorefinery conceptual design
- Bidimensional sustainability analysis
- Zero waste biorefinery
- Microbial electrolysis cell
- Invertase production
- Bio-hydrogen production
- Whey
- Wort

CAPÍTULO I: ETAPA DE DEFINICIÓN

1. Fundamentación del trabajo

El presente capítulo describe brevemente la justificación, alcance y objetivos a cumplir en el diseño y desarrollo conceptual de las distintas plataformas de biorrefinación que pretenden satisfacer la producción de distintos bienes de alto valor agregado a través de un tratamiento integral de efluentes procedentes de la industria cervecera y la industria láctea. Asimismo, se vincula y brinda pertinencia a este Trabajo de Obtención de Grado [TOG] como una aportación al Proyecto de Aplicación Profesional (PAP): Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas) en el desarrollo industrial de la región occidente del país.

1.1. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación

A través del desarrollo de la tecnología, la generación de bienes y servicios ha permitido satisfacer las necesidades de consumo del ser humano a través de una cadena de valor cuyo diseño y producción permite acelerar exponencialmente la cantidad de bienes industrializados. Dicho proceso de tecnificación en los procesos industriales ha permitido al ser humano el aumento de su expectativa de vida pero se ha limitado al concepto clásico de proporcionar solamente beneficios en la dimensión tecno-económica (Uğurluay y Kirikkaleli, 2022). Con el crecimiento de la población mundial, se aceleró la necesidad de alimentos y otros materiales básicos, lo que corresponde a una generación masiva de biomasa residual y al desperdicio de elementos que se encuentran embebidos en la materia prima (Carmona-Cabello, Garcia, Leiva-Candia y Dorado, 2018; Karp et. al, 2022), ocasionando

un aumento proporcional en el costo de eliminación de residuos, así como impactos ambientales significativos.

La información cuantitativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) arroja que aproximadamente un tercio de los alimentos producidos se pierde o desperdicia a lo largo de toda la cadena de valor, generando residuos de aproximadamente 1,300 millones de toneladas/año y contribuyendo en un estimado de 1 billón de dólares (USD) (Gustavsson, Cederberg, Sonesson, Van Otterdijk y Meybeck, 2012). En los países en vías de desarrollo, más del 40% de la pérdida de alimentos se genera durante las etapas de cosecha y procesamiento de los alimentos, mientras que en países industrializados se genera en la venta al por menor y consumo. Para el año 2019, existía un índice de 931 millones de toneladas/año de desperdicios de alimento en el mundo (17% del total producido) (Tsegaye, Jaiswal y Jaiswal, 2021) donde la región de Norteamérica (i.e., Canadá, Estados Unidos de América y México) aportó un total de 2.938, 19.360 y 11.979 millones de toneladas/año de residuos agroalimentarios, respectivamente (Forbes, Quested y O'Connor, 2021). De los anteriores valores, se ha reportado que el 26% del desperdicio total de alimentos era generado por la industria de bebidas, seguido de la industria láctea que contribuye con un 21%, la industria de frutas y verduras con el 14.8% y, finalmente, la industria de cereales con el 12.9% (Forbes et. al, 2021; Tsegaye et. al, 2021).

La cadena productiva de este tipo de industrias opera con procesos que no tienen el nivel de tecnificación requerido e impactando significativamente en los rendimientos y niveles de producción requeridos, generando altos niveles de desperdicios. Por ejemplo, para

la industria tequilera, se generan alrededor de 10-12 L de vinazas por cada litro de bebida espiritual producida (véase Sánchez, Sánchez, Dueñas, Hernández-Sánchez y Guadalajara, 2020), mientras que la industria cervecera requiere 12 L de agua potable para producir 1 L de cerveza y un consumo de agua potable en una relación 1:6 con altos índices de grano gastado, levadura residual y mosto (Rojas-Rejón, 2022). Para la industria láctea, 30% del suero de leche (i.e., lactosuero) generado se utiliza principalmente para la alimentación de animales, mientras que el volumen remanente es vertido en mantos freáticos y subsuelo sin un tratamiento biológico adecuado (Sebastián-Nicolás et. al, 2020). Debido a lo anterior, el impacto ambiental por parte del sector industrial en países desarrollados e industrializados contribuye a la generación de efluentes con alta demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), disposición, contaminación del aire, pérdida de biodiversidad, erosión y degradación del suelo, así como su relación en problemas de cambio climático que derivan en situaciones adversas de salud pública (Shah, Singh, Mohanty, Srivastava y Varjani, 2022; Carmona-Cabello et. al, 2018; Rojas-Rejón, 2022).

La integración de un marco de sostenibilidad apropiado y un análisis de ciclo de vida (ACV) lo suficiente robusto permite no solo evaluar tecnologías o procesos prospectivos desde el dominio tecno-económico, sino que el dominio ambiental puede ser tan importante como el aspecto económico desde un punto de vista monetizado. Al involucrar biorrefinerías multi-entrada/multi-producto, se evalúa un ejercicio de sostenibilidad para controlar y, posiblemente mitigar, residuos de diverso origen para su conversión en productos de alto valor agregado. Estudios de sostenibilidad y ACV semejantes a través de plataformas de biorrefinación pueden encontrarse en Shah et. al (2022) y en Sánchez, Magaña, Gomez, Solís

y Banares-Alcantara (2014). La revalorización de residuos alimenticios procedentes de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) (i.e., industria cervecera y láctea) a través de una plataforma de biorrefinación incide en un área de oportunidad para el desarrollo y competencia de la región en un plano bidimensional (i.e., económico y ambiental) debido a su utilización para la gestión eficaz del flujo de los residuos y su alineación a las políticas emergentes de bioeconomía circular (Yaashikaa, Kumar y Varjani, 2022), en la producción de metabolitos de interés biotecnológico y alimentario, así como el desarrollo de tecnologías que generen una reducida cantidad de residuos, emisiones de gases efecto invernadero, consumo energético y consumo de agua (Rojas-Rejón, 2022).

Debido a numerosas exploraciones en el área de diseño conceptual y análisis tecnológico-económico de diversas plataformas de biorrefinación a partir de residuos agroindustriales (Sánchez et. al, 2020; Magaña-Mendoza, 2018), residuos alimenticios (Demichelis, Fiore, Pleissner y Venus, 2018; Bastidas-Oyanedel y Schmidt, 2018) y biomasa empleada en la cadena alimenticia del ser humano (Aden et. al, 2002; Karp et. al, 2022), la recuperación de energía y producción de bienes de alto valor agregado a partir de diversos procesos unitarios propios de una plataforma bioquímica han demostrado satisfacer los marcos de sostenibilidad actuales (Global Energy Partnership, 2011). Por lo anterior mencionado, es fundamental llevar a cabo esta investigación a partir de un análisis paramétrico que pueda compararse con esquemas de biorrefinación semejantes, con el fin de evaluar distintas configuraciones de tecnologías para determinar la alternativa más sostenible y que este documento induzca a la proposición de nuevas cadenas de valor así como cambios en patrones de producción y

consumo para el ámbito mexicano, ofreciendo una simbiosis entre los grupos de investigación, los organismos industriales de la ZMG y la república mexicana.

El potencial en la producción de bienes de alto valor agregado a partir de biomasa en México ha sido un tópico de interés para varios investigadores (e.g., Molina-Guerrero, Sanchez y Vázquez-Núñez, 2020; Sacramento Rivero et. al, 2010; Cervantes, Torres y Ortega, 2020; Rojas-Rejón, 2022). Ha sido un tema de interés secundario para instancias gubernamentales y comunidad científica, ya que la mayoría de las iniciativas impulsadas en esa dirección suelen generar conflicto por el escaso acceso agroindustrial, la imprevisibilidad de los efectos de importación/exportación o su baja sostenibilidad. Hasta el momento, ningún país latinoamericano cuenta con una estrategia nacional que considere la producción de bienes de alto valor a través de una ruta químico-biológica comparable a la producción de Estados Unidos y la Unión Europea. Esto se manifiesta en la falta de financiamiento, incentivos y políticas tributarias que fomenten el interés del sector productivo en las biorrefinerías. Según Vergara et. al (2022) y Alemán-Nava et. al (2015), existen varias razones por las cuales México aún no ha desarrollado sistemas de biorrefinación:

- Falta de inversión: Una de las razones principales es la falta de inversión en investigación y desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles. México ha estado enfocado en la explotación de reservas de petróleo y gas natural, lo que ha hecho que se le brinde poca importancia a la investigación en tecnologías convencionales y emergentes para la producción de biocombustibles.
- Falta de políticas públicas claras: A pesar de que existen algunas políticas públicas relacionadas con la producción de biocombustibles, éstas no han sido claras ni

consistentes en el tiempo, lo que ha generado incertidumbre y falta de confianza entre los inversionistas y empresarios del sector.

- Competencia con la industria petrolera: México es uno de los principales productores de petróleo a nivel mundial, lo que ha hecho que el gobierno y las empresas estatales del país se centren en la explotación de este recurso en lugar de diversificar su matriz energética.
- Falta de infraestructura adecuada: La producción de biocombustibles requiere de una infraestructura adecuada para su producción, transporte y distribución, lo que no ha sido desarrollado en México de manera adecuada.
- Falta de incentivos fiscales: A diferencia de otros países, México no ha implementado incentivos fiscales para fomentar la inversión en la producción de biocombustibles, lo que ha desalentado a los inversionistas y sectores interesados.
- Falta de inversión y financiamiento: La construcción de biorrefinerías requiere una gran inversión inicial y, en el caso de México, existe una falta de financiamiento para este tipo de proyectos.

El anterior marco de legislación bioenergética en México puede expresarse de una manera más detallada a través de una matriz tipo FODA (Fortalezas, Debilidades, Amenazas y Oportunidades). Sacramento-Rivero et. al (2010) y la Red Mexicana de Bioenergía (2010) exponen un extenso análisis bibliográfico sobre qué tan atractivo resultado un modelo de biorrefinería (BF), así como de estrategias robustas en la planeación del proceso estratégico.

Tabla i Estrategias F-D y A-D para el desarrollo del modelo de biorrefinerías en México

		FORTALEZAS	AMENAZAS
		1 Alto porcentaje del gasto nacional se destina en I+D por parte de Institutos de Educación Superior (IES), en relación con otros países que pertenecen a la OCDE	Desarrollo tardío en sistemas de biorrefinación comparado con otras del mundo. Iniciar una dependencia con relación a Estados Unidos parecida a la que existe en materia de refinación de petróleo.
		2 Amplia disponibilidad y variedad de biomasa distribuida a lo largo del país	Volubilidad de las directivas, estrategias y fondos de apoyo con los cambios en las administraciones federal y estatal.
		3 Disponibilidad de un marco regulatorio para el uso y explotación de biocombustibles	La sobreutilización de subsidios nacionales e internacionales para posicionar las BR.
		4 Experiencia en planeación y estudios de factibilidad que incorporan criterios de sostenibilidad tridimensional (tecnológica, económica, ambiental y social)	Posibilidad de la generación de una opinión pública negativa ante las BR debido a la falta de información y campañas de desprestigio.
	DEBILIDADES	ESTRATEGIAS F-D	ESTRATEGIAS A-D
	1 Escasez de una estrategia nacional robusta que contemple el desarrollo de BR debido a que el gasto nacional en ciencia y tecnología ha significativamente en los años	1. Promoción de casos de estudio y proyectos de diseño conceptual que demuestren la factibilidad económica y ambiental para la resolución de necesidades de gestión de residuos de la región.	1. Creación de un marco regulatorio favorable: Trabajar con los gobiernos y los reguladores para establecer un marco regulatorio favorable que promueva el desarrollo de la industria. Esto puede incluir incentivos fiscales y financieros, políticas de compras gubernamentales y el establecimiento de normas y reglamentos claros que fomenten la innovación y el crecimiento de la industria.
	2 Vinculación pobre o inexistente entre academia industria (i.e., barreras culturales y jurídicas)	2. Integración con otros sectores: Integración con otros sectores, como el agrícola, el forestal y el ganadero. Al establecer relaciones con estos sectores, se pueden aprovechar los residuos y subproductos que generan y convertirlos en productos de alto valor agregado. Además, la integración con otros sectores puede ayudar a estos sistemas a garantizar un suministro constante y confiable de materias primas.	2. Las biorrefinerías en México pueden enfrentar dificultades para obtener financiamiento y acceso a tecnologías de punta. Una estrategia para abordar estas debilidades es buscar la cooperación y las alianzas estratégicas con empresas, universidades y centros de investigación.
	3 El desarrollo de grandes infraestructuras productivas se ve obstaculizado debido a que existen pocas industrias nacionales con un tamaño de producción deseado	3. Innovación tecnológica: Mejorar su posición en el mercado a través de la innovación tecnológica. Al invertir en investigación y desarrollo, las biorrefinerías pueden mejorar la eficiencia de sus procesos y desarrollar nuevos productos y tecnologías que les permitan competir en el mercado global. La innovación tecnológica también puede ayudar a dichos complejos a reducir costos y mejorar la rentabilidad a largo plazo.	3. Las biorrefinerías pueden enfrentar interrupciones en la cadena de suministro y cambios en la demanda del mercado. Una estrategia para abordar estas amenazas es buscar formas de mejorar la flexibilidad operativa, por ejemplo, mediante la implementación de sistemas de producción just-in-time.
	4 Altos índices de deserción en proyectos vinculados a I+D+I debido a la disminución de presupuesto en el Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico (PNCT) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)	4. Capacitación y desarrollo de talento: Las biorrefinerías pueden enfrentar dificultades para atraer y retener talento altamente capacitado. Una estrategia para abordar esta debilidad es invertir en capacitación y desarrollo de talento, para garantizar que la empresa tenga los recursos humanos necesarios para competir en el mercado global	4. Colaboración y asociaciones: posibles dificultades para acceder a la financiación y la tecnología necesarias para competir en el mercado global. Una estrategia para abordar esta amenaza es colaborar con otras empresas y organizaciones para acceder a recursos compartidos. Las biorrefinerías pueden formar asociaciones con otras empresas en la cadena de suministro, como proveedores de materias primas o distribuidores, para reducir los costos y aumentar su capacidad para competir en el mercado global.

Tabla ii Estrategias F-O y A-O para el desarrollo del modelo de biorrefinerías en México

		FORTALEZAS	AMENAZAS
		1 Alto porcentaje del gasto nacional se destina en I+D por parte de Institutos de Educación Superior (IES), en relación con otros países que pertenecen a la OCDE	Desarrollo tardío en sistemas de biorrefinación comparado con otras del mundo. Iniciar una dependencia con relación a Estados Unidos parecida a la que existe en materia de refinación de petróleo.
		2 Amplia disponibilidad y variedad de biomasa distribuida a lo largo del país	Volubilidad de las directivas, estrategias y fondos de apoyo con los cambios en las administraciones federal y estatal.
		3 Disponibilidad de un marco regulatorio para el uso y explotación de biocombustibles	La sobreutilización de subsidios nacionales e internacionales para posicionar las BR.
		4 Experiencia en planeación y estudios de factibilidad que incorporan criterios de sostenibilidad tridimensional (tecnológica, económica, ambiental y social)	Posibilidad de la generación de una opinión pública negativa ante las BR debido a la falta de información y campañas de desprestigio.
	OPORTUNIDADES	ESTRATEGIAS F-O	ESTRATEGIAS A-O
1	Se tiene la infraestructura necesaria para realizar la investigación aplicada que requiere el desarrollo de BR.	1. Fortalecimiento de la investigación y el desarrollo: Incursión en la competitividad a largo plazo mediante la inversión en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y productos.	1. Flexibilidad operativa: Las biorrefinerías pueden enfrentar interrupciones en la cadena de suministro y cambios en la demanda del mercado. Una estrategia para abordar estas amenazas es buscar formas de mejorar la flexibilidad operativa, por ejemplo, mediante la implementación de sistemas de producción just-in-time.
2	El procesamiento de biomasa se hará más rentable, esto con relación al avance de la tecnología y el aumento en el precio de petróleo	2. Diversificación de productos: Producción de una amplia variedad de productos, incluyendo biocombustibles, productos químicos, materiales avanzados y alimentos. Al diversificar sus productos, se reduce la dependencia de cualquier producto o mercado en particular, lo brinda una mayor resiliencia ante los cambios en la demanda o los precios.	2. Establecimiento de asociaciones con productores locales, cooperativas y comunidades para garantizar el suministro de materia prima, así como para apoyar el desarrollo de los productores locales.
3	Capacidad instalada con excesos en ingenios azucareros que pueden utilizarse como instalaciones de prueba de las primeras BR.	3. Aprovechamiento de la materia prima local: Una estrategia para aprovechar las oportunidades y fortalezas de las biorrefinerías en México es la utilización de materias primas locales, como por ejemplo la caña de azúcar, maíz, agave y otros cultivos del país.	3. Aprovechamiento de la capacidad para generar energía renovable y mejorar la eficiencia energética con la finalidad de reducir sus costos operativos. La generación de energía a partir de residuos y subproductos puede ayudar a las biorrefinerías a reducir su dependencia de fuentes de energía no renovable y, al mismo tiempo, mitigar emisiones de gases de efecto invernadero.
4	Experiencias de éxito y fracaso respecto a sistemas de biorrefinación implementados en países de primer mundo	4. Mejora de la eficiencia operativa: Las biorrefinerías pueden aprovechar las oportunidades para mejorar su eficiencia operativa y reducir costos, mediante la adopción de tecnologías de producción avanzadas y la optimización de los procesos.	4. Desarrollar operaciones de marketing y promoción para aumentar la visibilidad de sus productos sostenibles y renovables al identificar nuevas oportunidades de negocio en mercados emergentes que demanden productos sostenibles y renovables.

1.2. Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio

1.2.1. Entorno del objeto de estudio

Yangilar (2013) define la industria alimenticia como aquella industria cuyos procesos productivos se derivan en todas aquellas operaciones unitarias que involucran el transporte, recepción, procesamiento, conservación y almacenamiento de alimentos (i.e., origen animal, vegetal o fúngico) que forman parte del incremento en disponibilidad para el consumo del

ser humano. Algunos ejemplos de industrias alimenticias son la industria cárnica, pesquera, agropecuaria, láctea, azúcar, bebidas alcohólicas, etcétera.

En México, la industria alimentaria reportó una aportación al producto interno bruto (PIB) nacional durante el primer trimestre del 2022 de 5.24 B MXN, logrando un incremento del 6.05% y 15.6% en el trimestre anterior y en el año 2021, respectivamente. Actualmente la aportación de la industria de alimentos representa un 4% al PIB total (Cámara Nacional de la Industria de Conservas Alimenticias [CANAINCA], 2022).

Las entidades federativas con mayor producción bruta fueron Jalisco (225, 043 M MXN) y el Estado de México (192,201 M MXN). El ingreso total durante el año 2019 registró una cantidad de 1.59 B MXN, siendo las entidades federativas con mayores ingresos Jalisco (238,446 M MXN) y el Estado de México (198,029 M MXN) (véase **Gráfico 1A**). La población ocupada de la industria alimentaria se concentra actualmente en Estado de México, Chiapas y Jalisco (véase **Gráfico 1B**). Los municipios con mayores ingresos debido a la industria de alimentos y según el Censo Económico del 2014 fueron Azcapotzalco (Ciudad de México) (49,052 M MXN), Zapopan (Jalisco) (39,079 M MXN) y Guadalajara (Jalisco) (35,568 M MXN) (Data México, 2022).

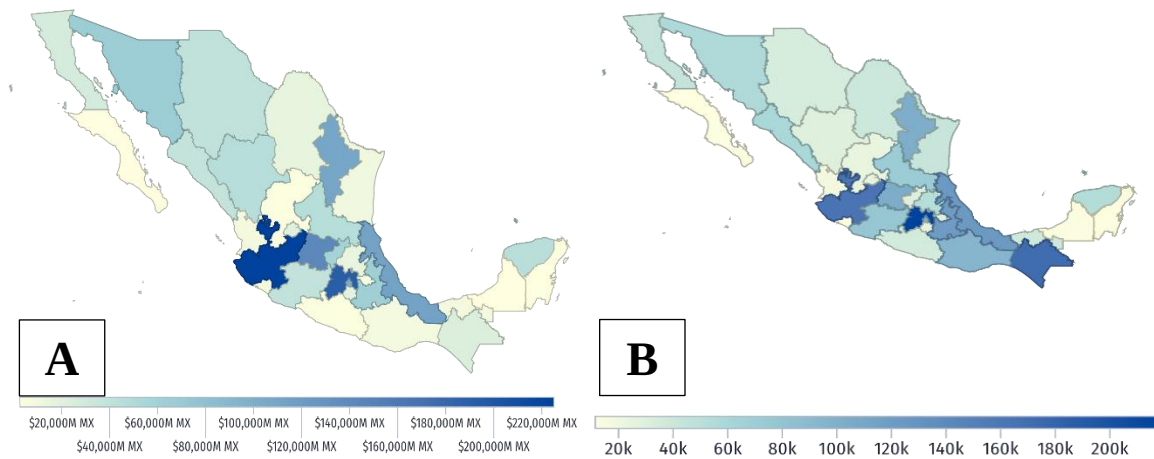
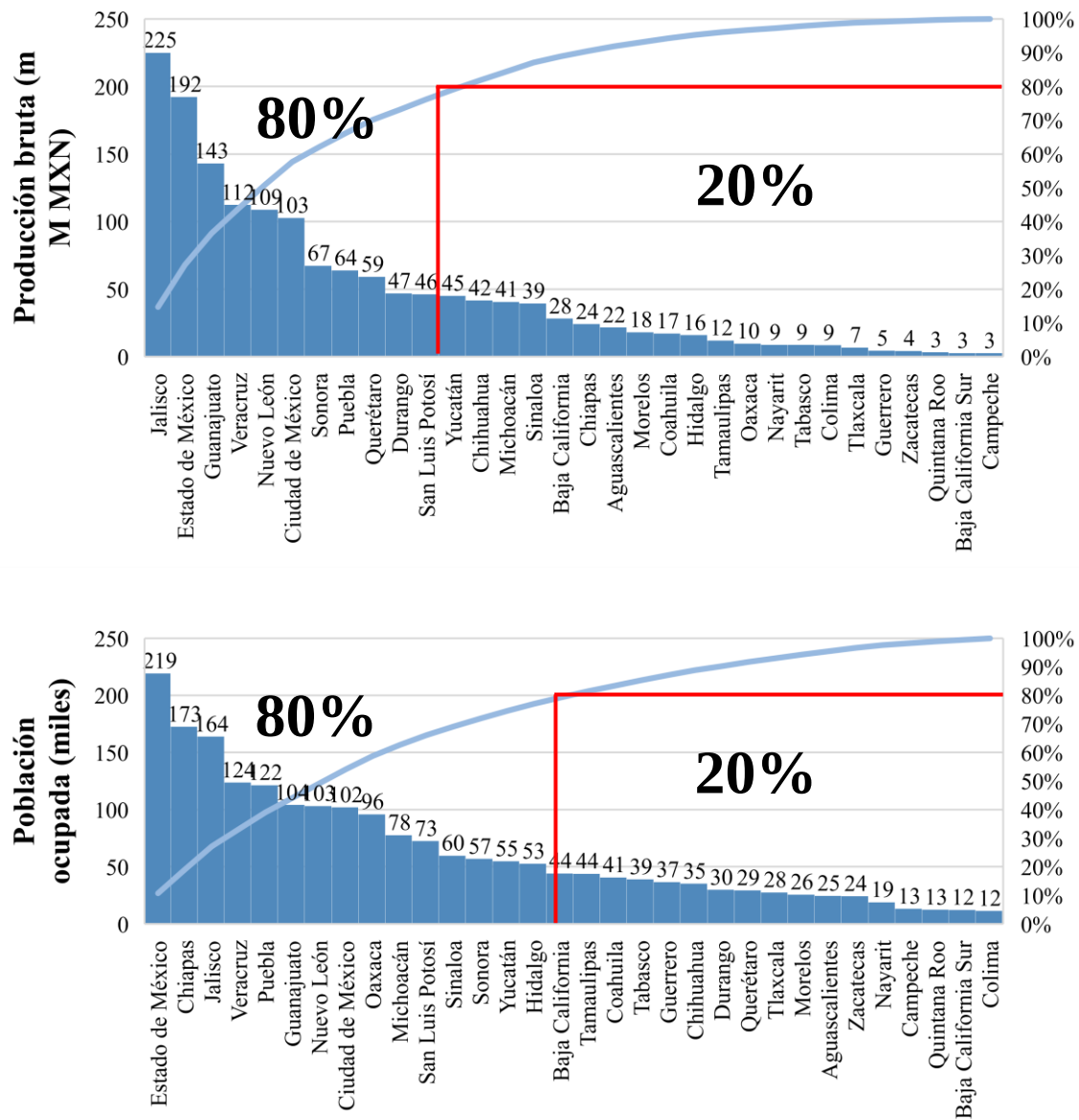


Gráfico 1 Distribución de producción bruta (A) y población ocupada (B) según entidad federativa. Recuperado de Data México (2022)

La distribución de producción bruta en la industria alimentaria se concentra en más de la mitad (50.97%) en los estados de Jalisco (14.67%), Estado de México (12.53%), Guanajuato (9.33%), Veracruz (7.33%) y Nuevo León (7.10%); por otro lado, la población económicamente activa en el ramo de la industria alimentaria se concentra (54.11%) principalmente en el Estado de México (10.68%), Chiapas (8.42%), Jalisco (7.99%), Veracruz (6.03%), Puebla (5.92%), Guanajuato (5.08%), Nuevo León (5.03%) y Ciudad de México (4.97%). Partiendo de un pensamiento deductivo, la región occidente del país representa una de las zonas con mayor actividad industrial en el giro alimenticio, resaltando asimismo dos municipios que conforman la ZMG (i.e., Zapopan y Guadalajara). Lo anterior se demuestra en el siguiente Diagrama de Pareto, donde se reconoce a través del criterio 80/20 las regiones geográficas donde se concentra la producción y actividad nacional de la industria alimentaria.



Estado de la República

Gráfico 2 Diagrama de Pareto (priorización) según la distribución de producción bruta (A) y población ocupada en la industria alimentaria (B)

Se concluye que el estado de Jalisco tanto como la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) representan una región geográfica fértil relacionadas a la producción de

bienes con valor agregado referentes a la industria alimenticia. Si bien la industria alimenticia tuvo una aportación del 6.45% al PIB total del estado de Jalisco durante el año 2020 (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco [IIEG], 2022), aquellas organizaciones con mayor impacto económico y mayor valor de ventas en la República Mexicana se presentan a continuación (Statista, 2021):

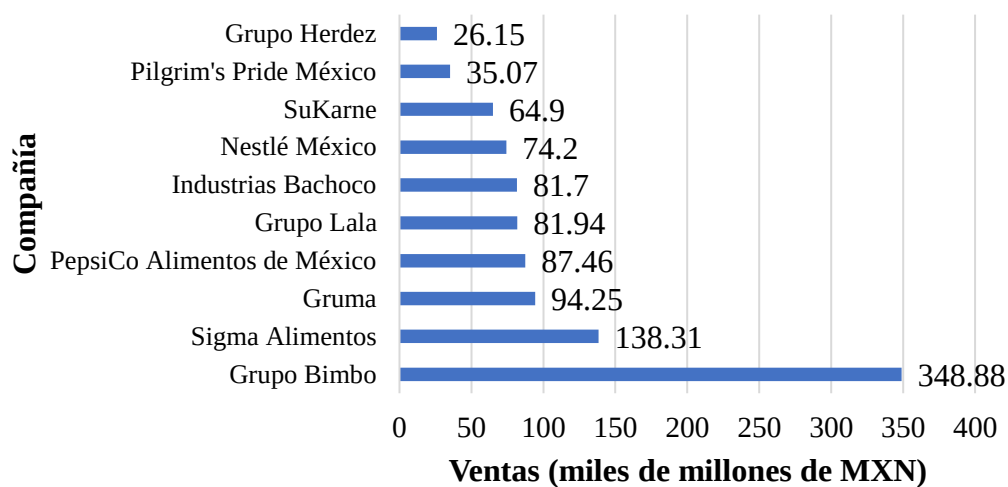


Gráfico 3 Valor de ventas de diversas empresas de la industria de los alimentos

Se observa que la injerencia en el ramo alimenticio de empresas productoras de leche o algún derivado de ésta (e.g., queso, mantequilla, requesón, yogurt, helado, kéfir, etcétera) representa el 24% del valor de ventas (i.e., Nestlé de México, Grupo Lala y PepsiCo Alimentos de México). En el escenario mexicano, la producción y elaboración de productos lácteos representó una aportación del 10% en el PIB de la industria alimentaria durante el año 2020, sólo por debajo de sectores como los productos de panadería y tortilla (31%), matanza y preparado de carnes (25%) y azúcares, chocolates, dulces y similares (14%) (Cámara Nacional de Industriales de la Leche [CANILEC], 2021).

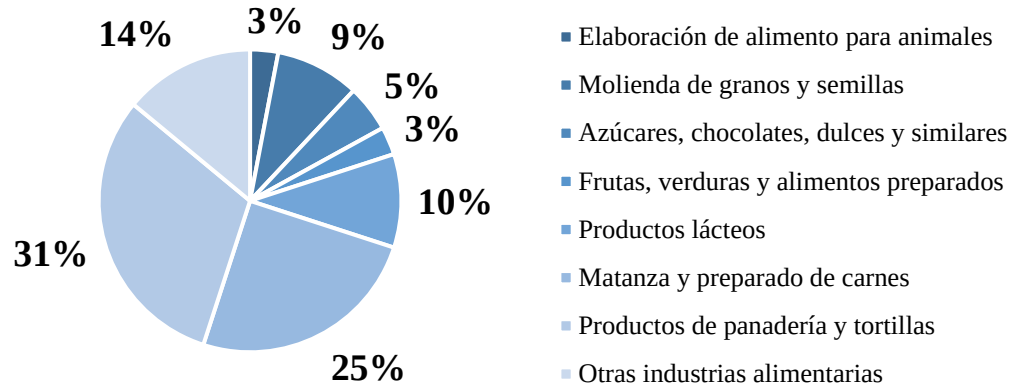


Gráfico 4 Giro y aportación en el Producto Interno Bruto (PIB) de la industria alimentaria.

Adaptado de CANILEC (2021)

La tasa de crecimiento anual promedio de la producción nacional de leche de vaca durante el periodo de 1980-2018 fue de 1.5%. En 1980, se produjeron alrededor de 7 mil millones de litros y en 2018 se registraron 12 mil millones de litros. Para el 2020, dicho indicador arribó a un valor de 13 mil millones de litros (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA], 2019; CANILEC, 2021). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] a través de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM) (2022a), México ocupa el octavo lugar a nivel mundial en producción de lácteos con un valor de 12,281 miles de toneladas, sólo por debajo de zonas geográficas como la Unión Europea y los Estados Unidos de América, con valores de 154,800 y 98,792 miles de toneladas, respectivamente. Registros recientes establecen que en promedio durante los últimos años de producción, 6 de cada 10 litros de leche que se producen en la República Mexicana provienen de entidades federativas como Jalisco (20.9%), Coahuila (11.6%), Durango (10.3%), Chihuahua (9.5%) y Guanajuato (7.0%).

Partiendo de la suposición que, la aportación en porcentaje de los anteriores Estados en la producción industrial de leche se mantiene constante para la producción de distintos tipos de queso (e.g., amarillo, chihuahua, crema, doble crema, fresco, manchego, Oaxaca, panela, etcétera), es posible migrar la producción total de queso y asociarla a cada entidad federativa. La **Tabla iii** refleja la producción industrial de queso del año 2010-2020 en toneladas por tipo de queso.

Tabla iii Producción industrial de diferentes tipos de queso (en miles de toneladas) durante el periodo 2010-2021. Adaptado de CANILEC (2021)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Amarillo	45.6	45.7	45.5	44.5	47.0	48.2	48.6	44.0	52.3	52.8	50.0	52.5
Chihuahua	29.1	33.1	34.5	36.9	39.7	38.4	38.9	37.3	42.1	48.5	55.2	57.4
Crema	20.4	19.6	19.3	28.0	29.8	32.8	33.4	37.2	45.8	43.3	38.9	40.5
Doble crema	24.0	34.9	43.6	45.4	46.1	47.8	50.6	55.2	73.0	72.8	78.9	88.7
Fresco	46.8	41.3	47.3	56.1	61.3	62.3	64.9	62.9	85.4	89.6	96.9	99.6
Manchego	21.7	22.6	29.0	29.6	27.4	31.5	34.5	29.4	39.1	38.6	40.0	41.6
Oaxaca	23.1	24.8	21.8	21.0	22.1	22.5	24.4	22.8	26.5	29.1	28.9	31.8
Panela	40.9	41.7	43.2	53.8	53.3	52.6	51.3	47.4	53.1	52.1	49.9	47.3
Otros	14.7	11.8	8.4	8.6	26.9	27.1	29.0	27.6	36.3	50.1	48.8	56.7
Total	266.3	275.4	292.6	323.9	353.6	363.3	375.6	363.8	453.6	476.9	487.4	516.2

Debido a que el lactosuero (LS) representa un subproducto de la industria láctea, varios autores (Osorio-González, Sandoval-Salas, Hernández-Rosas, Hidalgo-Contreras, Gómez-Merino y Ávalos, 2018; Padín-González y Díaz-Fernández, 2009) lo han categorizado como un problema ambiental potencial ya que contiene aproximadamente el 50% de la carga nutricional de la leche. Se estima que 1 kilogramo de queso producido genera aproximadamente de 9-10 L de lactosuero (Osorio et. al, 2018).

Se estima que el 50% del total de lactosuero generado se desecha a cuerpos de agua o subsuelo sin un tratamiento biológico apropiado (Osorio-González et. al, 2018), generando un severo problema ambiental debido a que el 40-60% de los sólidos totales es lactosa. Asimismo, contiene una alta demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) cuyos valores son de 55-117 g/L y 27-46 g/L, respectivamente (Prazeres, Carvalho y Rivas, 2013; Polettini, Pomi, Rossi, Zonfa, De Gioannis y Muntoni, 2022). Para una producción de 40,000 L/día de lactosuero sin depurar, se obtiene una DQO y DBO equivalente a la contaminación de aguas negras causadas por una ciudad hipotética de 1,250,000 habitantes (Torres-Martínez y Romero-León, 2020). No existen datos o recomendaciones de entidades gubernamentales mexicanas (e.g., Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) o Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA)) con relación al uso integral de lactosuero en productos de valor agregado o tratamiento de efluentes hacia cuerpos de agua (Herrera, 2022).

Para el caso de la industria cervecera, se ha sostenido una producción con una tendencia creciente durante el periodo 2013-2022, reflejado en una producción anual promedio de 11.31 mM de litros. Durante el año 2021 y 2022, el nivel de producción a nivel nacional fue de 13.47 y 14.17 mM de litros, respectivamente (INEGI, 2022a), posicionando a México como el cuarto productor de cerveza a nivel mundial. El valor mínimo observado durante el periodo 2013-2022 corresponde a la caída del activo debido a la restricción de actividades económicas durante el inicio de la pandemia COVID-19.

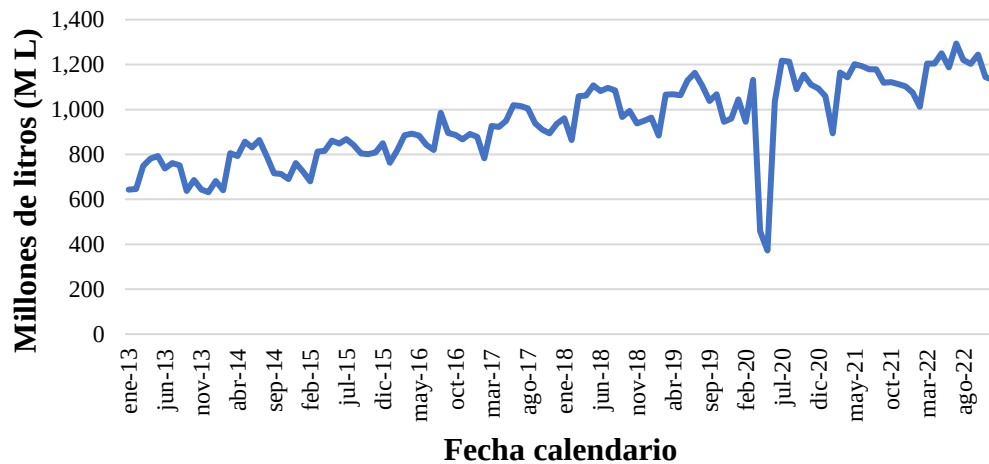


Gráfico 5 Tendencia en la producción de cerveza en la República Mexicana durante el periodo 2013-2022

Según cifras de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM) (INEGI, 2022), para el año 2019 México reportó una exportación de 4.9 mil millones de USD de cerveza e importó una cifra de 94 millones de USD, generando un superávit de 4.8 mil millones de USD (es decir, las exportaciones representaron 51.7 veces las importaciones). Por cada peso producido en el sector de bebidas alcohólicas, 0.65 centavos de peso son generados a través de la producción de la cerveza (INEGI, 2020). La distribución de producción de cerveza según entidad federativa se concentra en Zacatecas (24.1%), Coahuila (11.5%), Nuevo León (11.0%), Sonora (9.6%), Veracruz (8.3%), Oaxaca (8.0%), Jalisco (7.8%), Ciudad de México (5.2%), Baja California (5.2%), Estado de México (5.0%), Yucatán (3.2%) y otros (1.1%). El occidente del país (i.e., Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas) tiene una aportación del 31.9% a la producción nacional.

La industria cervecera genera cantidades variables de residuos. Entre ellos, el residuo más común (aproximadamente 85%) es el residuo de malta de cerveza, conocido como residuo de malta o mosto cervecero (RMC) (Mussatto, 2014). Se estima que por cada 100 L de cerveza, se producen alrededor de 20 kg de RMC (Mussatto, Dragone y Roberto, 2006). Considerando lo anterior, México produjo un total de 2373.7 y 2693.9 miles de toneladas en el 2020 y 2021 de RMC, respectivamente.

Dado el posible impacto ambiental de los residuos generados en el proceso de producción de cerveza y cuya composición compromete los efluentes de la ZMG, varios autores recomiendan minimizar la carga química y bioquímica de estas corrientes antes de su disposición final e inclusive, se sugieren desarrollar alternativas para el aprovechamiento integral de los residuos sólidos (Wichanuchit, Pung y Panich-pat, 2021; Sangeetha, Rajneesh y Yan, 2020). Para el caso de México, la normativa oficial que define los límites máximos permisibles hacia cuerpos receptores provenientes de la industria cervecera es la NOM-CCA-007-ECOL/1993, la cual prescribe una serie de parámetros fisicoquímicos (i.e., pH, DBO, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites y nitrógeno amoniacal) así como especificaciones a cumplir en la descarga de aguas residuales para cualquier industria en la República Mexicana.

1.2.2. Validación y alcance de las condiciones del escenario

El alcance de este documento comprende un estudio descriptivo a través de un análisis bidimensional (i.e., sustentabilidad tecno-económica y ambiental) en la construcción, programación y evaluación de un sistema de biorrefinación bioquímica que permita la revalorización de residuos agroalimentarios (e.g., mosto, proteasas, lactosuero, kéfir

industrial, macerado y espirulina) generados por diversas industrias alimenticias ubicadas en la ZMG. Se evalúa la conversión de dichos residuos (sujeto a condiciones fisicoquímicas específicas) en productos de alto valor agregado a través de un marco de sostenibilidad apropiado (i.e., estatal y nacional) que permita evaluar la sostenibilidad del proyecto mediante la creación y ponderación de indicadores que reflejen el impacto global (i.e., económica y ambiental) de la biorrefinería propuesta.

En el estado de Jalisco, existe un importante desarrollo en el área agroindustrial con más de 8,000 empresas dedicadas a la producción de alimentos. La industria cervecera es uno de mayor crecimiento en los últimos años y de las industrias con mayor impacto negativo al medio ambiente (Rojas-Rejón, 2022; Dieleman y Martínez-Rodríguez, 2019). Por ejemplo, en cierta cervecera de la ZMG se ha registrado que el consumo de agua es elevado (1:6), donde se generan 360 toneladas de grano gastado, 54 toneladas de levadura residual y 80 hectolitros de una corriente de mosto con 5° P cuya disposición compromete los efluentes de la región por sus altos índices de DQO y DBO. Para el caso de empresas lácteas de Jalisco en el 2020, han registrado un desecho de 0.92 M L/día de lactosuero sin un tratamiento adecuado para los efluentes del Estado (Rojas-Rejón, 2022).

Cabe destacar que este documento es parte de una investigación de orden superior llevado a cabo por el Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales (DPTI) del ITESO a través del Proyecto de Aplicación Profesional (PAP): Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental, Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas) a nivel licenciatura. El macroproyecto, liderado por el Dr. Rojas-Rejón (coordinador de este TOG), representa una experiencia socio-profesional en la

resolución e innovación de necesidades sociotécnicas en el área agroindustrial de la ZMG a través del interés, vinculación y participación con distintos organismos de investigación (i.e., Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), personal académico y alumnado que pertenecen a dichos programa de desarrollo tecnológico propuesto a nivel institucional con el fin de responder las orientaciones fundamentales (OF) del ITESO sobre las siguientes dimensiones (Francisco, 2015; ITESO, 2003):

- Contribuir a la protección del medio ambiente a través de acciones que estén diseñadas para minimizar el impacto ambiental y promover el uso responsable de los recursos naturales. Esto ayuda a proteger el medio ambiente y a preservar los ecosistemas para las generaciones futuras.
- Promover la eficiencia energética, que se define como la capacidad de obtener el máximo rendimiento energético con el mínimo consumo posible. Esto no solo reduce los costos de energía, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.
- Mejorar la calidad de vida por medio de prácticas más saludables y sostenibles en más de una dimensión.
- Involucrar tecnologías y procesos innovadores que pueden optimizar la eficiencia energética y la sostenibilidad en general. Esto puede llevar a la creación de nuevas oportunidades de negocio y a la mejora de la competitividad de las empresas.

La línea de tiempo de este proyecto comprende desde enero del 2022 hasta diciembre del 2023 con el fin de establecer conclusiones en un marco de sostenibilidad bidimensional (i.e., tecno-económica y ambiental) para el desarrollo de empresas dedicadas a la producción de alimentos en la región (i.e., industria cervecera y láctea de la ZMG). Considerando la disposición de las partes interesadas en este proyecto de investigación, se extiende el tiempo de vida útil del Proyecto de Aplicación Profesional (PAP): Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas) hasta el periodo anteriormente mencionado.

Aunado a lo anterior, un análisis robusto subsecuente es la definición de los factores críticos de calidad (CTQ) a través de la voz del cliente con el fin de definir las métricas cualitativas y cuantitativas críticas (véase **Figura 1** y **Figura 2**).

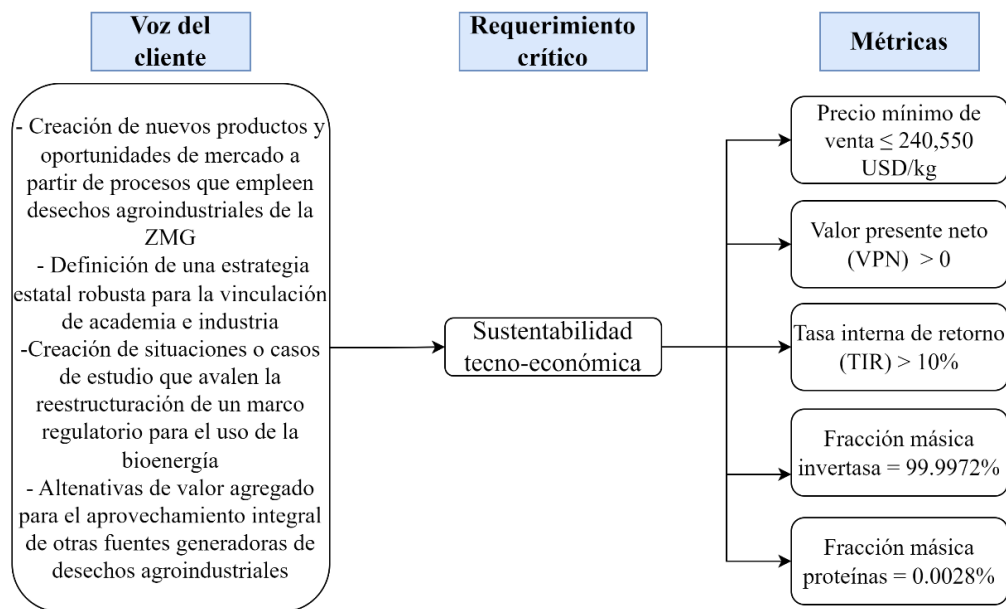


Figura 1 Árbol CTQ de la dimensión tecno-económica

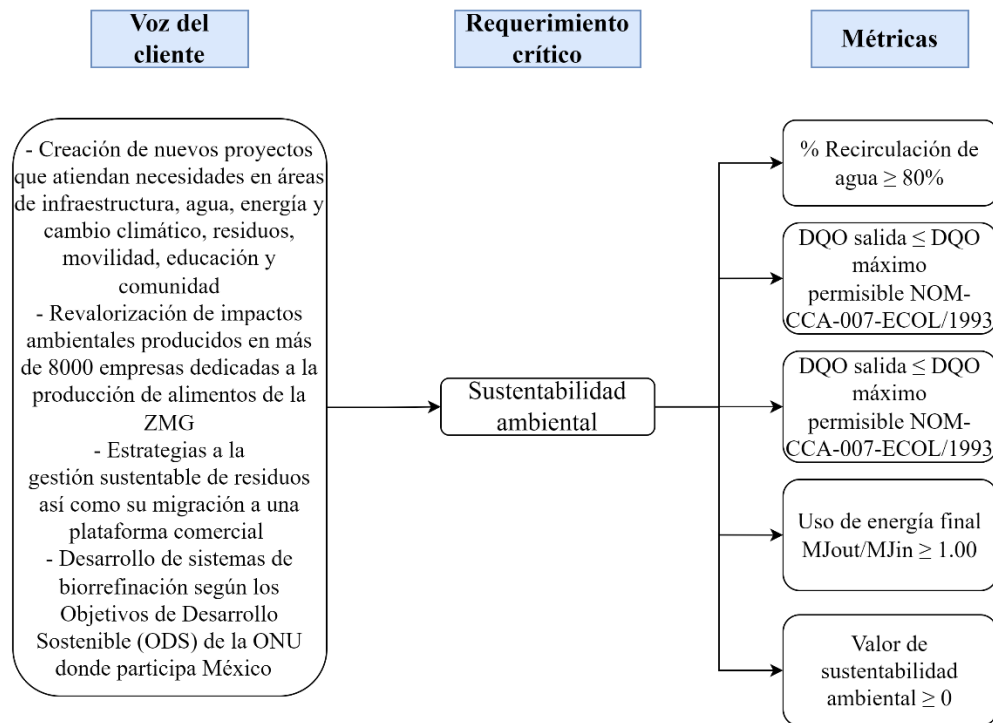


Figura 2 Árbol CTQ de la dimensión ambiental

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la sostenibilidad bidimensional (i.e., sustentabilidad tecno-económica y ambiental) de al menos dos plataformas bioquímicas de biorrefinería (BIORREF 1 y BIORREF 2) multi-entrada/multi-producto para la obtención de productos de alto valor agregado mediante el uso integral de residuos agroalimentarios de la ZMG.

1.3.2. Objetivos particulares

- Construir el diseño conceptual de los esquemas BIORREF 1 y BIOREF 2 empleando residuos agroalimentarios tales como lactosuero (LS) y residuo de mosto cervecero (RMC), a través de datos experimentales y la revisión de la literatura.
- Implementar el diseño conceptual en el simulador comercial SuperPro Designer (SPD) v12 para resolver los balances de materia y energía de las distintas operaciones unitarias involucradas en las situaciones BIORREF 1 y BIOREF 2, así como el diseño y dimensionamiento de los equipos involucrados.
- Evaluar el costo total de producción (CTP) global de los productos de alto valor agregado y el Valor Presente Neto (VPN) de los distintos esquemas de biorrefinación mediante un análisis de sensibilidad (i.e., tamaño de planta y costos de materia asociados).
- Definir el marco de sostenibilidad para la plataforma bioquímica y definir los indicadores de sustentabilidad tecno-económica y ambiental más adecuados para la valoración de los bosquejos dados en BIORREF 1 y BIOREF 2 en un escenario estatal y nacional.
- Comparar los escenarios de sostenibilidad evaluados en BIORREF 1 y BIORREF 2 respecto a valores análogos reportados en literatura.

1.4. Relevancia y pertinencia del trabajo

El presente documento aborda un diseño conceptual bidimensional (i.e., tecno-económico y ambiental) de una plataforma de biorrefinación para la bioconversión de desechos de la

industria alimenticia en productos de alto valor agregado a partir del diseño específico de bioprocesos. Los parámetros de diseño y de proceso empleados en el diseño de plantas se basan en datos de laboratorio y escala piloto que se han recabado en distintos consorcios de investigación de la región occidente del país (i.e., CIATEJ, CINVESTAV, ITESO y UAG) para la solución de problemas específicos de la industria alimenticia de Jalisco. Asimismo, se evalúa el dilema del aprovechamiento de desechos agroalimentarios para producir productos de alto valor agregado en pequeñas cantidades versus los bosquejos tradicionales para la producción de grandes cantidades de biocombustibles de baja rentabilidad.

El caso de estudio evaluado en este documento representa la evaluación final del Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas). Se exhorta la importancia de este documento como un punto de pliegue para la toma de decisiones futuras basado en el análisis estadístico de datos y creación de herramientas tecnológicas que permitan la optimización de bioprocesos a través de un marco de sostenibilidad que refleje el impacto bidimensional de la plataforma a nivel estatal y nacional.

La pertenencia de este documento como Trabajo de Obtención de Grado (TOG) en la Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad radica en el estudio de la industria cervecera y láctea de la ZMG, la creación de situaciones experimentales, optimización y modelado teórico/experimental de bio-procesos que escalen finalmente en indicadores o variables de ponderación en un sistema de biorrefinación avanzada. Lo anterior permitirá mapear diversos escenarios y su respectiva comparación para un marco de sostenibilidad acorde al desarrollo industrial de la región occidente del país.

Con base a lo anterior, la **Tabla iv** presenta a continuación el acta constitutiva del proyecto discutido a lo largo de este documento:

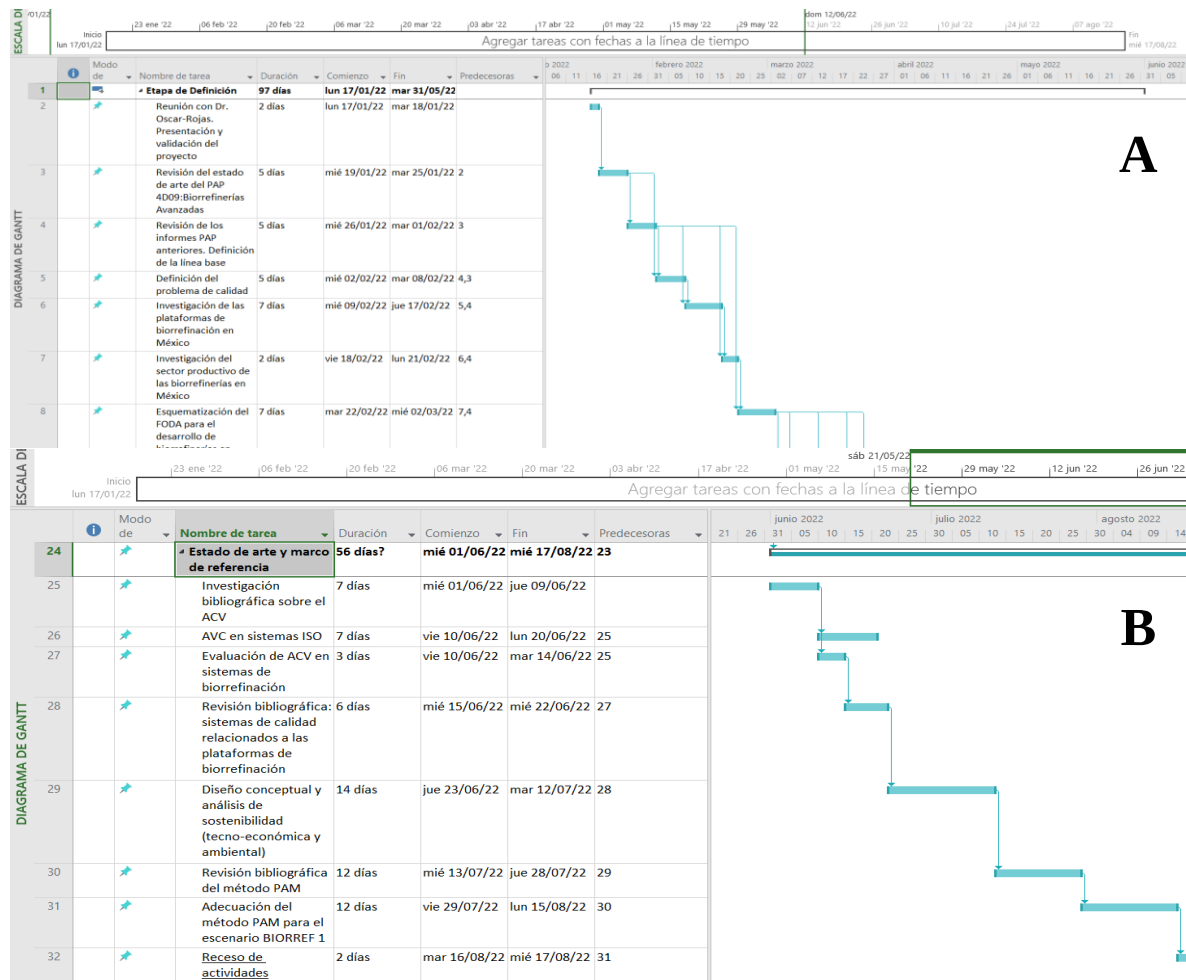
Tabla iv Acta constitutiva del proyecto de investigación

Id del proyecto	4D09: Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (Biorrefinerías Avanzadas)
Título del proyecto	Evaluación de factibilidad tecno-económica y reducción de impacto ambiental en la revalorización de residuos agroindustriales de giro cervecero y lácteo de la Zona Metropolitana de Guadalajara a través de una plataforma de biorrefinación bioquímica de segunda generación (2G) mediante un marco de sostenibilidad aplicable para el escenario mexicano
Unidad de negocio responsable	Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales (PTI)
Subestructura de la unidad de negocio	Grupo de Ingeniería de Fermentaciones y Bioprocesos
Zona geográfica	Tlaquepaque, Jalisco, México
Área de investigación	Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I)
Patrocinador del proyecto	Coordinación de Ingeniería en Biotecnología
Estatus	Evaluación de factibilidad tecno-económica y ambiental
Fecha inicial del proyecto	Agosto del 2020
Fecha final del proyecto	Diciembre del 2023
Situación actual / Descripción del problema	En el estado de Jalisco, se ha observado un avance en el sector agroindustrial, con más de 8,000 compañías dedicadas a la producción de alimentos. No obstante, la industria cervecera se ha destacado como una de las industrias de mayor expansión en los últimos años, considerándose a su vez como un sector que genera uno de los impactos ambientales más significativos. Se ha constatado que una industria cervecera que reside en la Zona Metropolitana de Guadalajara presenta un alto consumo de agua (1:6), generando residuos notables como 360 toneladas de grano gastado, 54 toneladas de levadura residual y 80 hectolitros de un flujo de mosto con 5° P, cuya disposición compromete los efluentes de la región debido a sus elevados niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Asimismo, en el año 2020, las empresas del giro lácteo registraron un desecho aproximado de 0.92 millones de litros al día de lactosuero, careciendo de un tratamiento biológico debido a la falta de una normativa en el Estado que regule este tipo de efluentes. Se ha propuesto fungir como intermediario y revalorizar los desechos presentes en esta industria a través de una plataforma basada en el concepto de biorrefinería que realice la conversión bioquímica de los residuos a través de bio-procesos, tecnología comercial y conocimiento empírico que permita evaluar la cadena de valor no solo desde el dominio tecno-económico, sino que se valore el dominio ambiental desde un punto de vista monetizado. Lo anterior converge en la propuesta de valor del ITESO, ya que permite evaluar los posibles impactos producidos (i.e., productos, procesos y servicios) y así identificar, medir y atender proyectos que tengan iniciativas sustentables. Finalmente, además de la evaluación de factibilidad económica y ambiental, el ITESO busca implementar estrategias a la gestión sustentable de residuos migrando así a una plataforma comercial y sea una herramienta para el sector industrial-alimenticio de la ZMG.
Situación futura / Objetivos del proyecto	(1) Definir un esquema y diseño conceptual de una biorrefinería sostenible (tecno-económico y ambiental) empleando residuos agroalimentarios de la ZMG tales como LS y RMC con el fin de producir bio-productos de alto valor agregado.

4D09: Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (Biorrefinerías Avanzadas)				
Id del proyecto				
	(2) Evaluar el costo total de producción (CTP) del principal producto de la plataforma de biorrefinación (i.e., invertasa grado farmacéutico) así como el Valor Presente Neto (VPN) a través de un análisis de sensibilidad respecto a la materia prima requerida y sujeta a la restricción que el precio mínimo de venta sea menor al costo de mercado actual (2022) (240,550 USD/kg) al evaluar $VPN=0$. Se establece que la tasa interna de retorno (TIR) deberá ser mayor o igual al 10%. (3) Definir el marco de sostenibilidad bidimensional con el fin de obtener el escenario que presente el valor positivo más alto como valor global de sostenibilidad (a través de indicadores o vectores propios en el dominio tecno-económico y ambiental).			
Responsable del proyecto	Dr. Óscar Rojas-Rejón			
Gerente del proyecto	Dr. Óscar Rojas-Rejón			
Miembros del equipo	Pablos Hernández Sánchez - DPTI/GIFB Dr. Víctor Sevilla Güitrón - DPTI/CINVESTAV Unidad Guadalajara Dra. Olga Ayala Ramos – DPTI/UAG/CINVESTAV Unidad Guadalajara			
Asesores del proyecto	Dr. Víctor Sevilla-Güitrón y Dra. Olga Ayala Ramos			
Esfuerzos de financiamiento	No aplica. Representa un proyecto a nivel DFSS (Design For Six Sigma)			
Resultados cualitativos logrados	Desarrollo de conocimiento teórico y práctico en la etapa de ingeniería de procesos (2021-2022) para la integración de datos experimentales y de optimización estadística de las plataformas <i>L. plantarum</i> y <i>S. boulardii</i> donde el LS (lactosuero) y RMC (residuo de malta cervecera) participen como medios de cultivo para el crecimiento de microorganismos productores de bienes de alto valor agregado.			
	Valor anterior	Objetivo	Dirección	Cambio (%)
KPI "1"	Valor de sostenibilidad global (adimensional)			
	N/D	>0	Incremento	N/A
KPI "2"	Valor presente Neto VPN (USD)			
	N/D	> 0	Incremento	N/A
KPI "3"	Precio mínimo de venta (USD/kg) del i-ésimo producto			
	N/D	$CTP_{producto-i} \leq CTP_{mercado}$	Reducción	N/A
KPI "4"	Tasa interna de retorno (TIR, %)			
	N/D	>10%	Incremento	N/A
Etapas del proyecto	Fase definir: enero – mayo 2022 Fase medir: agosto – diciembre 2022 Fase analizar: enero – mayo 2023 Fase diseñar: agosto – diciembre 2023			
Comentarios adicionales	Los indicadores en la dimensión tecno-económica son: (1) desempeño del proceso y uso de recursos $M_Y = kg_{BP}/kg_{MP}$, (2) Costo total de producción (CTP) $M_{TPC} = USD/kg_{BP}$, (3) Ahorro en procesos $M_{PS} = TPC_{Market} - TPC_{BP}$, (4) Productividad eléctrica de la planta $M_E = \Delta Electricity/kg_{BP}$, (5) Retorno de inversión (ROI) $M_{ROI} = ROI$, (6) Periodo de retorno (PBP) $M_{PBP} = PBP$, (7) Valor agregado $M_V = (USD_{revenue} - USD_{MPCost}) / kg_{BP}$, (8) Ganancia debido al tratamiento integral de residuos $M_{PTAR} = TPC_{PTAR}$ Los indicadores en la dimensión ambiental son: (1) $M_{CO2} = g_{CO2eq}/kg_{BP}$, (2) Consumo de agua $M_{WF} = L_{agua\ fresca}/kg_{BP}$, (3, 4 y 5) Calidad de agua $M_{DQO} = DQO/kg_{BP}$, $M_{WT} = MJ_{Energía\ térmica}/kg_{BP}$ y $M_{pH} = pH$, (6) Cantidad de residuos sólidos $M_S = kg_{residuos\ sólidos}/kg_{BP}$			

1.5. Cronograma de trabajo

En este apartado se establecen las etapas de proyecto descritas de forma detallada en el acta constitutiva del proyecto declarado en la **Tabla iv**. Como ejemplo, la **Figura 3** enuncian los recursos temporales, económicos y humanos, así como las organizaciones y objetos de estudio que forman que son necesarios para la realización satisfactoria de cada actividad que comprende las etapas de definición (**Figura 3A**), estado de arte (**Figura 3B**) y medición (**Figura 3C**) de este documento.



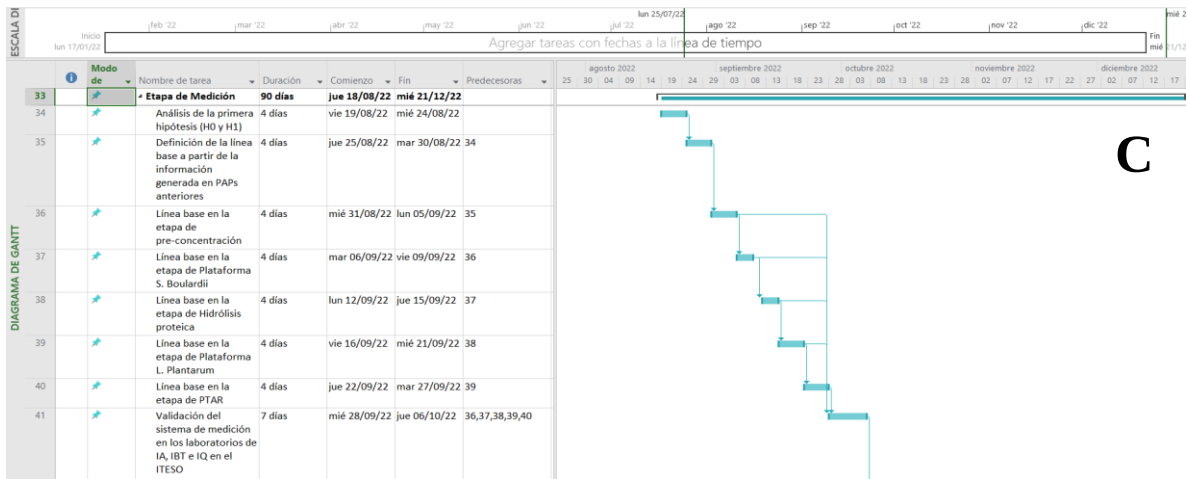


Figura 3 Ejemplo del cronograma de trabajo para las etapas de definición, estado de arte y medición del ciclo DMADV

1.6. Conclusión del capítulo

Una vez definido el problema de calidad, el presente Trabajo de Obtención de Grado (TOG) tiene como fin evaluar la factibilidad económica y ambiental de un sistema de biorrefinación que permita implementar estrategias a la gestión sustentable de residuos, permita fungir como una herramienta para el sector industrial-alimenticio de la ZMG y cuantifique impactos producidos en los productos, procesos y servicios de dichas industrias. La anterior iniciativa evaluará la conversión bioquímica de los residuos más importantes de la industria cervecera y lechera a través de tecnología comercial y conocimiento empírico desarrollado en el Proyecto de Aplicación Profesional (PAP): Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas).

CAPÍTULO II: ESTADO DE ARTE

2. Marco conceptual de referencia

En este capítulo se describe brevemente la estructura y orientación general del objeto de estudio con el fin de exponer una sistematización del estado de arte en el diseño conceptual de plataformas de biorrefinación a partir de un marco de sostenibilidad que involucre las dimensiones tecno-económica y ambiental. Asimismo, se exploran y evalúan las características inherentes de los procesos relacionados en la producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado a partir de un esquema o ruta bioquímica mediante el aprovechamiento integral de residuos provenientes de la industria alimenticia.

2.1. Estado de la cuestión

2.1.1. Análisis de ciclo de vida mediante la implementación de sistemas ISO

Como resultado de la crisis del petróleo, las potencias mundiales han incrementado el presupuesto y capacidad en el campo de la investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) derivado en alternativas energéticas y combustibles más eficientes. Diversos mecanismos jurídicos se han vinculado en la reducción de gases efecto invernadero (GEI) (i.e., Conferencia por Partes sobre el cambio climático [COP]) originando una presión continua en disminuir significativamente las emisiones de gases efecto invernadero satisfaciendo a la vez las necesidades energéticas que requieren sus procesos productivos (Sacramento-Rivero et. al, 2010).

En noviembre del 2022, se llevó a cabo la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en la ciudad de Sharm

el-Sheij, Egipto. En ella, se ha indicado el papel de bio-economía y la migración hacia desarrollos sostenibles mediante el uso de herramientas tecnológicas, científicas y sociales para el cumplimiento de dichas metas (McGrath, 2022). Las bases de un marco de sostenibilidad mediante plataformas químicas fueron enunciadas desde la declaración de Río de Janeiro (COP-1992) y los 12 principios de química verde postulados por Anastas y Warner (1998) donde se estableció la filosofía para el desarrollo de nuevas reactividades químicas y condiciones de reacción que puedan potencialmente proporcionar beneficios para la síntesis, diseño conceptual, manufactura y comercialización de productos de índole química en término de eficiencia de recursos, eficiencia energética, selectividad de productos, simplicidad operativa, seguridad para el ser humano y el medio ambiente.

El anterior marco de integración en los principios de Anastas y Warner derivan en el concepto de biorrefinería que parte de una refinería petrolera, donde a través de una materia prima reconocida (i.e., petróleo crudo), ésta se somete en diferentes procesos fisicoquímicos y operaciones unitarias para obtener una gama de productos tales como gasolinas líquidas, parafinas, diésel, keroseno, lubricantes, ceras, etcétera. Es reconocible la homonimia entre una planta multi-producto respecto a una refinería, no obstante, las biorrefinerías se diseñan para un espectro de productos comercializables de alto valor agregado mediante rutas de conversión específicas donde además se generan coproductos tales como calentamiento, electricidad, combustibles sólidos o líquidos, productos intermedios o productos sofisticados empleando diversas materias primas orgánicas a través de bloques de construcción denominadas “etapas de proceso” (Sevilla, 2014; Morais y Bogel-Lukasik, 2013). Un sistema de biorrefinación puede ser una instalación, un proceso, una planta o incluso un conjunto de

instalaciones cuya capacidad o escala operativa puede ser planta piloto, demostrativa o comercial (Pandey, Hofer, Taherzadeh, Nampoothiri y Larroche, 2015; Shah, et. al, 2022).

En virtud de su adaptabilidad potencial, varios autores (e.g., Katakojwala y Mohan, 2021; Asveld, Osseweijer y Posada, 2019; Tsegaye et. al, 2021; Azapagic, 2014) han expuesto que el desarrollo de este tipo de plataformas resulta de una estrategia apropiada para la valorización eficiente de residuos (e.g., materias primas renovables, residuos agrícolas y biogénicos) junto con la reducción sincrónica de las cargas ambientales y la creación de nuevas vías para el desarrollo socioeconómico; no obstante, para optimar la eficiencia de recuperación de recursos con la reducción simultánea de desechos, se han explorado sistemas de circuito cerrado (Bernstad, 2017) con el fin de brindar un aprovechamiento integral a cada componente que participa en las fronteras del sistema. Aunque se ha percibido que el concepto de biorrefinerías pudiera impactar positivamente en más de un dominio, una visión sistemática de algunos escenarios en casos de estudio (e.g., Bernstad, 2017; Adeleye et. al, 2019; Righi, 2019; Sanchez et. al, 2020) ha concluido que puede no ser cierto en todos los casos donde además el valor de sostenibilidad global puede resultar menor a cero.

Se puede determinar si un sistema de biorrefinación puede considerarse sostenible midiendo el impacto cuantificable de esta aplicación. Esta evaluación también debe tener en cuenta las posibles consecuencias debido a la competencia por los recursos utilizados, el impacto en el uso y la calidad del agua, los cambios en el uso de la tierra, el balance de reservas de carbono y la fertilidad del suelo, la producción y aprovechamiento de gases efecto invernadero (e.g., CO_x, NO_x, CH₄, O₃), el impacto en la biodiversidad, los riesgos toxicológicos potenciales y la eficiencia energética.

Los impactos en la dinámica regional, nacional e internacional, los usuarios finales y las necesidades de los consumidores así como la viabilidad económica de la inversión también son aspectos importantes en cualquier sistema de biorrefinación (Azapagic, 2014; Uğurluay y Kirikkaleli, 2022; Magaña-Mendoza, 2018). Dado que la evaluación de un sistema que implique una plataforma de sostenibilidad en más de una dimensión no es un número absoluto, es recomendable realizar la comparación con sistemas donde se obtienen productos y servicios similares bajo un esquema tecnológico convencional (Sánchez et. al, 2013) en todo el análisis de ciclo de vida (ACV) de los procesos involucrados (i.e., construcción, operación y desmantelamiento). Por lo anterior, resulta fundamental establecer métodos y vías de producción en plataformas termoquímicas y/o bioquímicas innovadoras, robustas y adaptables que estén equilibrio con una menor complejidad del proceso con el fin de reducir el nivel de riesgo e incertidumbre y evitar escenarios insostenibles en más de una dimensión. Hottle, Bilec y Landis (2013) argumentan que en la construcción de la sostenibilidad de la plataforma resulta crítico la selección de materias primas, la integración de procesos, el proceso de producción, los escenarios de utilización y disposición final de los subproductos, con el fin que el enfoque y los objetivos de un análisis de sostenibilidad contengan los métodos y herramientas de análisis que generen los indicadores y métricas asociadas al proceso. Algunos autores (e.g., Magaña-Mendoza, 2018; Kleeberg, Schneider y Nippa, 2015; Tahir y Darton, 2010; Sacramento-Rivero et. al, 2022) han reconocido que algunos impactos en la cadena de valor pueden ser complicados de cuantificar debido a su complejidad de asociarse en una escala de razón o intervalo y por ende, someterse a una operacionalización.

Para que una innovación tecnológica sea considerada como innovación sostenible, no sólo debe proporcionar beneficios económicos, sino también contribuir al mundo a través del concepto definido por Elkington (1994) como 3P (*People, Planet, Profits*), es decir, involucrar sinérgicamente las dimensiones sociales, ambientales y económicas (véase **Figura 4**) a través de una definición conocida como *triple bottom line* (triple línea de fondo). Partiendo de la definición de innovación, Trott (2008) expone que la innovación es el desarrollo tecnológico que conlleva a la introducción de un nuevo producto, característica de un producto existente, método de producción o mercados emergentes. Migrar del concepto clásico de innovación hacia una definición más robusta es considerar que no sólo la dimensión tecno-económica es importante, sino también la dimensión social en que la tecnología se utiliza de forma innovadora en la calidad de vida de las personas y en la protección del medio ambiente es un aforismo fundamental para proponer una cadena de valor robusta. Debido a la dificultad para evaluar la dimensión social en sistemas simples o complejos de biorrefinación, el dominio social no es evaluado en este documento.

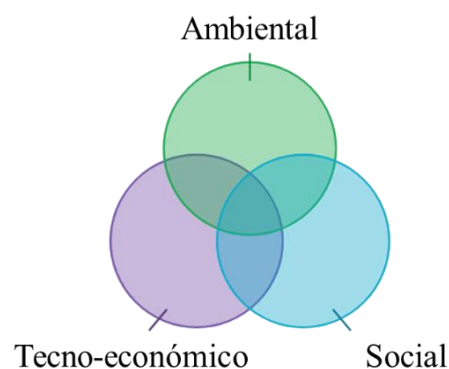


Figura 4 Conjunción de tres dominios en un análisis de sostenibilidad

Con el objetivo de establecer una línea base para la creación de marcos de sostenibilidad robustos, replicables y estandarizables, Pandey et. al (2015) y Finkbeiner et. al (2006) exponen una neguentropía existente entre la identificación, análisis de los impactos potenciales y puntos críticos en las estrategias a gran escala (i.e., ACV) respecto a la metodología integral basada en directrices de tipo ISO (*International Organization for Standardization*, por sus siglas en inglés). ISO 14040:2006 define un análisis de ciclo de vida como la evaluación de todas aquellas etapas o interacciones a nivel sistémico de un producto donde se asocian los impactos ambientales potenciales y significativos desde el inicio de la cadena de valor (i.e., adquisición de materias primas) hasta la disposición final del producto (*International Organization for Standardization* [ISO], 2006).

El ACV a través de ISO representa un enfoque flexible que, a través de la asignación de una unidad funcional, criterios de corte y fronteras del sistema, se evalúan aquellos impactos significativos del sistema de biorrefinación que, posteriormente, influirán en la toma de decisiones a través de actividades específicas (e.g., planeación estratégica, implementación de sistemas de medición, etiquetado del producto, selección de indicadores de desempeño asociados al impacto ambiental, etc.). En caso específico, ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 establecen la terminología común para crear un marco metodológico en la evaluación de la sostenibilidad de cualquier plataforma que involucra procesos de transformación.

Las pautas desarrolladas en las anteriores normativas internacionales se consideran métricas comparables a nivel de producto y organización. Estas pautas construyeron holísticamente el marco de cualquier análisis de ciclo de vida. Se ha observado que algunos

marcos metodológicos existentes (e.g., *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD), *Greenhouse Gas Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*, *Product Category Rules PCR 2011:17: Basic organic chemicals*, *The European Committee for Standardization (CEN) EN 16214-4: Sustainably produced biomass for energy applications*, *British Standards PAS 2050:2011: Specification for the assessment of the life cycle, greenhouse gas emissions of goods and services*, etcétera) varían considerablemente en la forma en que aplican el ACV, lo que genera inconsistencias entre los estudios y poca comparabilidad entre ellos (Ahlgren et. al, 2015; Kleeberg et. al, 2015), debido a que no se considera la sinergia existente entre las tres dimensiones de sostenibilidad (i.e., económica, social y ambiental) o son tratados como dimensiones mutuamente excluyentes.

La **Tabla v** realiza un compendio del resumen expuesto para la identificación de las fronteras del sistema en cada uno de los procesos unitarios tratados como elementos clave para la evaluación del ACV de un producto/proceso. Los límites del sistema se pueden considerar desde cualquier segmento de la cadena de valor (i.e., puerta a puerta, de la cuna a la puerta, de la cuna a la tumba y de la cuna a la cuna). Algunos ejemplos de operaciones en la cadena de valor son materia prima, transporte, procesamiento de productos y subproductos de la biorrefinería, transporte de productos a los consumidores, uso de los productos por parte del usuario final, eliminación de productos en el medio ambiente, etcétera (Dahiya, Katakojwala, Ramakrishna y Mohan, 2020).

Tabla v Terminología común empleada en la metodología de evaluación de ciclo de vida de un producto/proceso. Adaptado de Katakojwala y Mohan (2021) y Finkbeiner et. al (2006)

Término	Definición
Etapa del ciclo de vida	Las etapas de los ciclos de vida del producto o servicio, que comprenden principalmente la extracción, producción, uso y fin de la vida de las materias primas
Fronteras del sistema	Criterios especificados asignados a varios procesos unitarios a medir para el análisis del sistema
De la cuna a la puerta	ACV que se centra en las etapas iniciales. Incide desde la extracción de materias primas, fabricación, transporte y entrega del producto o servicio al cliente. No evalúa la fase del uso del producto por parte del consumidor ni la disposición final del producto o servicio.
De la puerta a la puerta	ACV del producto respecto al límite del sistema relativamente más pequeño empleado específicamente para optimizar una etapa del proceso
De la cuna a la tumba	ACV que evalúa el impacto ambiental completo de un producto o servicio a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde su creación (cuna) hasta su disposición final (tumba).
De la cuna a la cuna	ACV de la cuna a la tumba cuando en la etapa de eliminación se incorpora un proceso de reciclaje. Dicha práctica sostenible se realiza con el objetivo de incorporar la responsabilidad económica, social o ambiental en sistemas de circuito cerrado
Asignación	Asignación de varios flujos de entrada o salida de un sistema de proceso/producto entre el producto en cuestión y otros sistemas de productos múltiples
Fin de vida útil	Representa el final del uso del producto. Puede incluir procesos como la reutilización, el reciclaje, la recuperación química y energética, la incineración, el vertido, el tratamiento de aguas residuales (TAR) y la liberación de productos de base biológica en la naturaleza.
Caracterización	Contribución relativa de cada entrada y salida dentro del sistema de productos que se asigna a categorías de impacto y se convierte en indicadores que representan los impactos potenciales correspondientes en un análisis bidimensional o tridimensional
Normalización	Paso específico en el ACV donde los resultados de una serie de indicadores se presentan y/o ponderan en una unidad dimensional homogénea según ciertos parámetros de referencia.

Basado en una revisión de los estándares y lineamientos de ACV existentes resumidos por Ahlgren et. al (2015), el marco metodológico propuesto se basa en seis pasos los cuales son (1) definición de objetivos, (2) definición de la unidad funcional, (3) asignación de

productos de biorrefinería, (4) localización de la materia prima (i.e., biomasa), (5) diseño conceptual y (6) análisis del impacto de las fronteras del sistema. Un ejemplo de cadena de valor para cualquier sistema de biorrefinación se exhibe en la **Figura 5**.

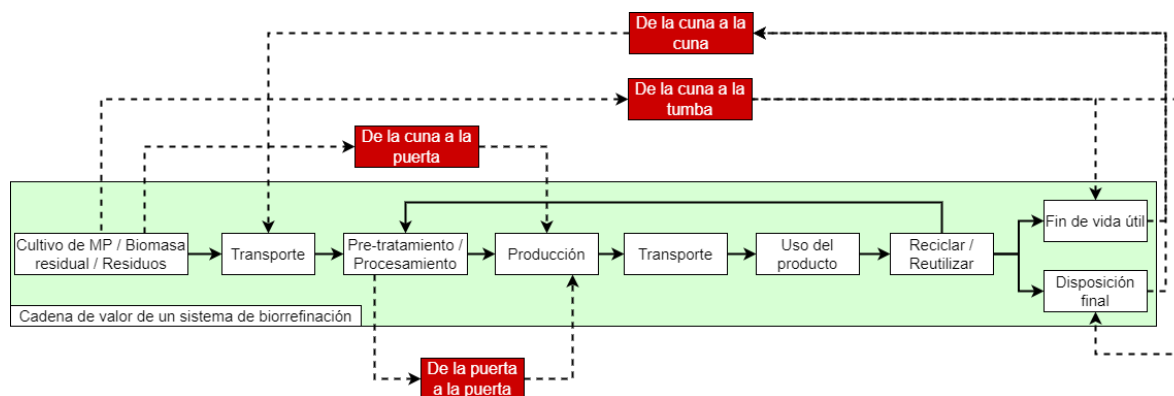


Figura 5 Cadena de valor de una biorrefinería. Adaptado de Katakojwala y Mohan (2021)

Cada marco metodológico converge asimismo en una serie de métodos de evaluación (e.g., *Impact 2002+*, *PAM*, *IPCC GWP 100a*, *ReCiPe*, *TRACI*, *CML*, *Ecoindicator-99*, etc.) cuya selección de categorías en impactos difieren según las consideraciones que se tengan como daño de punto final (e.g., ecosistema, calidad de efluentes, uso de recursos, eficiencia energética, salud humana, emisiones GEI, uso de suelo, etc.) (Dahiya, et. al, 2020; Katakojwala y Mohan, 2021) facilitando de esta manera la identificación de puntos críticos a lo largo del ACV.

2.1.2. Sistemas de calidad relacionados con plataformas de biorrefinación: revisión de literatura

La producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado pueden contribuir significativamente en la disponibilidad de bienes específicos y energía renovable para el territorio nacional. No obstante, el establecimiento de procesos a escala comercial (según lo

requieran los mercados locales, nacionales e internacionales) puede impactar negativamente los dominios económicos, ambientales (e.g., efectos del cambio climático y conservación de ecosistemas) y sociales (e.g., calidad de vida, seguridad alimentaria, pobreza, desigualdad) con un coeficiente significativo (Asveld, Osseweijer y Posada, 2019; Sacramento-Rivero et. al, 2010).

Las herramientas relacionadas a la evaluación de la sostenibilidad de procesos y sistemas relacionados a procesos bioenergéticos han sido estudiadas ampliamente en la literatura (e.g., Liu et. al, 2021; Sacramento-Rivero et. al, 2010; Vance, Sweeney y Murphy, 2022), sin embargo la experiencia, criterio y definición de las fronteras por parte del investigador ha sido una variable no estandarizable recurrente, por lo que una evaluación de sostenibilidad en plataformas de biorrefinación requiere una estrategia robusta que considere la proposición de métodos alternativos que contribuyan al desplazamiento de tecnologías convencionales que inciden negativamente en más de una dimensión.

En la **Tabla vi**, Watanabe et. al (2016) establece los parámetros más frecuentes empleados en los sistemas de biorrefinación en los dominios tecno-económico, ambiental y social. Cabe destacar que las evaluaciones de impacto social no se han explorado de forma robusta como las evaluaciones ambientales y tecno-económicas debido a la falta de herramientas adecuadas. Se ha reconocido que la complejidad del comportamiento social hace que la cuantificación de los impactos sociales sea una tarea complicada (Burdge, 2012; Ribeiro, 2013).

Tabla vi Parámetros más frecuentes en la medición de las dimensiones tecno-económica, ambiental y social de una plataforma de biorrefinación. Adaptado de Watanabe et. al (2016)

Tecno-económico	Ambiental	Social
Tiempo de vida de la planta Tasa de interés Porcentaje de apalancamiento Fecha de referencia Tasa de cambio Depreciación Precio de la materia prima i-ésima Precio unitario del producto i-ésimo Costo de servicios	Análisis de ciclo de vida (ACV): - Transporte - Uso de suelo - Maquinaria - Uso de agua - Emisiones hacia aire, agua y tierra - Impuestos de carbono - Optimización energética - Impactos ambientales (e.g., calentamiento global, acidificación, ecotoxicidad, smog, eutroficación, etc.)	Análisis de ciclo de vida social (ACVS): - Cantidad de puestos de trabajo - Condiciones de trabajo - Seguridad ocupacional - Calidad de salud en la comunidad - Perfil educacional - Perfil salarial

El uso de estos marcos conceptuales o conjuntos generalizados de indicadores presentan un problema práctico fundamental cuando se aplican a una operación comercial específica, ya que están diseñados para su aplicación a grandes organizaciones, áreas geográficas, etc. Por lo tanto, en casos específicos, se requiere cuidado para garantizar que se tengan en cuenta las cuestiones que no están cubiertas en el marco general o la metodología implementada (Magaña-Mendoza, 2018). Es fundamental la interpretación y adaptación para seleccionar un conjunto específico de indicadores, lo cual es complicado cuando la metodología se define en terminología abstracta y de alto nivel. Además, el conjunto de indicadores resultante puede no ser exhaustivo en la cobertura de todos los temas relevantes, o puede no estar relacionado con una definición aceptable de sostenibilidad. Si diferentes empresas adoptan enfoques diferentes, los resultados carecerán de comparabilidad (Tahir y Darton, 2010; Ahlgren et. al, 2015; Suwelack, y Wüst, 2015; Sacramento Rivero et. al, 2022).

Distintas evaluaciones en tres, dos o una dimensión para el caso de plataformas de biorrefinación se han registrado en la literatura a partir de biomasa lignocelulósica y desechos agroindustriales. Watanabe et. al (2016) presenta algunas de las técnicas mencionadas en la **Tabla vi** aplicadas al diseño conceptual de una biorrefinería virtual ubicada en Sao Paulo, Brasil, cuya materia prima es la caña de azúcar. Dicha biorrefinería, catalogada como multientrada-multiproducto donde su producto principal es el bioetanol, analiza las dimensiones tecno-económicas a través de herramienta de ingeniería económica para cuantificar distintos impactos económicos; asimismo, un análisis de ciclo de vida (ACV) según ISO 14040 es utilizado para la cuantificación del impacto ambiental. Ejemplos similares sobre el diseño conceptual y análisis bidimensional (i.e., tecno-económico y ambiental) para la evaluación de los impactos ambientales y económicos pueden ser encontrados en Sánchez et. al (2020) donde se detalla la bioconversión de paja de trigo (PT) en productos de alto valor agregado (i.e., bioetanol, biogás, electricidad) en un escenario mexicano. Cabe destacar que la cuantificación de impactos ambientales fue realizada a través de la metodología propuesta por Tahir y Darton (2010). Gargalo, Carvalho, Gernaey y Sin (2016) a su vez destacan un marco sostenibilidad bidimensional (i.e., tecno-económico y ambiental) para la revalorización del glicerol a través de la producción de ácido succínico o 1,3-propanodiol debido al excedente de glicerol crudo creado en biorrefinerías de biodiesel. A diferencia de Sánchez et. al (2020), Gargalo et. al (2016) propone una visión holística estimando las métricas ambientales y económicas a través del método determinístico y uso de la técnica Monte Carlo (véase Peña, 2014) para la reducción de incertidumbre en el establecimiento de los indicadores tecno-económicos y ambientales.

A diferencia de los casos de estudio presentados anteriormente, existen otros ejemplos de estudios/metodologías utilizadas para comparar alternativas basadas en criterios/indicadores predefinidos. Azapagic (2014) propone una metodología para guiar al usuario a través de diferentes etapas de diseño conceptual para la integración de criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales para cualquier plataforma de biorrefinación. Para el último caso, los indicadores sociales tienen naturaleza cualitativa como cuantitativa que describen una serie de preocupaciones planteadas por comunidades, organizaciones no gubernamentales (ONG) y otras partes interesadas. Dichos indicadores fueron creados específicamente para la industria química y de procesos definidos a través de un marco de sostenibilidad creado por el Instituto de Ingenieros Químicos (*ICHEME*, por sus siglas en inglés) (2003) y Sikdar (2003) que es aplicable única y exclusivamente para empresas de dicho giro.

Sacramento-Rivero et. al (2012) define una metodología de evaluación bidimensional y tridimensional aplicable a plataformas de biorrefinación donde se utiliza una escala de sostenibilidad basada en una referencia absoluta y normalizada a través de métricas que cuentan con una base científica, reflejándose en la evaluación de biocombustibles sólidos cuya metodología comprende de 13 indicadores normalizados y demostrables en el contexto bioenergético mexicano para biocombustibles sólidos (Sacramento-Rivero et. al, 2022). Asimismo, otro caso de estudio se encuentra en el diseño conceptual de una biorrefinería que transforma el pasto varilla en etanol lignocelulósico, metano, calor, electricidad y fenoles (Sacramento-Rivero et. al, 2016) donde su evaluación se realiza a través de 11 indicadores normalizados.

La propuesta de Sacramento-Rivero (2016) muestra un gran potencial como un complemento valioso para las metodologías clásicas de diseño de procesos, al cuantificar la sostenibilidad durante la etapa de diseño conceptual y requiere poco esfuerzo adicional más allá de realizar el análisis bidimensional; no obstante, los resultados de cada dominio deben tratarse como categorías dependientes y con interrelaciones latentes. Cada esquema se le deberá asignar un criterio de ponderación a cada uno de los dominios de sostenibilidad. Magaña-Mendoza (2018) establece que una posible desventaja de la anterior metodología ocurre en la evaluación de cada una de las etapas de la plataforma de biorrefinación, ya que en numerosas ocasiones no se dispone de información y el investigador se ve obligado a realizar suposiciones o emplear bases de datos de otras organizaciones que no necesariamente se ajustan al contexto económico, social, geopolítico, técnico y científico del país donde se llevará a cabo la evaluación bidimensional.

Otro método empleado por varios autores (Martín-Gamboa et. al, 2019; Suwelack y Wüst, 2015) donde se realiza la integración y evaluación de tres dominios de sostenibilidad recibe el nombre de análisis de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés). Dicho método requiere la definición de objetivos y preferencias de las partes interesadas para generar los indicadores requeridos mediante criterios de índole cualitativa y/o cuantitativa. El porcentaje de ponderación para cada dominio incluido en el análisis de sostenibilidad debe ser establecido con el fin que un dominio tenga una mayor relevancia que sus homólogos.

En el escenario donde no se considere una preferencia para alguna de las dimensiones, Sánchez et. al (2014) propone la creación de un marco de sostenibilidad para sistemas de biorrefinación a través del método de análisis de procesos (PAM, por sus siglas en inglés)

creado por Tahir y Darton (2010). El objetivo de dicho método es la generación de posibles problemáticas causadas por plataformas de biorrefinación con el fin de calcular los impactos generales tanto para los dominios económicos y ambientales, además de proporcionar información que podría usarse para mejorar la sostenibilidad de los procesos bajo análisis. La flexibilidad y alcance de este método a través de la propuesta de Sánchez et. al (2014) radica en la comparación de esquemas i-ésimos (con distinto grado de tecnificación) mediante la monetización de métricas con el objetivo que cada dimensión tenga una misma unidad dimensional y pueda crearse un valor de sostenibilidad global unificado. Dicho valor determinará cuál plataforma de biorrefinación es más sostenible. Cabe destacar que el método propuesto por Sánchez et. al (2014) así como el presentado por Sacramento-Rivero et. al (2016) han sido empleados en casos de estudio para el contexto económico, social, geopolítico, técnico y científico de la República Mexicana.

2.1.3. Diseño de procesos a través de *Design For Six Sigma (DFSS)*

La metodología *Design For Six Sigma (DFSS)* es un enfoque sistemático que se utiliza para desarrollar nuevos productos, servicios o procesos con niveles excepcionales de calidad. La teoría del DFSS se define como una hipótesis que comprende áreas de conocimiento fundamentales en forma de percepciones y comprensiones de diferentes campos de la ciencia y la ingeniería, así como de las relaciones entre estas áreas fundamentales con el fin de evitar vulnerabilidades conceptuales u operacionales (Dzulinski, Braghini Junior y Chiroli, 2023), Según Creveling, Slutsky y Antis (2002), esta metodología se basa en la filosofía *Six Sigma*, centrándose en la mejora continua y minimizando la variación del proceso para lograr resultados más consistentes y predecibles; no obstante, debido a la falta de disponibilidad de

datos en la fase inicial de diseño, la mayoría de las herramientas *Six Sigma* actuales pueden resultar inútiles (Kumar et. al, 2023). En este contexto, la estrategia DFSS durante la fase inicial de un diseño conceptual se muestra en la **Figura 6**.

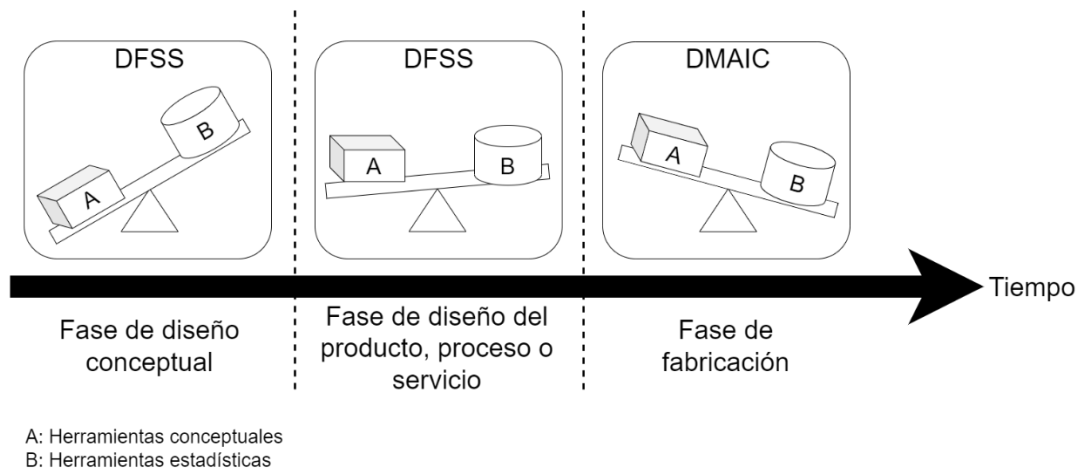


Figura 6 La estrategia DFSS en las fases de diseño de un proceso, producto o servicio. Adaptado de Yang y El-Haik (2009)

A diferencia de la metodología tradicional DMAIC que se centra en mejorar los procesos ya existentes y reduciendo la variabilidad de éstos, DFSS se centra en el diseño desde cero para garantizar que los resultados cumplan con los requisitos del cliente desde el principio. Yang y El-Haik (2009) exponen que el método DFSS suele ser un proceso secuencial, paso a paso, adaptado a las características específicas del producto o servicio que se está desarrollando. Estas fases suelen incluir definir, medir, analizar, diseñar y verificar (DMADV) que las expectativas y necesidades de un cliente fueron traducidas en especificaciones de diseño robusto para un proceso, producto o servicio.

El primer paso del ciclo DMADV consiste en comprender las necesidades del cliente que se traducen en características y especificaciones de calidad en el diseño a través de

herramientas tales como la función de despliegue de calidad (QFD, por sus siglas en inglés), *project charter*, árbol *critical-to-quality* (CTQ), 5 fuerzas de Porter, etc. La fase de medición implica mutar los anteriores requerimientos debidamente identificados en requerimientos de diseño que pueden ser medidos a través de variables que afecten la calidad del proceso o producto. El establecimiento de una línea base, tamaño de planta, validación del sistema de medición, diseño y mapeo de la cadena de valor así como la cuantificación de los indicadores establecidos durante la etapa de definición son algunas herramientas de calidad que comúnmente se encuentran en esta etapa del ciclo DMADV (Mader, 2002). Esta etapa requiere herramientas estadísticas y de análisis de datos para comprender los cambios internos y establecer una línea de base cuantitativa.

La fase de análisis se centra en comprender y cuantificar la relación entre las variables clave identificadas en la fase de medición. Se desarrollan, prueban y validan los conceptos de diseño una vez que se hayan identificado los CTQs y determinado el nivel de rendimiento requerido. El análisis y modelado de riesgos son herramientas valiosas en esta etapa para evaluar diferentes escenarios y elegir la mejor opción de diseño (Bañuelas y Antony, 2003). Por consiguiente, la fase de diseño es importante en DFSS porque implica crear una solución que cumpla con requisitos específicos. El diseño sólido y la optimización son fundamentales, por lo que es común emplear herramientas como el diseño de experimentos (DDE) para evaluar y optimar la capacidad del diseño para adaptarse al cambio, es decir, identificar aquellos niveles de los CTQs en proceso que permitirán mejorar los indicadores clave de proceso. Yang y El-Haik (2009) mencionan que si el diseño optimizado logra demostrar que se cumplen los requisitos del cliente y del negocio, es importante evaluar si el proceso,

producto o servicio cumplen en una dimensión tecno-económica. El último paso es la verificación, donde se utilizan las pruebas y la validación a través de plantas piloto para confirmar que un producto o servicio se puede fabricar o implementar con éxito a gran escala.

Cada una de estas etapas tiene su propio conjunto de herramientas y técnicas diseñadas para maximizar la calidad y la satisfacción del cliente. De manera divergente, los esfuerzos de DFSS tienden a predecir y mejorar la calidad antes de que se lancen productos y procesos mediante el uso de la metodología DMADV. No obstante, también se puede emplear para rediseñar procesos y productos actuales (Bañuelas y Antony, 2004). Este enfoque se puede utilizar para optimizar la eficacia de los procesos y productos en términos de eficiencia y eficacia, evitando de esta forma problemas futuros en las etapas de fabricación y servicio. DMADV pretende crear procesos y productos que sean (1) eficiente en el uso de recursos, (2) que sean capaces de obtener rendimientos altos (independiente de la complejidad del proceso), (3) estrictamente ligado a las demandas del cliente y partes interesadas y (4) diseño robusto en términos de procesamiento de la variabilidad (Phillips, 2002).

Varios autores (e.g., Francisco, Canciglieri Junior y Santanna, 2023; Pyzdek y Keller, 2003; Treichler et. al, 2002; Koch, Yang y Gu, 2004) afirman que existen otros factores como el riesgo, el potencial ahorro y costes que conlleva el desarrollo de un proyecto a través de DMADV no necesariamente sea la opción más adecuada, sino que debe de nutrirse de otras filosofías o metodologías (e.g., TRIZ, Taguchi, *Scamper*). Tomar una buena decisión implica hacer concesiones entre múltiples objetivos para seleccionar la alternativa que mejor se ajuste a los criterios de alta dirección. Una herramienta ampliamente utilizada en el diseño de

procesos a través de la metodología de *Six Sigma* es el proceso de jerarquía analítica (AHP, por sus siglas en inglés) con el fin de determinar el uso adecuado de la alternativa de rediseño sobre la opción de mejora.

El uso del AHP en una gama amplia de escenarios y su precisión está respaldada por la literatura (Francisco et. al, 2023; Yang y El-Haik, 2009; Banuelas y Antony, 2004 y Saaty, 1988) Bañuelas y Antony, 2003). AHP es una técnica para resolver problemas de decisión donde, para determinar la importancia relativa entre objetivos en cada nivel, se mide la fuerza de la importancia mediante comparaciones por pares y coloca los resultados en una matriz a través de los siguientes pasos (véase **Figura 7**):

- (1) Crear una jerarquía de decisiones dividiendo el problema en una jerarquía de elementos de decisión.
- (2) Recopilar información mediante una comparación por pares de elementos de decisión.
- (3) Calcular los pesos relativos de los elementos de decisión.
- (4) Determinar si los datos de entrada satisfacen un índice de coherencia. Si no es así, se regresa al paso 2 y se vuelve a ejecutar comparaciones por pares.
- (5) Sumar las ponderaciones relativas para obtener las puntuaciones y, por tanto, las clasificaciones para las alternativas de decisión.

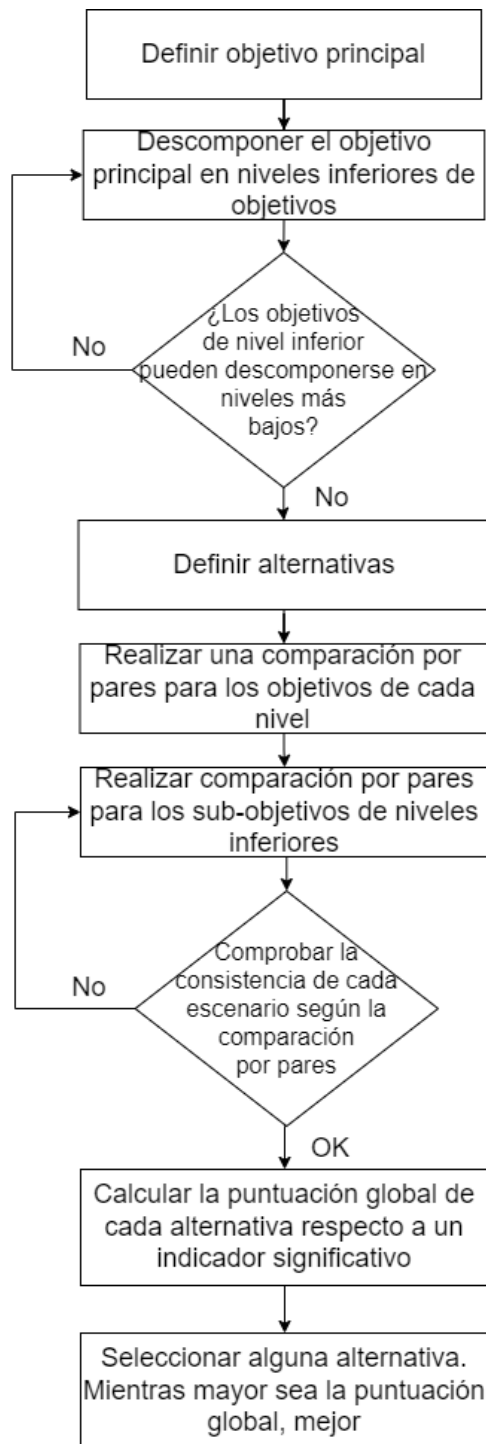


Figura 7 Diagrama de flujo del proceso de jerarquía analítica en un proyecto DFSS.

Adaptado de Bañuelas y Antony (2004).

CAPÍTULO III: ETAPA DE MEDICIÓN

3. Marco metodológico de referencia

En este capítulo se describe la estrategia empleada en la resolución de los casos de estudio BIOREFF 1 y BIOREFF 2 empleando como materia prima el lactosuero (LS) y el residuo de malta cervecera (RMC) procedente de la industria láctea y cervecera, respectivamente. Asimismo, se identifican las principales herramientas tecnológicas a utilizar en la proposición de un marco de sostenibilidad apropiado para evaluar bidimensionalmente las plataformas BIOREFF 1 y BIORREF 2. Se muestra la disposición de los procesos involucrados, las herramientas propias de la metodología DMADV con el fin de identificar los factores clave del proceso y determinar los métodos y herramientas necesarias para establecer la línea base del proceso. Finalmente, se realiza una exploración en el dominio financiero y las consideraciones adecuadas para la evaluación de factibilidad tecnológica y ambiental de las plataformas antes citadas.

3.1. Análisis de referencia: primera hipótesis

H_0 : A través de la simulación a nivel de diseño conceptual de una plataforma bioquímica “multientrada-multiproducto”, los esquemas de biorrefinería BIOREFF 1 y BIORREF 2 no son capaces de lograr una sostenibilidad tecno-económica y ambiental a partir del uso integral de residuos procedentes de la industria láctea y cervecera, procedentes de la región occidente del país.

H_1 : A través de la simulación a nivel de diseño conceptual de una plataforma bioquímica “multientrada-multiproducto”, los esquemas de biorrefinería BIOREFF 1 y BIORREF 2 son

capaces de lograr una sostenibilidad tecno-económica y ambiental a partir del uso integral de residuos procedentes de la industria láctea y cervecera, procedentes de la región occidente del país.

3.2. Definición de línea base y estrategia de investigación

A través de la metodología DMADV, la estrategia de investigación empleada en este documento consiste en una aproximación a través de un enfoque mixto, debido a que se integra la revisión de bibliografía a través de publicaciones científicas indexadas y datos experimentales evaluados en condiciones de escalamiento para llevar a cabo el diseño conceptual del sistema de biorrefinación con las suposiciones y consideraciones pertinentes. Se pretende generar los valores de entrada con el fin de crear información y modelos matemáticos de calidad/utilidad.

La línea base de la situación que se aborda en este documento parte del ciclo participativo de tres proyectos de aplicación profesional (PAP) ejecutados durante el periodo de otoño 2021 y primavera 2022, los cuales tienen por objetivo el desarrollo de conocimiento teórico y práctico en la ingeniería de procesos para la integración de datos experimentales y de optimización estadística de plataformas *S. boulardii* y *L. plantarum* donde LS y RMC participan como medios de cultivo para el crecimiento de los microorganismos anteriormente mencionados. Dichas operaciones representan dos etapas del diseño conceptual de BIOREFF

1. La aportación en el estado del arte de este documento se resume a continuación:

- Evaluación y escalamiento de bioprocesos en las condiciones de sacarificación y fermentación simultánea con *S. boulardii* a partir de LS he para la obtención de enzima invertasa y biomasa probiótica (i.e., levadura) (Gutiérrez y Rueda, 2021).

- Evaluación y escalamiento de bioprocesos en las condiciones de fermentación con *L. plantarum* a partir de RMC desechado por la industria cervecera para la obtención biomasa probiótica (i.e., lactobacilos), lactasas y ácido láctico (Fernández, Solalinde y Caballero, 2021).
- Simulación técnica de un sistema de biorrefinación para la obtención de pellets de *S. boulardii* y *L. plantarum*, ácido láctico y agua tratada a partir de un flujo másico de 107 kg/h y 54 kg/h de LS y RMC, respectivamente. Esta simulación procede de los valores experimentales obtenidos de Fernández et. al (2021) y Gutiérrez y Rueda (2021).

3.2.1. Validación del sistema de medición

Debido a que etapas anteriores de experimentación (véase Fernández et. al, 2021 y Gutiérrez y Rueda, 2021) fueron realizados en los laboratorios de Ingeniería en Biotecnología (IB) e Ingeniería de Alimentos (IA) del Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales (DPTI), es fundamental corroborar que los equipos de medición estén debidamente validados, calificados y certificados (con el fin que los parámetros fisicoquímicos y biológicos sean de calidad), además que IB e IA cuenten con procedimientos normalizados de operación (PNOs) debidamente estructurados y validados. Debido a que los laboratorios IB e IA citados cuentan con programas maestros de validación y calificación, una actividad común de dichos espacios es contar con calibraciones de equipos y servicios por parte de agentes externos. A continuación se muestra un ejemplo de certificado otorgado en la última calibración y certificación externa realizada en **26 de enero del 2023** (véase **Figura 8**).

Informe de calibración

Nº de Informe C.V.C.: CM-23/0045

Empresa: ITESO, A.C.

Domicilio: Periférico Sur Manuel Gómez Morín N° 8 585
Tlaquepaque, Jalisco, México

Teléfono: 33-36-69-34-34

Características del instrumento bajo calibración (IBC)

Instrumento:	Balanza	Intervalo de medida:	82 g / 210 g
Marca:	Ohaus	Resolución:	0,01 mg / 0,1 mg
Modelo:	DV 215CD	Tipo de instrumento:	Electrónico
Nº de Serie:	1124011529	Indicación:	Automática
Identificación:	No específica	Fecha de calibración:	2023-01-11
Área:	Laboratorio de química	Próxima calibración:	2024-01-10

Patrón (es) de medida de trabajo

Juego de Pesas:

Marca:	Mettler Toledo
Modelo:	150846
Nº de Serie:	No específica
Identificación:	CVC-L-M-155
Clase de exactitud:	E ₂
Intervalo de medida:	611, 110 g
Densidad:	7,95 g/cm³
Calibró:	MeAs
Nº de Informe:	5-1267

Este informe de calibración tiene validez únicamente en su forma íntegra y original. No se permite la reproducción parcial de este documento.

Procedimiento de calibración:
Por comparación directa con pesa patrón, de acuerdo con procedimiento PCM-02

Procedimiento para la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático, tipo electrónico.

Este informe de calibración tiene validez únicamente en su forma íntegra y original. No se permite la reproducción parcial de este documento.

Matriz Asesora y Proveedora de Equipos para Laboratorio S.A. de C.V.
AV. CAROL DE MEXICANOS NO. 2388, COL. AVANTE
44600 GUADALAJARA, JALISCO
033 3120 9795

SUCURSAL CMX
AV. CAROL DE MEXICANOS NO. 2388, COL. AVANTE
44600 GUADALAJARA, JALISCO
033 3120 9795

Servicio: 112719
Fecha: 2023-01-11
Cotización:
Factura:

Datos de cliente:

Cliente: ITESO INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Dirección: PERIFÉRICO SUR MANUEL GÓMEZ MORÍN NO. 8585
Colonia: SANTA MARÍA TLAQUEPAQUE
Deleg./Municipio: SAN PEDRO TLAQUEPAQUE
Estado: JALISCO
Teléfono: 3669-3434
Usuario: MC LAURA ARIAS
Email: laarias@iteso.mx
Laboratorio/Departamento: LABORATORIO DE ALIMENTOS

Instalación:	Capacitación:	Preventivo:	Correctivo:	Revisión:
No	No	SI	No	No

Equipo	Marca:	Modelo:	Número de serie:
ESPECTROFOTOMETRO	THERMO	GENESYS 10UV	250275204

Accesorios:
Con cable

Fallas y/u observaciones:
Se recibe equipo para mantenimiento preventivo.
Mantenimiento Preventivo con desarme general, limpieza a fondo en el interior y exterior, servicio a sistema electrónico con revisión de tarjetas de control, fuente de alimentación, lámparas), alineación, limpieza de óptica, ajustes y pruebas del funcionamiento en general.

OK Equipo listo
2020-12-08 J. Coronado.

Realizó:	Conformidad / Recibido:	Fecha de término:	Código de servicio:
ING. JOSE A. CORONADO LUNA	MC LAURA ARIAS	02-12-2020	

Victoriano Saldaña Álvarez #225, Col. Ladrón de Guevara, 44600 Guadalajara, Jalisco, México.
(33) 3120 9795 ó (33) 3124 0635
WWW.JACOSIBILL.COM

Informe de calibración

Nº de Informe C.V.C.: CM-23/0044

Empresa: ITESO, A.C.

Domicilio: Periférico Sur Manuel Gómez Morín N° 8 585
Tlaquepaque, Jalisco, México

Teléfono: 33-36-69-34-34

Características del instrumento bajo calibración (IBC)

Instrumento:	Balanza	Intervalo de medida:	210 g
Marca:	Mettler Toledo	Resolución:	0,1 mg
Modelo:	AB204-S	Tipo de instrumento:	Electrónico
Nº de Serie:	1118433516	Indicación:	Automática
Identificación:	No específica	Fecha de calibración:	2023-01-11
Área:	PTI Lab. de química	Próxima calibración:	2024-01-10

Patrón (es) de medida de trabajo

Juego de Pesas:

Marca:	Mettler Toledo
Modelo:	150846
Nº de Serie:	No específica
Identificación:	CVC-L-M-155
Clase de exactitud:	E ₂
Intervalo de medida:	611, 110 g
Densidad:	7,95 g/cm³
Calibró:	MeAs
Nº de Informe:	5-1267

Este informe de calibración tiene validez únicamente en su forma íntegra y original. No se permite la reproducción parcial de este documento.

Procedimiento de calibración:
Por comparación directa con pesa patrón, de acuerdo con procedimiento PCM-02

Procedimiento para la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático, tipo electrónico.

Este informe de calibración tiene validez únicamente en su forma íntegra y original. No se permite la reproducción parcial de este documento.

Matriz Asesora y Proveedora de Equipos para Laboratorio S.A. de C.V.
AV. CAROL DE MEXICANOS NO. 2388, COL. AVANTE
44600 GUADALAJARA, JALISCO
033 3120 9795

SUCURSAL CMX
AV. CAROL DE MEXICANOS NO. 2388, COL. AVANTE
44600 GUADALAJARA, JALISCO
033 3120 9795

Servicio: 112719
Fecha: 2023-01-11
Cotización:
Factura:

Datos de cliente:

Cliente: ITESO INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Dirección: PERIFÉRICO SUR MANUEL GÓMEZ MORÍN NO. 8585
Colonia: SANTA MARÍA TLAQUEPAQUE
Deleg./Municipio: SAN PEDRO TLAQUEPAQUE
Estado: JALISCO
Teléfono: 3669-3434
Usuario: MC LAURA ARIAS
Email: laarias@iteso.mx
Laboratorio/Departamento: LABORATORIO DE ALIMENTOS

Instalación:	Capacitación:	Preventivo:	Correctivo:	Revisión:
No	No	SI	No	No

Equipo	Marca:	Modelo:	Número de serie:
ESPECTROFOTOMETRO	THERMO	GENESYS 10UV	2060016093

Accesorios:
Con cable

Fallas y/u observaciones:
Se recibe equipo para mantenimiento preventivo.
Mantenimiento Preventivo con desarme general, limpieza a fondo en el interior y exterior, servicio a sistema electrónico con revisión de tarjetas de control, fuente de alimentación, lámparas), alineación, limpieza de óptica, ajustes y pruebas del funcionamiento en general.

OK Equipo listo
2020-12-08 J. Coronado.

Realizó:	Conformidad / Recibido:	Fecha de término:	Código de servicio:
ING. JOSE A. CORONADO LUNA	MC LAURA ARIAS	02-12-2020	

Victoriano Saldaña Álvarez #225, Col. Ladrón de Guevara, 44600 Guadalajara, Jalisco, México.
(33) 3120 9795 ó (33) 3124 0635
WWW.JACOSIBILL.COM

Figura 8 Documentos de calificación/validación para distintos equipos de medición en los laboratorios de IQ, IBT e IA

Por otro lado, los documentos institucionales del ITESO que fungen como evidencia en el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-177-SSA1-2013 “Buenas prácticas de laboratorio”, donde se establecen los requisitos mínimos que deben cumplir los

laboratorios para asegurar la calidad y fiabilidad de los resultados de las pruebas realizadas en términos de personal capacitado, instalaciones, equipos y materiales adecuados y calibrados, buenas prácticas de documentación, controles de calidad internos y participación en programas externos de evaluación de la calidad (véase **Tabla vii**). Por otro lado, la **Figura 9** expone la carátula de los documentos para el caso del laboratorio de Química (9A), laboratorio de Ingeniería de Alimentos (9B) y laboratorio de Ingeniería en Biotecnología (9C).

Tabla vii Documentos institucionales en los laboratorios de Ingeniería Química, Ingeniería de Alimentos e Ingeniería en Biotecnología del ITESO

ID del documento	Nombre del documento	Fecha de actualización
PL-DGA-DPTI-001	Políticas de uso del almacén y los laboratorios de Química	05/04/2019
PL-DGA-DPTI-002	Políticas de uso de los laboratorios y planta piloto de Ingeniería de Alimentos	14/01/2016
PL-DGA-DPTI-003	Políticas de uso de los laboratorios de Ingeniería en Biotecnología	08/08/2018



Políticas de uso del almacén y los laboratorios de Química

Código: PL-DGA-DPTI-001
Revisión: C
Fecha autorización: 05/04/2019
Páginas: 1 de 12

A

1. ANTECEDENTES Y MOTIVOS

El DPTI cuenta con laboratorios y talleres para realizar actividades dentro de las asignaturas de diferentes programas educativos, así como proyectos y servicios profesionales.

Estas políticas aplican a todos los usuarios de los laboratorios de Química e Ingeniería Química, siendo actualmente los estudiantes activos, personal docente y administrativo, investigadores, egresados y beneficiarios de servicios profesionales.

2. DISPOSICIONES

2.1 SERVICIOS DEL ALMACÉN

- 2.1.1 El almacén de química prestará servicio en el horario fijado por el profesor encargado de los laboratorios.
- 2.1.2 Todos los alumnos inscritos en asignaturas cuyo trabajo experimental se realice en los laboratorios de química e ingeniería química, tienen derecho a solicitar del almacén el equipo de trabajo autorizado por el profesor responsable del laboratorio, necesario para sus prácticas.
 1. El equipo se solicitará mediante el sistema informático de control de inventario del almacén, en el que cada alumno estará inscrito.
 - 2.1.2.1.1 Cuando el alumno solicite material en préstamo por primera vez, se le dará de alta en el sistema, para llevar el control del material y los instrumentos.
 - 2.1.2.1.2 En las ocasiones subsiguientes el alumno mostrará su credencial para acceder al sistema de préstamos.
 2. El almacenista entregará al alumno el equipo solicitado, anotando los datos requeridos por el sistema y las especificaciones del equipo.
 3. A ningún alumno se le facilitará equipo sin la autorización del profesor responsable de la práctica.
- 2.1.3 El alumno deberá regresar al almacén el equipo solicitado después de utilizarlo, o bien guardarlo en la gaveta del equipo hasta fin de semestre. El último día de clases será la fecha límite para regresar el equipo retenido.

FO-REC-DF-009 - FORMATO DE POLÍTICA (Rev. 8)

Para asegurar que posee la versión vigente de este documento, consulte: <http://dpti.iteso.mx>



ITESO Universidad
Jesuita de Guadalajara

Políticas de uso de los laboratorios de Ingeniería en Biotecnología

Código: PL-DGA-DPTI-003
Revisión: B
Fecha autorización: 08/08/2018
Páginas: 1 de 5

C

1. ANTECEDENTES Y MOTIVOS

La ciencia es un proceso metódico de exploración que tiene como resultado una serie de descubrimientos que deben ser interpretados mediante el desarrollo del aprendizaje cognitivo adquirido. El aprendizaje ocurre en el aula y se aplica en los laboratorios o en la investigación en campo. Como parte de su formación en ciencias, existe una serie de actividades que involucran el uso de diversos materiales, equipos y productos químicos dentro de los laboratorios de la institución, por lo tanto, la seguridad de los estudiantes, investigadores y personas en general dentro de estas instalaciones son de absoluta prioridad.

Estas políticas aplican a todos los usuarios de los laboratorios de Ingeniería en Biotecnología, siendo actualmente los estudiantes activos, personal docente y administrativo, investigadores, egresados y beneficiarios de servicios profesionales con la finalidad de ayudarles a comprender su papel en el aseguramiento de una buena práctica experimental dentro de nuestras instalaciones. Deben seguirse en todo momento y de ser necesario, los encargados de las instalaciones o en su defecto los instructores docentes les proporcionará reglas adicionales que se deberán adoptar en situaciones específicas. La institución se deslindará de cualquier responsabilidad por incidentes ocasionados por el incumplimiento de cualquiera de los puntos expuestos en este documento.

2. DISPOSICIONES

2.2 SOBRE LA CONDUCTA DEL ESTUDIANTE

- 2.2.1 Deberás conducerte con responsabilidad dentro del laboratorio, está estrictamente prohibido el comportamiento malicioso y lascivo, así como arrojar objetos dentro de las instalaciones. Todo tipo de instrucción verbal o escrita referente a tu seguridad en el manejo de algún equipo o reactivo, debe ser tomada en cuenta antes de iniciar cualquier actividad experimental.
- 2.2.2 Queda estrictamente prohibido trabajar en los laboratorios bajo la influencia del alcohol o cualquier droga ilegal.
- 2.2.3 Cualquier consumo o aplicación de algún producto como; comer, beber, mascar chicle, maquillarse, manipular lentes de contacto, etc. son considerados posibles vectores de contaminación hacia tu persona, por lo tanto, no están permitidos en los laboratorios.
- 2.2.4 Está prohibido realizar actividades experimentales sin la supervisión o autorización de un instructor capacitado, como también, ingresar a las áreas de almacenamiento de productos químicos.

FO-REC-DF-009 - FORMATO DE POLÍTICA (Rev. 8)

Para asegurar que posee la versión vigente de este documento, consulte: <http://dpti.iteso.mx>



ITESO Universidad
Jesuita de Guadalajara

Políticas de uso de los laboratorios y planta piloto de Ingeniería de Alimentos

Código: PL-DGA-DPTI-002
Revisión: A1
Fecha autorización: 14/01/2016
Páginas: 1 de 10

B

3. ANTECEDENTES Y MOTIVOS

El DPTI cuenta con laboratorios y talleres para realizar actividades dentro de las asignaturas de diferentes programas educativos, así como proyectos y servicios profesionales.

Estas políticas aplican a todos los usuarios de los laboratorios y planta piloto de Ingeniería de Alimentos, siendo actualmente los estudiantes activos, personal docente y administrativo, investigadores, egresados y beneficiarios de servicios profesionales, con la finalidad de establecer los criterios de trabajo y responsabilidades dentro de nuestras instalaciones para el buen desempeño de las actividades. La institución se deslindará de cualquier responsabilidad por incidentes ocasionados por el incumplimiento de cualquiera de los puntos expuestos en este documento.

4. DISPOSICIONES

2.1 DE LOS LABORATORIOS

- 2.1.1 **Personal.** El ingreso al área de laboratorios se deberá hacer tomando como referencia las Buenas Prácticas de Manufactura (BPMs), que se describen a continuación:
 - 2.1.1.1 Bata blanca, de manga larga, limpia y planchada. Se debe portar cerrada. De preferencia que no tenga botones o que los mismos estén ocultos.
 - 2.1.1.2 Pantalón largo, no faldas, ni bermudas, shorts o pantalones que no cubran la totalidad de la pierna. Evitar materiales sintéticos, tipo pants o leggings de nylon o lycra.
 - 2.1.1.3 Zapatos cerrados, de piel, que cubran todo el pie, con suela antideslizante, de preferencia bota industrial. No se permitirá el ingreso con tacones, tenis de cualquier tipo, zapatilla flat o bota de tela. Siempre deberán portar calceta o calcetín. Evitar el uso de medias de nylon.
 - 2.1.1.4 Cofia, la cual se proporciona en el almacén. Se puede utilizar varias veces lavándola adecuadamente. Es necesario recoger el cabello de tamaño medio a largo antes de colocar la cofia.
 - 2.1.1.5 Uñas cortas, al ras del crecimiento, sin esmalte, brillo o aplicaciones. No se permite el uso de uñas postizas.

FO-REC-DF-009 - FORMATO DE POLÍTICA (Rev. 8)

Para asegurar que posee la versión vigente de este documento, consulte: <http://dpti.iteso.mx>

Figura 9 Políticas de uso los laboratorios de Química (A), Ingeniería en Alimentos (B) e Ingeniería en Biotecnología (C)

3.2.2. Tamaño de planta

Con el objetivo de determinar los valores de entrada (i.e., cantidad de LS y RMC) que se alimentarán a los sistemas de biorrefinación, resulta fundamental calcular un tamaño de planta según la disponibilidad del país y/o entidad federativa. Anteriormente en la sección 1.2.1 *Entorno del objeto de estudio* se realizó un mapeo de la producción industrial de diferentes tipos de queso desde el año 2010 hasta el año 2021, mientras que el mapeo de la producción mensual de cerveza fue desde el año 2013 hasta el año 2022. La **Tabla viii** presenta una estratificación de los anteriores datos en unidades dimensionales pertinentes (i.e., producción anual de LS y RMC, respectivamente).

Tabla viii Estratificación de la producción anual de LS (millones de litros, periodo 2010-2021) y RMC (miles de toneladas, periodo 2013-2022) en México y Jalisco

Año	Producción (ton queso) México	Producción LS (M L) México	Producción LS (M L) Jalisco
2010	266,323	2523.06	527.32
2011	275,411	2609.16	545.31
2012	292,551	2771.54	579.25
2013	323,944	3068.94	641.41
2014	353,573	3349.64	700.07
2015	363,271	3441.51	719.28
2016	375,597	3558.29	743.68
2017	363,845	3446.95	720.41
2018	453,553	4296.82	898.03
2019	476,927	4518.26	944.32
2020	487,397	4617.45	965.05
2021	516,155	4889.89	1021.99
Año	Producción (m M L cerveza) México	Producción RMC (m ton) México	Producción RMC (m ton) Jalisco
2013	8.46	1692.1	132.0
2014	9.15	1829.0	142.7

2015	9.72	1943.1	151.6
2016	10.43	2086.4	162.7
2017	11.18	2235.6	174.4
2018	12.16	2432.5	189.7
2019	12.45	2490.0	194.2
2020	11.87	2373.7	185.1
2021	13.47	2693.9	210.1
2022	14.17	2834.2	221.1

La **Tabla ix** incorpora elementos de estadística descriptiva para la producción de LS y RMC a nivel nacional.

Tabla ix Elementos de estadística descriptiva en la generación de residuos de tipo LS y RMC para el escenario nacional

Variable	LS (M L) México	RMC (m ton) México
Mínimo	2,523.1	1,692.1
Máximo	4,889.9	2,834.2
Media	3,591.0	2,261.1
Mediana	3,444.2	2,304.6
Rango	2,366.8	1,142.1
Desviación estándar	811.8	373.1
Varianza	659,063.4	139,219.7
Asimetría	0.3150	-0.0387

De la **Tabla ix**, se observan los siguientes fenómenos:

- La generación de residuos LS y RMC tiende a un valor de 3,591.0 M L y 2,261.1 m ton, respectivamente. El 50% de la producción de LS tiene valores de 3,444.2 M L o menos, mientras que el 50% de la producción RMC tiene valores de 2,304.6 m ton o menos.
- La dispersión máxima registrada en el periodo de 2010-2021 en la generación de LS es de 2,366.8 M L, mientras que la dispersión máxima registrada en el periodo de 2013-

2022 para RMC es de 1,142.1 m ton. Existe una dispersión promedio de 811.8 M L para el caso de LS mientras que RMC registra una dispersión promedio de 373.1 m ton.

- Debido a que el coeficiente de asimetría en la generación de LS es un valor positivo, existe mayor concentración de datos por debajo de la media. El sesgo próximo a cero en la generación de residuos de tipo RMC indica que existe una concentración de datos equivalente antes y después de la media aritmética.

Con el objetivo de implementar límites inferiores y superiores apropiados para la proposición de un tamaño de planta a través de una media poblacional (μ), se procede a realizar una prueba de bondad de ajuste para determinar si la muestra de datos recolectada proviene de una población con una distribución de probabilidad normal. En otras palabras, se evalúa la adecuación del ajuste entre la distribución teórica y los datos observados en una distribución simétrica. La hipótesis nula (H_0) y alternativa en esta prueba de hipótesis son:

H_0 : No existe diferencia estadísticamente significativa entre la distribución de los datos y una distribución normal.

H_1 : Existe al menos una diferencia estadísticamente significativa entre la distribución de los datos y una distribución normal

Debido a que tanto la producción de RMC para México y Jalisco así como la producción de LS para México y Jalisco difieren entre sí a través de un factor dimensional, se presentan los resultados de la prueba de bondad de ajuste para el escenario nacional.

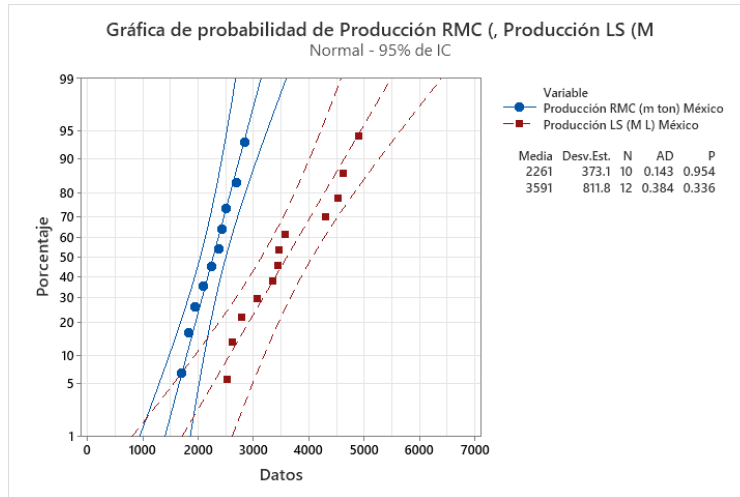


Gráfico 6 Prueba de bondad de ajuste en Minitab para los niveles de producción LS y RMC en un escenario nacional

Del **Gráfico 6**, el valor-p para ambas variables son mayores a un nivel de significancia (α) de 0.05, por lo que no existe suficiente evidencia para rechazar H_0 . Se concluye con un 95% de confianza que no existe diferencia estadísticamente significativa entre la distribución de los datos y una distribución normal. Por consiguiente, es factible utilizar el promedio como medida de tendencia central.

A continuación, se establece un intervalo de confianza para la media poblacional (μ) en la producción de LS y RMC tanto en un escenario nacional (México) como un escenario estatal (Jalisco). Para la construcción de dichos intervalos, se ha propuesto un nivel de significancia igual al 5%.

Tabla x Tamaño de planta propuesto para un escenario nacional y estatal en la revalorización de residuos tales como LS y RMC

LS		México		Jalisco	
		<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
	M L/mes	256.3	342.2	53.56	71.53
	M L/día	8.5	11.4	1.79	2.38
	M L/h	0.3559	0.4753	0.0744	0.0993
	L/h	355,914	475,324	74,387	99,343
RMC		México		Jalisco	
		<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
	ton/mes	166,175	210,667	12,963	16,431
	ton/día	5,539	7,022	432	548
	ton/h	231	293	18	23
	kg/h	230,799	292,593	18,003	22,821

Los anteriores hallazgos permiten establecer que con un tamaño de muestra de 12 observaciones, se concluye con un 95% de confianza que la producción media de LS a nivel nacional y estatal es de 355,914 a 475,324 L/h y 74,387 a 99,343 L/h, respectivamente. Para el caso de RMC, se concluye con un 95% de confianza y tomando muestras de 10 observaciones, la producción media de RMC a nivel nacional y estatal es de 230,799 a 292,593 kg/h y 18,003 a 22,821 kg/h, respectivamente.

La **Tabla xi** exhibe una matriz de sensibilidad con el fin de establecer las fronteras en el sistema respecto al intervalo superior anteriormente calculado. Debido a que tanto la producción de RMC para México y Jalisco así como la producción de LS para México y Jalisco difieren entre sí a través de un factor dimensional, se presentan los resultados para el escenario estatal. Se emplea el límite superior como condición frontera.

Tabla xi Matriz de sensibilidad en las condiciones de frontera para LS y RMC del sistema de biorrefinación para el escenario estatal

		Lactosuero (LS) (L/h)				
		3,000	27,000	51,000	75,000	99,000
Residuo de Malta Cervecera (RMC) (kg/h)	12,000	Evaluación de indicadores de la dimensión tecno- económica y ambiental que aportan un valor de sostenibilidad global ij-ésimo				
	14,750					
	17,500					
	20,250					
	23,000					

La posibilidad de extrapolar los anteriores límites de confianza debido a la creciente producción de queso (véase **Tabla iii**) y cerveza (véase **Gráfico 5**) en la República Mexicana puede observarse a través de una gráfica de rachas. Dicha representación es un tipo de gráfico utilizado en el análisis de datos para evaluar si una serie de datos exhiben un patrón aleatorio o no. Esta gráfica es útil para identificar si existe un patrón sistemático en los datos (i.e., mezcla, conglomerado, tendencia u oscilación), como un cambio en la media o una variabilidad por causas especiales que deba ser analizada. Sea la hipótesis nula (H0) e hipótesis alternativa (H1) de este ejercicio estadístico:

H0: Los datos siguen una secuencia aleatoria

H1: Los datos siguen una secuencia no aleatoria

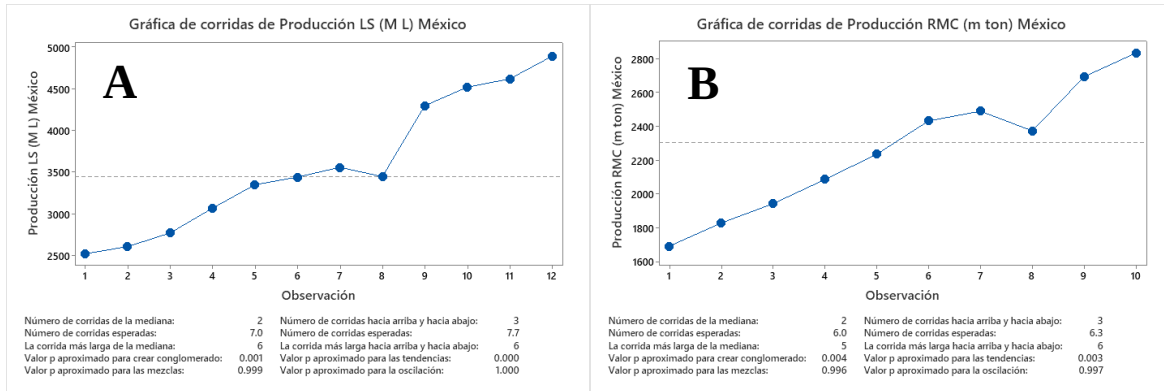


Gráfico 7 Representación de variación por causas especiales en la producción de LS y RMC para el escenario nacional

Del **Gráfico 7A** y **Gráfico 7B** se observa que el valor-p para la categoría de conglomerados (i.e., grupos o elementos repetidos en un área específica de la gráfica) y tendencia (i.e., grupo de observaciones con una dirección y fuerza sostenida a lo largo del tiempo) son menores al valor de significancia ($\alpha=0.05$), por lo que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la H_0 . Se concluye con un 95% de confianza que los datos siguen una secuencia no aleatoria y la variación es debida a causas especiales que deben ser estudiadas. Los intervalos de confianza exhibidos en la **Tabla x** no deben de considerarse como perpetuos para la línea de tiempo y alcance de este documento, es decir, eventos futuros al año 2021 para LS y año 2022 para RMC pueden alterar la capacidad o tamaño de planta.

3.2.3. Descripción de los procesos involucrados y mapeo de la cadena de valor (VSM)

A continuación, y a partir del diseño conceptual preliminar realizado por Fernández et. al (2021) y Gutiérrez y Rueda (2021), se lleva a cabo un mapeo de la cadena de valor (*Value Stream Mapping*, por sus siglas en inglés). La importancia de esta actividad durante la etapa

de medición es que permite una comprensión clara y detallada del flujo de valor en el proceso, lo que permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y la calidad del producto. Aunque el VSM que se presenta a continuación se detalla a nivel de diseño conceptual, dicha actividad ayudará a visualizar los cuellos de botella y los tiempos de espera en el proceso en una operación en continuo, permitiendo a distintos equipos interdepartamentales implementar cambios relacionados en problemas de eficiencia y eficacia. Cabe destacar que la **Figura 10** converge en un tamaño de planta de 7.56 MT/h de LS y 4.20 MT/h de RMC donde la caja de datos hace alusión a las características fisicoquímicas y biológicas indispensables (CTQs) que debe contener el producto después de cada operación unitaria.

Cada operación unitaria contiene el número de operadores requeridos (Seider, Seader y Lewin, 2009), tiempo de ciclo, tiempo disponible para cambio de herramienta y el porcentaje de utilización del equipo, donde por características del software de simulación se establece un valor fijo del 90%. La transición entre cada operación unitaria se realiza a través de un sistema FIFO (*First In First Out*) debido a que en procesos químicos, los materiales o productos se mueven a través del proceso de producción en el mismo orden en que fueron recibidos (Felder, Rousseau y Bullard, 2020).

Finalmente, se hacen presentes dos supermercados al inicio y al final del proceso que deben de cumplir una capacidad determinada que varía en función de la demanda por parte del cliente.

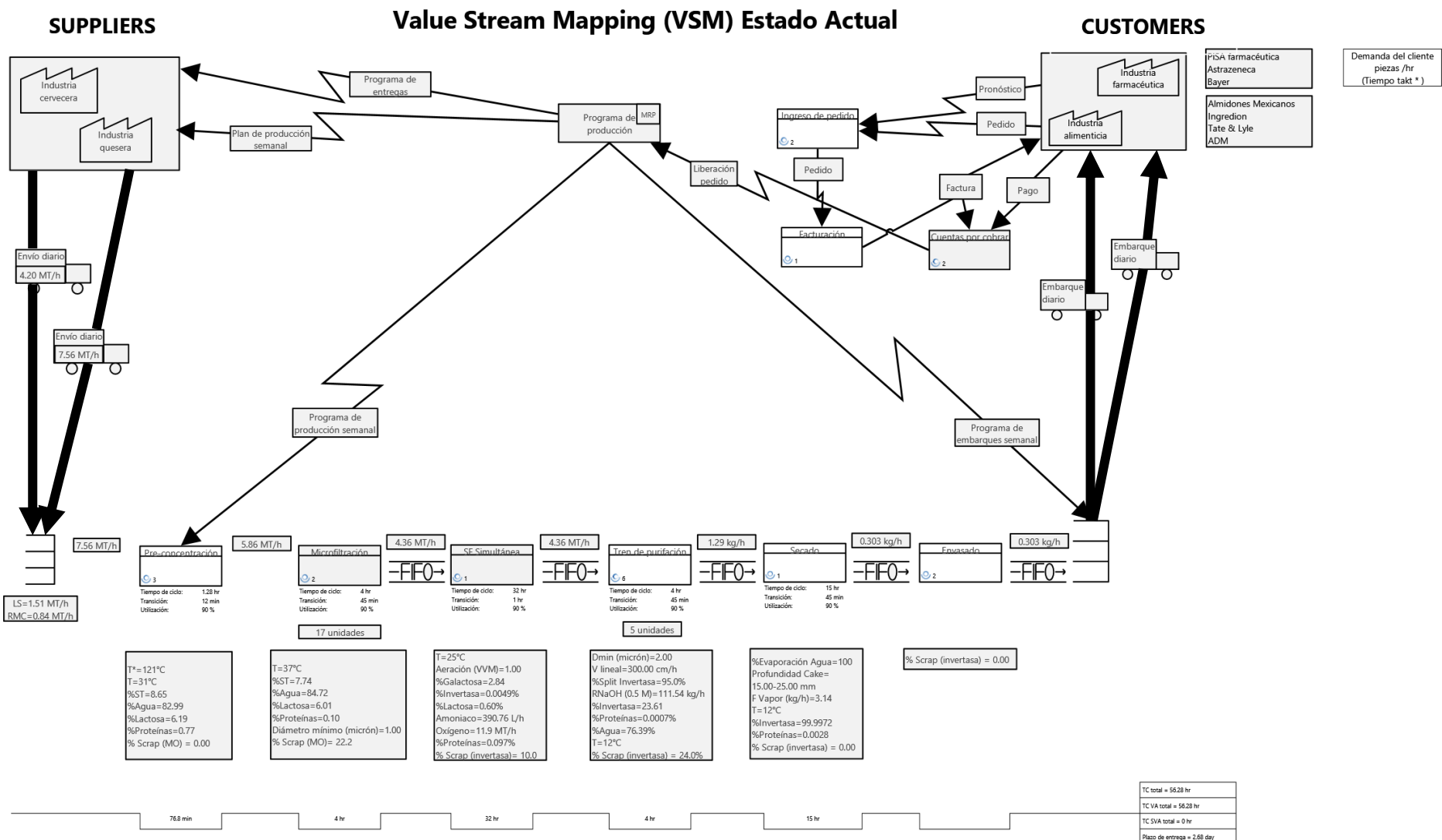


Figura 10 Value Stream Mapping (VSM) de estado actual para el sistema de biorrefinación en el esquema BIORREF 1

3.3. Metas de información

Se propone la evaluación bidimensional (sustentabilidad tecno-económica y ambiental) del sistema de biorrefinación (i.e., BIORREF 1 y BIORREF 2) a través del método de análisis de sostenibilidad desarrollado por Tahir y Darton (2010) y Global Bioenergy Partnership (2011). La adecuación para el escenario mexicano ha sido evaluada por Sánchez et. al (2014) y Magaña-Mendoza (2018). Los anteriores autores proveen las herramientas para la parametrización de indicadores económicos, ambientales y sociales a través del diseño conceptual de las tecnologías presentes en la biorrefinería. Debido a que cada una de las etapas y tecnologías presentes en el sistema de biorrefinación generan una serie de impactos desconocidos (i.e., productos, procesos y servicios), es importante cuantificar dichos valores en los dominios de sostenibilidad bidimensional. Cada uno de los dominios anteriormente mencionados debe establecerse a partir de la creación de un marco de sostenibilidad (MS) adecuado que se define en las etapas subsecuentes del proyecto. Lo anterior permite monetizar los valores de los indicadores generados a través del MS creado con el fin que éstos sean comparables e integrables entre sí, generando de esta forma un valor único y global de sostenibilidad para esquemas i-ésimos (i.e., BIORREF 1 y BIORREF 2) y puedan ser comparados entre sí, o bien, respecto a un sistema de referencia.

La **Figura 11** muestra una representación gráfica del método de análisis de proceso (MAP) presentado por Sánchez et. al (2014) así como Tahir y Darton (2010). Cabe destacar que los rectángulos sin bordes representan las etapas a ejecutar (i.e., diseño conceptual de planta, aplicación del método de análisis de procesos (*PAM*, por sus siglas en inglés), análisis

parámetros asociados a las dimensiones tecno-económica y de sustentabilidad ambiental como sugieren Sánchez et. al (2014) así como Tahir y Darton (2010). Las ecuaciones de balance de masa que involucran las conversiones de reacción y las relaciones de separación se escriben en términos de flujos másicos totales (kg/h), fracciones másicas de los componentes, índices de separación y factores de conversión (Sánchez, Sevilla-Güitrón, Magaña y Gutiérrez, 2013).

$$F_i + \sum F_j = \sum F_k \quad (1)$$

$$F_m = z_{i-m} F_i \quad (2)$$

$$x_{li} F_i + \sum x_{lj} F_j = \sum x_{lk} F_k \quad (3)$$

$$x_{lm} F_m = z_{li-m} x_{li} F_i \quad (4)$$

La **Ec. (1)** representa un modelo de un balance de masa global para un módulo determinado. Sea C un grupo identificador de una corriente, F_i , donde $i \in C$ es el flujo principal del módulo. Este flujo es escogido arbitrariamente como una referencia para los cálculos de flujos de salida. $F_j, j \neq i \in C$ son el resto de los flujos de entrada del módulo y $F_k, k \neq j \neq i \in C$ son los flujos de salida del módulo. La relación de flujo másico de entrada-salida en función de la corriente de entrada principal se calcula a través de la **Ec. (2)** donde z_{i-m} representa la fracción de separación de la corriente m con respecto a la corriente principal i . La **Ec. (3)** representa un balance por componente donde $x_{li}, -l \in L, i \in C$ es la fracción másica del componente l y L es el conjunto de identificación del componente. Por otro lado, la **Ec. (4)** se refiere a la fracción de separación de un componente específico de la corriente principal donde z_{li-m} representa la fracción de separación del componente l en la corriente principal i derivada al flujo m .

El diseño más simple del cual se parte un diseño conceptual está representado en la **Figura 12A**. La proposición de una segunda unidad con un grado de complejidad mayor que converja con la definición de un sistema de biorrefinación dado por las **Eq. (1-4)** está dado por la **Figura 12B**. Se considera que la construcción de diagramas de procesos en la etapa de diseño conceptual resulta de una herramienta fundamental para identificar las etapas de proceso (i.e., corrientes de entrada y salida en cada etapa de operación) así como su representación gráfica de los fenómenos fisicoquímicos y rutas metabólicas que ocurren dentro de éstas. Cabe destacar que los diagramas de bloques que representa a las biorrefinerías propuestas en este documento se muestran en la sección de resultados (véase Capítulo 4 de este documento).

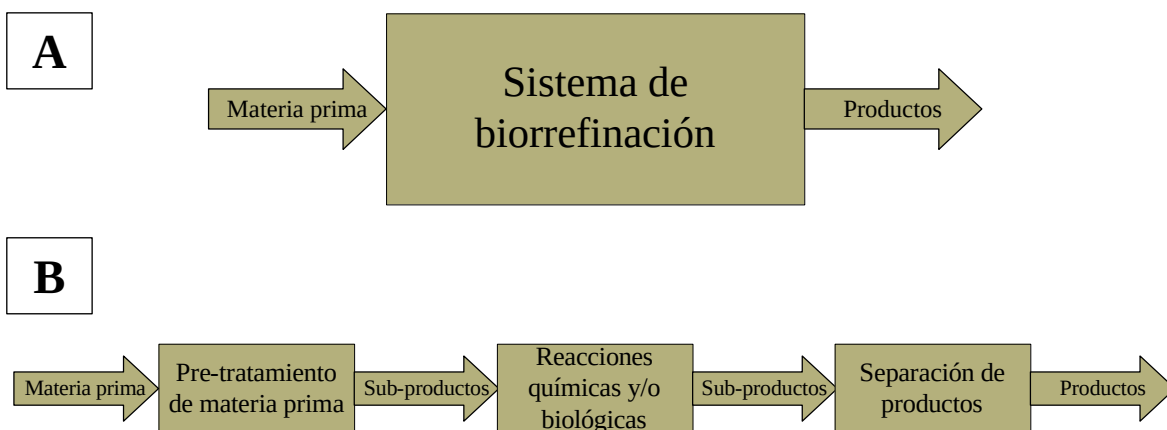


Figura 12 Diagrama de bloques simple de un sistema de biorrefinación. Adaptado de Sevilla-Güitrón (2014)

Una de las suposiciones más importantes resulta al considerar que el sistema se encuentra en estado estacionario, es decir, que las variables participantes en ella y que definen el comportamiento de cada operación unitaria o de reacción química, permanecen invariantes respecto al tiempo. El modelo de estado estacionario se construye a través del software

comercial SuperPro Designer v10 (SPD) donde se detallan las operaciones unitarias, equipo auxiliar necesario, parámetros de diseño y operación, conversiones de reacción y relaciones de separación involucrados en cada etapa del proceso. Lo anterior mencionado permite cuantificar qué, cómo y cuánto participa en cada corriente de entrada y salida de las distintas etapas que participan en el sistema de biorrefinación y determinar la inversión de capital del proyecto.

El costo de accesorios (e.g., equipos de instrumentación y control, válvulas, materiales y equipo eléctrico), edificaciones de procesos auxiliares y de servicios, talleres de mantenimiento, terrenos y acondicionamiento se calculan como una función del costo total de equipos (Towler, G. y Sinnott, 2022; Seider, Seader y Lewin, 2009). Una vez obtenido el costo total de equipos, es fundamental emplear un índice de costos que se define como la relación entre el precio real en un periodo de tiempo en comparación con dicho valor en un periodo base seleccionado (i.e., un punto definido en el tiempo o el precio promedio). Debido a las tasas de cambios en el valor del dinero debido a la inflación, deflación y/o alza de precios de materiales, estos factores índice pueden obtenerse a través del *Chemical Engineering Journal* (ElSevier, 2022). En este documento, el cálculo de costos de los equipos se llevó a cabo a través del simulador SuperPro Designer.

Las propiedades fisicoquímicas de cada una de las especies involucradas son extraídas de las bases de datos de SPD, o bien, simuladas a partir de información obtenida en literatura. Cada balance de materia y energía es calculado por SPD, así como las demandas de transferencia de calor utilizando diverso servicio auxiliar (e.g., agua de enfriamiento, agua

de chiller, freón, vapor de alta presión y vapor de baja presión) y la demanda de energía eléctrica para cada equipo de proceso.

3.3.2. Metodología del Análisis Tecno-económico

El aspecto económico es fundamental para la evaluación a nivel conceptual de un proceso. A menudo, el criterio principal para justificar la viabilidad de un nuevo diseño resulta al evaluar la factibilidad económica a través de diversas técnicas y correlaciones, en las que generalmente se evalúa si el valor presente de los flujos de capital futuros esperados justifica la inversión inicial del proyecto. Para realizar esta evaluación, se adopta el enfoque técnico propuesto el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, por sus siglas en inglés) para simular la conversión de bio-productos, que incluye diseño de procesos, simulación de procesos y técnicas diversas de estimación económica (Wooley et. al, 1999; Ayala, 2022).

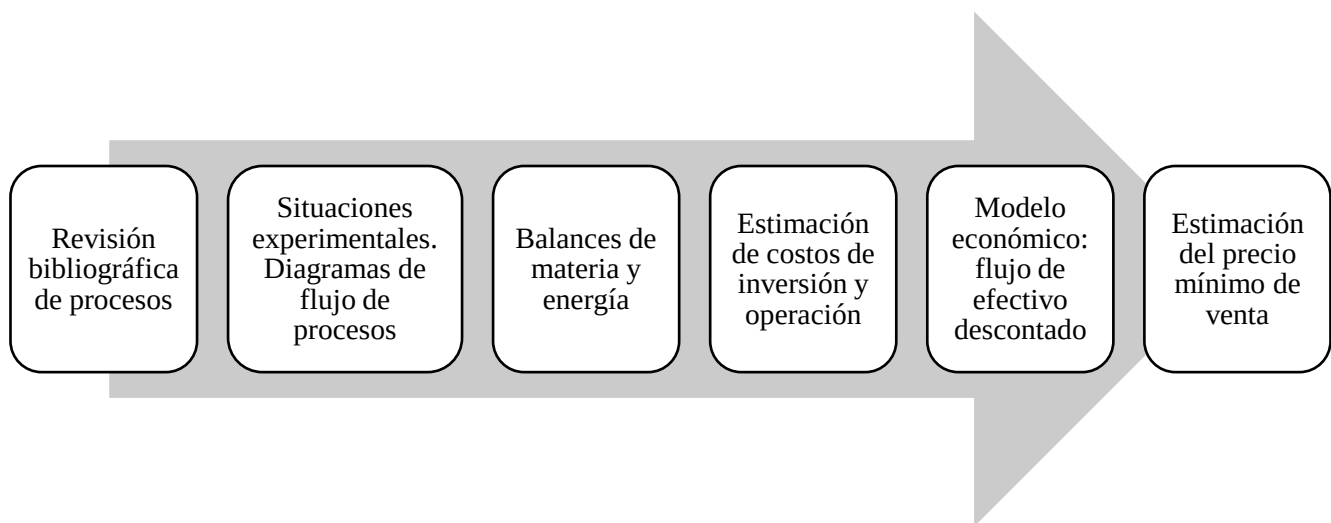


Figura 13 Perspectiva del NREL en el diseño conceptual y análisis tecno-económico de bioprocesos. Adaptado de Ayala (2022)

Towler y Sinnott (2022) exponen que en la fase de diseño conceptual de cualquier proceso químico-industrial es fundamental obtener valores cuantitativos que reflejen la viabilidad económica del proyecto a través de la inversión total de capital (ITC) y el flujo de efectivo (FE). Éste último, se define como la diferencia entre los ingresos de efectivo (i.e., venta de producto y subproductos en el sistema de biorrefinación) y los egresos de efectivo (i.e., costos relacionados a la producción (CDP) y aquellos impuestos (IMP) relacionados con la contribución hacia la Secretaría de Hacienda y Crédito Público [SHCP]).

Los costos de producción son función de los costos relacionados a ventas, administración, investigación e ingeniería, así como los costos de manufactura (CM). El costo total de producción (CTP) del producto de interés así como de los subproductos restantes pueden evaluarse a través de una técnica conocida como Valor Presente Neto (VPN) o bien, pueden considerarse como créditos y su valor se determina a través de un robusto estudio de las fluctuaciones de mercado para dicho subproducto, con el fin de obtener un precio de venta representativo. P_i representa el precio por unidad de medida de cada producto/subproducto, mientras que CTP_i es el costo total de producción asociado a un producto/subproducto (véase **Ec. 6-8**). Cabe destacar que es importante definir la tasa de interés, el porcentaje de apalancamiento, el tiempo de vida de la planta, así como el espacio-tiempo de inicio en la producción.

De acuerdo con Sevilla-Güitrón (2014) y Seider et. al (2009), la ITC representa la suma de la inversión de capital fijo (ICF) y el capital de trabajo (CT). A su vez, la ICF representa la suma de los costos directos de inversión (CDI) y costos indirectos (CI). Generalmente, el valor monetario de la ITC se logra a través de socios estratégicos, préstamos

de entidades gubernamentales o bancarias (Seider et. al, 2009), por lo tanto, la inversión inicial (I) se define como la diferencia matemática entre el ITC y el préstamo (véase **Ec. 9** y **Tabla xii**).

$$FE = \text{Ingresos de efectivo} - \text{Egresos de efectivo} \quad (6)$$

$$\text{Ingresos de efectivo} = \sum_{i=1}^n P_i(CTP)_i \quad (7)$$

$$\text{Egresos de efectivo} = CDP + IMP + \text{Costos Financieros} \quad (8)$$

$$I = ITC - \text{Préstamo} \quad (9)$$

Tabla xii Variables que componen la dimensión de la inversión total de capital (ITC) y contribuciones al costo de producción (CDP). Recuperado de Sevilla-Güitrón (2014), Seider et. al (2009) y Kobe (1958).

Contribuciones al ITC			
ICF	CDI	Costos de equipo	Equipos e instalación Instrumentación y control Tuberías y accesorios Material y equipo eléctrico
		Costo de instalaciones	Edificios de procesos principales, procesos auxiliares y servicios Talleres de mantenimiento Terrenos y acondicionamiento
	CI	Ingeniería y supervisión Gastos de construcción Gastos legales Contingencias (económicas y ambientales)	
CT	Materia prima y suministros de operación Almacenaje de productos terminados Efectivo disponible para pagos mensuales operativos Cuentas e impuestos por pagar		
Contribuciones al costo de producción (CDP)			
SARE	Ventas, administración, investigación e ingeniería		
CM	Cargos fijos		Seguros e impuestos locales

Contribuciones al ITC		
	OVERHEAD	Contabilidad, reparaciones, gastos de oficina, etc.
	Costos directos de producción	Materia prima, servicios y electricidad
		Mantenimiento, herramientas y materiales
		Mano de obra, supervisión, laboratorios, patentes y regalías

Kobe (1958), Seider et. al (2009), Magaña-Mendoza (2018) y Ayala (2022) exponen que, debido a la dependencia entre los conceptos de ITC y FE, es necesario emplear herramientas financieras que permitan evaluar la viabilidad tecno-económica de un sistema de biorrefinación, específicamente, aquellas que no consideran el valor monetario en el tiempo del proyecto. Herramientas como la tasa de retorno de la inversión (ROI) y la tasa de retorno del periodo (PBP) son útiles ya que funcionan como indicadores comunes en la rentabilidad de un proceso en las etapas tempranas de un proyecto. Romero-Perez, Vergara y González-Delgado (2021) definen el índice ROI como la relación entre la ganancia neta anual y el ITC, es decir, el porcentaje del ITC que se recupera anualmente. Por otro lado, Ayala (2022) define el PBP como el tiempo necesario para que el FE anual iguale al ICF. Según Bidar y Shahraki (2018), este tiempo debe ser menor o igual al calculado empleando un indicador denominado como la tasa mínima de retorno aceptable (MARR, por sus siglas en inglés) la cual es un estándar de la ganancia mínima que debe generar una inversión para ser atractiva y es expuesta en la **Tabla xiii**.

Tabla xiii Valores de Tasa Mínima Aceptable (MACRR) de retorno de inversión y niveles de riesgo. Adaptado de Bidar y Shahraki (2018)

Inversión	Nivel de riesgo	MARR %/anual
Base: oportunidades de inversión corporativa segura o costo capital	Seguro	4-8
Nueva capacidad con posición establecida en el mercado corporativo	Bajo	8-16
Nuevo producto que ingresa a un mercado establecido o nueva tecnología de proceso	Medio	16-24
Nuevo producto o proceso en una nueva aplicación	Alto	24-32
Todo nuevo, alto esfuerzo en I+D y marketing	Muy alto	32-48+

3.3.3. Valor Presente Neto (VPN)

El instrumento financiero que sí toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo es el Valor Presente Neto (VPN). El VPN relaciona los valores actuales del flujo de caja anual y la inversión inicial requerida con base en una tasa de interés “i” para un número dado de períodos n (definidos como anualidades). Debido a que en este documento se supone que NPV=0, entonces “i” se convierte en la tasa interna de retorno (TIR), también conocida como tasa de retorno de flujo de efectivo descontado (DCFRR, por sus siglas en inglés) considerando la entrada de efectivo (i.e., producción anual de bienes de alto valor agregado) y la salida de efectivo (i.e., costos directos de producción, cargos fijos, gastos generales de la planta, inversión de capital, costo de insumos y materia prima, anualidad del préstamo, etcétera). La **Eq. 10** expone la ecuación matemática del VPN:

$$VPN = \frac{FE[(1+i)^n - 1]}{i(1+i)^n} + \frac{CT}{(1+i)^n} - I = 0 \quad (10)$$

Los parámetros financieros que involucra el análisis se presentan en la **Tabla xiv**. El flujo de efectivo y todos los costos de la biorrefinería se indexaron al año 2022. En los esquemas multientrada-multiproducto de BIORREF 1 y BIORREF, se aplicó la metodología de asignación única del CTP al producto principal (invertasa en ambos casos, por representar el producto más valioso en términos comerciales). A los demás productos y debido que este documento representa un análisis exploratorio, no se les asignaron créditos o contribuciones positivas por la venta de estos. En lugar de ello, el precio mínimo de venta refleja un conjunto de todos los bienes producidos en el escenario BIORREF 1 y BIORREF 2 (Sánchez et. al, 2013; Ayala, 2022).

Tabla xiv Parámetros financieros empleados en el análisis tecno-económico en los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
Impuestos	%	30	NA
Tasa de interés	%	10	NA
Préstamo	%	30	NA
Inflación general promedio anual	%	7.82	Banco de México, 2023
Operación de planta	h/año	7920	NA
Tiempo de construcción	año	3	NA
Vida útil del proyecto	año	15	NA

Se consideró que una vez finalizado el periodo de construcción de la biorrefinería (3 años), se asume que la planta trabajará al máximo de su capacidad instalada. Para financiar la inversión inicial del proyecto, se contempla un préstamo equivalente al 30% de la inversión total de capital (ITC), el cual será reembolsado durante todo el periodo de vida del proyecto con una tasa de interés anual del 6%. Para tener en cuenta la variación del valor del dinero a lo largo del tiempo, se consideró una inflación general anual promedio (2022) del 7.82%

(Banco de México, 2023). Los valores del Costo de Financiamiento (CFI) y el Costo Total (CTO) del proyecto así como los costos de producción, se calcularon utilizando correlaciones estándar empleadas en la etapa de diseño conceptual de ingeniería del proyecto (Intelligen, 2020). La depreciación de la planta se calculó de manera lineal a lo largo de todo el periodo de vida de la planta. Por otro lado, se empleó el método de integración de energía (véase Dimian, Bildea y Kiss (2014)) con el objetivo de calcular el porcentaje máximo de energía recuperado (*Maximum Energy Recovered [MER]*, por sus siglas en inglés) con el fin de optimizar la recuperación de energía en procesos que involucren equipos alimentados con algún servicio auxiliar (e.g., agua de enfriamiento, agua de chiller, freón, vapor saturado). Lo anterior se realizó con la finalidad de minimizar la inversión de capital y reducir el CTP de los productos de interés en los sistemas BIORREF 1 y BIOREFF 2.

La **Tabla xv** exhibe el costo de las materias primas asociadas en el proceso de producción de los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2, así como los insumos necesarios y los servicios requeridos. El cálculo de servicios se calculó una vez culminados los balances de materia y energía, así como la integración energética de las corrientes del proceso (véase sección de **APÉNDICES**). El costo de los cocteles enzimáticos (i.e., tripsina y mix de amilasas) presentes en la etapa de hidrólisis proteica y plataforma *L. plantarum*, respectivamente, fueron obtenidos por proveedores locales (Merck KGaA, 2023; ENMEX, 2023). El costo de los demás insumos fue proporcionado por la base de datos de SuperPro Designer (SPD) (Intelligen, 2020) y/o por literatura especializada (e.g., Bellotti et. al, 2017; Hansen, 2013; Gu et. al, 2022; U.S. Geological Survey, 2020). La cantidad de operadores requeridos en la planta se determinó considerando el tipo de operación unitaria involucrada

y el tipo de producto asociado (Seider et. al, 2009). Para establecer el valor del salario en el personal involucrado (e.g., operadores, técnicos, ingenieros, etc.), se tomó como referencia el promedio anual reportado por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2022b).

Tabla xv Principales costos implicados en la simulación de los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
Lactosuero	USD/ton	0.00	Chávez, 2022
Residuo de Malta Cervecera	USD/ton	0.00	Chávez, 2022
Electricidad	USD/kWh	0.05	Ayala (2022)
Agua de proceso	USD/ton	0.20	Intelligen, 2020
Vapor de baja presión	USD/ton	12.00	Intelligen, 2020
Vapor de alta presión	USD/ton	20.00	Intelligen, 2020
Agua de enfriamiento	USD/ton	0.05	Intelligen, 2020
Agua de chiller	USD/ton	0.40	Intelligen, 2020
Freón	USD/ton	0.15	Intelligen, 2020
Amoniaco	USD/ton	200	Intelligen, 2020
Ácido clorhídrico	USD/ton	100	Intelligen, 2020
Oxígeno	USD/ton	139	Bellotti et. al, 2017; Hansen, 2013; Gu et. al, 2022
Helio	USD/kg	44.74	U.S. Geological Survey, 2020
NaOH	USD/ton	76	Intelligen, 2020
Tripsina	USD/kg	5,700.00	Merck KGaA, 2023
Mix amilasas	USD/kg	116.58	ENMEX, 2023
Mano de obra	USD/h	2.01	INEGI, 2022b

3.3.4. El concepto de sostenibilidad y el método de análisis de proceso (MAP)

Con la finalidad de definir el método de análisis de proceso (MAP), es fundamental relacionar dicha proposición metodológica respecto al concepto de sostenibilidad. La sostenibilidad es un concepto que abarca la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Arena et. al,

2009; Ruggerio, 2021). Por tanto, al analizar una tecnología que podría reemplazar el proceso de producción de uno o varios bienes con valor agregado, es fundamental asegurar que tanto la materia prima como el proceso de elaboración generen beneficios económicos y ambientales tanto para las generaciones actuales como para las futuras. Si bien no se ha establecido un criterio de selección de indicadores estándar que forme parte del marco de sostenibilidad (Finkbeiner et. al, 2006; ISO, 2006), existen una serie de objetivos generales que motivan el desarrollo de esta industria sostenible y que son ampliamente utilizados en trabajos similares (e.g., Ladakis et. al, 2022; Efthymiou et. al, 2021; Ioannidou et. al, 2020; Ioannidou et. al, 2022; Souza et. al, 2017). Dichos objetivos incluyen: 1) mitigar los impactos ambientales, incluyendo aquellos relacionados con el calentamiento global, 2) asegurar la verdadera renovabilidad de la materia prima y el proceso de producción, así como la reducción del consumo y contaminación del agua, 3) evaluar la viabilidad económica de los biocombustibles en comparación con sus contrapartes fósiles en el mercado, 4) promover una producción y consumo responsables de materiales, maximizando la eficacia en la conversión de la materia prima de la biorrefinería (Griggs et. al, 2013; Clark y Wu, 2016).

Por lo anterior, el método de análisis de proceso (MAP) consiste en articular el Marco de Sostenibilidad (MS) así como los correspondientes indicadores que sustenten los impactos económicos y ambientales de la plataforma de biorrefinación. El método establecido por Tahir y Darton (2010), citado por Sánchez et. al (2014) y Magaña-Mendoza (2018) se resume de la siguiente manera:

1. Establecer los límites del sistema de biorrefinación bajo consideración, identificando entradas, salidas y actividades.

2. Examinar las entradas y salidas del sistema para establecer las actividades con relaciones lógicas a los impactos potenciales en cualquier dominio (e.g., gases de combustión, tratamiento biológico de aguas residuales, consumo de electricidad, etc.). A dichas variables se les conoce con el nombre de Generadores Internos de Impacto (GII).
3. Identificar los grupos sociales o entidades afectadas por los GII, que reciben el nombre de Receptores Externos de Impacto (REI).
4. Establecer posibles problemáticas de los REI con respecto a los impactos generados en el sistema de biorrefinación (e.g., uso de recursos, contaminación de aire, contaminación de agua, rendimiento de la plataforma, etc.). Dichas problemáticas constituirán en grupos adimensionales con los que se clasificarán los indicadores del sistema.
5. Crear indicadores que reflejen los posibles impactos en las dimensiones económica y ambiental. Dichos indicadores serán una representación cuantitativa de las problemáticas determinadas en el paso 4. Los cuantificadores usualmente reciben el nombre de métricas.

3.3.5. Análisis y ponderación de indicadores

Un análisis robusto de indicadores permite examinar resultados de dos o más conjuntos de plataformas con el fin de establecer conclusiones válidas. Dicha actividad puede proveer información acerca de la(s) etapa(s) de proceso que genera un mayor impacto en cualquiera de las dimensiones así como el indicador que tiene un mayor impacto en cada una de éstas. Es común elegir los valores de las métricas obtenidas en la plataforma cuya tecnología sea

más simple (i.e., estándar) con el fin de normalizar los resultados de las métricas respecto al caso base seleccionado. Es recomendable que cada uno de los valores finales asociados a las métricas posean un escalamiento desde la fase de diseño conceptual, datos experimentales y/o bases de datos actualizadas provenientes de organismos nacionales e internacionales en un espacio-tiempo definido por el usuario.

Cabe destacar que el contraste de indicadores permite una evaluación robusta de los principales impactos generados por el sistema de biorrefinación en las dimensiones económica y ambiental. Sin embargo, para establecer un marco de sostenibilidad apropiado, es necesario un proceso de ponderación para integrar y unificar los resultados de cada indicador en una unidad similar, por lo que la ejecución del proceso de ponderación requiere la definición de funciones dimensionales y factores de escala. Una función dimensional tiene el objetivo de traducir los indicadores en una unidad similar con el fin de asociarlos en un valor de sostenibilidad global para cada dominio y esquema del sistema de biorrefinación a evaluar.

Cada función dimensional es creada para cada métrica dependiendo de la unidad funcional de cada indicador. Por otro lado, los factores de escala son números adimensionales que multiplican un indicador determinado que ha sido traducido en una unidad común y le asigna una importancia relativa (%). Un valor negativo adjudicado a un valor de un indicador tendrá una connotación adversa para la definición de sostenibilidad adoptada en este documento; no obstante, un signo positivo en un indicador se traducirá en un impacto favorable según el marco de sostenibilidad definido.

La **Tabla xvi** muestra el marco de sostenibilidad para el esquema general de biorrefinería validado por diversos autores para un escenario mexicano (e.g., Ayala, 2022; Aguilar-Sánchez et. al, 2018; Magaña-Mendoza, 2018; Molina-Guerrero et. al, 2020; Sacramento Rivero et. al, 2022; Sacramento Rivero et. al, 2010; Sacramento-Rivero et. al, 2016; Sánchez et. al, 2014; Sánchez et. al, 2020; Sánchez et. al, 2013) que comprende 15 indicadores (ocho y siete para los dominios económicos y ambientales, respectivamente). Se incluye además los generadores internos de impacto (GII), receptores externos de impacto (REI), las etapas o fases del proceso que generan un impacto donde se relaciona una problemática, los indicadores y sus métricas relacionadas.

El enfoque distintivo de este método radicó en convertir las diferentes métricas de manera uniforme para todos los indicadores dentro del marco de sostenibilidad, tanto en términos económicos como ambientales. Para lograr esto, se optó por una unidad funcional estandarizada para la evaluación, que en este caso es el costo en dólares por kilogramo de bioproductos generados en la plataforma (USD/kg_{BP}), por lo tanto, todas las métricas se vuelven intensivas y sujetas a comparación con otros esquemas. Cabe destacar que la conversión de las métricas se realizó utilizando funciones dimensionales y factores de escalamiento previamente seleccionados con base en datos del proceso y complementados con información externa (e.g., regulaciones gubernamentales y bases de datos públicas). Los detalles de las funciones dimensionales y los valores de los factores de escalamiento utilizados en este proceso se encuentran descritos en la **Tabla xvii**.

Tabla xvi Marco de sostenibilidad para los dominios tecno-económico y ambiental

Generadores Internos de Impacto (GII)	Receptores Externos de Impacto (REI)	Problemáticas	Indicador	Métrica
DIMENSIÓN TECNO-TECONÓMICA				
Proceso de producción (operación de la planta)	Consumidores de los bienes Propietarios de la planta Inversionistas Mercado	Rendimiento del proceso y uso de recursos	Desempeño del proceso y uso de recursos	$M_Y = kg_{BP} / kg_{MP}$
			Costo total de producción (CTP)	$M_{TPC} = USD / kg_{BP}$
			Ahorro en procesos	$M_{PS} = TPC_{Market} - TPC$
	Propietarios de la planta Inversionistas Comisión Federal de Electricidad	Suficiencia eléctrica de la planta	Productividad eléctrica de la planta	$M_E = \Delta Electricity / kg_{BP}$
	Inversionistas Propietarios de la planta	Rentabilidad de la planta	Retorno de inversión (ROI)	$M_{ROI} = ROI$
			Periodo de retorno (PBT)	$M_{PBT} = PBT$
			Valor agregado	$M_V = (USD_{revenue} - USD_{MPCost}) / kg_{BP}$
	Inversionistas Propietarios de la planta	Tratamiento de residuos	Ganancia debido al tratamiento integral de residuos	$M_{TAR} = TPC_{TAR}$
DIMENSIÓN AMBIENTAL				
Fermentación TAR Acondicionamiento	Población	Calentamiento global debido a GEI	GEI emitidos	$M_{CO2} = g_{CO2eq} / kg_{BP}$
Proceso de producción (operación de la planta)	Población local	Disponibilidad de agua	Consumo de agua	$M_{WF} = L_{agua\ fresca} / kg_{BP}$ $M_{Wd} = L_{agua\ descargada} / kg_{BP}$
	Otras industrias que usan la misma fuente de agua		Calidad de agua	$M_{DQO} = DQO / kg_{BP}$ $M_{WT} = MJ_{Energía\ térmica} / kg_{BP}$ $M_{pH} = pH$
	Población local Gobierno	Eliminación de residuos	Cantidad de residuos sólidos	$M_S = kg_{residuos\ sólidos} / kg_{BP}$

Tabla xvii Función dimensional y factores de escalamiento para la conversión de los indicadores del marco de sostenibilidad

Indicador	Función dimensional	Factor de escalamiento			
		Factor	Unidades	Valor	Ref.
DIMENSIÓN TECNO-ECONÓMICA					
Desempeño del proceso y uso de recursos	$M_Y^{-1} \cdot C_Y$	Costo promedio en el traslado de la MP en la ZMG (C_Y)	USD/kg _{MP}	0.007	Gobierno de Jalisco, 2022
Costo total de producción (CTP)	$M_{TPC} \cdot C_{TPC}$	NA		1.00	NA
Ahorro en procesos	$M_{PS} \cdot C_{PS}$	NA		1.00	NA
Productividad eléctrica de la planta	$-M_E \cdot C_E$	Costo de electricidad (C_E)	USD/kWh	0.05	Ayala, 2022
Retorno de inversión (ROI)	Analizado por separado debido a la aplicación de la herramienta VPN=0				
Periodo de retorno (PBT)	Analizado por separado debido a la aplicación de la herramienta VPN=0				
Valor agregado	$M_V \cdot C_V$	Inverso de la producción anual de bioproductos en la biorrefinería	Tiempo de operación* kg _{BP} ⁻¹	3.43x10 ⁻⁸	NA
Ganancia debido al tratamiento integral de residuos	$M_{PTAR} \cdot C_{TAR}$		Tiempo de operación* kg _{BP} ⁻¹	3.43x10 ⁻⁸	NA
DIMENSIÓN AMBIENTAL					
GEI emitidos	$-M_{CO_2} \cdot C_{CO_2}$	Costo de emisión de CO ₂ (C_{CO_2})	USD/ton-CO _{2eq}	323.50	Tol, 2023
Consumo de agua	$-M_{WF} \cdot C_{WF}$	Costo de agua de proceso (C_{WF})	USD/m ³	1.23	OECD, 2015
	$-M_{Wd} \cdot C_{Wd}$	Costo de agua de proceso (C_{Wd})	USD/m ³	1.23	OECD, 2015
Calidad de agua	$-M_{DQO} \cdot C_{DQO}$	Costo por emisión de agua contaminada (C_{DQO})	USD/kg _{DQO}	32.5	Ayala, 2022
	$-M_{WT} \cdot C_{WT}$	Costo por energía (MJ) térmica descargada (C_{WT})	USD/MJ	2.39x10 ⁻³	NA
	$-M_{pH} \cdot C_{pH}$	Costo por neutralización de iones H ⁺ /OH ⁻	NA	NA	NA

Indicador	Función dimensional	Factor de escalamiento			
		Factor	Unidades	Valor	Ref.
Cantidad de residuos sólidos	$-M_s * C_s$	Costo de disposición para residuos sólidos (C_s)	USD/ton	17.3	Ayala, 2022

3.4. Conclusiones del capítulo

Como resultado del proceso de medición en el ciclo DMADV, se establecieron las principales métricas que serán evaluadas en los esquemas BIORREF 1 y BIORREF 2 con el fin de establecer una configuración que logre satisfacer las dimensiones de sustentabilidad tecnológica y sustentabilidad ambiental. Mediante la implementación de herramientas de calidad, se ha determinado satisfactoriamente un total de 15 indicadores (ocho y siete para los dominios económicos y ambientales, respectivamente) que reflejan diversas problemáticas asociadas en los esquemas de biorrefinación en una unidad dimensional similar a través de un marco de sostenibilidad (MS) definido y aplicable en un escenario mexicano.

CAPÍTULO IV: ETAPA DE ANÁLISIS Y DISEÑAR

4. Estrategia de investigación

En este capítulo se describe una primera aproximación del diseño conceptual y análisis de sostenibilidad bidimensional para el escenario descrito como BIORREF 1 y BIORREF 2. A través del marco de sostenibilidad (MS) creado en el capítulo 3 de este documento, se integran diversas estrategias de producción a través de esquemas consolidados multientrada-multiproducto para la producción de invertasa, ácido láctico, biogás y un aprovechamiento limitado del agua tratada para el caso de BIORREF 1. Por otro lado, un segundo escenario denominado BIORREF 2 también es analizado donde se produce invertasa, ácido láctico, biohidrógeno, dióxido de carbono, vapor de alta presión y baja presión, electricidad y una serie de productos de bajo valor agregado. Además, BIORREF 2 incorpora en su totalidad el agua tratada de los efluentes de proceso.

Al realizar una evaluación de factibilidad económica a través de herramientas de ingeniería financiera, se comparan los resultados entre ambos escenarios mencionados con anterioridad. Finalmente, se establece una evaluación bidimensional en los dominios económicos y ambientales del escenario BIORREF 1 y BIORREF 2, con el fin de proponer un valor de sostenibilidad global en las fronteras de dichos sistemas.

4.1. Diseño conceptual y análisis bidimensional del esquema BIORREF 1

4.1.1. Descripción del esquema BIORREF 1

El diagrama de bloques asociado con el diseño conceptual de la biorrefinería planteada para el aprovechamiento integral del lactosuero (LS) y residuo de malta cervecera (RMC) procedente del sector alimenticio de la ZMG, se muestra en la **Figura 14**.

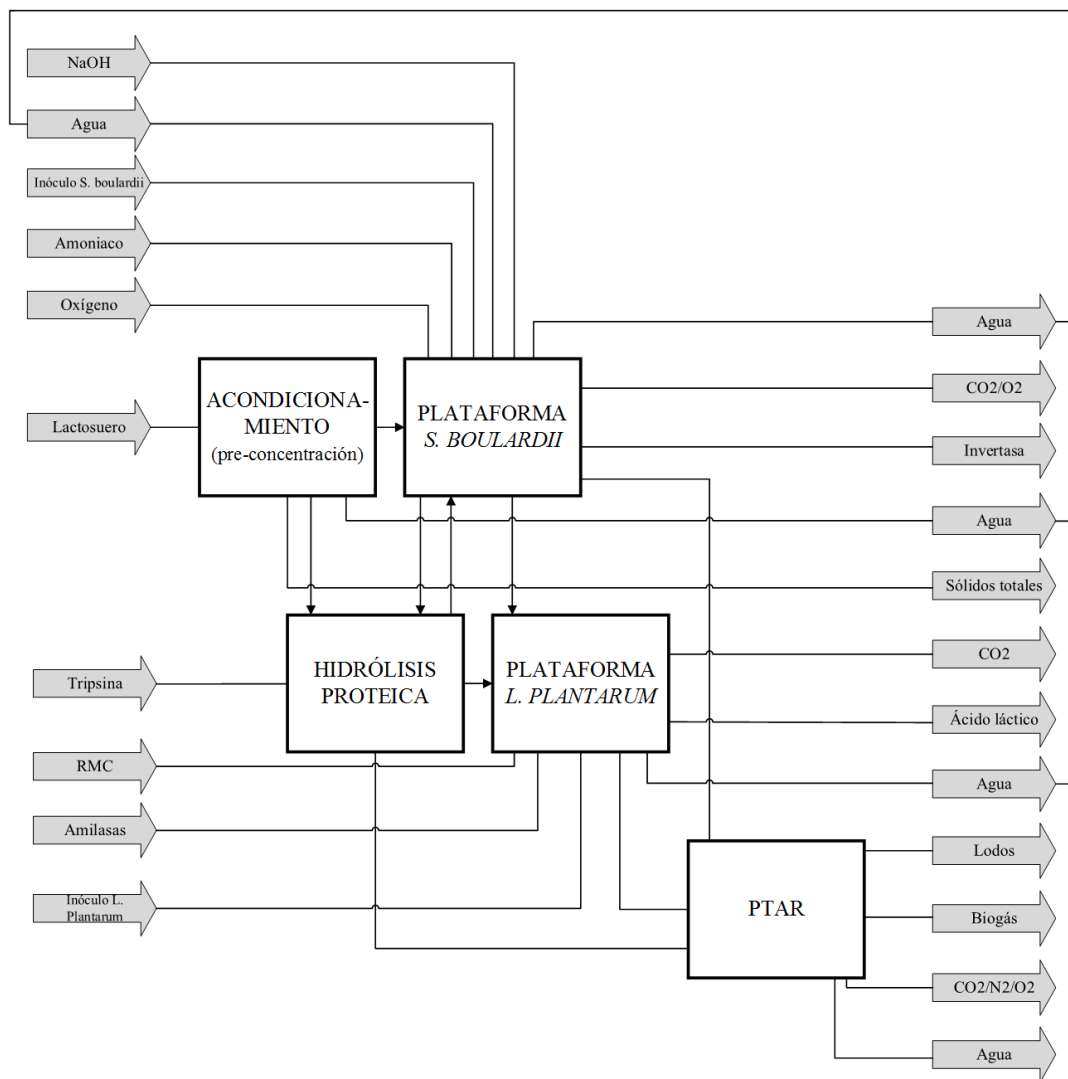


Figura 14 Diagrama de bloque de los esquemas de biorrefinería multietapa-multiproducto para el escenario BIORREF 1

El anterior esquema cuenta con cinco etapas de proceso principales: (1) preconcentración, (2) plataforma *S. boulardii*, (3) hidrólisis proteica, (4) plataforma *L. plantarum* y (5) planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Las etapas de proceso principales se muestran como rectángulos. Las flechas negras y grises indican los productos principales del proceso y los servicios generados y aprovechados por el mismo proceso, respectivamente.

A continuación, se realiza una breve descripción del proceso de las cinco etapas que conforman el esquema base de la biorrefinería multientrada/multiproducto:

1. Acondicionamiento

Durante esta etapa, el lactosuero (LS) se somete a las operaciones de separación, evaporación, esterilización, centrifugación y microfiltración. El proceso comienza con la remoción de los sólidos presentes (6.7% masa) en el filtro rotatorio 01-RVF-102. Los sólidos obtenidos residen en la corriente 102C mientras que los componentes restantes del LS (i.e., lactosa, proteínas y otros) son concentrados en un evaporador de triple efecto 01-EV-103 con temperaturas de 128.9, 104.5 y 62.0 °C, respectivamente. Dicha etapa permite la precipitación de las proteínas alfa-lactoalbúmina y beta-lactoglobulina que se encuentran en el suero de leche (Haller y Kulozik, 2019), con el fin de obtener un mejor rendimiento en el paso de fermentación en la plataforma *S. boulardii*.

A continuación, la esterilidad del medio para la posterior fermentación en biorreactor se lleva a cabo con el equipo 01-ST-106. Una vez que precipitaron las proteínas alfa-lactoalbúmina y beta-lactoglobulina, se sometió la corriente a un proceso de centrifugación en donde el sobrenadante (107A) (84.09% agua, 12.92% lactosa, 2.78% otros y 0.21%

proteínas) se alimenta a la plataforma *S. bouldarii*, mientras que la fase sólida (107B) (62.39% agua, 9.59% lactosa, 2.06% otros y 25.96% proteínas) se convierte en sustrato para la etapa de hidrólisis proteica. El porcentaje de remoción de proteínas tiene un valor de 87.05% y una concentración del particulado de 258.38 g/L. El agua recuperada del evaporador 01-EV-103 se condensa y se envía a la corriente 105A que es enviada a la corriente de “Agua de recuperación” en el proceso.

2. Plataforma *S. bouldarii*

El sobrenadante del equipo 01-DS-107 entra al biorreactor 02-FR-203 donde amoníaco (NH_3) y oxígeno (O_2) son alimentados a una relación 0.0110 m/m y 0.0217 m/m, respectivamente. El biorreactor opera a una temperatura de 25.0°C y tiene un tiempo de residencia de 32 h. Como metabolitos de interés que produce *S. bouldarii*, se encuentra invertasa, biomasa y dióxido de carbono, donde existe una relación de 0.0738 kg invertasa producida por cada kilogramo de lactosa alimentada. Debido a que estos microorganismos producen tanto invertasa extracelular como intracelular, el homogeneizador 02-HG-204 realiza la operación de agitación mecánica para la ruptura celular y obtención de invertasa intracelular de la biomasa generada así como proteínas, ácidos nucleicos y debris a partir de *S. bouldarii* (Moreno, Sanchez y Rodríguez, 1990; Barbosa et. al, 2018).

A continuación, la operación de centrifugación 02-DS-205 remueve los sólidos más prominentes de la corriente (i.e., biomasa y debris celulares). Se incluye en esta etapa un tren de purificación por unidades de filtración sin salida, cromatografía de intercambio iónico (PBA), cromatografía por filtración de gel y una etapa de diálisis con agua desionizada (Andjelković, Pićurić y Vujčić, 2010; Ferreira et. al, 2018). La temperatura promedio del tren

de purificación es alrededor de 4°C. El equipo 02-FDR-214 funge como liofilizador (T=12°C) donde se realiza un secado en frío de la corriente, permitiendo sublimar completamente el agua presente en la corriente 213A. Se incorpora asimismo un segundo liofilizador (equipo 02-FDR-215) que recibe el efluente del equipo 02-C-211 con el fin de recircular la invertasa residual presente en la corriente de rechazo del tren de purificación y recircularla al inicio de la plataforma *S. bouldarii*. Finalmente, el agua sublimada (corrientes 214A y 215A) así como la corriente 210A que proviene del tren de filtración, son enviadas a la corriente de “Agua de recuperación” en el proceso.

3. Hidrólisis proteica

La fase sólida proveniente de la etapa de preconcentración (corriente 107B) se mezcla con un remanente de proteínas de la corriente 212C proveniente del tren de purificación de la plataforma *S. bouldarii*. La mezcla resultante (corriente 109A) se mezcla con un complejo enzimático (i.e., tripsina) a una relación de 0.4000 m/m. La operación de hidrólisis proteica se lleva a cabo a una temperatura de 64.2°C, 1 bar y un tiempo de residencia de 1 h con una conversión del 85.00%. La generación de péptidos y aminoácidos libres de menor tamaño permiten que el hidrolizado de proteína potencie características funcionales en la plataforma *L. plantarum* tales como capacidad de agitación, baja viscosidad, dispersión y aumento de solubilidad (Kong, Zhou y Qian, 2007; Yin et. al, 2007). Finalmente, la corriente 303A entra a una operación de microfiltración donde se retiene el 99.97% de los sólidos que se envían a la PTAR (corriente 304B), mientras que el filtrado de esta operación (rico en aminoácidos y lactosa) arriba la etapa de *L. plantarum*.

4. Plataforma *L. plantarum*

Durante esta etapa se emplea como materia prima el RMC, el cual es sometido a una operación de hidrólisis enzimática con una enzima amilasa (relación 0.0035 m/m). El objetivo de este tratamiento es aumentar el contenido de glucosa aprovechando los sólidos y polímeros presentes en la corriente. El mosto hidrolizado es enriquecido con un hidrolizado de proteína de lactosuero proveniente de la plataforma de *S. boulardii* (corriente 208A) y un hidrolizado de aminoácidos proveniente de la etapa de hidrólisis proteica (corriente 304A). La mezcla resultante funge como fuente de nitrógeno para *L. plantarum*, bacteria ácido-láctica que es utilizada para la fermentación y producción de ácido láctico en esta etapa de la biorrefinería. Las condiciones del reactor 04-R-406 son $T=37.0^{\circ}\text{C}$, $P=1.013$ bar y 120.0 h como tiempo de residencia. La conversión global de ácido láctico es del 98.0% para las especies galactosa y lactosa. Solamente el 1.71% de la glucosa no es convertida en el reactor 04-R-406. Un tren compuesto por unidades de nanofiltración permite recuperar el 72.64% del ácido láctico generado en el reactor 04-R-406.

La corriente 410A (97.38% agua, 0.0052% galactosa, 0.03% glucosa, 0.0009% lactosa y 2.58% ácido láctico) es sometida a una operación de evaporación al vacío (81.5°C y 0.5 bar) donde se concentra el ácido láctico a un valor del 98.52% (corriente 411B). El porcentaje restante es de galactosa (0.20%), glucosa (1.25%) y lactosa (0.03%). El agua recuperada se condensa y se envía a la corriente 412B, que es enviada a la corriente de “Agua de recuperación” en el proceso.

5. PTAR

Debido a la alta demanda química de oxígeno (i.e., carga orgánica) de los efluentes procedentes de las etapas anteriormente mencionadas, la mayoría de los esquemas de biorrefinería multientrada-multiproducto cuentan con una etapa de tratamiento de aguas residuales. En este documento, los efluentes contenidos en las corrientes 216A, 304B y 413A entran a un esquema de PTAR donde el producto final es agua con una calidad requerida por las autoridades mexicanas para ser considerada como efluente industrial, o bien, que sea recirculado al proceso (NOM-CCA-007-ECOL-1993) con el fin de disminuir los requerimientos de agua fresca como materia prima. Esta etapa involucra una serie de operaciones unitarias conocidas como etapas anaerobias, donde se genera una mezcla de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) denominada como biogás a partir del consumo de compuestos orgánicos presentes en la corriente 501A. Posteriormente, una segunda etapa aerobia permite la degradación de los compuestos orgánicos remanentes que la etapa anaerobia no logró consumir. El destino final del biogás en este documento es como venta de coproducto comercial.

Los detalles del escenario BIORREF 1 (e.g., simulaciones, reacciones químicas y biológicas propuestas, parámetros de operación de cada etapa de proceso, costo, material y dimensiones de cada equipo) se exhiben en el **Apéndice A** de este documento. Por otro lado, los resultados obtenidos con las técnicas de integración de energía (i.e., punto de pliegue) para la recuperación máxima de energía (MER), la curva compuesta caliente, curva compuesta fría y los flujos térmicos asociados para la integración energética en el escenario BIORREF 1 se muestran en el **Apéndice B**.

4.1.2. Análisis tecno-económico del escenario BIORREF 1

El **Gráfico 8** muestra el costo total de producción (CTP, en unidades de USD/kg bioproductos) que resulta del cálculo de la herramienta financiera descrita en la **Ec. 10**. Al igualar a cero el valor presente neto (VPN), se obtiene el precio mínimo de venta por kilogramo de bioproductos obtenidos en el escenario BIORREF 1 a través de un análisis de sensibilidad respecto a la cantidad de materia prima (i.e., LS y RMC) que entra en el sistema y que fue descrito anteriormente en la **Tabla xi**.

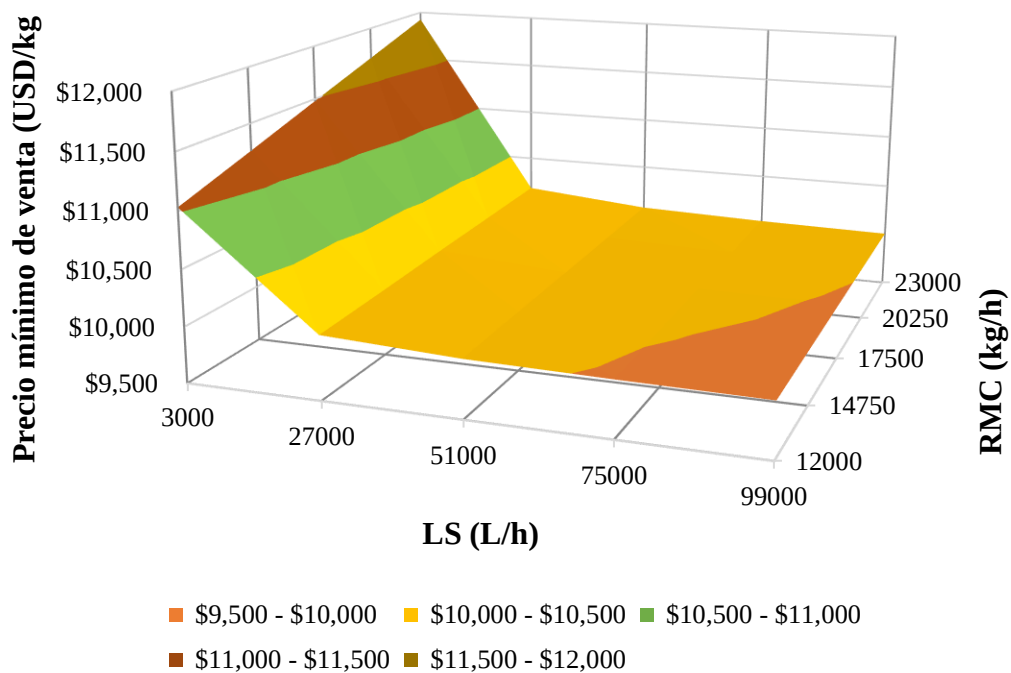


Gráfico 8 Precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos) a través de distintas capacidades de planta para el escenario BIORREF 1

Como se observa en el **Gráfico 8**, el precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos) tiene una tendencia decreciente conforme el tamaño de planta incrementa. Estas tendencias

coinciden con análisis tecno-económicos publicados en la literatura bajo el esquema de biorrefinería (e.g., Ioannidou et. al, 2022; Ladakis et. al, 2022; Souza Filho et. al, 2017; Gu et. al, 2022; Sánchez et. al, 2020). Se ha identificado que a partir de un tamaño de planta de 27,000 L/h y 12,000 kg/h de LS y RMC, respectivamente, el precio mínimo de venta (10,070.02 USD/kg bioproductos) tiene sólo un CTP de 60.52 USD/kg bioproductos mayor respecto al tamaño de planta evaluado en una situación frontera (i.e., 99,000 L/h y 12,000 kg/h de LS y RMC, respectivamente). Por lo tanto, a partir de un tamaño de planta de 27,000 L/h y 12,000 kg/h de LS y RMC, respectivamente, la función del costo total de producción tiene un comportamiento cuasi-lineal. Para garantizar que el abasto de este complejo de biorrefinación sea adecuado respecto a la producción local y a los objetivos de este documento en lograr una solución sostenible en los dominios tecno-económico y ambiental, análisis futuros se centrarán en una capacidad de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente.

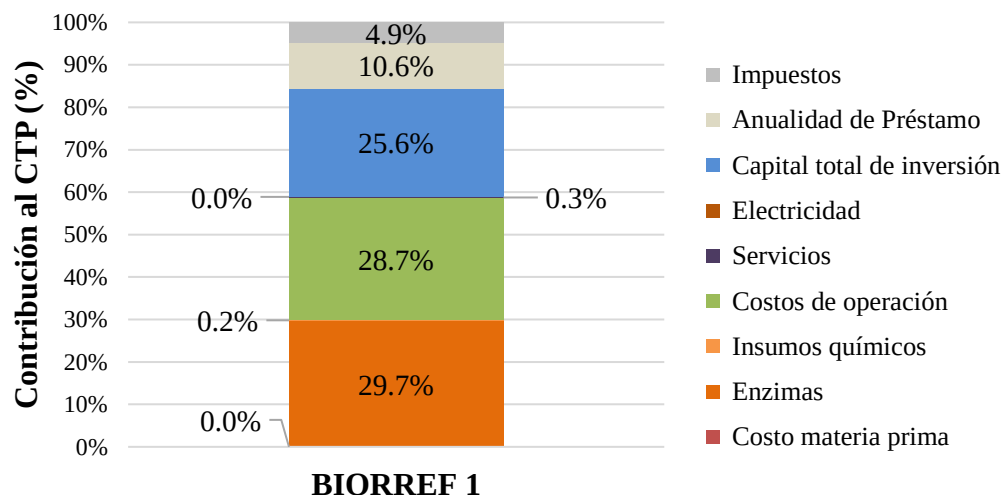


Gráfico 9 Contribuciones al CTP para el esquema BIORREF 1 con una capacidad de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente

El **Gráfico 9** muestra los principales elementos que contribuyen al costo total de producción (CTP) para el esquema BIORREF 1. Las enzimas, los costos de operación (i.e., cargos fijos de fabricación, gastos generales, mano de obra, patentes y regalías así como el mantenimiento de la planta) y el capital total de inversión contribuyen en un 84.0% al costo total de producción (CTP). La importancia de los anteriores tres contribuyentes se presenta en trabajos que utilizan un esquema de biorrefinería multientrada-multiproducto (e.g., Ayala, 2022; Ioannidou et. al, 2022; Ladakis et. al, 2022; Magaña-Mendoza, 2018; Sánchez et. al, 2020). Se considera importante señalar que entre los costos de materia prima, el 99.2% de la contribución se ve reflejada por los cocteles enzimáticos que participan en las etapas de plataforma *S. boulardii* y plataforma *L. plantarum*.

La **Tabla xviii** contiene los principales resultados tecno-económicos del escenario BIORREF 1 en las que se hace mención la cantidad de operadores, costo asociado de equipos por etapa, principales contribuyentes al CTP, producción total anual y precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos).

Tabla xviii Valores relevantes en el análisis de flujo de efectivo descontado considerando VPN=0 para el esquema BIORREF 1

ESCENARIO BIORREF 1	
Número de operadores	22
MATERIA PRIMA	
Lactosuero (k Litros/h)	75.0
Residuo de malta cervecera (ton/h)	17.5
Agua fresca (ton/h)	5.32
Amoniaco (ton/h)	0.29
Oxígeno (ton/h)	0.58
NaOH (0.5 M) (ton/h)	85.42
Amilasas (ton/h)	0.06
Tripsina (ton/h)	0.15

ESCENARIO BIORREF 1	
Aire (ton/h)	72.24
COSTO DE EQUIPOS POR ETAPA (M USD)	
Acondicionamiento	11.77
Plataforma <i>S. bouldardii</i>	18,689.05
Hidrólisis proteica	5.74
Plataforma <i>L. plantarum</i>	166.58
PTAR	68.46
Costo total de equipos	18,942
PRINCIPALES CONTRIBUYENTES AL CTP (M USD/año)	
Costo de materia prima	0.00
Enzimas	6771.34
Insumos químicos	52.53
Costos de operación	6542.91
Servicios	57.17
Electricidad	3.75
Capital total de inversión	5838.28
Anualidad de préstamo	2420.11
Impuestos	1115.05
PRODUCCIÓN TOTAL ANUAL	
Invertasa (k ton)	2.28
Ácido láctico (k ton)	6.53
Biogás (k ton)	20.32
CTP (USD/kg bioproductos)	10,011.93

La etapa con el mayor costo para todos los casos fue la Plataforma *S. bouldardii*, representando un 98.67% del costo total para este rubro. Específicamente, los equipos de liofilización 02-FDR-214 y 02-FDR-215 representan un 91.47% de aportación al costo de esta etapa debido a que la fracción másica de agua en las corrientes 213A y 211D son de 71.20 y 99.98%, por lo que se requieren una serie de unidades en paralelo para sublimar dicha cantidad de agua y lograr una separación adecuada en la mezcla líquida de invertasa/agua. Cabe destacar que el equipo 02-FDR-215 recupera alrededor del 11% de la invertasa que se envía como corriente de desecho en el tren de purificación que pertenece a la Plataforma *S. bouldardii*. Asimismo, el equipo 02-FDR-215 contribuye en un 66.83% del total del agua que

transita en la corriente “agua de recuperación”. Aproximadamente el 25% de la corriente “agua de recuperación” es recirculada nuevamente al proceso con el fin que los requerimientos de agua fresca en proceso sean menores a un 3%.

4.1.3. Análisis de indicadores económicos y ambientales para el escenario BIORREF

1

La **Tabla xix** muestra los resultados obtenidos en los seis indicadores económicos y siete indicadores ambientales para el esquema BIORREF 1 para un tamaño de planta equivalente a 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente. Se presenta para cada indicador su correspondiente contribución al dominio correspondiente así como su valor monetizado en la unidad funcional seleccionada para este documento (USD/kg bioproductos). El impacto económico se calculó mediante la suma de los seis indicadores mientras que el impacto de sustentabilidad ambiental se obtuvo a través de la suma de los siete indicadores que pertenecían a este dominio.

Cabe destacar que se ha analizado minuciosamente la contribución o impacto de cada indicador para la dimensión económico y ambiental, por lo que si el indicador monetizado es mayor a cero, su impacto se considera como beneficioso en el dominio analizado. Por otro lado, si el indicador monetizado es menor a cero, éste se interpreta como una situación perjudicial para dicho dominio.

Tabla xix Valor de los indicadores económicos y ambientales iniciales, homogenizados y su correspondiente porcentaje de contribución para el esquema de producción BIORREF 1

Indicador	Valor	Valor Monetizado	Contribución (%)
DIMENSIÓN TECNO-ECONÓMICA			
M_Y	3.99E-02	1.75E-01	0.00%
M_{TPC}	1.00E+04	-1.00E+04	4.15%
M_{PS}	2.31E+05	2.31E+05	95.62%
M_E	2.57E+00	-1.29E-01	0.00%
M_V	1.60E+10	5.49E+02	0.23%
M_{TAR}	2.96E+07	1.02E+00	0.00%
Valor de sustentabilidad económica (USD/kg bioproductos)		2.21E+05	100.00%
DIMENSIÓN AMBIENTAL			
M_{CO_2}	5.95E+02	-1.93E-01	52.17%
M_{WF}	1.45E+00	-1.79E-03	0.48%
M_{Wd}	4.53E+01	5.57E-02	15.08%
M_{DQO}	1.63E-03	-5.30E-02	14.36%
M_{WT}	-3.78E+00	9.03E-03	2.45%
M_{pH}	0.00E+00	0.00E+00	0.00%
M_S	3.30E+00	-5.71E-02	15.46%
Valor de sustentabilidad ambiental (USD/kg bioproductos)		-2.40E-01	100.00%

Para el caso de la dimensión tecno-económica, el valor monetizado del indicador M_{PS} (ahorro en procesos) representa un 95.62% debido a que el precio mínimo de venta (CTP) es sustancialmente menor que el precio de venta de la bibliografía consultada (Merck KGaA, 2023; Stowers, Ferguson y Tanner, 2008) de la enzima invertasa con una actividad mayor o igual a 300 unidades/mg de sólido. La dimensión de sustentabilidad ambiental refleja un total de cuatro indicadores que representan un impacto perjudicial en el dominio ambiental para el escenario BIORREF 1 (i.e., M_{CO_2} , M_{WF} , M_{DQO} y M_S). El indicador referente a la emisión de gases efecto invernadero (i.e., CO_2) tiene una contribución del 52.17% al indicador de sustentabilidad ambiental debido a la falta de un tratamiento integral de las emisiones

presentes en las corrientes 203C (i.e., productos de la fermentación en plataforma *S. boulardii*), 406B (i.e., productos de la fermentación en la plataforma *L. plantarum*) y 509B (i.e., productos del reactor aerobio en la PTAR). Aproximadamente el 30% de la contribución negativa de esta dimensión se refiere a los tópicos relacionados al tratamiento ineficaz de residuos sólidos provenientes del suero de leche (i.e., corriente 102C), del hidróxido de sodio que se filtra en el equipo 05-RVF-503 así como la demanda química de oxígeno presente en la corriente “agua de recirculación” que contiene una concentración puntual de 0.028 g/L. Aunque para la dimensión ambiental, dicho indicador refleja una connotación negativa en el marco de sostenibilidad (MS) desarrollado, la NOM-CCA-007-ECOL (1993) establece como límite máximo permisible una concentración de DQO de 0.05 g/L para efluentes que se deseen reincorporar a las entradas de un proceso de la índole especificada en el escenario BIORREF 1.

Tal y como se observa en la **Tabla xix**, el escenario BIORREF 1 resultó en un impacto económico positivo con un valor de 221,078.66 USD/kg bioproductos, mientras que el dominio ambiental tuvo una incidencia negativa con un valor de -0.24 USD/kg bioproductos (véase **Gráfico 10**). Los anteriores valores convergen en un valor de sostenibilidad global positivo de 221,078.42 USD/kg bioproductos.

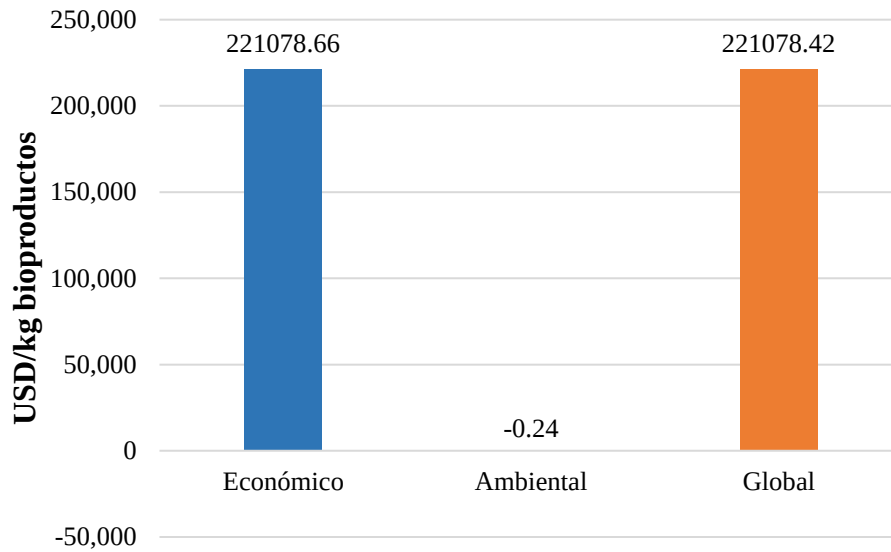


Gráfico 10 Valor de sostenibilidad global para el escenario BIORREF 1

Las diversas estrategias en bioprocesos y desarrollos biotecnológicos que apuesten a la sostenibilidad de las dimensiones económica y ambiental se han reflejado en el escenario BIORREF 1. Los valores resultantes del análisis bidimensional han permitido identificar los principales impactos en ambos dominios que se analizan a través de un diagrama de Ishikawa presentado en la **Figura 15**. Dicha herramienta de la calidad permitirá presentar una propuesta que permita reflejar un impacto positivo en los indicadores M_{CO_2} , M_{WF} , M_{DQO} y M_S .

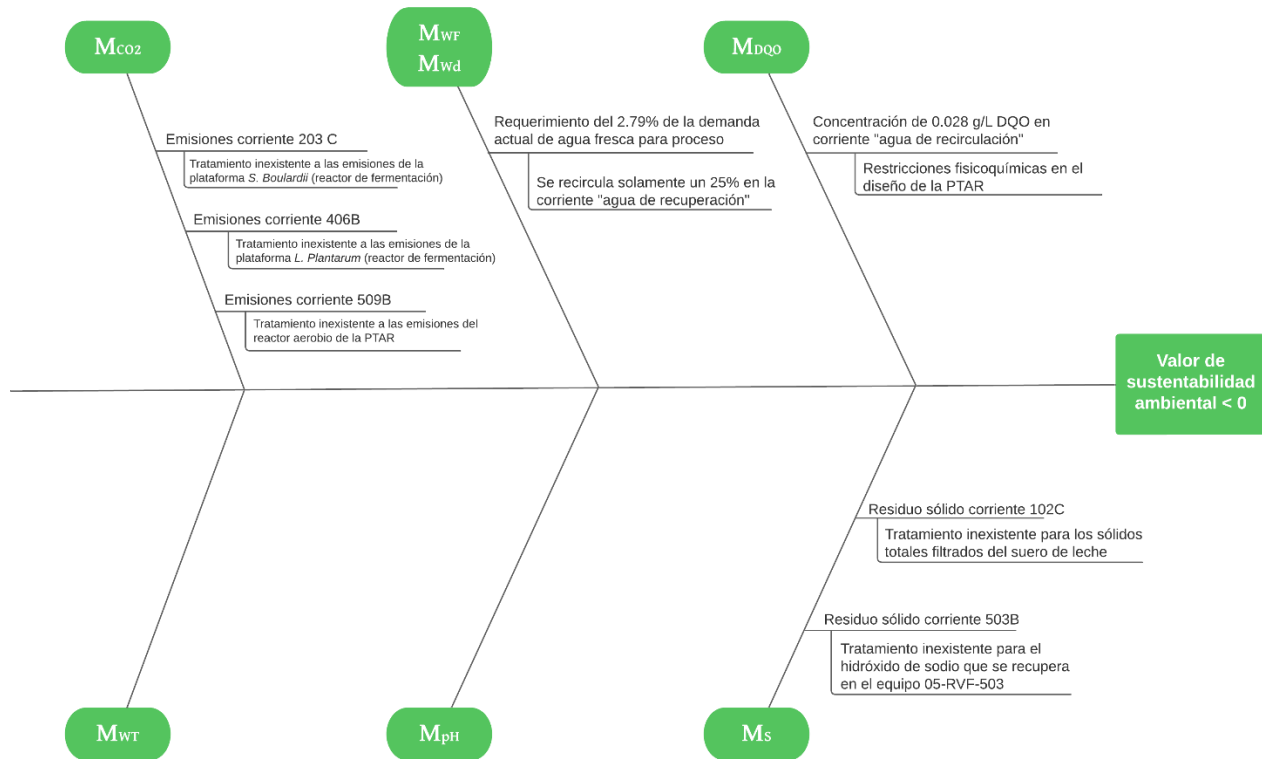


Figura 15 Diagrama de Ishikawa de la dimensión de sustentabilidad ambiental para el escenario BIORREF 1

Con lo observado en la **Figura 15**, se posibilita una serie de aspectos para un escenario BIORREF 2 mejorando así la concepción de biorrefinerías multientrada-multiproducto. Para ello, los resultados de los indicadores globales BIORREF 1 muestran el éxito de la estrategia al convertir un desafío ambiental en un producto con valor agregado ya que el valor de sostenibilidad global subraya la importancia de un rendimiento satisfactorio en BIORREF 1 tanto en las dimensiones económicas como ambientales.

4.2. Diseño conceptual y análisis bidimensional del esquema BIORREF 2

4.2.1. Descripción del esquema BIORREF 2

La **Figura 16** expone el diagrama de bloques asociado al diseño conceptual de la biorrefinería del escenario BIORREF 2, correspondiente a un esquema consolidado para la producción de hidrógeno gaseoso (H_2) a partir de una etapa de fermentación oscura así como una etapa de celdas de electrólisis microbiana (MEC, por sus siglas en inglés). Por otro lado, también se añade una etapa para la captura, purificación y compresión de los gases efecto invernadero (i.e., CO_2) que no fueron debidamente tratados en el escenario BIORREF 1. Este esquema propuesto integra una serie de procesos intensificados y consolidados para brindar una solución integral a los aspectos detectados en el diagrama de Ishikawa que se presentó anteriormente (véase **Figura 15**). Se consta de siete etapas principales: (1) preconcentración y recuperación de sólidos, (2) plataforma *S. boulardii*, (3) hidrólisis proteica, (4) plataforma *L. plantarum* consolidada, (5) fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana (MEC) (H_2), (6) captura de dióxido de carbono y celdas de combustible microbianas (MFC) y (7) cogeneración. Cabe destacar que, además del diseño conceptual plasmado en la sección 4.1 de este documento, el escenario BIORREF 2 incorporan diversas estrategias de revalorización y visión de un sistema multientrada-multiproducto con producción “cero desperdicios” que se enuncian a continuación:

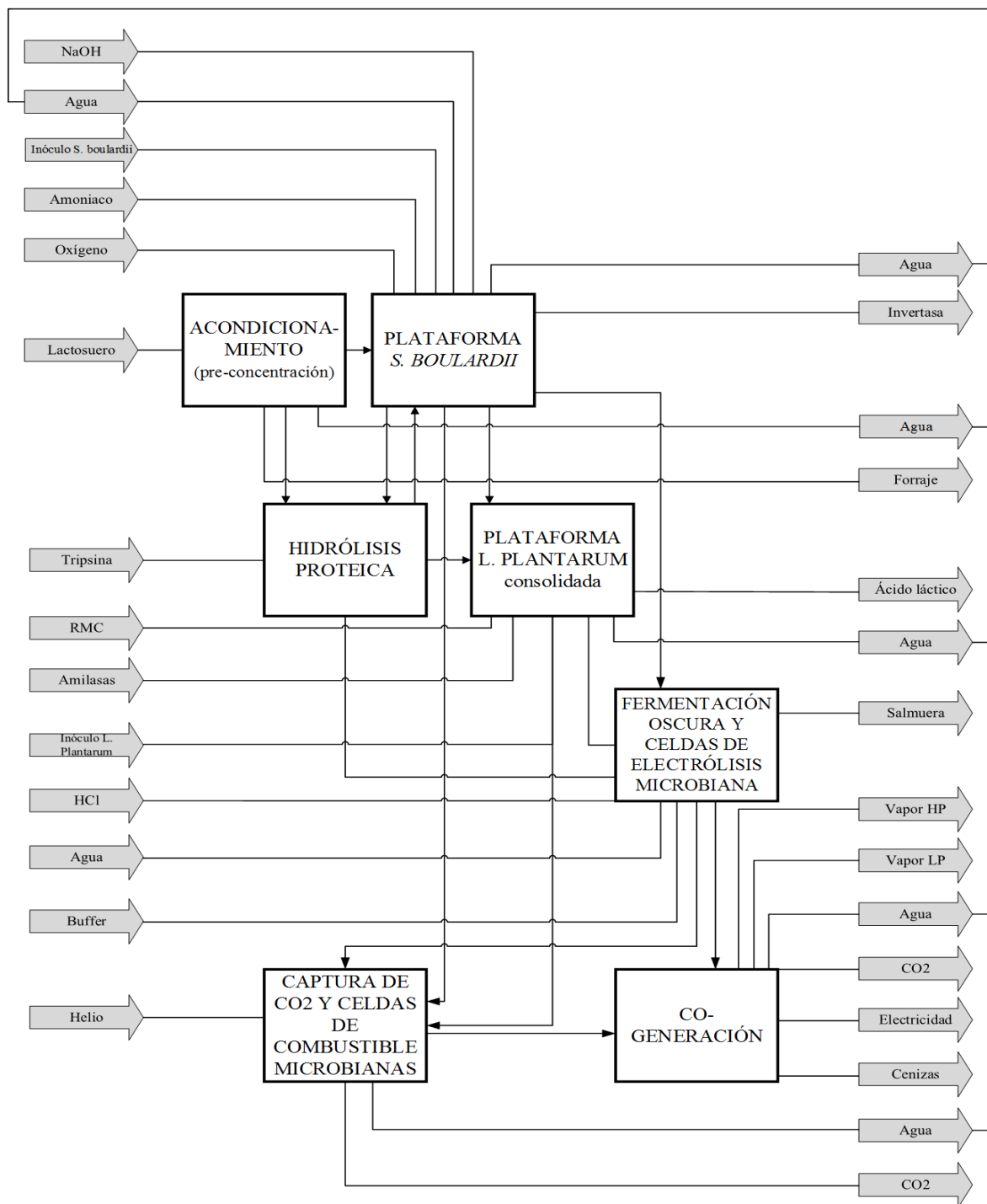


Figura 16 Diagrama de bloque de los esquemas de biorrefinería multietapa-multiproducto para el escenario BIORREF 2

1. Preconcentración y recuperación de sólidos

La corriente 102C (compuesta mayoritariamente por grasa, proteínas y minerales del lactosuero) es vendida para la industria forrajera como suplemento alimenticio. Cabe destacar que la literatura especializada (véase Moore, 1980; Ball et. al, 2001) expone que los principales determinantes de la calidad del forraje son la concentración de paredes celulares, proteínas, minerales, grasas y la tasa de degradación de la pared celular en el rumen. Debido a que la disponibilidad de forraje debe ser adecuada para que se produzca el máximo consumo voluntario de energía digestible, en ocasiones las proteínas y minerales contenidas en situaciones de pastoreo no es la adecuada y una suplementación debe ser considerada (Ball et. al, 2001; Collins et. al, 2003). Con la información consultada en bibliografía, la corriente 102C tiene calidad para ser dispuesta como aditivo para forrajes.

2. Plataforma *S. bouldarii*

Esta etapa no sufre modificaciones respecto al escenario BIORREF 1 planteado anteriormente.

3. Hidrólisis proteica

Esta etapa no sufre modificaciones respecto al escenario BIORREF 1 planteado anteriormente.

4. Plataforma *L. plantarum* consolidada

Se han consultado diversas referencias bibliográficas (Arellano, 2013; Alexandri, Schneider y Venus, 2018) relacionadas a la purificación de ácido láctico donde se emplea un sistema de microfiltración de flujo cruzado UFI-TEC que funciona a 1.5 bar y equipado con 4

membranas cerámicas CéRAM INSIDE ($\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$). Asimismo, se ha revisado la literatura para validar experimentalmente membranas poliméricas con alta selectividad para separaciones fermentativas (véase Bouchoux, Roux-de Balman y Lutin, 2006; Thuy y Boontawan, 2017; Davey, Leak y Patterson, 2016). Los coeficientes de rechazo en experimentos similares de literatura antes citada respecto a este caso de estudio se mencionan en la **Tabla xx**.

Tabla xx Coeficientes de rechazo en las etapas de purificación de ácido láctico (nanofiltración). Recuperado de Arellano (2013), Alexandri et. al (2018) y Davey, Leak y Patterson (2016)

Compuesto	Coeficiente de rechazo
Enzimas	100%
Polisacáridos	100%
Proteínas	100%
Sólidos totales	100%
Lactosa	82%
Glucosa	23.6%
Hidróxido de sodio	15%
Ácido láctico	2.5%

Los anteriores coeficientes de rechazo permiten que los efluentes de la etapa de purificación en *L. plantarum* así como la corriente de rechazos hacia fermentación oscura y celdas MEC tengan una concentración de ácido láctico por debajo de 0.7 g/L (Ayala, 2022). Dicha concentración es crucial debido a que valores por encima de 0.7 g/L, la inhibición microbiana afecta considerablemente el avance de reacción para la producción de H_2 gaseoso.

5. Fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana (MEC)

Se reemplaza el sistema tradicional de tratamiento de aguas residuales (TAR) incorporando tecnologías de fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana (MEC) de una cámara sin membrana donde se oxida la materia orgánica. Con el fin de darle un aprovechamiento integral a la corriente 209D para el sistema MEC (cuya composición másica es de 98.45% agua, 1.45% de NaOH y el restante de materia orgánica), se implementa un sistema de neutralización con HCl en una relación molar 1:1 respecto al hidróxido de sodio con el fin que al combinarse los efluentes en el equipo 05-MX-501, la corriente resultante (501A) contenga un pH aproximado de 7 unidades. Para el escenario BIORREF 2, los equipos de neutralización permiten que la concentración de cloruro de sodio (NaCl) tenga una concentración de 18.55 g/L. Para evitar que dicha condición represente un medio inadecuado para la sección fermentación oscura-MEC, la corriente ingresa a un tren de purificación compuesto por unidades de nanofiltración que remueven el 98.82% de la sal presente en dicha corriente. Los datos de diseño para las unidades de nanofiltración fueron obtenidos de Haddad, Bazinet y Barbeau (2019) y Van Linden et. al (2020). El efluente del digestor anaerobio (05-AD-508) es sometido a un medio anaerobio a través de un equipo de filtración de aire (05-AF-511).

Durante la sección de fermentación oscura, los azúcares simples disponibles se convierten en una serie de bioproductos deseados mediante la acción de consorcios microbianos selectivos. Los resultados experimentales de un cultivo mixto termófilo en la etapa de fermentación oscura así como los avances de reacción asociados para degradar materia orgánica (i.e., polisacáridos, glicina, lactosa y glucosa) son expuestos en Ayala

(2022), Marone et. al (2017), Feng et. al (2021), Zhang, Cao y Ren (2019), Collet et. al (2019), Tagne et. al (2023) con el fin de aumentar el rendimiento asociado a la producción de hidrógeno gaseoso. Por otro lado, los equipos asociados al proceso MEC permiten que los efluentes reciban un tratamiento biológico y se intensifique la producción de hidrógeno (H_2) que puede ser vendido como coproducto o bien, a través de una reacción de combustión, se genere vapor de agua. Dicho coproducto puede emplearse como crédito en las demandas energéticas que requiera el escenario BIORREF 2. Las características y especificaciones del sistema MEC se enuncian en la **Tabla xxi**.

Tabla xxi Características y especificaciones del sistema MEC (celdas de electrólisis microbiana) para el escenario BIORREF 2 (Khan et al., 2017; Beegle y Borole, 2018; Munoz-Cupa et. al, 2021; Ayala, 2022)

Especificación	Valor	Unidad
Eficiencia energética	0.50	kW-h/m ³ -H ₂
Eficiencia de conversión catódica	90.00	%
Eficiencia coulombica	50	%
Capacidad del reactor	11.92	kgDQO – m ³ /h
Costo del reactor de cámara simple	949.23	USD/m ³
Capacidad de electrodos	10.94	kgDQO – m ² /h
Material del ánodo	Grafito	NA
Costo del ánodo	57.00	USD/m ²
Material del cátodo	SS 304 con Ni 625	NA
Costo del cátodo	475.38	USD/m ²
Vida útil de los electrodos	>7	años

Las condiciones de proceso (i.e., tiempo de almacenamiento, pH, soluciones buffer, equipos de filtración de aire, temperatura, concentración de inóculo, etc.), tamaño del reactor, número de unidades y área requerida de los electrodos se obtuvieron de Khan et. al (2017) y Rozendal et. al (2008). Las condiciones de operación, junto con los rendimientos esperados

se tomaron de Ayala (2022), Marone et. al (2017), Cheng y Logan (2007), Kadier et. al (2014), Tartakovsky et. al (2011) y Montpart (2015). El efluente líquido del sistema MEC es recirculado nuevamente al tanque de almacenamiento 05-V-510 en una relación 50-50, con el fin de intensificar la degradación de la materia orgánica remanente. El 50% restante (corriente 515A) que representa una fracción sólida rica en biomasa, polisacáridos, desechos celulares, proteínas insolubles, restos de enzimas y ácidos nucleicos se separan en un filtro rotatorio (05-RVF-516) y se envían a la etapa de cogeneración.

6. Captura de dióxido de carbono y celdas de combustible microbianas (MFC)

Para el tratamiento de la corriente 203C compuesta por una mezcla 97.92% de CO₂ y el balance de O₂, se empleó un sistema de membranas cerámicas con una alta selectividad al CO₂ con el fin de purificar los efluentes gaseosos de los procesos fermentativos procedentes de la plataforma *S. bouldarii*. La selectividad (>400) así como el porcentaje de remoción de O₂ (91.42% por etapa) para el sistema CO₂-O₂ es reportada experimentalmente mediante el uso de membranas de zeolitas modificadas en Li y Tezel (2007), Jaschi et. al (2018), White et. al (2010) y Chatterjee et. al (2021).

Los principales productos gaseosos de la fermentación oscura y celdas MEC (i.e., H₂ y CO₂) son mezclados con los efluentes gaseosos del proceso fermentativo de *L. plantarum*. La corriente íntegra (514A) es presurizada con un compresor (06-G-603) a un valor de 9 bar y una temperatura de 37°C y se mezcla con el efluente del sistema de adsorción CO₂-O₂. A continuación, la mezcla CO₂-H₂ (fracción másica, 96.62% y 3.38%, respectivamente) es sometida a un proceso de separación (equipo 06-CSP-606, P=9 bar y T=16.9°C) mediante un sistema de membranas de zeolita de alto flujo (i.e., 300 ton/día de CO₂), tomado de

Korelskiy et. al (2015). Cabe destacar que el uso de esta tecnología involucra una operación de separación más viable por su alta eficiencia y menores costos operativos respecto a procesos de separación comunes del CO₂ tales como la absorción (Wilberforce et. al, 2019; Dubey y Arora, 2022). El 96.71% del H₂ es recuperado en esta etapa del proceso el cual es sometido a un conjunto de celdas de combustible microbianas (MFC, por sus siglas en inglés) donde el hidrógeno gaseoso es oxidado en presencia de aire en exceso para su conversión total en agua líquida. El equipo 06-FC-613 genera una cantidad de 22.85 kW/kg de H₂ alimentado.

El hidrógeno remanente del proceso de separación 06-CSP-606 junto con el CO₂ entran en un proceso de adsorción con un lecho de carbón activado modificado (06-GAC-607) donde se capturan las trazas de hidrógeno y se eliminan olores de la corriente (Li et. al, 2021; Delgado et. al, 2014). El CO₂, con una pureza del 99.99% se acondiciona a una presión de 102.8 bar y 32°C por un sistema de compresión en cuatro etapas hasta alcanzar las condiciones anteriormente citadas. Para finalizar el proceso de purificación, la corriente gaseosa es sometida a una membrana biológica (06-GBX-609) con el fin de retener cualquier traza procedente de los sistemas fermentativos en BIORREF 2.

Varios autores (e.g., Ayala, 2022 y Ho, Lizuka y Shibata, 2019) han recalcado un creciente interés industrial en la captura y reutilización del dióxido de carbono debido a que puede contribuir a la viabilidad económica de una planta industrial al convertirse en un producto de valor añadido. El CO₂ tiene diversas aplicaciones potenciales, como su uso en la conversión biológica de microalgas, la industria de alimentos y bebidas, la producción de plásticos, productos químicos, refrigerantes, la mineralización, entre otros. Cada aplicación

final del CO₂ implica un tratamiento y preparación del efluente que incluye una purificación y compresión del gas (véase **Tabla xxii**).

Tabla xxii Aplicaciones industriales del CO₂ así como su pureza (%) y presión mínima requerida (Hunt et. al, 2010; Ho, Lizuka y Shibata, 2019)

Aplicación industrial	Pureza mínima del CO ₂ (%)	Presión mínima requerida (bar)
Bebidas carbonatadas	99%	2
Recuperación mejorada de gas	99.9%	120
Recuperación mejorada de petróleo	95 – 99%	89.6 – 150
Elaboración de policarbonatos	95%	1
Producción de metanol	99%	1 – 3
Producción de urea	99.90%	123.21
Cultivo de microalgas	> Concentración ambiental	Atmosférico
Producción de refrigerantes	99%	70 – 100
Metalurgia	95%	95
Agente descafeinante	99%	303.98
Carbonatación mineral	6-99.9%	0.06– 150

7. Cogeneración

Una vez convertidos la mayor cantidad de materia orgánica en el sistema de fermentación oscura y celdas MEC, el efluente procedente de estas etapas así como el efluente no deseado del equipo 06-GAC-607 (i.e., trazas de hidrógeno) se quema en un generador de vapor (07-SG-704) con un 10% de oxígeno en exceso. A continuación, una turbina (07-SE-706) produce electricidad y vapor de alta (HP), baja presión (LP) y condensados. Tanto el vapor de alta presión como el vapor de baja presión puede ser utilizado para las demandas energéticas de los equipos en cada una de las etapas de este escenario, mientras que los condensados pueden utilizarse para las demandas de esta materia prima en BIORREF 2. Dicho efluente (corriente 706C) se mezcla con las corrientes de agua recuperadas en el tren

de separación *S. boulardii* (210A, 214A, 215A), condensados de la etapa de preconcentración y recuperación de sólidos (103B y 104B), corrientes de agua recuperadas del tren de separación *L. plantarum* (413B) y la fracción líquida del filtro rotatorio 05-RVF-516 (516C). La corriente resultante se considera agua de proceso reutilizable, ya que cumple con la normatividad local de concentración máxima de carga orgánica (DQO) según la NOM-CCA-007-ECOL/1993.

4.2.2. Análisis tecno-económico del escenario BIORREF 2

El **Gráfico 11** establece un análisis de sensibilidad sobre el costo total de producción (CTP, USD/kg bioproductos) a través de la herramienta financiera de Valor Presente Neto (VPN) mostrada en la **Ec. 10** para el escenario BIORREF 2.

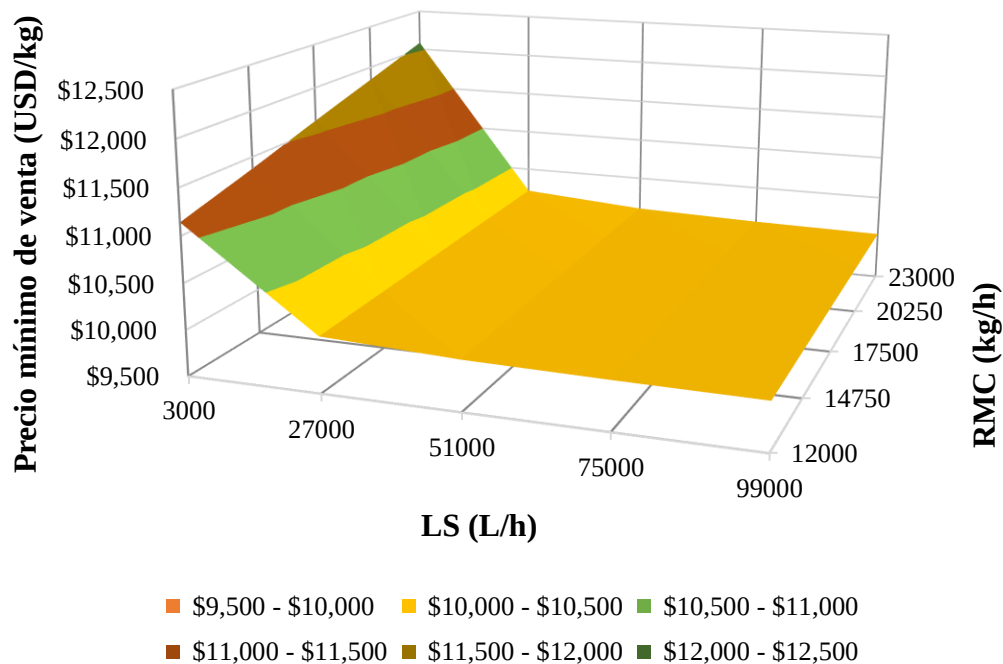


Gráfico 11 Precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos) a través de distintas capacidades de planta para el escenario BIORREF 2

La producción de bioproductos en el esquema de BIORREF 1 oscila desde 121.38 ton/día (escenario 3,000 L/h de LS y 12,000 kg/h de RMC) hasta 310.13 ton/día (escenario 99,000 L/h de LS y 23,000 kg/h de RMC), mientras que en BIORREF 2 fluctúa desde 359.65 ton/día hasta 4048.53 ton/día, respectivamente. Lo anterior refleja que en esquemas BIORREF 2 la producción de bioproductos incrementa desde 196% hasta 1205% respecto a sus homólogos en BIORREF 1. En las superficies de respuesta exhibidas en el **Gráfico 8** y **Gráfico 11**, existe un incremento del 0.29%-1.35% en el costo total de producción del esquema BIORREF 1 al esquema BIORREF 2 (véase **Gráfico 12**).

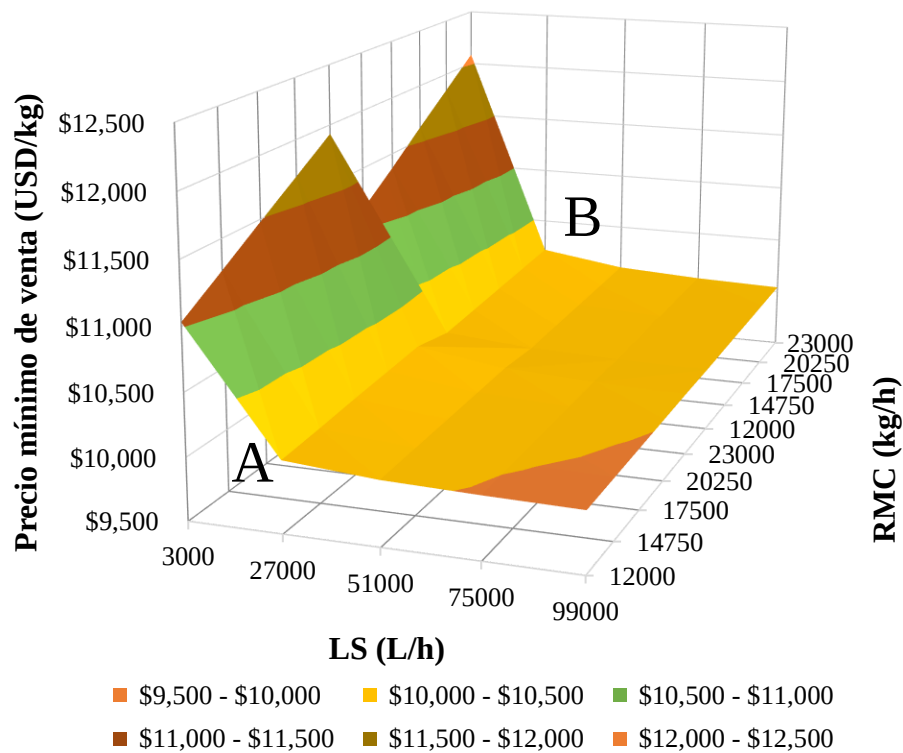


Gráfico 12 Superficies de respuesta asociadas al precio mínimo de venta para los esquemas BIORREF 1 (A) y BIORREF 2 (B)

De manera específica, aunque se logra un incremento en la producción de bioproductos existe un aumento en el costo total de producción (CTP) debido a las siguientes situaciones específicas:

- (1) El aprovechamiento integral de la corriente 102C (0.11 kg forraje/L LS) se evalúa como producto de bajo valor agregado debido a sus composiciones másicas de sólidos totales, proteína y agua según Moore (1980) y Ball et. al (2001). Para los escenarios de BIORREF 1, esta corriente se considera como desecho y es evaluado con las métricas en la dimensión de sustentabilidad ambiental correspondientes (véase **Tabla xix**).
- (2) El esquema de BIORREF 2 logra recuperar una mayor cantidad de ácido láctico en el tren de separación para *L. plantarum* (22.96% en promedio mayor que BIORREF 1) así como una mayor conversión de materia orgánica en el sistema de fermentación oscura y celdas MEC en la generación de bioproductos tales como H₂ y CO₂.
- (3) La etapa de captura de CO₂ también refleja una importante mejora en la dimensión tecno-económica, ya que el tratamiento eficaz de este componente representa en promedio el 11.52% de la producción total de bioproductos (sin considerar la producción de agua dentro del métrico). El escenario BIORREF 1 no contempla una etapa de captura de CO₂ así como su correspondiente purificación y compresión.
- (4) Como resultado de la incorporación de las celdas MFC y una etapa de cogeneración en el escenario BIORREF 2, la combustión del hidrógeno producido en la etapa de fermentación oscura y MEC así como la generación de electricidad a partir de la materia orgánica no convertida produce un superávit de electricidad en la mayoría de

los casos de BIORREF 2, por lo que dicho excedente de electricidad se considera un crédito a favor de las consideraciones económicas en el cálculo de CTP.

- (5) Debido a la incorporación de un reactor de neutralización 05-V-502 en la sección de celdas MEC, el cloruro de sodio (NaCl) es necesario someterse a un proceso de separación debido a su alta concentración en la corriente 502C (14.29-18.53 g/L). Con la información expuesta en Haddad, Bazinet y Barbeau (2019) se recupera dicha corriente a través de equipos de nanofiltración donde el rechazo tiene una composición másica de 88.38% de agua, 7.16% de NaCl y el balance de materia orgánica. Dicha mezcla puede ser catalogada como salmuera (Giwa et. al, 2017; Pramanik, Shu y Jegatheesan, 2017).
- (6) El costo de la etapa PTAR en BIORREF 1 representa en promedio el 0.52% (5.58 MUSD-88.3 MSD) en el costo total de equipos. La etapa de fermentación oscura-celdas MEC, captura CO₂-celdas MFC así como la etapa de cogeneración representa en promedio 0.81% (10.67 M USD – 74.08 M USD) en el costo total de equipos para el esquema BIORREF 2.
- (7) La materia prima necesaria en cada una de las etapas de BIORREF 1 tiene un valor de 311.71-9,007.21 M USD/año, mientras que en BIORREF 2 asciende de 315.13-9,125.91 M USD/año. El anterior incremento se debe al costo del HCl necesario para neutralizar la solución de NaOH que arriba a la sección de MEC así como el costo del gas de arrastre (i.e., helio) para las columnas de adsorción presentes en la captura de CO₂.
- (8) La cantidad de operadores entre los escenarios evaluados difiere de manera significativa. Para BIORREF 1, la cantidad de mano de obra oscila entre 25-28

operadores mientras que para BIORREF 2 se requieren 40-147 operadores. Un elemento importante al analizar esta diferencia reside en el factor proporcional propuesto por Seider et. al (2009) cuando la cantidad de productos obtenidos en el volumen de control es mayor a 100 ton/día producidos. Debido a que en BIORREF 2 se considera que el superávit de agua obtenido es considerado en la sumatoria de bioproductos, el sistema de biorrefinación en cada uno de los 25 escenarios de BIORREF 2 supera la especificación propuesta por Seider et. al (2009), en contraste con BIORREF 1 que solo se recircula la cantidad necesaria de agua fresca y el superávit se desecha al sistema municipal de drenaje.

Al igual que la sección 4.1.2 de este documento, se realiza un análisis para un tamaño de planta de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente con el fin de comparar las contribuciones al CTP de su homólogo BIORREF 1.

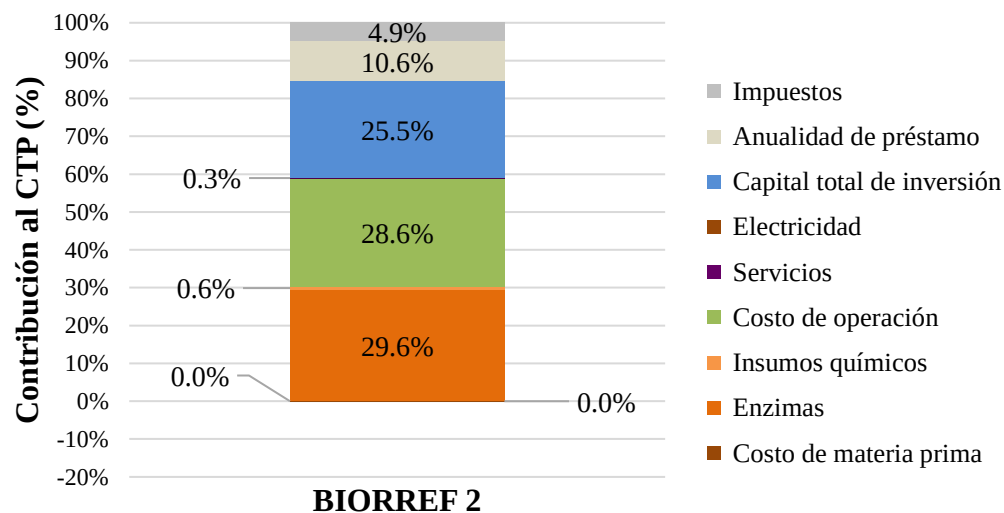


Gráfico 13 Contribuciones al CTP para el esquema BIORREF 2 con una capacidad de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente

Del **Gráfico 13**, se observa que la principal diferencia entre el **Gráfico 9** reside en la contribución de la electricidad debido a que la mayoría de los escenarios en BIORREF 2 producen una mayor cantidad de electricidad de la que se requiere para el funcionamiento de los equipos que conforman cada una de las etapas de proceso. El capital total de inversión así como los costos de operación se incrementan una décima porcentual debido a que las etapas de fermentación oscura-celdas MEC, captura CO₂-celdas MFC así como la etapa de cogeneración representan una contribución mayor al costo total de equipos en BIORREF 2 respecto a BIORREF 1. Las enzimas, los costos de operación (i.e., cargos fijos de fabricación, gastos generales, mano de obra, patentes y regalías así como el mantenimiento de la planta) y el capital total de inversión contribuyen en un 83.72 % al costo total de producción (CTP), valor semejante a su homólogo.

La **Tabla xxiii** contiene los principales resultados tecno-económicos del escenario BIORREF 2 en las que se hace mención la cantidad de operadores, costo asociado de equipos por etapa, principales contribuyentes al CTP, producción total anual y precio mínimo de venta (USD/kg bioproductos). Asimismo, se presenta el homólogo para BIORREF 1 con el fin de establecer una comparación entre las principales aportaciones de la herramienta VPN.

Tabla xxiii Valores relevantes en el análisis de flujo de efectivo descontado considerando VPN=0 para el esquema BIORREF 1 y BIORREF 2

Valor / Esquema	BIORREF 1	BIORREF 2	Gradiente
Número de operadores	22	118	436%
MATERIA PRIMA			
Lactosuero (k Litros/h)	75.0	75.0	0%
Residuo de malta cervecera (ton/h)	17.5	17.5	0%
Agua fresca (ton/h)	5.32	0.00	-100%
Amoniaco (ton/h)	0.29	0.29	0%

Valor / Esquema	BIORREF 1	BIORREF 2	Gradiente
Oxígeno (ton/h)	0.58	0.57	-1.72%
NaOH (0.5 M) (ton/h)	85.42	85.32	-0.12%
Amilasas (ton/h)	0.06	0.06	0%
Tripsina (ton/h)	0.15	0.15	0%
Aire (ton/h)	72.24	61.89	-14.33%
HCl (ton/h)	NA	1.52	NA
Helio (ton/h)	NA	0.25	NA
COSTO DE EQUIPOS POR ETAPA (M USD)			
Acondicionamiento	11.77	11.74	-0.25%
Plataforma <i>S. bouldarii</i>	18,689.05	18,668.46	-0.11%
Hidrólisis proteica	5.74	5.70	-0.70%
Plataforma <i>L. plantarum</i>	166.58	163.42	-1.90%
PTAR	68.46	NA	NA
Fermentación oscura y MEC	NA	18.16	NA
Captura de CO ₂ y MFC	NA	33.69	NA
Cogeneración	NA	2.84	NA
Costo total de equipos	18,942	18,904	-0.20%
PRINCIPALES CONTRIBUYENTES AL CTP (M USD/año)			
Costo de materia prima	0.00	0.00	-0.05%
Enzimas	6771.34	6768.18	160%
Insumos químicos	52.53	136.68	0.13%
Costos de operación	6542.91	6551.34	1.26%
Servicios	57.17	57.89	-114%
Electricidad	3.75	-0.51	-0.20%
Capital total de inversión	5838.28	5826.69	-0.20%
Anualidad de préstamo	2420.11	2415.30	-0.20%
Impuestos	1115.05	1112.84	-0.05%
PRODUCCIÓN TOTAL ANUAL			
Invertasa (k ton)	2.28	2.28	0%
Ácido láctico (k ton)	6.53	7.89	20.83%
Biogás (k ton)	20.32	27.45	35.09%
CO ₂ (k ton)	NA	66.30	NA
Forraje (k ton)	NA	207.71	NA
Salmuera (k ton)	NA	699.80	NA
Agua (k ton)	NA	2.28	NA
CTP (USD/kg bioproductos)	10,011.93	10,042.18	0.30%

Simbología: NA = No aplica

Debido a que el escenario BIORREF 2 contiene una etapa de cogeneración y un sistema de tratamiento de aguas residuales distinto al escenario BIORREF 1, es importante considerar una superficie de respuesta donde permita identificar las condiciones óptimas de

diseño según la metodología DMADV y en términos de la sustentabilidad energética (e.g., superávit energético que resulta del gradiente de la energía producida y la energía demandada) del escenario BIORREF 2. El **Gráfico 14A** y **Gráfico 14B** muestran el superávit energético en la planta según la cantidad de LS y RMC que entra al sistema.

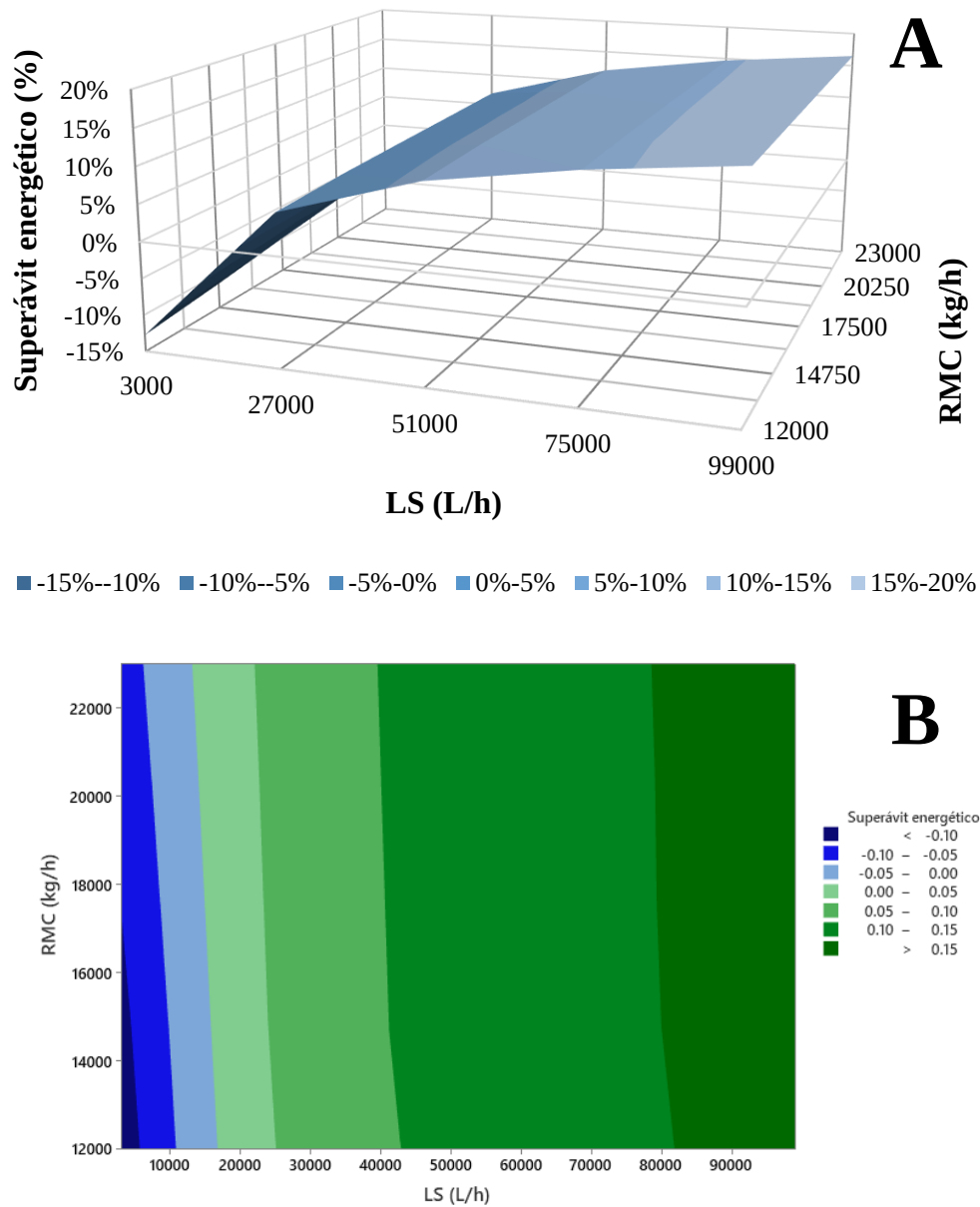


Gráfico 14 Superficie (A) y contorno de respuesta (B) para el superávit energético en BIORREF 2

Del **Gráfico 14A** y **Gráfico 14B**, se observa que las condiciones óptimas de diseño para arribar la sustentabilidad energética en BIORREF 2 ocurre a partir de un tamaño de planta correspondiente a 27,000 L/h y 12,000 kg/h de LS y RMC, respectivamente. La celda de combustible microbiana 06-FC-613 así como la turbina 07-SE-706 generan en promedio el 26.1% y 73.9% de la energía producida en el esquema BIORREF 2, respectivamente.

A diferencia de BIORREF 1 donde la etapa de PTAR fue diseñada para cumplir con los requerimientos ambientales según la NOM-CCA-007-ECOL/1993, el caso de BIORREF 2 consiste en el diseño de la etapa de fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana como operación unitaria alternativa en la generación de bioproductos y la degradación de materia orgánica, donde el cumplimiento de los requerimientos de efluentes se considera un objetivo secundario. La **Tabla xxiv** y el **Gráfico 15** presentan un análisis de sensibilidad de la demanda química de oxígeno (DQO)

Tabla xxiv Análisis de sensibilidad de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de efluentes para el esquema BIORREF 2

		Lactosuero (L/h)				
		3000	27000	51000	75000	99000
RMC (kg/h)	12000	0.103	0.067	0.054	0.047	0.043
	14750	0.104	0.071	0.058	0.051	0.046
	17500	0.105	0.074	0.061	0.054	0.048
	20250	0.106	0.077	0.064	0.056	0.051
	23000	0.107	0.080	0.067	0.059	0.053

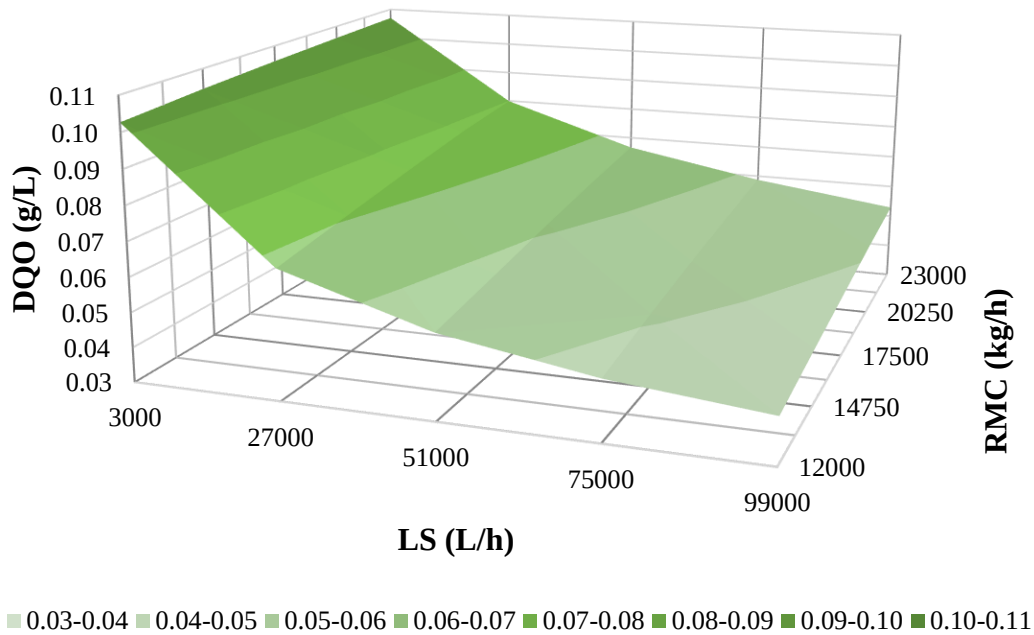


Gráfico 15 Análisis de sensibilidad de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de efluentes para el esquema BIORREF 2

Se observa que, con el fin de proponer escenarios factibles a través del criterio técnico-económico, sustentabilidad energética y calidad de agua descargada, el tamaño de planta adecuado para satisfacer la calidad de agua según la NOM-CCA-007-ECOL/1993 satisface los siguientes escenarios:

- (1) Para una cantidad de LS mayor o igual a 51,000 L/h pero menor a 75,000 L/h, la cantidad de RMC deberá ser igual o menor a 12,000 kg/h.
- (2) Para una cantidad de LS mayor o igual a 75,000 L/h pero menor a 99,000 L/h, la cantidad de RMC deberá ser igual o menor a 17,500 kg/h.
- (3) Para una cantidad de LS mayor o igual a 99,000 L/h, la cantidad de RMC deberá ser igual o mayor a 12,000 kg/h.

4.2.3. Análisis de indicadores económicos y ambientales para el escenario BIORREF

2

Debido a que el punto de operación que satisface el criterio tecno-económico, sustentabilidad energética y calidad de agua descargada converge con el punto de operación seleccionado en la sección 4.1.3 de este documento, se procede a analizar un tamaño de planta de 75,000 L/h y 17,500 kg/h de LS y RMC, respectivamente.

Tabla xxv Valor de los indicadores económicos y ambientales iniciales, homogenizados y su correspondiente porcentaje de contribución para el esquema de producción BIORREF 2

Indicador	Valor	Valor Monetizado	Contribución (%)
DIMENSIÓN TECNO-ECONÓMICA			
M_Y	1.39E+00	5.05E-03	0.00%
M_{TPC}	1.00E+04	-1.00E+04	4.17%
M_{PS}	2.31E+05	2.31E+05	95.82%
M_E	-1.01E-02	5.06E-04	0.00%
M_V	1.59E+10	1.58E+01	0.01%
M_{TAR}	1.68E+08	1.66E-01	0.00%
Valor de sustentabilidad económica (USD/kg bioproductos)		2.20E+05	100.00%
DIMENSIÓN AMBIENTAL			
M_{CO2}	2.43E+01	-7.86E-03	41.07%
M_{WF}	0.00E+00	0.00E+00	0.00%
M_{Wd}	3.56E+00	4.37E-03	22.85%
M_{DQO}	1.91E-04	-6.19E-03	32.37%
M_{WT}	-2.97E-01	7.10E-04	3.71%
M_{pH}	0.00E+00	0.00E+00	0.00%
M_S	1.17E-06	-2.03E-08	0.00%
Valor de sustentabilidad ambiental (USD/kg bioproductos)		-8.97E-03	100.00%

De la **Tabla xxv**, se observa que en la dimensión tecno-económica el valor monetizado del indicador M_{PS} (ahorro en procesos) tiene un valor semejante al obtenido en

BIORREF 1. Debido a que el costo mínimo de venta tuvo un incremento del 0.29%-1.35% en relación con el escenario más simple, el gradiente obtenido con el precio de mercado no tuvo una variación significativa. Se observa una disminución de 579.31 USD/kg bioproductos en comparación con el escenario BIORREF 1 para la dimensión tecnológica.

La dimensión de sustentabilidad ambiental en BIORREF 2 refleja un menor impacto respecto a BIORREF 1. Para el métrico M_{CO_2} , se logró una reducción de gases efecto invernadero desde 595.44 gCO₂eq/kg bioproductos hasta 24.30 gCO₂eq/kg bioproductos. Debido a que en el segundo escenario se establece una etapa de proceso donde se recuperan y purifican los gases provenientes de los procesos fermentativos, únicamente existe una corriente que expide gases de esta naturaleza (703B) que contiene una fracción másica de CO₂ por debajo del 7%. Por otro lado, el métrico M_{Wd} (22.85% de contribución) tiene un impacto positivo en la dimensión ambiental debido a que el agua producida en BIORREF 2 posee las condiciones fisicoquímicas adecuadas para recircularse en su totalidad y además, el superávit puede considerarse como un subproducto en este tipo de esquema. Casi una tercera parte de la contribución en la dimensión ambiental se refiere a los tópicos relacionados a la DQO que contiene la corriente 711A (i.e., agua de recirculación). Aunque el valor de DQO refleja un valor inferior a lo permitido por la NOM-CCA-007-ECOL (1993), el marco de sostenibilidad empleado en este documento tiene una connotación negativa ante la presencia de dicha especie en cualquier efluente.

Tal y como se observa en la **Tabla xxv**, la implementación de un sistema avanzado en la conversión de residuos en la última etapa de proceso (i.e. fermentación oscura, MEC y

MFC) así como la consideración de bioproductos de menor valor agregado logró la reducción en un 96.25% del impacto de la dimensión ambiental. El escenario BIORREF 2 resultó con un impacto positivo en la dimensión tecno-económica con un valor puntual de 240,433.35 USD/kg bioproductos, mientras que el dominio ambiental tuvo una incidencia negativa con un valor de -0.01 USD/kg bioproductos (véase **Gráfico 16**). Los anteriores valores convergen en un valor de sostenibilidad global positivo de 220,499.34 USD/kg bioproductos. Cabe destacar que una extensa bibliografía consultada a la finalización de este TOG arrojó una nula cantidad de publicaciones en revistas indexadas y bases de datos gubernamentales relacionadas al aprovechamiento integral de LS y RMC en un marco de sostenibilidad bidimensional. Si bien existen autores que proponen un CTP de invertasa por esquemas de producción tradicionales (véase Merck KGaA, 2023; Stowers, Ferguson y Tanner, 2008), ninguno de ellos realiza una análisis exhaustivo de un esquema tipo biorrefinería multientrada/multiproducto en las dimensiones tecno-económica y ambiental.

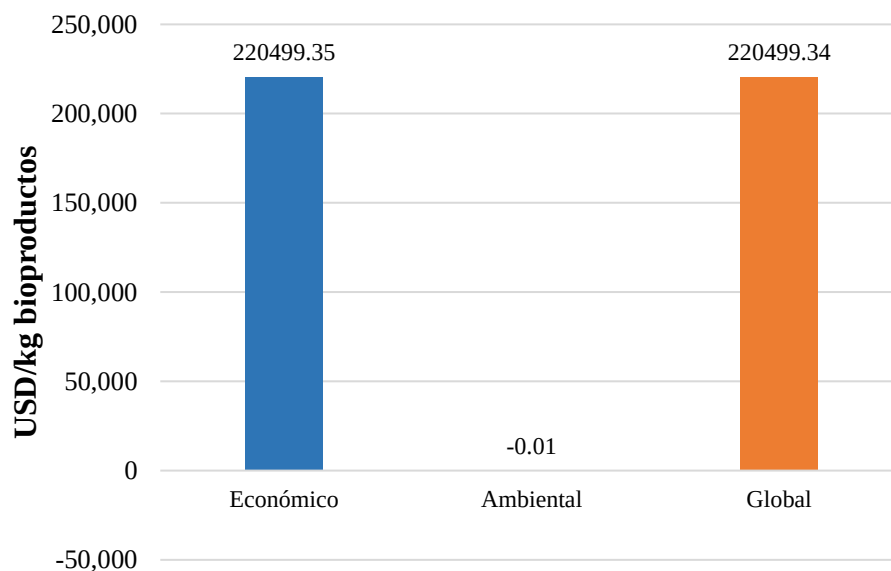


Gráfico 16 Valor de sostenibilidad global para el escenario BIORREF 2

4.3. Conclusiones del capítulo

Como resultado de un marco de sostenibilidad (MS) robusto para el escenario mexicano, se llevó a cabo un análisis bidimensional (i.e., dominio tecno-económico y ambiental) donde se obtuvo un precio mínimo de venta de 10,011.93 y 10,042.18 USD/kg bioproductos para los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2, respectivamente. Se reveló que el valor de sustentabilidad ambiental para ambos casos fue un valor próximo a cero a pesar de que BIORREF 1 no se considera la revalorización de residuos sólidos, recuperación de gases efecto invernadero y se posee un sistema tradicional de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Por otro lado, se desarrolló un segundo esquema de biorrefinería renovable que aprovecha la carga orgánica de los efluentes de BIORREF 1 para lograr un aprovechamiento integral de los residuos y generar una mayor cantidad de subproductos de valor agregado. Los resultados de los indicadores ambientales tuvieron una reducción del 96.25% respecto a su homólogo BIORREF 1 donde además, se establecieron condiciones frontera que conduzcan a una relación de excedente energético positivo así como la recirculación del agua tratada eficientemente al proceso. Ambos esquemas analizados lograron un valor de sostenibilidad global por encima de cero, demostrando la importancia del aprovechamiento de residuos de la industria láctea y cervecera de la ZMG para la generación de bio-productos de alto valor agregado a través de un esquema de biorrefinación multietapa-multiproducto.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

5. Conclusiones generales

A través de un ciclo DMADV para la creación de un marco de sostenibilidad (MS) bidimensional así como el desarrollo de un diseño conceptual que permita revalorizar residuos procedentes de la industria láctea y cervecera de la ZMG, se ha propuesto dos escenarios (i.e., BIORREF 1 y BIORREF 2) cuyos resultados cuantitativos y cualitativos han demostrado ser una plataforma bioquímica multientrada-multiproducto capaz de lograr valores de sostenibilidad global mayores a cero, analizando la dimensión tecno-económica y la dimensión de la sustentabilidad ambiental de manera equitativa. El alto impacto logrado en ambas dimensiones refleja el aprovechamiento integral y sistémico de los residuos procedentes de la ZMG, logrando una producción de bio-productos de alto valor agregado con un precio mínimo de venta atractivo así como la implementación de etapas de proceso innovadoras. La anterior estrategia logró una reducción en la generación de nuevos residuos sólidos y/o efluentes que comprometan la cadena de valor de una plataforma que trabaje bajo el concepto de biorrefinería. Se evaluó la cantidad de residuos tanto de la industria láctea de la industria cervecera con el fin de estimar un tamaño de planta lo más realista posible.

El análisis tecno-económico detallado en BIORREF 1 logró introducir tecnologías atractivas para la producción de invertasa, ácido láctico y biogás en un esquema bioquímico desarrollado como parte de las estrategias I+D+I del Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, alcanzando un diseño conceptual robusto con un costo total de producción de 10,011.93 USD/kg bioproductos. El anterior valor converge en un estimador por debajo del precio de venta que ofrece la bibliografía considerando únicamente a la producción de

invertasa como el agente que dictamina el costo total de producción de dicho bioproceso. Respecto a la dimensión tecno-económica, el valor por debajo del precio de venta del producto invertasa otorgó una contribución de casi el 96% en los indicadores constituidos de esta dimensión.

En el plano ambiental, aunque se logró brindarle un tratamiento convencional a las aguas residuales del escenario BIORREF 1 según la normativa mexicana vigente, el superávit de agua recuperada no es considerada como bio-producto. Por otro lado, las emisiones no tratadas de gases efecto invernadero presentes en BIORREF 1, el tratamiento inexistente en los residuos sólidos y el DQO en los efluentes de este escenario corresponden en un 80% del impacto de la dimensión ambiental. Aunado a esto y considerando una ponderación equitativa en ambas dimensiones, el valor de sostenibilidad global fue de 221,078.42 USD/kg bioproductos.

Como parte de la metodología DMADV, se llevó a cabo la incorporación de un segundo escenario (BIORREF 2) donde se logró la generación de una mayor cantidad de subproductos a través del aprovechamiento de la carga orgánica presente en los efluentes que arribaban al sistema de tratamiento de aguas tradicional en BIORREF 1. Dicha modificación, en conjunto con la integración de tecnologías innovadoras, dio cabida al aumento del 0.30% del precio mínimo de venta respecto al escenario BIORREF 2. No obstante y a diferencia del esquema convencional, se logra un aprovechamiento integral de las corrientes consideradas como desechos en el esquema BIORREF 1 (i.e., CO₂, forraje, salmuera y agua) donde además se genera un superávit energético que es capaz de lograr la sostenibilidad energética en el esquema avanzado. Dichas modificaciones propias del ciclo DMADV lograron reducir el

impacto en la dimensión ambiental del 96.25% respecto al escenario BIORREF 1. Si bien se obtuvo un impacto positivo en la dimensión tecno-económica al igual que en el escenario más simple, el valor de sostenibilidad global para BIORREF 2 convergió en una cifra muy similar a la de BIORREF 1, arribando a un valor global de 220,499.34 USD/kg bioproductos.

En resumen, la revalorización de las corrientes de salida, la implementación de sistemas avanzados e intensificados alineados a la estrategia de una biorrefinería multientrada-multiproducto, permiten demostrar no sólo la factibilidad tecno-económica y ambiental de un problema ambiental de la ZMG, sino que también logra sentar las bases científicas para migrar procesos productivos hacia una economía circular.

5.1. Aspectos de mejora para futuras investigaciones

Este documento, si bien aborda de manera robusta un diseño conceptual bidimensional de una biorrefinería multientrada-multiproducto con el objetivo de mitigar problemas ambientales relacionados a los residuos de distintas industrias alimentarias de la ZMG, los resultados obtenidos fungen como guía para futuras investigaciones en el Proyecto de Aplicación Profesional (PAP): Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas). A continuación, se detallan una serie de aspectos para abordarse en futuros análisis en la línea de tiempo de este PAP:

- Evaluar el desempeño fermentativo respecto a las características propias de los efluentes que arriban a las etapas de fermentación oscura, así como comparar el uso de distintos consorcios microbianos nativos, bioaumentados o mixtos.

- Evaluar experimentalmente la degradación de la carga orgánica entrante a las celdas de electrólisis microbiana (MEC), empleando las especies químicas y fracciones másicas reales del proceso de fermentación oscura propuesto en este documento. Asimismo, establecer el modelo cinético correspondiente que permita establecer parámetros críticos de proceso en una escala piloto.
- Migrar la configuración de BIORREF 2 hacia un esquema donde se emplee el dióxido de carbono generado en una plataforma que aproveche este producto. Por ejemplo, una plataforma que emplee microalgas o algún proceso biológico que produzca un subproducto de mayor valor agregado.
- Llevar a cabo la validación experimental en la purificación de la mezcla binaria CO₂-O₂ así como la mezcla CO₂-H₂, con el fin de contar con un panorama más certero en la evaluación tecno-económica de este tipo de operaciones unitarias.
- Robustecer el marco de sostenibilidad (MS) desarrollado en este documento con el fin de incorporar la dimensión social. La migración de un diseño conceptual bidimensional hacia uno tridimensional propone evaluar el bienestar general de la sociedad a través de esquemas de biorrefinería multientrada-multiproducto, creando de esta forma sociedades más justas, equitativas y saludables.

5.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación

El caso de estudio presentado en este documento responde al enfoque de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) buscados por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), cuya acción inmediata se refleja en las orientaciones fundamentales del Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y

Alimentaria (4D09 Biorrefinerías Avanzadas). Garantizar soluciones integrales, reducción de desigualdades, inclusividad, movilización de recursos (i.e., gobierno, sector privado y sociedad civil) permite equilibrar las necesidades en las dimensiones económicas y ambientales de la ZMG a través de enfoque a largo plazo. Si bien, los escenarios BIORREF 1 y BIORREF 2 parten de un diseño conceptual alineado con la metodología *Design For Six Sigma* cumpliendo las características propias de la maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad, este documento converge en presentar una metodología robusta para identificar, medir y atender proyectos que tengan iniciativas de gestión sustentable en la revalorización de residuos mediante una plataforma de biorrefinación.

Por otro lado, la trascendencia en este trabajo de obtención de grado (TOG) permite establecer un nexo entre distintas ramas de las ciencias exactas con el objetivo de impulsar el trabajo multidisciplinario en el Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales y establecer un lenguaje común que induzca a la generación de nuevas cadenas de valor (i.e., productos y servicios), migrando de esta manera hacia nuevos patrones de producción/consumo. Al demostrar no solo la factibilidad económica de cualquier proyecto, sino también su impacto ambiental a través de un marco de sostenibilidad robusto y pertinente con las necesidades de la sociedad mexicana, se generarán vectores significativos que permitan alinear cualquier proyecto a las políticas emergentes de bioeconomía circular.

6. Productos académicos generados

- Presentación oral en congresos nacionales

Hernández-Sánchez, P., Rojas-Rejón, O., Sevilla-Güitrón, V. y Ayala-Campos, O. ***“Evaluación de Biorrefinerías (2G) Avanzadas para la Revalorización de Residuos Agroalimentarios de la ZMG a través de un Diseño Conceptual Bidimensional”***. En: XLIV ENCUESTRO NACIONAL DE LA AMIDIQ (30 mayo – 02 de junio del 2023, Bahías de Huatulco, Oaxaca, México), 2023.

- Presentación en cartel en congresos nacionales

Gaxiola-Flores, J., Reyes-Solís, U., Velgis-García, A., Rojas-Rejón, O., Sánchez-Carrillo, F., Hernández-Sánchez y Sevilla-Güitrón, V. ***“Evaluación del diseño conceptual de una biorrefinería para la producción de ácido láctico y enzimas a partir de efluentes de desecho de la industria cervecera y láctea”***. En: XX Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería 2023 (11 de septiembre – 15 de septiembre del 2023, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México), 2023.

7. Bibliografía

- Adeleye, A. T., Louis, H., Temitope, H. A., Philip, M., Amos, P. I., Magu, T. O., ... y Amusan, O. O. (2019). Ionic liquids (ILs): advances in biorefinery for the efficient conversion of lignocellulosic biomass. *Asian Journal of Green Chemistry*, 3(3), 391-417.
- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., ... y Lukas, J. (2002). *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover* (No. NREL/TP-510-32438). National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
- Aguilar-Sánchez, P., Navarro-Pineda, F. S., Sacramento-Rivero, J. C., y Barahona-Pérez, L. F. (2018). Life-cycle assessment of bioethanol production from sweet sorghum stalks cultivated in the state of Yucatan, Mexico. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1685-1696. DOI: 10.1007/s10098-017-1480-4
- Ahlgren, S., Björklund, A., Ekman, A., Karlsson, H., Berlin, J., Börjesson, P., ... y Strid, I. (2015). Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems-key issues and recommendations. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(5), 606-619. DOI: 10.1002/bbb.1563
- Alemán-Nava, G. S., Meneses-Jácome, A., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Dallemand, J. F., ... y Parra, R. (2015). Bioenergy in Mexico: Status and perspective. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(1), 8-20. DOI: 10.1002/bbb.1523

- Alexandri, M., Schneider, R., y Venus, J. (2018). Membrane technologies for lactic acid separation from fermentation broths derived from renewable resources. *Membranes*, 8(4), 94. DOI: 10.3390/membranes8040094
- Anastas, P. y Warner, J. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
- Andjelković, U., Pićurić, S. y Vujčić, Z. (2010). Purification and characterisation of *Saccharomyces cerevisiae* external invertase isoforms. *Food Chemistry*, 120(3), 799-804. DOI: 10.1016/j.foodchem.2009.11.013
- Arellano, A. (2013). Evaluación del proceso de obtención y separación de ácido láctico a partir de la fermentación de suero lácteo mediante tecnología de membrana. [Tesis para optar el grado de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos]. Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). 124 páginas.
- Arena, M., Ciceri, N. D., Terzi, S., Bengo, I., Azzone, G., y Garetti, M. (2009). A state-of-the-art of industrial sustainability: Definitions, tools and metrics. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(1-3), 207-251. DOI: 10.1504/IJPLM.2009.031674
- Asveld, L., Osseweijer, P., y Posada, J. A. (2019). Societal and ethical issues in industrial biotechnology. *Sustainability and Life Cycle Assessment in Industrial Biotechnology*, 121-141. DOI: 10.1007/10_2019_100
- Ayala, O. (2022). Producción Biológica de Hidrógeno y Butanol a Partir de Biomásas Lignocelulósicas en una Biorrefinería Sostenible. [Tesis para optar el grado de Doctor

en Ciencias en la especialidad Ingeniería Eléctrica]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Guadalajara. 243 páginas.

Azapagic, A. (2014). Sustainability considerations for integrated biorefineries. *Trends in biotechnology*, 32(1), 1-4. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.10.009

Ball, D. M., Collins, M., Lacefield, G. D., Martin, N. P., Mertens, D. A., Olson, K. E., ... y Wolf, M. W. (2001). Understanding forage quality. *American Farm Bureau Federation Publication*, 1(01), 1-15.

Banco de México (2023). Portal de inflación. Recuperado el 22 de julio del 2023, de: <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=inf&idioma=sp>

Bañuelas, R., y Antony, J. (2003). Going from six sigma to design for six sigma: an exploratory study using analytic hierarchy process. *The TQM Magazine*, 15(5), 334-344. DOI: 10.1108/09544780310487730

Bañuelas, R., y Antony, J. (2004). Six sigma or design for six sigma? *The TQM magazine*, 16(4), 250-263. DOI: 10.1108/09544780410541909

Barbosa, P. M. G., de Moraes, T. P., de Andrade Silva, C. A., da Silva Santos, F. R., Garcia, N. F. L., Fonseca, G. G., ... y da Paz, M. F. (2018). Biochemical characterization and evaluation of invertases produced from *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 and *Rhodotorula mucilaginosa* for the production of fructooligosaccharides. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 48(6), 506-513. DOI: 10.1080/10826068.2018.1466155

- Bastidas-Oyanedel, J. R., y Schmidt, J. E. (2018). Increasing profits in food waste biorefinery—a techno-economic analysis. *Energies*, 11(6), 1551. DOI: 10.3390/en11061551
- Beegle, J. R. y Borole, A. P. (2018). Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 343-351. DOI: 10.1016/j.rser.2018.07.057
- Bellotti, D., Rivarolo, M., Magistri, L., y Massardo, A. F. (2017). Feasibility study of methanol production plant from hydrogen and captured carbon dioxide. *Journal of CO2 utilization*, 21, 132-138. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.07.001
- Bernstad, A. (2017). System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. *International journal of environmental science and technology*, 14(2), 435-452. DOI: 10.1007/s13762-016-1138-5
- Bidar, B., y Shahraki, F. (2018). Energy and exergo-economic assessments of gas turbine-based CHP systems: A case study of SPGC utility plant. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 37(5), 209-223.
- Bouchoux, A., Roux-de Balman, H., y Lutin, F. (2006). Investigation of nanofiltration as a purification step for lactic acid production processes based on conventional and bipolar electrodialysis operations. *Separation and purification technology*, 52(2), 266-273. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.05.011

Burdge, R. J. (2002). Why is social impact assessment the orphan of the assessment process?

Impact Assessment and Project Appraisal, 20(1), 3-9. DOI:
10.3152/147154602781766799

Cámara Nacional de Industriales de la Leche [CANILEC] (2021). *Estadísticas del Sector*

Lácteo 2010-2020. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de:
<https://www.canilec.org.mx/wp-content/uploads/2021/04/Compendio-del-Sector-Lacteo-2021.pdf>

Cámara Nacional de la Industria de Conservas Alimenticias [CANAINCA] (2020). *Estiman*

que producción de alimentos procesados llegue a 169 MMD. Recuperado el 18 de
septiembre del 2022, de: <https://www.canainca.org.mx/index.php/la-industria/noticias-recientes/109-estiman-que-produccion-de-alimentos-procesados-llegue-a-169-mmd>

Carmona-Cabello, M., Garcia, I. L., Leiva-Candia, D., y Dorado, M. P. (2018). Valorization

of food waste based on its composition through the concept of biorefinery. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14, pp. 67-79. DOI:
10.1016/j.cogsc.2018.06.011

Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria

[CEDRSSA] (2019). *La producción y el comercio de lácteos en México*. Recuperado
el 25 de marzo del 2022, de:
<http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/14producci%C3%B3n%20y%20comercio%20de%20lacteos-junio%2004,%202019.pdf>

- Cervantes, G., Torres, L.G. y Ortega, M. (2020). Valorization of Agricultural Wastes and Biorefineries: A Way of Heading to Circular Economy. In: Salomone, R., Cecchin, A., Deutz, P., Raggi, A., Cutaia, L. (eds) *Industrial Symbiosis for the Circular Economy. Strategies for Sustainability*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-36660-5_12
- Chatterjee, S., Jeevanandham, S., Mukherjee, M., Vo, D. V. N., y Mishra, V. (2021). Significance of re-engineered zeolites in climate mitigation—A review for carbon capture and separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105957. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105957
- Chávez, K. (2022). Simulación del diseño conceptual de una biorrefinería para la producción de probióticos, ácido láctico y enzimas a partir de efluentes de desecho de la industria cervecera y láctea. [Proyecto de Aplicación Profesional para optar el grado de Ingeniero en Alimentos]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). 33 páginas
- Cheng, S., y Logan, B. E. (2007). Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(47), 18871-18873. DOI: 10.1073/pnas.0706379104
- Clark, H., y Wu, H. (2016). The sustainable development goals: 17 goals to transform our world. *Furthering the work of the United Nations*, 36-54. DOI: 10.18356/69725e5a-en
- Collet, C., Adler, N., Schwitzguébel, J. P., y Péringer, P. (2004). Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 29(14), 1479-1485. DOI:
10.1016/j.ijhydene.2004.02.009

Creveling, C. M., Slutsky, J., y Antis, D. (2002). *Design for Six Sigma in technology and product development*. Prentice Hall Professional.

Dahiya, S., Katakojwala, R., Ramakrishna, S., y Mohan, S. V. (2020). Biobased products and life cycle assessment in the context of circular economy and sustainability. *Materials Circular Economy*, 2(1), 1-28. DOI: 10.1007/s42824-020-00007-x

Data México (2022). Industria alimentaria. Recuperado el 18 de septiembre del 2022, de:
<https://datamexico.org/es/profile/industry/food-manufacturing>

Davey, C. J., Leak, D., y Patterson, D. A. (2016). Hybrid and mixed matrix membranes for separations from fermentations. *Membranes*, 6(1), 17. DOI:
10.3390/membranes6010017

Delgado, J. A., Águeda, V. I., Uguina, M. A., Sotelo, J. L., Brea, P., y Grande, C. A. (2014). Adsorption and diffusion of H₂, CO, CH₄, and CO₂ in BPL activated carbon and 13X zeolite: evaluation of performance in pressure swing adsorption hydrogen purification by simulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(40), 15414-15426. DOI: 10.1021/ie403744u

Demichelis, F., Fiore, S., Pleissner, D., y Venus, J. (2018). Technical and economic assessment of food waste valorization through a biorefinery chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, pp. 38-48. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.064

- Dieleman, H., y Martínez-Rodríguez, M. C. (2019). Potentials and challenges for a circular economy in Mexico. *Towards Zero Waste: Circular Economy Boost, Waste to Resources*, 6, 9-24. DOI: 10.1007/978-3-319-92931-6_2
- Dimian, A. C., Bildea, C. S. y Kiss, A. A. (2014). Pinch point analysis. En *Computer aided chemical engineering* (Vol. 35, pp. 525-564). Elsevier.
- Douglas, J. (1988). *Conceptual Design of Chemical Processes*. McGraw Hill.
- Dubey, A., y Arora, A. (2022). Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133932. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133932
- Dzulinski, A. C., Braghini Junior, A., y Chiroli, D. M. G. (2023). Design for Six Sigma: A Review of the Definitions, Objectives, Activities, and Tools. *Engineering Management Journal*, 35(2), 161-180. DOI: 10.1080/10429247.2022.2041964
- Efthymiou, M. N., Pateraki, C., Papapostolou, H., Lin, C. S. K., y Koutinas, A. (2021). Restructuring the sunflower-based biodiesel industry into a circular bio-economy business model converting sunflower meal and crude glycerol into succinic acid and value-added co-products. *Biomass and Bioenergy*, 155, 106265. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106265
- Elkington, J. (1994). Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California management review*, 36(2), 90-100. DOI: 10.2307/41165746

ElSevier. (2022). *Chemical Engineering Journal*. Recuperado el 20 de marzo de 2022, desde:
<https://www.sciencedirect.com/journal/chemical-engineering-journal>

Felder, R., Rousseau, R. y Bullard, L. (2020). *Elementary principles of chemical processes*.
John Wiley & Sons.

Feng, D., Xia, A., Liao, Q., Nizami, A. S., Sun, C., Huang, Y., ... y Zhu, X. (2021). Carbon
cloth facilitates semi-continuous anaerobic digestion of organic wastewater rich in
volatile fatty acids from dark fermentation. *Environmental Pollution*, 272, 116030.
DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116030

Fernández, A., Solalinde, J. y Caballero, L. (2021). PROGRAMA DE DESARROLLO
TECNOLÓGICO PARA LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL ENERGÉTICA
Y ALIMENTARIA I. [Proyecto de Aplicación Profesional para optar el grado de
Ingeniero en Biotecnología]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Occidente (ITESO). 46 páginas.

Ferreira, M. V., Rossler, A. F., Toralles, R. P., Ruiz, W. A. y Rombaldi, C. V. (2018).
Extracción optimizada y purificación parcial de invertasa aislada de *S. Cerevisiae* en
puré de durazno. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40, e-489. DOI: 10.1590/0100-
29452018489

Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., y Klüppel, H. J. (2006). The new
international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The
international journal of life cycle assessment*, 11(2), 80-85. DOI:
10.1065/lca2006.02.002

- Forbes, H., Quested, T. y O'Connor, C. (2021). *Informe sobre el índice de desperdicio de alimentos 2021. Nairobi (Kenia)*. ISBN: 978-92-807-3868-1
- Francisco P. (2015). Laudato si: On care for our common home. *Our Sunday Visitor*.
- Francisco, M. G., Canciglieri Junior, O., y Santanna, A. M. O. (2023). Roadmap for product development based on design for six sigma method. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(5), 989-1009. DOI: 10.1108/IJLSS-06-2022-0131
- Gargalo, C. L., Carvalho, A., Gernaey, K. V., y Sin, G. (2016). A framework for techno-economic & environmental sustainability analysis by risk assessment for conceptual process evaluation. *Biochemical engineering journal*, 116, 146-156. DOI: 10.1016/j.bej.2016.06.007
- Giwa, A., Dufour, V., Al Marzooqi, F., Al Kaabi, M., y Hasan, S. W. (2017). Brine management methods: Recent innovations and current status. *Desalination*, 407, 1-23. DOI: 10.1016/j.desal.2016.12.008
- Global Energy Partnership (2011). *The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy*. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de: http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/Indicators/GBEP_Report-traducci%C3%B3n_espa%C3%B1ol.pdf
- Gobierno de Jalisco (2022). Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Recuperado el 26 de julio del 2023, de: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/resolutivo_tarifario_2022.pdf

- Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., ... y Noble, I. (2013). Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 495(7441), 305-307. DOI: 10.1038/495305a
- Gu, Y., Wang, D., Chen, Q., y Tang, Z. (2022). Techno-economic analysis of green methanol plant with optimal design of renewable hydrogen production: A case study in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(8), 5085-5100. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.148
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., y Meybeck, A. (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo: alcance, causas y prevención*. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de: <https://www.fao.org/3/i2697s/i2697s.pdf>
- Haddad, M., Bazinet, L., y Barbeau, B. (2019). Eco-efficient treatment of ion exchange spent brine via electrodialysis to recover NaCl and minimize waste disposal. *Science of The Total Environment*, 690, 400-409. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.539
- Haller, N., y Kulozik, U. (2019). Separation of whey protein aggregates by means of continuous centrifugation. *Food and Bioprocess Technology*, 12(6), 1052-1067. DOI: 10.1007/s11947-019-02275-1
- Hansen, J. (2023). Power-to-ammonia for fertilizers, chemicals, and as an energy vector. In *High-Temperature Electrolysis: From fundamentals to applications* (pp. 17-1). Bristol, UK: IOP Publishing.
- Herrera, A.: Comunicación personal (2022)

Ho, H. J., Iizuka, A., y Shibata, E. (2019). Carbon capture and utilization technology without carbon dioxide purification and pressurization: a review on its necessity and available technologies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(21), 8941-8954. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01213

Ho, H. J., Lizuka, A., y Shibata, E. (2019). Carbon capture and utilization technology without carbon dioxide purification and pressurization: a review on its necessity and available technologies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(21), 8941-8954. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01213

Hottle, T. A., Bilec, M. M., y Landis, A. E. (2013). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymer degradation and stability*, 98(9), 1898-1907. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.016

Hunt, A. J., Sin, E. H., Marriott, R., y Clark, J. H. (2010). Generation, capture, and utilization of industrial carbon dioxide. *ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials*, 3(3), 306-322. DOI: 10.1002/cssc.200900169

Institution of Chemical Engineers (IChemE) (2003). *Sustainable Development Progress Metrics*. Recuperado el 13 de abril del 2022, de: www.icheme.org/sustainability/metrics.pdf

Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco [IIEG] (2022). *Industria alimentaria*. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de: https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=15087

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (2022a). Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM). Recuperado el 25 de enero del 2023, de:

https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?px=EMIM_ENTIDAD_37&bd=EMIM

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (2022b). Banco de Información Económica (BIE). Recuperado el 22 de junio del 2023, de: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (2020). *Conociendo la industria de la cerveza*. Colección de estudios sectoriales y regionales. URL: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente [ITESO] (2003). Orientaciones fundamentales del ITESO. Recuperado el 20 de marzo del 2022, de: <https://posgrados.iteso.mx/documents/2624322/0/Orientaciones+fundamentales+del+ITESO.pdf/4831d49f-7335-47f7-8cdd-d5df274b74e8#:~:text=Tiene%20como%20misi%C3%B3n%3A,b%C3%BAsqueda%20permanente%20de%20la%20verdad.>

Intelligen Inc. (2020). Superpro Designer. <https://www.intelligen.com/products/superpro-overview/>

International Organization for Standardization [ISO]. (2006). ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia.

Recuperado el 25 de agosto del 2022, de:
<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

Ioannidou, S. M., Ladakis, D., Moutousidi, E., Dheskali, E., Kookos, I. K., Câmara-Salim, I., ... y Koutinas, A. (2022). Techno-economic risk assessment, life cycle analysis and life cycle costing for poly (butylene succinate) and poly (lactic acid) production using renewable resources. *Science of The Total Environment*, 806, 150594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150594

Ioannidou, S. M., Pateraki, C., Ladakis, D., Papapostolou, H., Tsakona, M., Vlysidis, A., ... y Koutinas, A. (2020). Sustainable production of bio-based chemicals and polymers via integrated biomass refining and bioprocessing in a circular bioeconomy context. *Bioresource technology*, 307, 123093. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123093

Jaschik, M., Tańczyk, M., Janusz-Cygan, A., Wojdyła, A., y Warmuziński, K. (2018). The separation of carbon dioxide from CO₂/N₂/O₂ mixtures using polyimide and polysulphone membranes. *Chemical and Process Engineering*, 39(4). DOI: 10.24425/122962

Kadier, A., Simayi, Y., Kalil, M. S., Abdeslahian, P., & Hamid, A. A. (2014). A review of the substrates used in microbial electrolysis cells (MECs) for producing sustainable and clean hydrogen gas. *Renewable Energy*, 71, 466-472. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.052

- Karp, S. G., Schmitt, C. C., Moreira, R., de Oliveira Penha, R., de Mello, A. F. M., Herrmann, L. W., y Soccol, C. R. (2022). Sugarcane Biorefineries: Status and Perspectives in Bioeconomy. *BioEnergy Research*, pp. 1-12. DOI: 10.1007/s12155-022-10406-4
- Katakojwala, R., y Mohan, S. V. (2021). A critical view on the environmental sustainability of biorefinery systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27, 100392. DOI: 10.1016/j.cogsc.2020.100392
- Khan, M. Z., Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Sultana, S., Ismail, I. M., y Shahzad, K. (2017). Microbial electrolysis cells for hydrogen production and urban wastewater treatment: A case study of Saudi Arabia. *Applied Energy*, 185, 410-420. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.005
- Kleeberg, K., Schneider, K., y Nippa, M. (2015). Methods for Measuring and Evaluating Sustainability: State-of-the Art, Challenges, and Future Developments. *Handbook of Clean Energy Systems*, 1-26. DOI: 10.1002/9781118991978.hces174
- Kobe, K. (1958). Plant Design and Economics for Chemical Engineers (Peters, Max S.). *J Chem Educ.* 35(10):A506. DOI:10.1021/ed035pa506
- Koch, P. N., Yang, R. J., y Gu, L. (2004). Design for six sigma through robust optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26, 235-248. DOI: 10.1007/s00158-003-0337-0
- Kong, X., Zhou, H., y Qian, H. (2007). Enzymatic hydrolysis of wheat gluten by proteases and properties of the resulting hydrolysates. *Food Chemistry*, 102(3), 759-763. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.06.062

- Korelskiy, D., Ye, P., Fouladvand, S., Karimi, S., Sjöberg, E., y Hedlund, J. (2015). Efficient ceramic zeolite membranes for CO₂/H₂ separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(23), 12500-12506. DOI: 10.1039/C5TA02152A
- Kumar, V., Cudney, E. A., Mittal, A., Jha, A., Yadav, N., y Owad, A. A. (2023). Mapping quality performance through lean six sigma and new product development attributes. *The TQM Journal*. DOI: 10.1108/TQM-11-2022-0324
- Ladakis, D., Stylianou, E., Ioannidou, S. M., Koutinas, A., y Pateraki, C. (2022). Biorefinery development, techno-economic evaluation and environmental impact analysis for the conversion of the organic fraction of municipal solid waste into succinic acid and value-added fractions. *Bioresource Technology*, 354, 127172. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127172
- Li, P., y Tezel, F. H. (2007). Adsorption separation of N₂, O₂, CO₂ and CH₄ gases by β -zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 98(1-3), 94-101. DOI: 10.1016/j.micromeso.2006.08.016
- Li, S., Yuan, X., Deng, S., Zhao, L., y Lee, K. B. (2021). A review on biomass-derived CO₂ adsorption capture: adsorbent, adsorber, adsorption, and advice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111708. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111708
- Liu, Y., Lyu, Y., Tian, J., Zhao, J., Ye, N., Zhang, Y., y Chen, L. (2021). Review of waste biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110716. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110716

Mader, D. P. (2002). Design for six sigma. *Quality progress*, 35(7), 82-86.

Magaña-Mendoza, G. (2018). Análisis de sostenibilidad de esquemas de biorrefinación para el aprovechamiento integral de los residuos del agave. [Tesis para optar el grado de Maestría en Ciencias de Innovación Biotecnológica]. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ). 144 páginas.

Marone, A., Ayala-Campos, O. R., Trably, E., Carmona-Martínez, A. A., Moscoviz, R., Latrille, E., ... y Bernet, N. (2017). Coupling dark fermentation and microbial electrolysis to enhance bio-hydrogen production from agro-industrial wastewaters and by-products in a bio-refinery framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1609-1621. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.166

Martín-Gamboa, M., Dias, L. C., Quinteiro, P., Freire, F., Arroja, L., y Dias, A. C. (2019). Multi-criteria and life cycle assessment of wood-based bioenergy alternatives for residential heating: A sustainability analysis. *Energies*, 12(22), 4391. DOI: 10.3390/en12224391

Merck KGaA (2023). Invertase from baker's yeast (*S. cerevisiae*). Recuperado el 15 de febrero del 2023, desde: https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/sigma/i4504?gclid=CjwKCAjw_uGmBhBREiwAeOfsd6Fsk5valactru8ehmFt243rLzroqZJqOx-5AcreAvI-0hYdq53zqRoClfEQAvD_BwE&gclidsrc=aw.ds

Molina-Guerrero, C. E., Sanchez, A., y Vázquez-Núñez, E. (2020). Energy potential of agricultural residues generated in Mexico and their use for butanol and electricity

- production under a biorefinery configuration. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 28607-28622. DOI: 10.1007/s11356-020-08430-y
- Montpart, N., Rago, L., Baeza, J. A., y Guisasola, A. (2015). Hydrogen production in single chamber microbial electrolysis cells with different complex substrates. *Water Research*, 68, 601-615. DOI: 10.1016/j.watres.2014.10.026
- Moore, J.E. (1980). Forage Crops. In Crop Quality, Storage, and Utilization, C.S. Hoveland (Ed.). DOI: 10.2135/1980.cropquality.c3
- Morais, A. R., y Bogel-Lukasik, R. (2013). Green chemistry and the biorefinery concept. *Sustainable chemical processes*, 1(1), 1-3. DOI: 10.1186/2043-7129-1-18
- Moreno, S., Sanchez, Y. y Rodriguez, L. (1990). Purification and characterization of the invertase from *Schizosaccharomyces pombe*. A comparative analysis with the invertase from *Saccharomyces cerevisiae*. *Biochemical Journal*, 267(3), 697-702. DOI: 10.1042/bj2670697
- Munoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C., y Bassi, A. (2021). An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Science of the Total Environment*, 754, 142429. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142429
- Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275. DOI: 10.1002/jsfa.6486

- Mussatto, S. I., Dragone, G., y Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics, and potential applications. *Journal of cereal science*, 43(1), 1-14. DOI: 10.1016/j.jcs.2005.06.001
- NOM-CCA-007-ECOL/1993. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-007-ECOL/199. Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Gobernación. Recuperado el 20 de marzo de 2022 desde: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4793920&fecha=18/10/1993
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2015). Environmental Trends: Water pricing for public supply. In: *Environment at a Glance 2015: OECD Indicators*. París: OECD Publishing; 2015:36-37. DOI: 10.1787/888933261897
- Osorio-González, C. S., Sandoval-Salas, F., Hernández-Rosas, F., Hidalgo-Contreras, J. V., Gómez-Merino, F. C., y Ávalos, D. L. C. (2018). Potential for the use of cheese whey in Mexico. *Agroproductividad*, 11(7), 101-106.
- Padín-González, C. y Díaz-Fernández, M. (2009). Fermentación alcohólica del lactosuero por *Kluyveromyces marxianus* y solventes orgánicos como extractantes. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29(2), 110-116.
- Pandey, A., Hofer, R., Taherzadeh, M., Nampoothiri, M., y Larroche, C. (Eds.). (2015). *Industrial biorefineries and white biotechnology*. Elsevier.
- Peña, D. (2014). *Fundamentos de estadística*. Editorial Alianza.
- Phillips, E. J. (2002). Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations. *Consulting to Management*, 13(4), 57.

- Polettini, A., Pomi, R., Rossi, A., Zonfa, T., De Gioannis, G., y Muntoni, A. (2022). Factor-based assessment of continuous BIO-H₂ production from cheese whey. *Chemosphere*, 136174. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136174
- Pramanik, B. K., Shu, L., y Jegatheesan, V. (2017). A review of the management and treatment of brine solutions. *Environmental science: water research & technology*, 3(4), 625-658. DOI: 10.1039/C6EW00339G
- Prazeres, A. R., Carvalho, F., y Rivas, J. (2013). Fenton-like application to pretreated cheese whey wastewater. *Journal of Environmental Management*, 129, 199-205. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.07.016
- Pyzdek, T., y Keller, P. A. (2003). *A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels*. McGraw-Hill Education.
- Red Mexicana de Bioenergía [REMBIO] (2010). Proyectos REMBIO. Recuperado el 25 de agosto del 2022, de: <http://www.rembio.org.mx/ProyectosRembio>.
- Ribeiro, B. E. (2013). Beyond commonplace biofuels: Social aspects of ethanol. *Energy Policy*, 57, 355-362. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.02.004
- Righi, S. (2019). Life Cycle Assessments of Waste-Based Biorefineries—A Critical Review. In: Basosi, R., Cellura, M., Longo, S., Parisi, M. (eds) *Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies. Green Energy and Technology*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-93740-3_9
- Rojas-Rejón, O.: Comunicación personal (2022)

- Romero-Perez, J. C., Vergara, L., y González-Delgado, A. D. (2021). Development of a methodology for the synthesis of biorefineries based on incremental economic and exergetic return on investment. *ACS omega*, 6(9), 6112-6123. DOI: 10.1021/acsomega.0c04782
- Rueda, K. y Gutiérrez, C. (2021). Optimización del proceso de sacarificación y fermentación simultánea de lactosuero por *Saccharomyces boulardii* para su aprovechamiento en biorrefinerías avanzadas. [Proyecto de Aplicación Profesional para optar el grado de Ingeniero en Biotecnología]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). 36 páginas.
- Ruggerio, C. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the Total Environment*, 786, 147481. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147481
- Saaty, T. L. (1988). *What is the analytic hierarchy process?* Springer Berlin Heidelberg.
- Sacramento Rivero, J. C., Mwampamba, T. H., Navarro-Pineda, F. S., Musule, R., García, C. A., Martínez-Bravo, R. D., ... y Camarillo, R. (2022). A Methodological Framework for Assessing the Sustainability of Solid Biofuels Systems. *Bioenergy research*, 1-23. DOI: 10.1007/s12155-021-10365-2
- Sacramento Rivero, J.C., Romero, G., Cortés-Rodríguez, E., Pech, E. y Blanco-Rosete, S. (2010). Diagnóstico del Desarrollo de Biorrefinerías en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 261-283.

- Sacramento-Rivero, J. C., Navarro-Pineda, F., y Vilchiz-Bravo, L. E. (2016). Evaluating the sustainability of biorefineries at the conceptual design stage. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 167-180. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.10.017
- Sánchez A., Magaña, G., Gomez, D., Solís, M., y Banares-Alcantara, R. (2014). Bidimensional sustainability analysis of lignocellulosic ethanol production processes. Method and case study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(5), pp. 670-685. DOI: 10.1002/bbb.1512
- Sánchez, A., Sánchez, S., Dueñas, P., Hernández-Sánchez, P., y Guadalajara, Y. (2020). The role of sustainability analysis in the revalorization of Tequila residues and wastes using biorefineries. *Waste and Biomass Valorization*, 11(2), pp. 701-713. DOI: 10.1007/s12649-019-00756-0
- Sánchez, A., Sevilla-Güitrón, V., Magaña, G., y Gutiérrez, L. (2013). Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production. *Fuel*, 113, 165-179. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.05.034
- Sangeetha, T., Rajneesh, C. P., y Yan, W. M. (2020). Integration of microbial electrolysis cells with anaerobic digestion to treat beer industry wastewater. En *Integrated microbial fuel cells for wastewater treatment* (pp. 313-346). Butterworth-Heinemann.
- Sebastián-Nicolás, J. L., González-Olivares, L. G., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constantino, C. A., Castañeda-Ovando, A., y Cruz-Guerrero, A. E. (2020). Valorization of whey using a biorefinery. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(5), 1010-1027. DOI: 10.1002/bbb.2100

- Seider, W. D., Seader, J. D. y Lewin, D. R. (2009). *Product & Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*. John Wiley & Sons.
- Sevilla-Güitrón, V. (2014). Análisis Paramétrico del Costo Total de Etanol 2G Enzimático para Diferentes Esquemas de Producción en el Ámbito Mexicano. [Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias en la especialidad Ingeniería Eléctrica]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Guadalajara. 122 páginas.
- Shah, A. V., Singh, A., Mohanty, S. S., Srivastava, V. K., y Varjani, S. (2022). Organic solid waste: Biorefinery approach as a sustainable strategy in circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 126835. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126835
- Sikdar, S. K. (2003). Sustainable development and sustainability metrics. *AIChE journal*, 49(8), 1928-1932.
- Souza Filho, P. F., Brancoli, P., Bolton, K., Zamani, A., y Taherzadeh, M. J. (2017). Techno-economic and life cycle assessment of wastewater management from potato starch production: Present status and alternative biotreatments. *Fermentation*, 3(4), 56. DOI: 10.3390/fermentation3040056
- Statista (2021). Empresas de la industria de los alimentos con el mayor valor de ventas en México en 2021. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de: <https://es.statista.com/estadisticas/1156191/empresas-del-sector-alimentos-ventas-mexico/>

- Statista (2022). Valor de ventas de bebidas alcohólicas producidas en México en 2020, por tipo de bebida. Recuperado el 25 de marzo del 2022, de: <https://es.statista.com/estadisticas/1264821/valor-ventas-bebidas-alcoholicas-producidas-mexico-por-tipo/#:~:text=Durante%202020%2C%20la%20bebida%20alcoh%C3%B3lica,mexicanos%20en%20ese%20mismo%20a%C3%B1o.>
- Stowers, C. C., Ferguson, E. M., y Tanner, R. D. (2008). Development of activity-based cost functions for cellulase, invertase, and other enzymes. In *Biotechnology for Fuels and Chemicals: Proceedings of the Twenty-Ninth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held April 29–May 2, 2007, in Denver, Colorado* (pp. 475-485). Humana Press. DOI: 10.1007/s12010-007-8087-x
- Suwelack, K., y Wüst, D. (2015). An approach to unify the appraisal framework for biomass conversion systems. *Biomass and Bioenergy*, 83, 354-365. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.10.012
- Tagne, R. F. T., Costa, P., Casella, S., y Favaro, L. (2023). Optimization of biohydrogen production by dark fermentation of African food-processing waste streams. *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.348
- Tahir, A. C., y Darton, R. C. (2010). The process analysis method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. *Journal of cleaner production*, 18(16-17), 1598-1607. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.07.012

- Tartakovsky, B., Mehta, P., Santoyo, G., y Guiot, S. R. (2011). Maximizing hydrogen production in a microbial electrolysis cell by real-time optimization of applied voltage. *International journal of hydrogen energy*, 36(17), 10557-10564. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.162
- Thuy, N. T. H., y Boontawan, A. (2017). Production of very-high purity succinic acid from fermentation broth using microfiltration and nanofiltration-assisted crystallization. *Journal of Membrane Science*, 524, 470-481. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.11.073
- Tol, R. (2023). Social cost of carbon estimates have increased over time. *Nat. Clim. Chang.* 13, 532–536. DOI: 10.1038/s41558-023-01680-x
- Torres-Martínez, Q. y Romero-León, K. (2020). Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: valorización económica de residuos. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(55), e20908. DOI: 10.24836/es.v30i55.908
- Towler, G. y Sinnott, R. (2021). *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Butterworth-Heinemann.
- Treichler, D., Carmichael, R., Kusmanoff, A., Lewis, J., y Berthiez, G. (2002). Design for Six Sigma: 15 lessons learned. *Quality Progress*, 35(1), 33.
- Trott, P. (2008). *Innovation management and new product development*. Pearson Education.
- Tsegeye, B., Jaiswal, S., y Jaiswal, A. K. (2021). Food waste biorefinery: pathway towards circular bioeconomy. *Foods*, 10(6), 1174. DOI: 10.3390/foods10061174

- U.S. Geological Survey (2020). *Mineral Commodity Summaries: Helium*. Recuperado el 01 de septiembre del 2023, de: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-helium.pdf>
- Uğurluay, K. y Kirikkaleli, D. (2022). Sustainable Technology in High-Income Economies: The Role of Innovation. *Sustainability*, 14(6), 3320. DOI: 10.3390/su14063320
- Van Linden, N., Shang, R., Stockinger, G., Heijman, B., y Spanjers, H. (2020). Separation of natural organic matter and sodium chloride for salt recovery purposes in zero liquid discharge. *Water Resources and Industry*, 23, 100117. DOI: 10.1016/j.wri.2019.100117
- Vance, C., Sweeney, J., y Murphy, F. (2022). Space, time, and sustainability: The status and future of life cycle assessment frameworks for novel biorefinery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112259. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112259
- Vergara, A. G. Y., Sotelo-Navarro, P. X., Poggi-Varaldo, H. M., Calderón-Salinas, J. V., Sánchez-Pérez, R., y Matsumoto-Kuwahara, Y. (2022). Análisis de legislación sobre biorrefinerías en México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 38, 111-142.
- Watanabe, M. D., Pereira, L. G., Chagas, M. F., Cunha, M. P. D., Jesus, C. D., Souza, A., ... y Bonomi, A. (2016). Sustainability assessment methodologies. In *Virtual Biorefinery* (pp. 155-188). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-26045-7_6

- White, J. C., Dutta, P. K., Shqau, K., y Verweij, H. (2010). Synthesis of ultrathin zeolite Y membranes and their application for separation of carbon dioxide and nitrogen gases. *Langmuir*, 26(12), 10287-10293. DOI: 10.1021/la100463j
- Wichanuchit, W., Pung, T., y Panich-pat, T. (2021). Wastewater Treatment in the Brewing Industry Using *Chlorella vulgaris*. *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*, 14(3), 35-41.
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., y Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of the total environment*, 657, 56-72. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.424
- Wooley, R., Ruth, M., Sheehan, J., Ibsen, K., Majdeski, H., y Galvez, A. (1999). *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis current and futuristic scenarios* (No. NREL/TP-580-26157). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., y Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, 343, 126126. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126126
- Yang, K., y El-Haik, B. S. (2009). *Design for six sigma: a roadmap for product development*. McGraw-Hill Education.
- Yangilar, F. (2013). The application of dietary fiber in food industry: structural features, effects on health and definition, obtaining and analysis of dietary fiber: a

review. *Journal of Food and Nutrition Research*, 1(3), 13-23. DOI: 10.12691/JFNR-1-3-1.

Yin, S. W., Tang, C. H., Cao, J. S., Hu, E. K., Wen, Q. B., y Yang, X. Q. (2008). Effects of limited enzymatic hydrolysis with trypsin on the functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate. *Food chemistry*, 106(3), 1004-1013. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.07.030

Zhang, K., Cao, G. L., y Ren, N. Q. (2019). Bioaugmentation with *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* W16 to enhance thermophilic hydrogen production using corn stover hydrolysate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5821-5829. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.045

8. APÉNDICES

8.1. APÉNDICE A: Detalles del esquema BIORREF 1 y BIORREF 2

En el presente apéndice se enuncian los detalles de cada una de las etapas de proceso así como las correspondientes reacciones químicas y biológicas asociadas en SuperPro Designer (SPD). Cabe destacar que los equipos en el simulador SPD se identifican con la siguiente nomenclatura: **XX-YY-ZZZ** para la versión SPD v.11. Los dos primeros dígitos XX se asocian al número de etapa del esquema BIORREF 1 (i.e., 01=preconcentración, 02=plataforma *S. bouldarii*, 03=hidrólisis proteica, 04=plataforma *L. plantarum* y 05=PTAR) y BIORREF 2 (i.e., 01=preconcentración y recuperación de sólidos, 02=plataforma *S. bouldarii*, 03=hidrólisis proteica, 04=plataforma *L. plantarum* consolidada, 05=fermentación oscura y MEC, 06=captura de CO₂ y MFC y 07=cogeneración); las dos letras siguientes (YY) identifican el tipo de operación unitaria y es descrito por parte del software. Los tres últimos dígitos (ZZZ) se emplean como un número consecutivo del equipo. Las corrientes son identificadas con la siguiente nomenclatura S-AAA, donde las últimas tres letras se refieren a un número consecutivo y está en función de la etapa participante. Por parte de los equipos asociados a la transferencia de calor (i.e., intercambiadores de calor), SPD asigna una flecha ascendente cuando se trata de un enfriador mientras que asigna una flecha descendente cuando es un calentador.

8.1.1. Etapa de preconcentración

Tabla xxvi Fracciones de separación para la etapa de preconcentración

Equipo 01-DS-107		
Especie química	Porcentajes de remoción del material particulado	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Lactosa	0.0000	0.0000
Otros	0.0000	0.0000
Proteínas	87.0500	87.0500

8.1.2. Etapa Plataforma *S. bouldarii*

Tabla xxvii Reacciones y conversiones de la plataforma *S. bouldarii*

Equipo 02-FR-203			
Reacción		BIORREF 1	BIORREF 2
1.00 Agua + 1.00 Lactosa → 1.00 Galactosa + 1.00 Glucosa		90.00	90.00
1.00 Amoniaco + 1.00 Glucosa + 1.00 Oxígeno → 3.71 Biomasa + 2.82 Dióxido de carbono + 0.0002 Invertasa		90.00	90.00
1.00 Amoniaco + 1.00 Galactosa + 1.00 Oxígeno → 3.40 Biomasa + 2.99 Dióxido de carbono + 0.0002 Invertasa		90.00	90.00
Equipo 02-HG-204			
Relación de disrupción celular		BIORREF 1	BIORREF 2
10.00 Biomasa → 3.00 Desechos + 0.50 Invertasa + 4.50 Proteínas + 2.00 Ácidos nucleicos		99.00	99.00

Tabla xxviii Fracciones de separación para la etapa Plataforma *S. bouldarii*

Equipo 02-DS-205		
Especie química	Porcentajes de remoción del material particulado	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Biomasa	98.0000	98.0000
Desechos	98.0000	98.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Invertasa	0.0001	0.0001
Lactosa	0.0000	0.0000
Otros	98.0000	98.0000

Proteínas	0.0000	0.0000
Ácidos nucleicos	0.0000	0.0000
Equipo 02-DE-207		
Especie química	Porcentajes de remoción del material particulado	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Biomasa	100.0000	100.0000
Desechos	100.0000	100.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Invertasa	0.0000	0.0000
Lactosa	0.0000	0.0000
Otros	100.0000	100.0000
Proteínas	0.0000	0.0000
Ácidos nucleicos	0.0000	0.0000
Equipo 02-UF-208		
Especie química	Coeficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Invertasa	1.0000	1.0000
Lactosa	0.0000	0.0000
Proteínas	0.0001	0.0001
Ácidos nucleicos	0.0000	0.0000
Equipo 02-C-209		
Especie química	%Adsorción/%Rendimiento	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00
Galactosa	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00
Glucosa	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00
Invertasa	100.00 / 98.42	100.00 / 98.42
Lactosa	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00
Proteínas	20.00 / 15.00	20.00 / 15.00
Ácidos nucleicos	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00
Equipo 02-UF-210		
Especie química	Coeficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Invertasa	1.0000	1.0000
Proteínas	1.0000	1.0000
Equipo 02-C-211		

Especie química	% Recuperación	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.00	0.00
Invertasa	90.00	90.00
Proteínas	1.00	1.00
Equipo 02-C-212		
Especie química	Coeficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Invertasa	1.0000	1.0000
Proteínas	0.0000	0.0000

8.1.3. Etapa de hidrólisis proteica

Tabla xxix Reacciones y conversiones de hidrólisis proteica

Equipo 03-R-303			
Reacción		BIORREF 1	BIORREF 2
18.02 Agua + 68400.00 Proteínas → 68418.01 Glicina		85.00	85.00

Tabla xxx Fracciones de separación para la etapa de Hidrólisis Proteica

Equipo 03-UF-304		
Especie química	Coeficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Glicina	0.0000	0.0000
Lactosa	0.0000	0.0000
Otros	0.9998	0.9998
Proteínas	0.0000	0.0000
Tripsina	0.0000	0.0000

8.1.4. Etapa Plataforma *L. plantarum*

Tabla xxxi Reacciones y conversiones de la plataforma *L. plantarum*

Equipo 04-R-406		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
1.00 Glucosa + 0.10 Glicina → 0.89 Agua + 5.00 Biomasa + 1.10 Dióxido de carbono	14.30	14.30
1.00 Glucosa → 2.00 Ácido láctico	99.00	99.00
1.00 Agua + 1.00 Lactosa → 4.00 Ácido láctico	99.00	99.00

1.00 Galactosa → 2.00 Ácido láctico	99.00	99.00
-------------------------------------	-------	-------

Tabla xxxii Fracciones de separación para la etapa de Plataforma *L. plantarum*

	Equipo 04-DS-407	Equipo 04-DS-408
Especie química	Porcentajes de remoción del material particulado	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.1000	0.1000
Biomasa	100.0000	100.0000
Coctel enzimático	0.0000	0.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Glicina	0.0000	0.0000
Lactosa	0.0000	0.0000
Otros	10.0000	10.0000
Polisacáridos	0.0000	0.0000
Proteínas	1.0000	1.0000
Tripsina	0.0000	0.0000
Ácidos nucleicos	0.0000	0.0000
Ácido láctico	0.0000	0.0000
Especie química	Equipo 04-DS-408	Equipo 04-DS-409
	Porcentajes de remoción del material particulado	
Especie química	BIORREF 1	BIORREF 2
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Coctel enzimático	1.0000	1.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Glicina	0.9000	0.9000
Lactosa	0.8200	0.8200
Otros	1.0000	1.0000
Polisacáridos	1.0000	1.0000
Proteínas	1.0000	1.0000
Tripsina	0.0000	0.0000
Ácidos nucleicos	1.0000	1.0000
Ácido láctico	0.0800	0.0200
Especie química	Equipo 04-DS-409	Equipo 04-DS-410
	Coefficiente de rechazo	
Especie química	BIORREF 1	BIORREF 2
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000

Glicina	0.9000	0.9000
Lactosa	0.8200	0.8200
Tripsina	1.0000	1.0000
Ácido láctico	0.0800	0.0200
Especie química	Equipo 04-NF-410	Equipo 04-NF-411
	Coefficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	0.0000	0.0000
Galactosa	0.0000	0.0000
Glucosa	0.0000	0.0000
Glicina	1.0000	1.0000
Lactosa	0.8200	0.8200
Ácido láctico	0.0800	0.0200

8.1.5. Etapa de PTAR (sólo para BIORREF 1)

Tabla xxxiii Reacciones y conversiones de la etapa PTAR

Equipo 05-PFR-504		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
0.07 Agua + 1.00 Galactosa → 1.07 DQO	100.00	NA
0.12 Agua + 1.00 Lactosa → 1.12 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Biomasa → 1.42 DQO	100.00	NA
1.00 Glicina → 0.36 Agua + 0.64 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Cóctel enzimático → 1.42 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Desechos → 1.42 DQO	100.00	NA
0.07 Agua + 1.00 Glucosa → 1.07 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Invertasa → 1.42 DQO	100.00	NA
0.10 Agua + 1.00 Otros → 1.10 DQO	100.00	NA
0.07 Agua + 1.00 Polisacáridos → 1.07 DQO	100.00	NA
1.00 Proteínas → 0.36 Agua + 0.64 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Tripsina → 1.42 DQO	100.00	NA
0.06 Agua + 1.00 Ácido láctico → 1.06 DQO	100.00	NA
0.42 Agua + 1.00 Ácidos nucleicos → 1.42 DQO	100.00	NA
Equipo 05-RX-506		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
1.00 DQO → 0.27 Biomasa + 0.27 Dióxido de carbono + 0.46 Metano	95.00	NA
Equipo 05-RX-509		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
1.71 DQO → 0.71 Agua + 1.00 DBO	100.00	NA
62.00 DBO → 18.00 Agua + 44.00 Dióxido de carbono	70.00	NA
0.71 Agua + 1.00 DBO → 1.71 DQO	100.00	NA

Tabla xxxiv Fracciones de separación para la etapa PTAR

Equipo 05-CL-511		
Especie química	Porcentajes de remoción del material particulado	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	5.00	NA
Biomasa	100.00	NA
DQO	95.00	NA

8.1.6. Etapa de fermentación oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)

Tabla xxxv Reacciones y conversiones de la etapa fermentación oscura y MEC

Equipo 05-V-502		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
1.00 HCl + 1.00 NaOH → 1.00 Agua + 1.00 NaCl	NA	100.00
Equipo 05-AD-508		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
6.00 Agua + 1.00 Polisacáridos → 6.00 Dióxido de carbono + 12.00 Hidrógeno	NA	76.00
8.00 Agua + 1.00 Glicina → 3.00 Ácido acético + 0.84 Dióxido de carbono + 1.00 Hidrógeno	NA	55.00
4.00 Agua + 1.00 Glicina → 1.00 Ácido butírico + 1.29 Dióxido de carbono + 1.00 Hidrógeno	NA	55.00
3.00 Agua + 1.00 Lactosa → 2.00 Ácido acético + 4.00 Dióxido de carbono + 2.00 Etanol + 4.00 Hidrógeno	NA	92.00
1.00 Glucosa → 1.00 Agua + 5.00 Biomasa + 0.88 Dióxido de carbono	NA	5.00
1.00 Glucosa → 2.00 Dióxido de carbono + 2.00 Etanol	NA	70.00
2.00 Agua + 1.00 Glucosa → 2.00 Ácido acético + 2.00 Dióxido de carbono + 4.00 Hidrógeno	NA	55.00
2.00 Agua + 1.00 Glucosa → 1.00 Ácido butírico + 2.81 Dióxido de carbono + 2.00 Hidrógeno	NA	55.00
Equipo 05-EWC-512 y 05-EWC-513		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
3.00 Agua + 1.00 Ácido láctico → 3.00 Dióxido de carbono + 6.00 Hidrógeno	NA	91.00
1.00 Ácido acético + 2.00 Agua → 2.00 Dióxido de carbono + 4.00 Hidrógeno	NA	94.00
6.00 Agua + 1.00 Ácido butírico → 4.00 Dióxido de carbono + 10.00 Hidrógeno	NA	80.00

3.00 Agua + 1.00 Etanol → 2.00 Dióxido de carbono + 6.00 Hidrógeno	NA	75.00
6.00 Agua + 1.00 Galactosa → 6.00 Dióxido de carbono + 12.00 Hidrógeno	NA	75.00
13.00 Agua + 1.00 Lactosa → 12.00 Dióxido de carbono + 24.00 Hidrógeno	NA	75.00
6.00 Agua + 1.00 Glucosa → 6.00 Dióxido de carbono + 12.00 Hidrógeno	NA	75.00

Tabla xxxvi Fracciones de separación para la etapa fermentación oscura y MEC

Equipo 05-UF-504		
Especie química	Coefficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	NA	0.0000
Biomasa	NA	0.0000
Coctel enzimático	NA	0.0000
Desechos	NA	0.0000
Galactosa	NA	0.0000
Glucosa	NA	0.0000
Glicina	NA	0.0000
Invertasa	NA	0.0000
Lactosa	NA	0.0000
NaCl	NA	0.9500
Otros	NA	0.0000
Polisacáridos	NA	0.0000
Proteínas	NA	0.0000
Tripsina	NA	0.0000
Ácidos nucleicos	NA	0.0000
Ácido láctico	NA	0.0000
Equipo 05-UF-505		
Especie química	Coefficiente de rechazo	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Agua	NA	0.0000
Biomasa	NA	0.0000
Coctel enzimático	NA	0.0000
Desechos	NA	0.0000
Galactosa	NA	0.0000
Glucosa	NA	0.0000
Glicina	NA	0.0000
Invertasa	NA	0.0000
Lactosa	NA	0.0000
NaCl	NA	0.9500

Otros	NA	0.0000
Polisacáridos	NA	0.0000
Proteínas	NA	0.0000
Tripsina	NA	0.0000
Ácidos nucleicos	NA	0.0000
Ácido láctico	NA	0.0000

8.1.7. Etapa de captura de CO₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)

Tabla xxxvii Reacciones y conversiones de la etapa de captura de CO₂ y MFC

Equipo 06-FC-613		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
1.00 Hidrógeno + 0.50 Oxígeno → 1.00 Agua	NA	100.00

Tabla xxxviii Fracciones de separación para la etapa de captura de CO₂ y MFC

Equipo 06-MA-602		
Especie química	Porcentajes de adsorción por etapa	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Dióxido de carbono	NA	0.00
Oxígeno	NA	91.42
Equipo 06-CSP-606		
Especie química	Porcentajes de recuperación	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Dióxido de carbono	NA	0.00
Hidrógeno	NA	96.71
Equipo 06-GAC-607		
Especie química	Porcentajes de adsorción	
	BIORREF 1	BIORREF 2
Dióxido de carbono	NA	0.00
Hidrógeno	NA	95.33

8.1.8. Etapa de cogeneración (sólo para BIORREF 2)

Tabla xxxix Reacciones y conversiones de la etapa de cogeneración

Equipo 05-PFR-504		
Reacción	BIORREF 1	BIORREF 2
0.82 Agua + 1.00 Ácido butírico → 1.82 DQO	NA	100.00
1.10 Agua + 1.00 Etanol → 2.10 DQO	NA	100.00

1.00 Ácido acético + 0.07 Agua → 1.07 DQO	NA	100.00
0.07 Agua + 1.00 Galactosa → 1.07 DQO	NA	100.00
0.12 Agua + 1.00 Lactosa → 1.12 DQO	NA	100.00
0.07 Agua + 1.00 Glucosa → 1.07 DQO	NA	100.00
0.07 Agua + 1.00 Polisacáridos → 1.07 DQO	NA	100.00
0.06 Agua + 1.00 Ácido láctico → 1.06 DQO	NA	100.00

8.2. APÉNDICE B: Detalles del cálculo del esquema BIORREF 1 para una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC

En este apéndice se presentan los detalles generales de los equipos de cada etapa para los esquemas BIORREF 1 empleando LS y RMC como sustrato y una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC. Cabe destacar que se ha seleccionado este tamaño de planta de manera arbitraria. Asimismo, se incluyen el nombre del equipo, nomenclatura, número de unidades, material de construcción, capacidad del equipo y costo asociado. Los nombres se encuentran en el idioma inglés ya que es la notación estándar por parte de SPD.

Finalmente, se presentan las corrientes y cargas energéticas con los que se construyó la red de intercambiadores de calor que alimentaría el análisis de punto de pliegue para llevar a cabo la integración energética y cálculo de MER. Los detalles de dicha red de intercambiadores de calor así como la carga térmica asociada en cada etapa también se identifican en este apéndice.

Tabla xl Equipos y operaciones unitarias para las etapas del esquema BIORREF 1

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
Etapas Preconcentración					
01-HX-104	Condenser	4	CS	77.05 m ²	38
01-DS-107	Disk-Stack Centrifuge	1	SS316	28,269.72 L/h	2101
01-GBX-101	Generic Box	1	CS	74,647.74 kg/h	0
01-ST-106	Heat Sterilizer	1	SS316	28,586.81 L/h	710
01-MX-108	Mixer	1	CS	26,702.25 kg/h	0
01-MX-109	Mixer	1	CS	11,415.60 kg/h	0
01-MX-105	Mixer	1	CS	38,459.77 kg/h	0
01-EV-103	Multi-Effect Evaporator	21	SS316	8.00 m ²	380
01-RVF-102	Rotary Vacuum Filter	4	CS	66.87 m ²	207
Etapas Plataforma <i>S. bouldarii</i>					

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
02-PM-219	Centrifugal Pump	1	SS316	5.90 kW	41
02-DE-207	Dead-End Filter	1	SS316	430.00 m ²	1412
02-DF-212	Diafilter	38	SS316	79.24 m ²	140
02-DS-205	Disk-Stack Centrifuge	3	SS316	8,484.51 L/h	519
02-FR-203	Fermentor	6	SS316	204,233.50 L	2373
02-V-218	Flat Bottom Tank	1	SS316	12,328.94 L	33
02-FDR-215	Freeze Dryer	5913	SS316	600.00 kg	2877
02-FDR-214	Freeze Dryer	29	SS316	588.30 kg	2854
02-C-211	Gel Filtration Column	1202	SS316	763.16 L	864
02-HX-213	Heat Exchanger	1	CS	0.35 m ²	8
02-HX-206	Heat Exchanger	1	CS	17.54 m ²	45
02-HX-202	Heat Exchanger	1	CS	6.17 m ²	24
02-HG-204	Homogenizer	3	SS316	16.97 m ³ /h	108
02-MX-201	Mixer	1	CS	26,995.98 kg/h	0
02-MX-216	Mixer	1	CS	122,948.99 kg/h	0
02-MX-217	Mixer	1	CS	148,534.60 kg/h	0
02-C-209	PBA Column	158	SS316	2,541.63 L	3331
02-UF-208	Ultrafilter	46	SS316	79.89 m ²	141
02-UF-210	Ultrafilter	2	SS316	68.98 m ²	133
Etapla Hidrólisis proteica					
03-HX-302	Heat Exchanger	1	CS	3.10 m ²	16
03-MF-304	Microfilter	36	SS316	77.94 m ²	138
03-MX-301	Mixer	1	CS	11,564.27 kg/h	0
03-R-303	Stirred Reactor	1	SS316	13,107.53 L	754
Etapla Plataforma <i>L. plantarum</i>					
04-PM-414	Centrifugal Pump	1	CS	0.03 kW	4
04-HX-412	Condenser	8	CS	87.93 m ²	40
04-DS-407	Disk-Stack Centrifuge	1	SS316	42,736.07 L/h	115
04-FR-403	Fermentor	1	SS316	237,485.27 L	2552
04-V-416	Flat Bottom Tank	1	SS316	752.56 L	33
04-HX-405	Heat Exchanger	1	CS	14.81 m ²	40
04-HX-402	Heat Exchanger	1	CS	4.99 m ²	21
04-HX-415	Heat Exchanger	1	CS	0.49 m ²	8
04-MX-401	Mixer	1	CS	17,564.75 kg/h	0
04-MX-413	Mixer	1	CS	11,161.45 kg/h	0
04-MX-404	Mixer	1	CS	42,672.18 kg/h	0
04-R-406	Stirred Reactor	162	SS316	39.79 m ³	996
04-TFE-411	Thin Film Evaporator	3	SS316	34.65 m ²	658
04-NF-410	Ultrafilter	1	SS316	60.00 m ²	13

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
04-NF-409	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	134
04-NF-408	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	13
Etapla PTAR					
05-RX-506	Anaerobic Digester	16	Concrete	1,896.30 m ³	2141
05-PM-510	Centrifugal Pump	1	CS	5.61 kW	15
05-PM-517	Centrifugal Pump	1	CS	0.06 kW	4
05-PM-512	Centrifugal Pump	1	CS	5.21 kW	14
05-PM-513	Centrifugal Pump	1	CS	0.40 kW	5
05-PM-507	Centrifugal Pump	1	CS	5.27 kW	15
05-CL-511	Clarifier	1	Concrete	185.89 m ²	233
05-SV-505	Flat Bottom Tank	1	SS304	150,500.10 L	178
05-FS-514	Flow Splitter	1	CS	10,079.03 kg/h	0
05-HX-521	Heat Exchanger	1	CS	73.20 m ²	105
05-HX-519	Heat Exchanger	1	CS	77.78 m ²	109
05-HX-502	Heat Exchanger	1	CS	7.22 m ²	26
05-SV-518	Horizontal Tank	1	CS	145,869.10 L	401
05-MX-501	Mixer	1	CS	136,424.66 kg/h	0
05-MX-508	Mixer	1	CS	140,253.19 kg/h	0
05-MX-520	Mixer	1	CS	221,194.18 kg/h	0
05-PFR-504	Plug Flow Reactor	1	SS316	150,216.88 L	0
05-FR-516	Rotary Vacuum Filter	1	SS304	0.57 m ²	73
05-RVF-503	Rotary Vacuum Filter	7	CS	77.25 m ²	226
05-SC-515	Screw Conveyor	1	CS	25.00 ft	1
05-RX-509	Well-Mixed Aeration Basin	6	Concrete	4,397.26 m ³	5240

Tabla xli Cargas térmicas para la integración energética y cálculo de MER para el esquema

BIORREF 1

Número	Corriente	Rango de temperatura (°C)		ΔT (°C)	Carga térmica (kW)	Carga térmica acumulada (kW)
		A	B			
CURVA COMPUESTA CALIENTE (CCC)						
1	103A	62	20	42	7892.66	7892.66
2	201B	32.4	25	7.4	195.74	8088.40
3	205A	27.4	4	23.4	441.74	8530.14
4	212B	25.8	12	13.8	11.43	8541.57

Número	Corriente	Rango de temperatura (°C)		ΔT (°C)	Carga térmica (kW)	Carga térmica acumulada (kW)
		A	B			
5	404A	42.9	37	5.9	276.16	8817.73
6	411A	81.5	20	61.5	21897.61	30715.34
7	414A	81.5	25	56.5	29.96	30745.30
8	518A	35.2	20	15.2	2292.10	33037.40
9	520A	26.8	20	6.8	1742.54	34779.94
CURVA COMPUESTA FRÍA (CCF)						
1	301B	26.4	65	38.6	488.39	488.39
2	401B	25	65	40	791.93	1280.32
3	501A	26.5	35	8.5	1313.21	2593.53

Tabla xlii Detalles de la red de intercambiadores de calor y cargas térmicas para el esquema

BIORREF 1

Corriente	Etapas	Temp. Entrada (°C)	Temp. Salida (°C)	Agente intercambio	Flujo agente (kg/h)	Equipo	Carga térmica total por etapa (kW)
103A	Preconcentración	62	20	Agua de chiller	1502466.10	01-HX-104	7892.66
201B	Plataforma S. <i>boulardii</i>	32.4	25	Agua de chiller	33535.24	02-HX-202	648.91
205A		27.4	4	Freón	10852.72	02-HX-206	
212B		25.8	12	Freón	280.79	02-HX-213	
301B	Hidrólisis proteica	26.4	65	Vapor LP	834.29	03-HX-302	488.39
401B	Plataforma L. <i>plantarum</i>	25	65	Vapor LP	1352.82	04-HX-402	22995.66
404A		42.9	37	Agua de enfriamiento	47550.75	04-HX-405	
411A		81.5	20	Agua de chiller	4168482.90	04-HX-412	
414A		81.5	25	Agua de chiller	5133.30	04-HX-415	
501A	PTAR	26.5	35	Vapor LP	2243.30	05-HX-502	5347.85
518A		35.2	20	Agua de chiller	392696.02	05-HX-515	
520A		26.8	20	Agua de chiller	298543.28	05-HX-521	

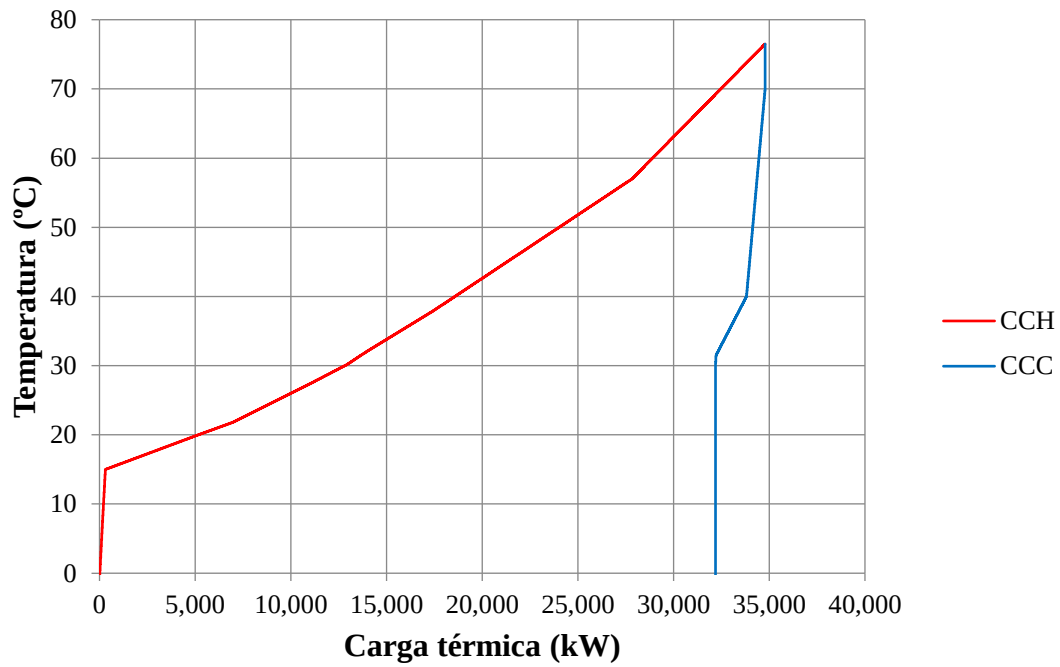


Gráfico 17 Curva compuesta de integración energética para el esquema BIORREF 1

8.3. APÉNDICE C: Detalles del cálculo del esquema BIORREF 2 para una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC

En este apéndice se presentan los detalles generales de los equipos de cada etapa para los esquemas BIORREF 2 empleando LS y RMC como sustrato y una capacidad de planta de 75,000 L/h LS y 17,500 kg/h RMC. Cabe destacar que se ha seleccionado este tamaño de planta de manera arbitraria. Asimismo, se incluyen el nombre del equipo, nomenclatura, número de unidades, material de construcción, capacidad del equipo y costo asociado. Los nombres se encuentran en el idioma inglés ya que es la notación estándar por parte de SPD.

Finalmente, se presentan las corrientes y cargas energéticas con los que se construyó la red de intercambiadores de calor que alimentaría el análisis de punto de pliegue para llevar a cabo la integración energética y cálculo de MER. Los detalles de dicha red de intercambiadores de calor así como la carga térmica asociada en cada etapa también se identifican en este apéndice.

Tabla xliii Equipos y operaciones unitarias para las etapas del esquema BIORREF 2

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
Etapla Preconcentración					
01-HX-104	Condenser	4	CS	77.01 m ²	38
01-DS-107	Disk-Stack Centrifuge	1	SS316	27,596.20 L/h	2074
01-GBX-101	Generic Box	1	CS	74,647.74 kg/h	0
01-ST-106	Heat Sterilizer	1	SS316	27,914.53 L/h	705
01-MX-105	Mixer	1	CS	38,432.62 kg/h	0
01-MX-109	Mixer	1	CS	11,404.86 kg/h	0
01-MX-108	Mixer	1	CS	26,696.81 kg/h	0
01-EV-103	Multi-Effect Evaporator	21	SS316	7.99 m ²	380
01-RVF-102	Rotary Vaccum Filter	4	CS	66.17 m ²	206
Etapla Plataforma <i>S. bouldarii</i>					

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
02-PM-219	Centrifugal Pump	1	SS316	5.89 kW	41
02-CSP-220	Component Splitter	1	CS	2,146.83 kg/h	27
02-DE-207	Dead-End Filter	1	SS316	410.00 m ²	1347
02-DF-212	Diafilter	38	SS316	79.16 m ²	140
02-DS-205	Disk-Stack Centrifuge	3	SS316	8,268.57 L/h	512
02-FR-203	Fermentor	6	SS316	199,297.74 L	2346
02-V-218	Flat Bottom Tank	1	SS316	12,315.53 L	33
02-FDR-215	Freeze Dryer	5907	SS316	599.95 kg	2877
02-FDR-214	Freeze Dryer	29	SS316	587.45 kg	2852
02-C-211	Gel Filtration Column	1201	SS316	762.97 L	863
02-HX-206	Heat Exchanger	1	CS	16.89 m ²	44
02-HX-202	Heat Exchanger	1	CS	6.22 m ²	24
02-HX-213	Heat Exchanger	1	CS	0.35 m ²	8
02-HG-204	Homogenizer	3	SS316	16.54 m ³ /h	107
02-MX-217	Mixer	1	CS	148,373.11 kg/h	0
02-MX-216	Mixer	1	CS	123,380.60 kg/h	0
02-MX-201	Mixer	1	CS	26,990.48 kg/h	0
02-C-209	PBA Column	158	SS316	2,538.74 L	3326
02-UF-210	Ultrafilter	2	SS316	68.90 m ²	133
02-UF-208	Ultrafilter	45	SS316	78.74 m ²	140
Etapla Hidrólisis proteica					
03-HX-302	Heat Exchanger	1	CS	3.10 m ²	16
03-MF-304	Microfilter	36	SS316	77.89 m ²	137
03-MX-301	Mixer	1	CS	11,553.46 kg/h	0
03-R-303	Stirred Reactor	1	SS316	13,066.92 L	754
Etapla Plataforma <i>L. plantarum</i>					
04-PM-414	Centrifugal Pump	1	CS	0.03 kW	4
04-HX-413	Condenser	9	CS	89.75 m ²	40
04-DS-408	Disk-Stack Centrifuge	1	SS316	49,227.91 L/h	115
04-FR-403	Fermentor	1	SS316	47,497.05 L	1347
04-V-416	Flat Bottom Tank	1	SS316	907.96 L	33
04-FSP-418	Flow Splitter	1	CS	13,039.58 kg/h	0
04-HX-402	Heat Exchanger	1	CS	4.99 m ²	21
04-HX-415	Heat Exchanger	1	CS	0.60 m ²	8
04-HX-405	Heat Exchanger	1	CS	15.53 m ²	41
04-MX-404	Mixer	1	CS	42,099.78 kg/h	0
04-MX-417	Mixer	1	CS	13,039.58 kg/h	0
04-MX-407	Mixer	1	CS	49,240.35 kg/h	0
04-MX-401	Mixer	1	CS	17,564.75 kg/h	0

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
04-R-406	Stirred Reactor	160	SS316	39.75 m ³	995
04-TFE-412	Thin Film Evaporator	3	SS316	39.79 m ²	709
04-NF-410	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	134
04-NF-411	Ultrafilter	1	SS316	60.00 m ²	13
04-NF-409	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	13
Etapas Fermentación Oscura y MEC					
05-AF-511	Air Filter	1	CS	453,687.04 L/h	8
05-AD-508	Anaerobic Digester	1	Concrete	6,415,334.72 L	4671
05-PM-503	Centrifugal Pump	1	CS	5.23 kW	14
05-EWC-512	Electrowinning Cell	50	Plastic	115.95 m ²	111
05-EWC-513	Electrowinning Cell	6	Plastic	115.95 m ²	22
05-V-510	Flat Bottom Tank	16	SS316	189,036.26 L	284
05-FSP-515	Flow Splitter	1	CS	448,613.03 kg/h	0
05-HX-507	Heat Exchanger	1	CS	16.19 m ²	42
05-MX-506	Mixer	1	CS	225,773.77 kg/h	0
05-MX-514	Mixer	1	CS	1,499.66 kg/h	0
05-MX-509	Mixer	1	CS	449,599.97 kg/h	0
05-MX-501	Mixer	1	CS	131,557.73 kg/h	0
05-MX-517	Mixer	1	CS	26,226.49 kg/h	0
05-V-502	Neutralizer	1	CS	72,547.69 L	283
05-RVF-516	Rotary Vacuum Filter	12	CS	74.41 m ²	221
05-UF-504	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	134
05-UF-505	Ultrafilter	1	SS316	70.80 m ²	134
Etapas Captura de CO₂ y MFC					
06-G-609	Centrifugal Compressor	1	CS	40.42 kW	76
06-G-611	Centrifugal Compressor	1	CS	84.11 kW	100
06-G-601	Centrifugal Compressor	1	CS	131.91 kW	185
06-G-608	Centrifugal Compressor	1	CS	17.96 kW	76
06-G-610	Centrifugal Compressor	1	CS	65.84 kW	88
06-G-603	Centrifugal Compressor	1	CS	271.04 kW	361
06-CSP-606	Component Splitter	1	CS	3,586.29 kg/h	27
06-CSP-614	Component Splitter	1	CS	4,279.05 kg/h	27

Nombre	Tipo	Unidades	Material	Capacidad	Costo de equipo (k USD/equipo)
06-FC-613	Fuel Cell	536	SS316	5.00 kW	60
06-GAC-607	GAC Adsorber (for Gaseous Streams)	1	CS	442.80 L	54
06-GBX-612	Generic Box	1	CS	3,465.30 kg/h	0
06-HX-605	Heat Exchanger	1	CS	0.94 m ²	8
06-MA-602	Membrane Adsorber	246	SS316	0.54 L	2
06-MX-604	Mixer	1	CS	3,586.29 kg/h	0
Etapla Cogeneración					
07-GF-705	Centrifugal Fan	1	CS	92,418,624.27 L/h	28
07-CSP-709	Component Splitter	1	CS	451,508.12 kg/h	27
07-SE-706	Extraction Steam Turbine-Generator	1	CS	8,274.90 kW	1778
07-HX-711	Heat Exchanger	3	CS	77.56 m ²	109
07-HX-703	Heat Exchanger	1	CS	6.93 m ²	26
07-MX-707	Mixer	1	CS	225,549.44 kg/h	0
07-MX-702	Mixer	1	CS	3,591.38 kg/h	0
07-MX-708	Mixer	1	CS	451,508.12 kg/h	0
07-PFR-710	Plug Flow Reactor	2	SS316	252,821.46 L	0
07-SC-701	Screw Conveyor	1	SS304	5.00 m	5
07-SG-704	Steam Generator	1	CS	54,560.15 kg/h	645

Tabla xlv Cargas térmicas para la integración energética y cálculo de MER para el esquema BIORREF 2

Número	Corriente	Rango de temperatura (°C)		ΔT (°C)	Carga térmica (kW)	Carga térmica acumulada (kW)
		A	B			
CURVA COMPUESTA CALIENTE (CCC)						
103A	1	62	20	42	7888.74	7888.74
201B	2	32.3	25	7.3	197.44	8086.18
205A	3	27.4	4	23.4	424.84	8511.02
212B	4	25.8	12	13.8	11.41	8522.43
404A	5	43.4	37	6.4	295.31	8817.74
412A	6	81.5	20	61.5	25145.95	33963.69
414A	7	81.5	25	56.5	36.43	34000.12
604A	8	37	16.9	20.1	26.07	34026.19
710A	9	32.2	20	12.2	6413.41	40439.60

Número	Corriente	Rango de temperatura (°C)		ΔT (°C)	Carga térmica (kW)	Carga térmica acumulada (kW)
		A	B			
CURVA COMPUESTA FRÍA (CCF)						
301B	1	26.4	65	38.6	488.4	488.40
401B	2	25	65	40	791.93	1280.33
506B	3	25.7	37	11.3	2926.22	4206.55

Tabla xlv Detalles de la red de intercambiadores de calor y cargas térmicas para el esquema
BIORREF 2

Corriente	Etapas	Temp. Entrada (°C)	Temp. Salida (°C)	Agente intercambio	Flujo agente (kg/h)	Equipo	Carga térmica total por etapa (kW)
103A	Preconcentración	62	20	Agua de chiller	1501719.60	01-HX-104	7888.74
201B	Plataforma S. <i>boulardii</i>	32.3	25	Agua de chiller	33826.55	02-HX-202	633.69
205A		27.4	4	Freón	10437.64	02-HX-206	
212B		25.8	12	Freón	280.40	02-HX-213	
301B	Hidrólisis proteica	26.4	65	Vapor LP	834.31	03-HX-302	488.4
401B	Plataforma L. <i>plantarum</i>	25	65	Vapor LP	1352.82	04-HX-402	26269.62
404A		43.4	37	Agua de enfriamiento	50848.03	04-HX-405	
412A		81.5	20	Agua de chiller	4786845.90	04-HX-412	
414A		81.5	25	Agua de chiller	6240.94	04-HX-415	
506B	Fermentación oscura y MEC	25.7	37	Vapor LP	4999.49	05-HX-507	2926.22
604A	Captura de CO ₂ y MFC	37	16.9	Agua de chiller	4466.90	06-HX-605	26.07
710A	Cogeneración	32.2	20	Agua de chiller	1098785.82	07-HX-711	6413.41

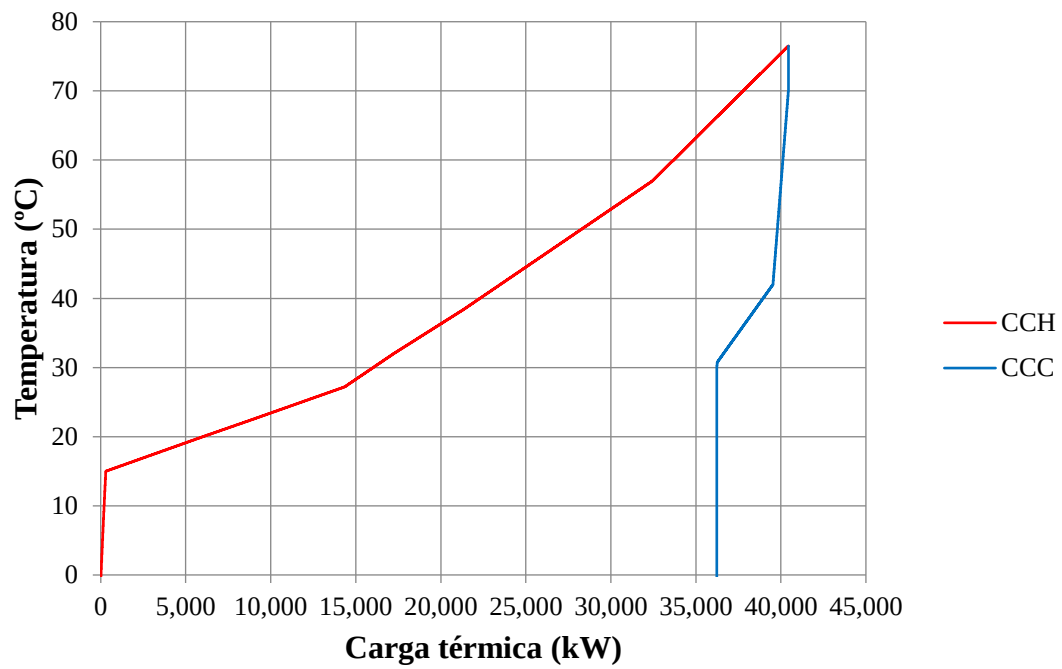


Gráfico 18 Curva compuesta de integración energética para el esquema BIORREF 2

8.4. Apéndice D: Diagramas de proceso en SPD para BIORREF 1 y BIORREF 2

8.4.1. Diagrama de proceso de la etapa preconcentración (BIORREF 1 y BIORREF 2)

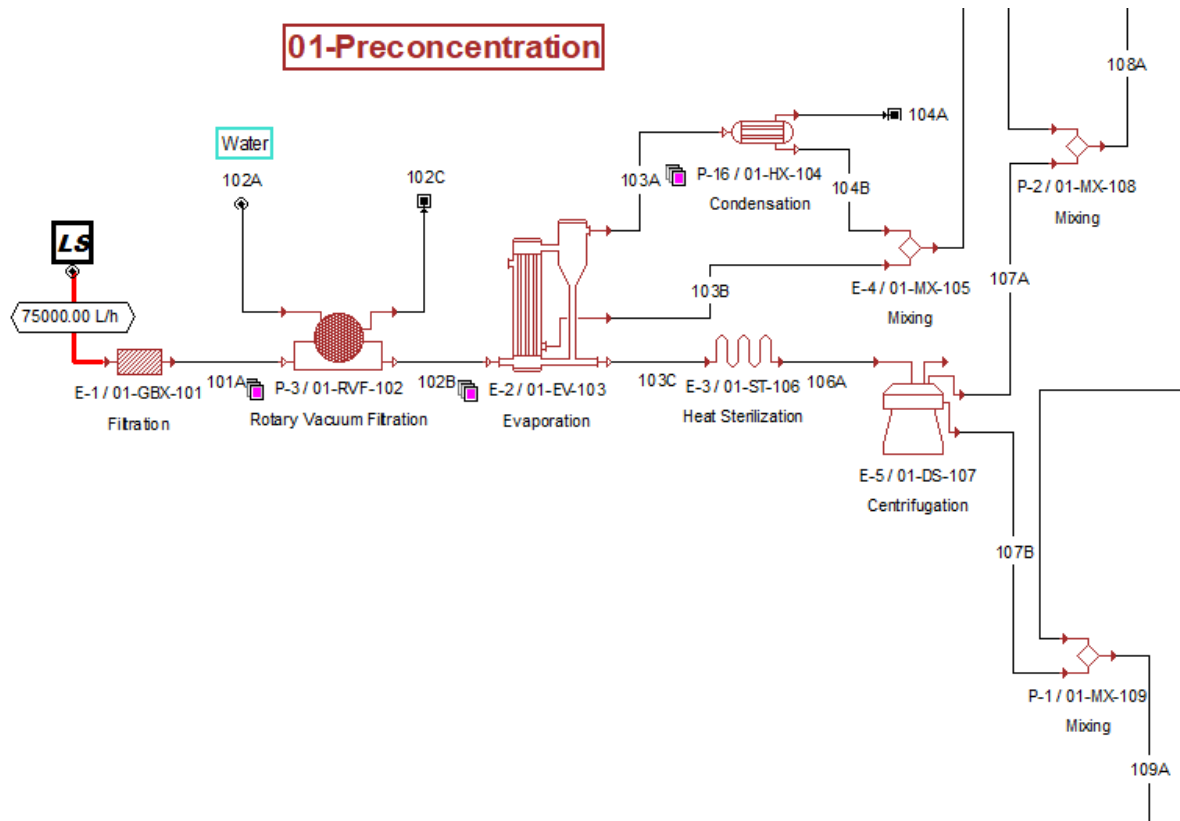


Figura 17 Diagrama de proceso de la etapa preconcentración (BIORREF 1 y BIORREF 2)

8.4.2. Diagrama de proceso de la etapa Plataforma *S. boulardii* (BIORREF 1 y BIORREF 2)

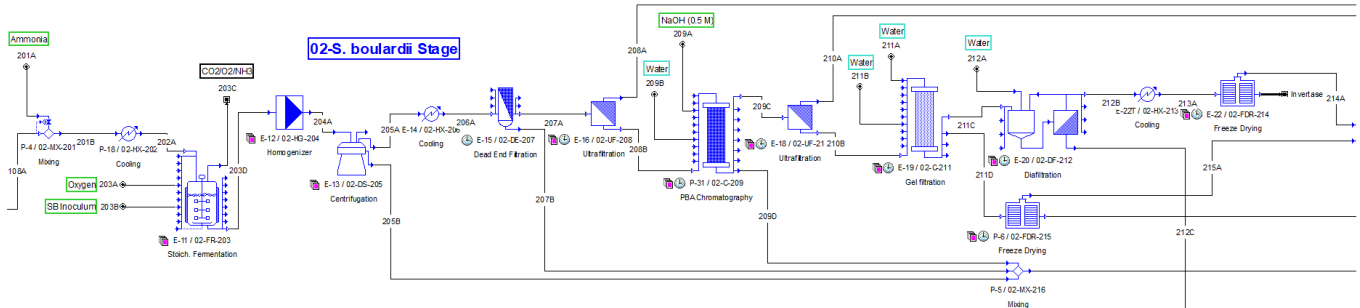


Figura 18 Diagrama de proceso de la etapa Plataforma *S. boulardii* (BIORREF 1 y BIORREF 2)

8.4.3. Diagrama de proceso de la etapa Hidrólisis Proteica (BIORREF 1 y BIORREF 2)

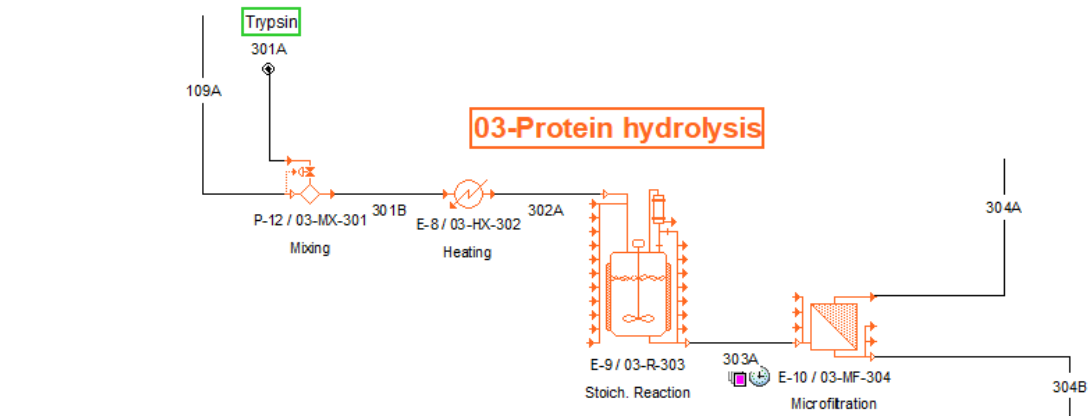


Figura 19 Diagrama de proceso de la etapa Hidrólisis Proteica (BIORREF 1 y BIORREF 2)

8.4.4. Diagrama de proceso de la etapa Plataforma *L. plantarum*

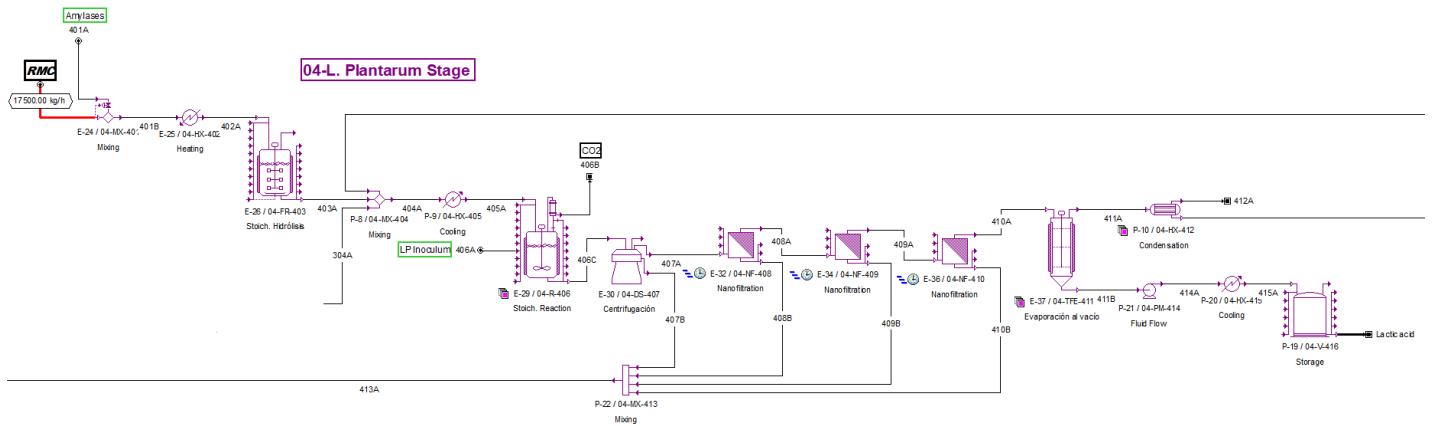


Figura 20 Diagrama de proceso de la etapa Plataforma *L. plantarum*

8.4.5. Diagrama de proceso de la etapa PTAR (sólo para BIORREF 1)

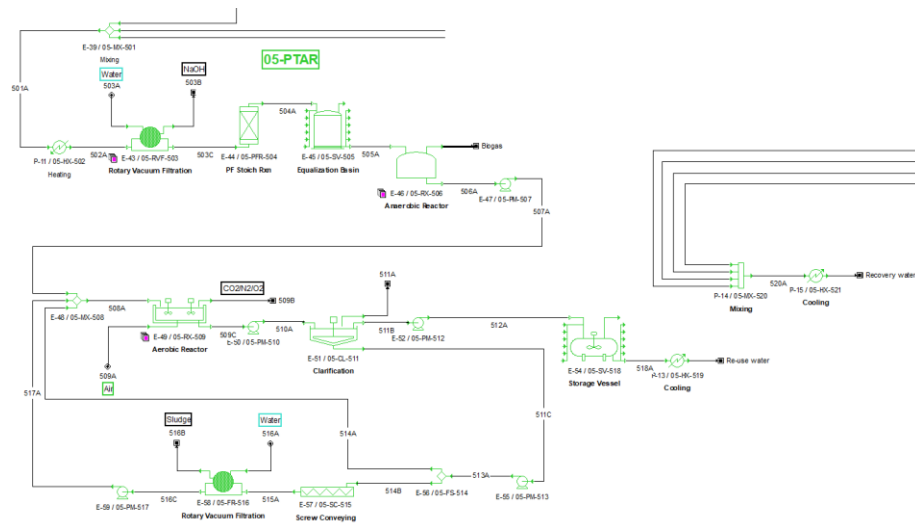


Figura 21 Diagrama de proceso de la etapa PTAR (sólo para BIORREF 1)

8.4.6. Diagrama de proceso de la etapa Fermentación Oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)

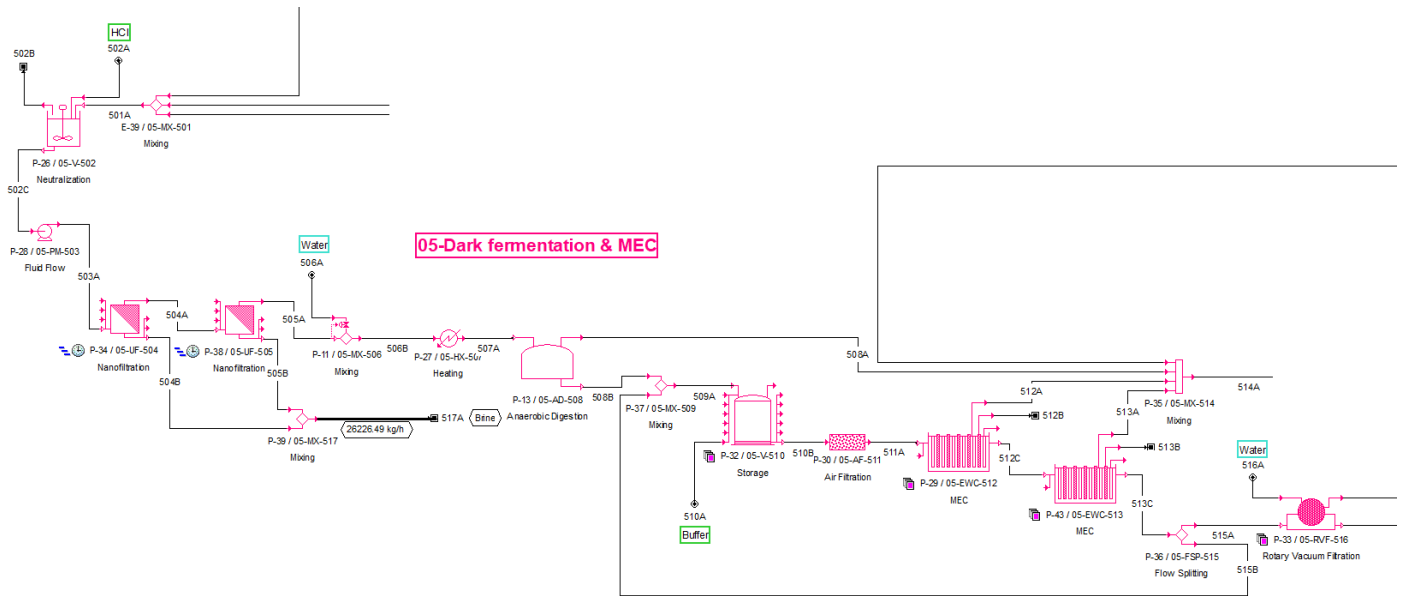


Figura 22 Diagrama de proceso de la etapa Fermentación Oscura y MEC (sólo para BIORREF 2)

8.4.7. Diagrama de proceso de la etapa Captura de CO₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)

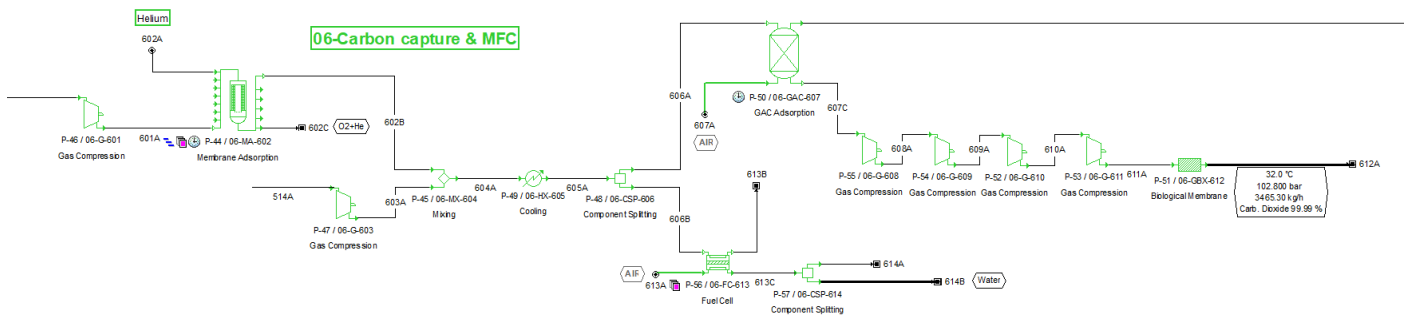


Figura 23 Diagrama de proceso de la etapa Captura de CO₂ y MFC (sólo para BIORREF 2)

8.4.8. Diagrama de proceso de la etapa Cogeneración (sólo para BIORREF 2)

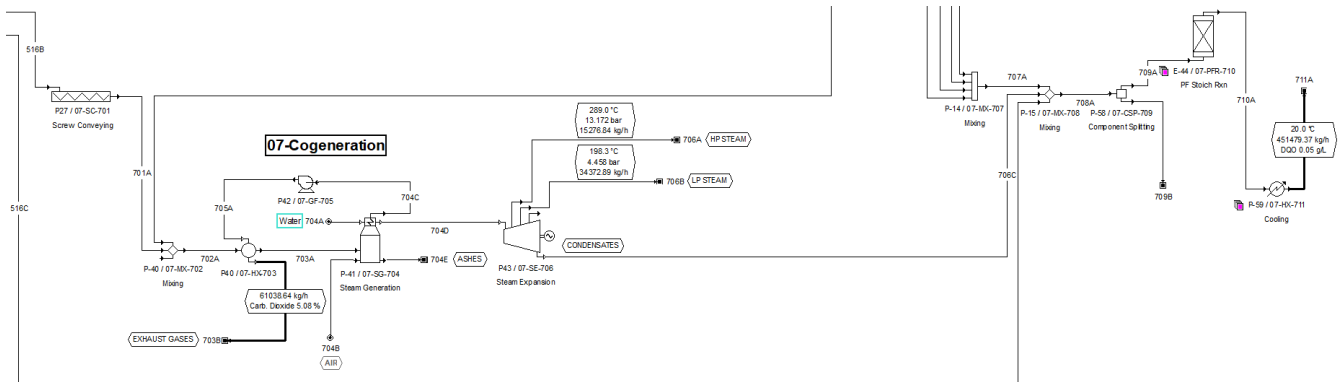


Figura 24 Diagrama de proceso de la etapa Cogeneración (sólo para BIORREF 2)