



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Química e Ingeniería Química**

**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**Diseño modular de una planta para la producción de  
bioetanol a partir de la cáscara de mango *Mangifera  
indica* L., variedad Haden, en Lima**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química**

**AUTOR**

**Mariela ADCO BARTOLOME**

**ASESOR**

**Dr. Eder Clidio VICUÑA GALINDO**

**Lima, Perú**

**2024**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Adco, M. (2024). *Diseño modular de una planta para la producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango Mangifera indica L., variedad Haden, en Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

### Metadatos complementarios

|                                  |                                                                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datos de autor</b>            |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Mariela Adco Bartolome.                                                                   |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 70125360                                                                                  |
| URL de ORCID                     |                                                                                           |
| <b>Datos de asesor</b>           |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Eder Clidio Vicuña Galindo                                                                |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 09069542                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0003-4980-0490">https://orcid.org/0000-0003-4980-0490</a> |
| <b>Datos del jurado</b>          |                                                                                           |
| <b>Presidente del jurado</b>     |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Fanny Blas Rodriguez                                                                      |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 10683607                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 1</b>      |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Jose Orlando Calvay Castillo                                                              |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 45152683                                                                                  |
|                                  |                                                                                           |
| <b>Datos de investigación</b>    |                                                                                           |
| Línea de investigación           | C.0.2.6. Tecnología Limpia y medio ambiente en metalurgia                                 |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Grupo de investigación                                 | No aplica                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Agencia de financiamiento                              | Sin financiamiento                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Ubicación geográfica de la investigación               | <p>Edificio: Laboratorio TYP<br/>País: Perú<br/>Departamento: Lima<br/>Provincia: Lima<br/>Distrito: Callao<br/>Calle: Delta 269<br/>Latitud: -12.049516<br/>Longitud: -77.088040</p>                                                                                   |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Abril 2024 – diciembre 2024                                                                                                                                                                                                                                             |
| URL de disciplinas OCDE                                | <p>Ingeniería química<br/> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01</a><br/> Ingeniería de procesos<br/> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02</a></p> |

# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

## FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "II Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-I", bajo la Presidencia de la **Mg. FANNY BLAS RODRÍGUEZ**; el **Dr. JOSÉ ORLANDO CALVAY CASTILLO (Miembro)** y **Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO (Asesor)**; habiendo presentado para tal efecto la **TESIS**, titulada "**Diseño modular de una planta para la producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango Mangifera indica L., variedad Haden, en Lima**", después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **ADCO BARTOLOME, MARIELA**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DOCE

(LETRAS)

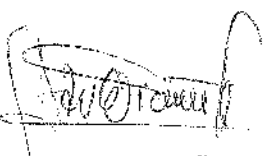
12

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 17 de agosto del 2024

  
**Mg. FANNY BLAS RODRÍGUEZ**  
Presidenta

  
**Dr. JOSÉ ORLANDO CALVAY CASTILLO**  
Miembro

  
**Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO**  
Asesor

  
**Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE**  
Director de la E.P. de Ingeniería Química





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE

**SAN MARCOS**

Universidad del Perú, Decana de América

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000656-2024-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **Diseño modular de una planta para la producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango *Mangifera indica* L., variedad Haden, en Lima**, presentado por la bachiller **Mariela Adco Bartolome** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 4% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 09 de febrero de 2025

Firma del Asesor \_\_\_\_\_

Nombres y Apellidos del asesor: Eder Clidio Vicuña Galindo

DNI: 09069542

## **DEDICATORIA**

Agradezco profundamente a mi asesor, Dr. Eder Vicuña Galindo, por su tiempo, dedicación y las orientaciones que me proporcionó durante la elaboración de esta tesis. También expreso mi gratitud a Dios por darme fortaleza; a mis padres, cuyo apoyo incondicional en las diversas etapas de mi vida ha sido fundamental para moldear la persona que soy hoy; y a mi hermano, quien siempre ha estado a mi lado brindándome su apoyo constante. Agradezco a todos mis profesores y compañeros por compartir sus conocimientos personales y académicos, lo cual ha sido crucial para fortalecer mi trayectoria profesional. Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por la cálida acogida que me brindó a lo largo de estos años.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor el Dr. Vicuña Galindo por apoyo constante y valiosa ayuda en el desarrollo de este proyecto. Su orientación y compromiso han sido esenciales para la culminación de este trabajo. A mis amigos por su amistad incondicional y ánimos constantes durante todo el proceso

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| DEDICATORIA.....                                                   | i   |
| AGRADECIMIENTO.....                                                | ii  |
| RESUMEN.....                                                       | vi  |
| ABSTRACT.....                                                      | vii |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                              | 1   |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                              | 2   |
| 1.1.1 Determinación del problema .....                             | 2   |
| 1.1.2 Formulación del problema .....                               | 2   |
| 1.2 Objetivos.....                                                 | 3   |
| 1.2.1 Objetivo general .....                                       | 3   |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                   | 3   |
| 1.3 Justificación de la investigación .....                        | 3   |
| 1.3.1 Teórica.....                                                 | 3   |
| 1.3.2 Práctica .....                                               | 4   |
| 1.3.3 Metodológica.....                                            | 4   |
| 1.4 Límites de la investigación .....                              | 4   |
| 2. Revisión de la literatura .....                                 | 4   |
| 2.1 Marco Teórico .....                                            | 5   |
| 2.1.1 Mango .....                                                  | 5   |
| 2.1.2 Biocombustibles .....                                        | 8   |
| 2.1.3 Bioetanol .....                                              | 8   |
| 2.1.4 Economía circular .....                                      | 9   |
| 2.1.5 Pretratamientos .....                                        | 9   |
| 2.1.6 Pilares fundamentales de una Planta Industrial Moderna... .. | 10  |
| 2.1.7 Modularización.....                                          | 38  |
| 2.1.8 Evaluación Económica .....                                   | 40  |
| 2.1.9 Criterios de Inversión .....                                 | 42  |
| 2.1.10 Nivel de Preparación Tecnológica (TRL) .....                | 43  |
| 2.1.11 Diseño de proceso .....                                     | 45  |
| 2.1.12 Diseño conceptual .....                                     | 49  |

|        |                                                               |    |
|--------|---------------------------------------------------------------|----|
| 2.2    | Antecedentes del estudio .....                                | 49 |
| 3.     | Hipótesis y variables .....                                   | 52 |
| 3.1    | Hipótesis .....                                               | 52 |
| 3.1.1  | Hipótesis general .....                                       | 52 |
| 3.1.2  | Hipótesis específica.....                                     | 52 |
| 3.2    | Variables.....                                                | 52 |
| 4.     | Metodología .....                                             | 54 |
| 5.     | Resultados .....                                              | 58 |
| 5.1    | Diseño Modular Adaptable.....                                 | 58 |
| 5.2    | Análisis previos. ....                                        | 58 |
| 5.3    | Módulos, Componentes y Parámetros .....                       | 59 |
| 5.4    | Modelo Preliminar de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA). .... | 61 |
| 5.5    | Indicadores de desempeño.....                                 | 62 |
| 5.6    | Evaluación Económica .....                                    | 63 |
| 5.6.1. | Costos de Producción. ....                                    | 64 |
| 5.6.2. | Financiamiento .....                                          | 69 |
| 6.     | Discusión de Resultados .....                                 | 76 |
| 7.     | Conclusiones .....                                            | 80 |
| 8.     | Recomendaciones.....                                          | 81 |
| 9.     | Referencias bibliográficas .....                              | 81 |
| 10.    | Anexos.....                                                   | 98 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Diagrama de los Pilares fundamentales de una Planta Industrial Moderna.....                                                  | 10 |
| Figura 2. Espectro de opciones en un espacio multidimensional.....                                                                     | 11 |
| Figura 3. Diagrama de flujo de la formulación del IPRI .....                                                                           | 15 |
| Figura 4. Ilustración de la señal de tránsito con clasificación de código de color para diferentes niveles de riesgo.....              | 16 |
| Figura 5. Capas de protección para reducir accidentes específicos .....                                                                | 17 |
| Figura 6. Roles de las herramientas de sistemas en el diseño de biorrefinerías .....                                                   | 23 |
| Figura 7. Un enfoque de sistemas totales para las biorrefinerías .....                                                                 | 24 |
| Figura 8. Flujo de trabajo del marco-estructural para el diseño y control simultáneos.....                                             | 26 |
| Figura 9. Diagrama de flujo de trabajo de la metodología del IPDC.....                                                                 | 27 |
| Figura 10. Flujo de trabajo del marco estructural para el diseño y control simultáneos .....                                           | 29 |
| Figura 11. Índice de Ingeniería de Procesos a lo largo de los años. Anon (2004).....                                                   | 35 |
| Figura 12. Índice de Costos de Plantas Químicas (CPE de sus siglas en inglés). Anon (2004). .....                                      | 36 |
| Figura 13. Patrón de flujo de caja para un proyecto típico .....                                                                       | 41 |
| Figura 14. Diagrama esquemático de una progresión típica de un proyecto de CPI.....                                                    | 44 |
| Figura 15. Diseño del proceso de síntesis.....                                                                                         | 45 |
| Figura 16. Optimización del diseño.....                                                                                                | 47 |
| Figura 17. Modelo cebolla.....                                                                                                         | 48 |
| Figura 18. Clasificación de criterios de calidad.....                                                                                  | 49 |
| Figura 19. Marco para realizar un análisis del ciclo de vida de un producto químico .....                                              | 50 |
| Figura 20. Diagrama de flujo del Proceso Metodológico .....                                                                            | 56 |
| Figura 21. Diagrama de Flujo de la obtención de Bioetanol de la cáscara de mango.....                                                  | 57 |
| Figura 22. Diagrama del balance de materia de una planta piloto de bioetanol de <i>Mangifera indica</i> L, ubicado en Lima- Perú ..... | 64 |
| Figura 23. Patrón de flujo de caja correspondiente a la planta piloto de bioetanol a partir de <i>Mangifera indica</i> L .....         | 74 |
| Figura 24 Jerarquía de estrategias de integración masiva .....                                                                         | 90 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Clasificación taxonómica.....                                                                                                                                 | 5  |
| Tabla 2. Composición fitoquímica nutricional cáscara mango .....                                                                                                       | 7  |
| Tabla 3. Estrategias de Diseño Inherentemente más Seguro .....                                                                                                         | 12 |
| Tabla 4. Estado actual y futuro de la manufactura de productos.....                                                                                                    | 20 |
| Tabla 5. Clasificación de los tipos de flexibilidad y sus respectivas estrategias conceptuales y de diseño .....                                                       | 31 |
| Tabla 6. Factores típicos para la estimación del costo fijo de capital del proyecto.....                                                                               | 38 |
| Tabla 7. Análisis proximal de la cáscara de mango seco .....                                                                                                           | 58 |
| Tabla 8. Costos de producción para un lote de bioetanol elaborado a partir de <i>Mangifera indica L</i> .....                                                          | 65 |
| Tabla 9. Costos de inversión en los equipos para una planta piloto de bioetanol a partir de <i>Mangifera indica L</i> .....                                            | 66 |
| Tabla 10. Consumos y costos de la energía proveniente de los equipos utilizados en la operación de producción de bioetanol a partir de <i>Mangifera indica L</i> ..... | 67 |
| Tabla 11. Características del local para la instalación de la planta piloto de producción de bioetanol a partir de cáscara de <i>Mangifera indica L</i> .....          | 68 |
| Tabla 12. Plan de financiamiento económico para la construcción de una planta piloto de bioetanol producido a partir de <i>Mangifera indica L</i> .....                | 69 |
| Tabla 13. Condiciones del plan de financiamiento .....                                                                                                                 | 70 |
| Tabla 14. Flujo de caja para una planta piloto de producción de bioetanol a partir de <i>Mangifera indica L</i> .....                                                  | 71 |
| Tabla 15. Variables y parámetros notables para la evaluación de la rentabilidad de una planta piloto de bioetanol en base a cáscara de <i>Mangifera indica L</i> ..... | 75 |

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue diseñar una planta modular para la producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L., variedad Haden) en Lima, Perú, utilizando diversos principios; enfocado en la necesidad de revalorizar los residuos orgánicos y mitigar los problemas ambientales asociados a la acumulación de estos. La metodología incluyó un análisis de la viabilidad de la cáscara de mango como materia prima, evaluando su composición química y su potencial para procesos de bioetanol; posteriormente, se desarrolló un diseño modular que abarca las etapas de pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación. El diseño fue evaluado mediante simulaciones y análisis técnico-económicos, considerando parámetros operativos, costos y escalabilidad. Los resultados pronostican que la cáscara de mango es una materia prima adecuada por sus altos contenidos de azúcares que permiten un rendimiento eficiente en la producción de bioetanol. Asimismo, el diseño modular tiene el potencial de ser técnicamente viable y económicamente competitivo, con un enfoque flexible y escalable. No obstante que se requiere de un diseño más moderno y el uso de herramientas computacionales y datos de campo para desarrollar un diseño de la planta más confiable, segura, eficiente y productiva, este trabajo es pionero y puede servir de base para trabajos futuros.

**Palabras clave:** Cáscara mango, bioetanol, modularización, economía circular

## ABSTRACT

The aim of this research was to design a modular plant for the production of bioethanol from mango peel (*Mangifera indica* L., variety Haden) in Lima, Peru, using various principles; focused on the need to revalue organic waste and mitigate the environmental problems associated with its accumulation. The methodology included an analysis of the viability of mango husk as a raw material, assessing its chemical composition and potential for bioethanol processes; subsequently, a modular design was developed covering the pretreatment stages, hydrolysis, fermentation and distillation. The design was evaluated by means of simulations and technical-economic analysis, considering operational parameters, costs and scalability. The results predict that mango peel is a suitable raw material for its high sugar content, which allows efficient performance in bioethanol production. The modular design also has the potential to be technically feasible and economically competitive, with a flexible and scalable approach. Although more modern design and the use of computational tools and field data are required to develop a more reliable, safe, efficient and productive plant design, this work is pioneering and can serve as a basis for future work.

**Keywords:** mango husk, bioethanol modularization, circular economy

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una gran preocupación por abordar la crisis energética y mitigar el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles, que actualmente satisfacen el 90 % de la demanda global. Por esta razón, en los últimos años se ha centrado la investigación en el avance de energías renovables y sostenibles, como los biocombustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Una solución para abordar la sobreexplotación de combustibles convencionales es el bioetanol, el cual, debido a sus características, no requiere modificaciones significativas en la infraestructura de transporte. En más de 65 países, se ha promovido la producción y el consumo de bioetanol para el sector de transporte con el objetivo de descarbonizar el medio ambiente. Se mezcla con gasolina en diversas proporciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La cantidad de etanol añadida puede variar del 5 al 100 % según el país. Estudios estiman que la adopción generalizada de una mezcla de bioetanol al 10 % podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 12 y un 19 % comparado con el uso de gasolina no mezclada (Zabed et al., 2017; Gronchi et al., 2019).

Cada año aumenta la demanda de bioetanol, por lo que es necesario emplear materias primas alternativas para reducir el uso de los principales cultivos que comúnmente se usa tal como la caña de azúcar, que representó más del 96 % de la producción total de etanol en 2020. Estas materias primas se clasifican como de primera generación al provenir de cultivos destinados a la alimentación, lo que genera una competencia significativa tanto en el suministro de alimentos como en la producción de etanol (Robak and Balcerek, 2020). Los progresos en la fabricación de biocombustibles de segunda generación derivados de biomasa lignocelulósica, como residuos de cultivos o pastos energéticos, han ganado relevancia. Esto se debe a que la biomasa de segunda generación se presenta como una excelente alternativa. Esta forma de biomasa es abundante, renovable y relativamente fácil de obtener (Sharma et al., 2020).

La producción de estos biocombustibles requiere tres etapas fundamentales. Primero, se debe descomponer la estructura rígida de la biomasa mediante un pretratamiento. Luego, se convierten los azúcares en fermentables a través de la hidrólisis. Por último, se lleva a cabo la fermentación de este producto. Dado que estos son procesos químicos, es crucial entender las etapas involucradas y las condiciones de operación adecuadas. Cualquier variación fuera del rango óptimo puede impactar la eficiencia del producto final.

## 1.1. Planteamiento del problema

### 1.1.1 Determinación del problema

Durante muchos años el modelo energético en el Perú tuvo una alta dependencia del petróleo (Petroperú, 2023, p. 12). Esta fuente de energía no renovable genera daños para nuestra salud y medio ambiente por el aumento de GEI Rusiecki (2022) y Mujica (2023). Es así que en el último informe World Air Quality Report señala que Lima es la ciudad de Latinoamérica más contaminada con un valor  $18.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Es por ello que surge la necesidad de nuevas fuentes energéticas, si bien hay proyectos de inversión para obtención de nuevas energías, algunos presentan limitaciones como la energía solar, que no está 24 horas, disponible además que no satisfacen la demanda y son de limitada aplicación. El biodiesel es una fuente de energía renovable, pero presenta algunas complicaciones durante su obtención, ya que se solidifica a bajas temperaturas lo que puede dañar al motor, como que también pierde sus propiedades a corto plazo, algo que no sucede con los combustibles fósiles, es caro y no se puede usar en todos los motores. Trillo (2021)

El sector de procesamiento de alimentos establece un vínculo y una sinergia vitales entre los dos pilares de la economía: la industria y la agricultura. Los desechos de cáscaras de frutas (FPW, por sus siglas en inglés) se generan abundantemente en las industrias de procesamiento de alimentos. Cada fruta consta de 15 a 50% de cáscara, que se desecha como un residuo después de utilizar su parte carnosa (es decir, mesocarpio). En algunos casos, el volumen de residuos obtenido es mayor que el producto en sí (Wadhwa y Bakshi 2013, García et al. 2015, Pathak et al. 2015, 2017a, b)

### 1.1.2 Formulación del problema

#### Problema general

¿Cómo diseñar un proceso de bioetanol a partir de la cáscara de mango *Mangifera indica* L., variedad Haden en Lima?

#### Problemas específicos

- ¿Será la cáscara de mango *Mangifera indica* L., variedad Haden, una buena fuente para producir bioetanol?

- ¿Cuál será el proceso metodológico que deberá usarse para el diseño de proceso y que cumpla con los lineamientos de eficiencia, seguridad, sea eco amigable, sostenibilidad y no genere impacto ambiental?
- ¿Será factible el diseño del proceso de producción de bioetanol, a partir de cáscara de mango Haden, para su potencial aplicación a escala industrial?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Diseñar un proceso modular eficiente y económicamente viable para la producción de bioetanol a partir de cáscara de mango Haden, optimizando el uso de recursos, integrando herramientas computacionales y evaluando su impacto ambiental mediante el análisis del ciclo de vida (LCA).

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la escalabilidad y eficiencia técnica del diseño modular para garantizar su aplicación en distintos niveles de producción sin comprometer la viabilidad económica del proceso.
- Analizar y optimizar los indicadores de desempeño de la planta modular, asegurando un control eficiente de las variables operativas y mejorando la eficiencia energética del sistema.
- Incorporar criterios financieros y análisis económico desde la etapa de diseño, asegurando la rentabilidad del proyecto y facilitando la toma de decisiones estratégicas para su implementación a nivel industrial.

## **1.3 Justificación de la investigación**

### **1.3.1 Teórica**

El desarrollo de esta investigación integra métodos modernos de diseño de procesos en bioetanol, utilizando tecnologías sostenibles. Se elige la cáscara de mango como materia prima para aprovechar residuos agrícolas. La investigación se basa en economía circular y biorrefinerías, promoviendo sostenibilidad y optimización de procesos industriales.

### **1.3.2 Práctica**

La industria alimentaria produce muchos desechos orgánicos, como cáscaras de mango, que a menudo van a vertederos, causando problemas ambientales. Este proyecto convierte esos desechos en bioetanol, un biocombustible limpio. Utiliza un diseño modular que se adapta a diferentes escalas, mejorando eficiencia y reduciendo costos, especialmente en Perú.

### **1.3.3 Metodológica**

El uso de métodos avanzados de diseño de procesos asegura la precisión de los resultados. Se propone un diseño modular para optimizar cada etapa del proceso de producción de bioetanol y se implementan principios de diseño seguro y economía circular para reducir riesgos y la huella ambiental.

## **1.4 Límites de la investigación**

Debido a la complejidad del estudio, la información gratuita disponible para su preparación y las etapas muy tempranas del proyecto, hay temas que aún no han sido explorados y analizados en su totalidad. A la vez, el análisis se realiza en una etapa preliminar y no se fundamenta en la planificación detallada que debe llevarse a cabo al iniciar la operación del proyecto. Los datos para los cálculos se basan principalmente en trabajos parecidos a la producción de bioetanol de otras fuentes de residuos orgánicos.

Además, la evaluación económica se desarrolla con base en precios y costos actuales, lo que implica que fluctuaciones futuras en los mercados de materias primas, energía y equipos podrían afectar la viabilidad económica estimada. Asimismo, el proyecto está diseñado específicamente para Lima, limitando su aplicación directa en otras regiones con condiciones climáticas, industriales o socioeconómicas diferentes.

En el aspecto técnico, se considera un análisis de acuerdo a una tecnología seleccionada para el proceso, así como la elaboración del diagrama de operaciones y el tamaño de operaciones; como tal este análisis solo se limita a realizar las etapas principales dentro del proceso de producción.

Con respecto al análisis ambiental y social, se busca mitigar los posibles impactos ambientales y sociales que conlleva la producción de bioetanol a partir de cáscara de mango Haden, teniendo que profundizar en un análisis más detallado para poder determinar estos impactos.

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Marco Teórico

En esta sección se abordará los aspectos más relevantes respecto al mango, el bioetanol, las consideraciones modernas tecnológicas y el diseño del proceso y planta.

#### 2.1.1 Mango

El mango, uno de los frutos tropicales más exquisitos y valorados por los consumidores, tiene sus orígenes en la India y se cree que su cultivo se remonta a unos 2000 años antes de Cristo. Según algunos expertos en botánica, la domesticación de esta planta por parte del hombre podría haber ocurrido hace unos 6000 años. (Oquendo, 2007). El árbol que produce esta fruta, conocida como "*Manguiфера indica* L.", proviene de una de las muchas especies silvestres que aún se encuentran en el noroeste de India, Filipinas y Papúa Guinea. Aunque casi la mitad de estas especies generan frutos comestibles, ninguna se compara en calidad con la especie "*indica*", considerado por algunos expertos como el soberano de todas las frutas. (Inoagro 2015). Fueron los colonizadores portugueses quienes introdujeron el cultivo del mango en África, y después en Brasil, desde donde se expandió a todas las regiones con condiciones climáticas adecuadas para su cultivo. (Oquendo,2007).

#### A) Descripción botánica y taxonómica

Los árboles de la especie *indica* son robustos y pueden alcanzar hasta 20 metros de altura, con una forma piramidal y hojas alargadas de un vibrante color verde. Sus frutos son ovalados. El mango es una drupa que puede variar en peso, desde aproximadamente 200 g hasta 2000 g, y en formas que van desde redondas hasta ovoides, pasando por arriñonadas y a veces aplanadas. Tienen un color que puede ser verde o amarillo, con tonalidades que incluyen rosa, rojo y violeta. La información botánica del mango se presenta en la tabla 1. El género *Mangifera* incluye 69 especies, según Kosterman y Bompard en 1993.

**Tabla 1.** Clasificación taxonómica. Basado en Galán (2000).

| Reino    | Plantae       |
|----------|---------------|
| División | Magnoliophyta |
| Clase    | Magnoliopsida |

|         |               |
|---------|---------------|
| Orden   | Sapindales    |
| Familia | Anacardiaceae |
| Género  | Manguifera    |
| Especie | Indica        |

---

## **B) Variedades del mango**

Según Minaya (1999), en Perú se cultiva una variedad de mangos que se divide en dos categorías: las plantas francas, que no están injertadas y son poliembriónicas, y las variedades mejoradas, que están injertadas y son monoembriónicas. Entre las plantas francas se encuentran el "criollo de Chulucanas", el "chato de Ica", el "rosado de Ica", entre otros. Estos mangos, reconocidos por su color amarillo, tamaño, textura fibrosa de la pulpa y sabor agradable, se han utilizado recientemente para producir pulpa y jugos concentrados, que son exportados principalmente al mercado europeo. Por otro lado, las variedades mejoradas incluyen tipos rojos como Haden, Kent, Tommy Atkins, Zill, Keitt y Edward, importadas de Florida, Estados Unidos, a nuestra costa.

### **Haden**

Esta variedad de mango proviene del sur de Florida, EE. UU., gracias a John Haden, quien plantó la primera semilla en 1902 en Coconut Grove. El mango Haden tiene una piel roja y verde cuando está maduro y es conocido por su sabor dulce y jugoso, equilibrando bien dulzura y acidez. Su aroma es tropical y fuerte, y su pulpa es suave y carnosa, variando de firme a cremosa según su madurez, además de ser resistente a enfermedades.

El mango Haden está compuesto principalmente por agua (más del 80% de su peso fresco), seguido de carbohidratos como azúcares simples que nos dan energía. También es rico en fibra, que es buena para la digestión. En cuanto a vitaminas, destaca por su contenido en vitamina C, vitamina A y algunas del grupo B como B6 y ácido fólico. En cuanto a minerales, contiene potasio, magnesio, y cantidades menores de calcio, hierro y zinc. Además, tiene compuestos antioxidantes y fenólicos que son buenos para la salud. (Fruits in Perú, 2019)

## **C) Composición del mango**

La composición de la cáscara del mango depende principalmente del estado de madurez, la ubicación, la variedad y las condiciones climáticas de la región donde se produce el mango. La Tabla 2 muestra que la cáscara de mango contiene una variedad de macronutrientes. (Lebaka et al.2021).

#### **D) Cáscara del mango.**

La cáscara de mango, que representa aproximadamente el 15-18% del peso total del fruto, ha captado recientemente la atención de la comunidad científica debido a su composición. Se ha encontrado que está repleta de fibra dietética, proteínas, azúcares reductores y una variedad de compuestos bioactivos, incluyendo carotenoides, vitamina C y compuestos fenólicos. Esto ha llevado a investigaciones sobre su potencial uso en diversas aplicaciones biotecnológicas, como la producción de etanol, ácido láctico, pectinasas y biogás (metano). Además, se ha explorado su utilidad en la alimentación del ganado, extracción de pectina, desarrollo de compuestos antimicrobianos y como ingrediente en la formulación de alimentos, como pastas y productos de panadería. (MOK, 2014).

**Tabla 2.** Composición fitoquímica nutricional cáscara mango. Basado en Cedeño-Reyes y Zambrano-Delgado (2014); Larrauri, Rupérez et al. (1996); Torres-León et al. (2016).

| <b>Compuesto (por 100 g)</b>      | <b>Cáscara</b> |
|-----------------------------------|----------------|
| Agua (g)                          | 10.5           |
| Energía (kcal)                    | 248.57         |
| Carbohidratos, por diferencia (g) | 63.8           |
| Proteína (g)                      | 3.6            |
| Lípidos totales (grasas) (g)      | 2.2            |
| Azúcares, totales (g)             | 34.38          |
| Fibra dietética total (g)         | 12.5           |
| Almidón (g)                       | 29.8           |

#### **E) Fibra dietaria**

La Association of Oficial Analytical Chemists (AOAC) la describe como la porción comestible residual de las células vegetales, que consiste en polisacáridos, lignina y otras sustancias que resisten la digestión por enzimas humanas. Esta definición abarca los principales componentes de los alimentos, como la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, las

gomas, la celulosa modificada, los mucílagos, los oligosacáridos y las pectinas, junto con sustancias menos comunes como las ceras, las cutinas y la suberina.

La composición de la fibra dietética incluye varios componentes clave:

**Celulosa:** Predominante en la estructura celular de frutas y verduras, es un polímero lineal de glucosa unida por enlaces  $\beta$ -1,4 glucosídicos. Aunque es insoluble en agua, tiene una alta afinidad por ella. Su contenido es más alto en frutas y verduras, alcanzando hasta un 20-31%, mientras que en cereales es del 17%. (Periago et al., 1993).

**Hemicelulosa:** Similar a la celulosa, pero más pequeña en tamaño, compuesta por pentosas unidas por enlaces  $\beta$ -(1,4). Contiene cadenas laterales de arabinosa y otros azúcares, siendo la hexosa la más accesible para su asimilación en el sistema digestivo. (Aguilar, 2002).

**Pectina:** Abundante en tejidos vegetales, especialmente en la pared celular primaria y la lámina media de plantas superiores. Formada principalmente por cadenas de ácido galacturónico unidas por enlaces glucosídicos  $\beta$ -(1,4), con residuos adicionales de L-ramnosa, D-galactanos y L-arabinos. (Aguilar, 2002).

**Lignina:** Una sustancia intracelular amorfa y compleja presente en vegetales, compuesta por fenólicos, polisacáridos, ácido urónico y proteínas. Es la parte hidrofóbica de la fibra dietética. (Periago et al., 1993).

**Carragenanos:** Capaces de formar geles en presencia de ciertos iones, están compuestos por galactanos extraídos de algas rojas, con monómeros de D-galactosa y 3,6-anhidro-D-galactosa. (Aguilar, 2002).

**Alginatos:** Constituyentes de la pared celular de algas pardas, formados por monómeros de ácido  $\beta$ -D-manurónico y  $\alpha$ -L-gulorónico. Solubles en agua en forma de sales con metales alcalinos, magnesio, amonio y aminas. (Belitz, 1997).

**Gomas:** Moléculas de alto peso molecular formadas por polímeros hidrofílicos unidos por enlaces glucosídicos, que pueden consistir en un solo tipo de monosacárido o en monosacáridos diferentes. (Aguilar, 2002).

### 2.1.2 Biocombustibles

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (2004, p. 39-40) define biocombustible como un "combustible producido directa o indirectamente a partir de la biomasa", entiende a esta última como "materia de origen biológico, excluida la encastrada en yacimientos y formaciones geológicas fosilizadas".

Los biocombustibles se obtienen mediante la transformación de biomasa, materia orgánica de origen vegetal o animal, a través de diversos procesos mecánicos, termoquímicos y biológicos.

### **2.1.3 Bioetanol**

El bioetanol se obtiene de plantas que contienen altos niveles de azúcares, almidones y materiales lignocelulósicos. Cualquier recurso que posea estas características en su composición puede ser utilizado para producir etanol. (Sánchez, 2010). El bioetanol de segunda generación se puede obtener de residuos agroindustriales con alto contenido de celulosa como los que están presentes en la madera, como también el bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz, astillas, paja. Esta biomasa contiene principalmente celulosa. Para poder obtener etanol se debe someter a procesos de pretratamiento para romper las cadenas lignocelulósicas para que la celulosa esté libre para estar en contacto con los ácidos o las enzimas hidrolíticas y obtener azúcares. La biomasa lignocelulósica tiene una ventaja que es de fácil adquisición y alta disposición (Tye et al., 2016).

### **2.1.4 Economía circular**

El concepto de economía circular se encuentra intrínsecamente vinculado al diseño modular en plantas químicas. Este enfoque maximiza la eficiencia de los recursos mediante la reutilización y reconfiguración de módulos, adaptándose a diferentes productos y procesos. Las plantas modulares no solo reducen el desperdicio y optimizan los recursos, sino que también contribuyen al diseño sostenible y escalable, alineándose con los principios de la economía circular. Además, permite integrar tecnologías limpias como el uso de energías renovables, promoviendo la sostenibilidad y reduciendo el impacto ambiental. El diseño modular se presenta como una solución eficiente en la industria química que busca minimizar su huella ecológica y satisfacer demandas de mercado cambiantes (Wörsdörfer et al., 2016).

La economía circular representa un innovador enfoque en la producción y consumo, orientado hacia un crecimiento sostenible a largo plazo. Su objetivo es maximizar el uso de recursos mediante la optimización de estos, la reducción del consumo de materias primas y la reutilización de residuos mediante el reciclaje o la transformación en nuevos productos. Este modelo se inspira en la naturaleza, donde todo elemento tiene valor y se utiliza eficientemente, convirtiendo los residuos en nuevos recursos. Así, se busca prolongar el ciclo de vida de los productos materiales, manteniendo un equilibrio entre el progreso y la

sostenibilidad ambiental. (Repsol 2023)

### **2.1.5 Pretratamientos**

Las técnicas de pretratamiento se dividen en categorías químicas, fisicoquímicas, físicas y biológicas, cada una con sus propias ventajas y desventajas específicas. Un pretratamiento eficaz reduce el contenido de lignina, evitando así la unión de enzimas a la lignina durante la hidrólisis y mejorando la eficiencia de la sacarificación (Preethi et al., 2021). La literatura ha revisado exhaustivamente cada una de estas técnicas de pretratamiento (Gandam et al., 2022).

Los pretratamientos físicos se enfocan en la reducción del tamaño de partícula para aumentar la superficie, disminuir la cristalinidad de la celulosa y mejorar la accesibilidad a enzimas y microorganismos (Maroušek et al., 2012; Sitotaw et al., 2023). Aunque tienen un alto requerimiento energético, no generan inhibidores y tienen un impacto mínimo en la eliminación de lignina y hemicelulosa.

En contraste, los pretratamientos químicos requieren menos tiempo que los biológicos y menos energía que los físicos (Li et al., 2022; Maroušek, 2013). Estos provocan cambios estructurales en la lignocelulosa que parcialmente eliminan la lignina y/o la hemicelulosa, desarrollando porosidad y accesibilidad a las fibras de celulosa. Sin embargo, suelen generar inhibidores y residuos químicos que necesitan tratamiento y disposición adecuada (Ceaser & Chimphango, 2021).

Los pretratamientos fisicoquímicos combinan características tanto de los pretratamientos físicos como químicos, heredando tanto sus beneficios como sus desventajas. Por último, los pretratamientos biológicos son respetuosos con el medio ambiente, selectivos y no generan inhibidores para los microorganismos de fermentación. No obstante, requieren nutrientes costosos para los microbios y un prolongado tiempo de pretratamiento.

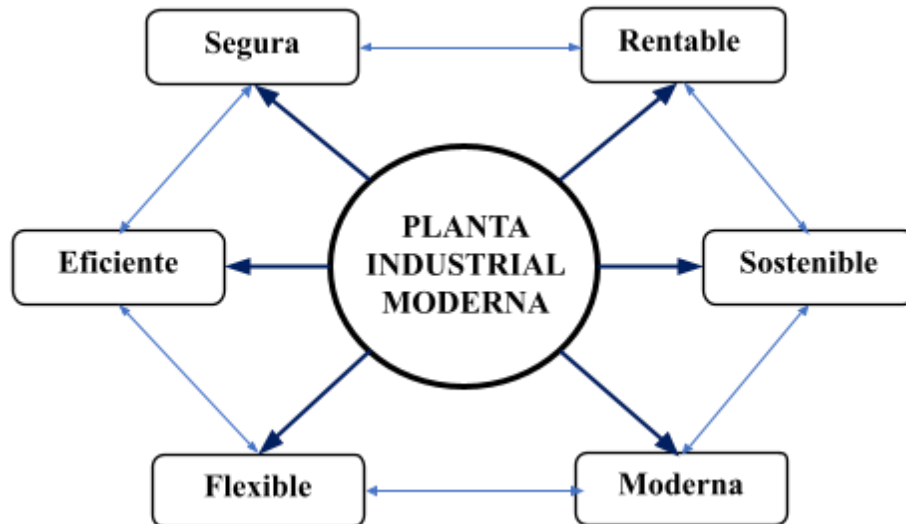


**Figura 1.** Diagrama de los Pilares fundamentales de una Planta Industrial Moderna.

### 2.1.6 Pilares fundamentales de una Planta Industrial Moderna

La figura 1 ilustra los pilares esenciales de la industria moderna, los cuales incluyen automatización, seguridad operativa, protección ambiental, uso eficiente de recursos, minimización de residuos, eficiencia energética, calidad del producto y viabilidad económica. Estos aspectos están interrelacionados y guían el progreso, rendimiento y viabilidad técnica y económica de la industria.

#### A. Seguridad

Hendershot (2012) detalla la metodología de Diseño Intrínsecamente más Seguro (ISD), que busca integrar la seguridad en el diseño para reducir o eliminar peligros. Las medidas de seguridad se dividen en:

- 1) **Inherente:** Cambia el proceso para usar materiales menos peligrosos.
- 2) **Pasivo:** Usa diseños que reducen riesgos sin requerir acción activa.
- 3) **Activo:** Implementa sistemas de control y mitigación, como rociadores.
- 4) **Procedimental:** Aplica procedimientos y normas para gestionar riesgos operativos.

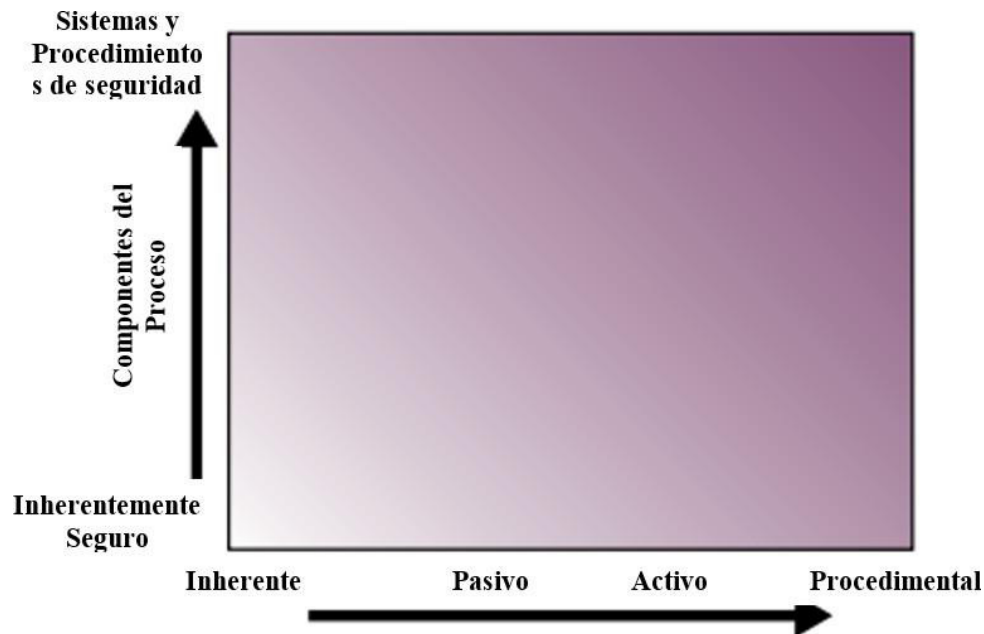


**Figura 2.** Espectro de opciones en un espacio multidimensional. De Hendershot (2012).

La ISD debe verse como un espectro de opciones en un espacio multidimensional, véase la figura 2. Se puede considerar un diseño inherentemente más seguro a nivel de proceso general (eje horizontal) y para los componentes individuales en una planta específica (eje vertical). De Hendershot (2012).

Hendershot (2012) explica que el Diseño Intrínsecamente más Seguro (ISD) debe integrarse desde el principio en el desarrollo de procesos, aunque también puede ser aplicado más adelante para mejorar la seguridad. El ISD se puede aplicar en varias fases:

1. **Selección de tecnología:** Evaluar y elegir tecnologías teniendo en cuenta los peligros y las opciones más seguras.
2. **Diseño preliminar:** Considerar la seguridad en operaciones, procesamiento y ubicación de la planta.
3. **Diseño detallado:** Planificar la ubicación de equipos y tuberías, y decidir entre procesos grandes o varios más pequeños.
4. **Diseño de equipos:** Elegir diseños que minimicen riesgos y considerar materiales peligrosos.
5. **Operación:** Mantener el enfoque en seguridad durante el funcionamiento, mantenimiento y al implementar nuevas tecnologías.

Santo et al. (2023) refuerzan los principios del ISD, que incluyen sustitución, simplificación, moderación y minimización. Destacan que los procedimientos deben ser:

1. **Claramente definidos:** Proveer la información necesaria para realizar tareas de forma segura.
2. **Adaptados al usuario:** Ajustar el nivel de detalle según la experiencia y formación del personal.
3. **Concisos:** Eliminar información innecesaria.
4. **Consistentes:** Usar términos y formatos uniformes.
5. **Revisados regularmente:** Asegurarse de que los procedimientos se revisen y actualicen con frecuencia, utilizando métodos como la "verificación del ciclo de trabajo" para asegurar su eficacia.

En la tabla 3 se presentan las estrategias de diseño del ISD.

**Tabla 3.** Estrategias de Diseño Inherentemente más Seguro.

| Concepto de ISD | Ejemplo de Aplicación                                                                                                                                                                                    | Beneficios Potenciales                                                                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sustitución     | Diferentes materias primas (por ejemplo, hipoclorito de sodio vs. cloruro gaseoso para tratamiento de aguas).                                                                                            | Riesgo potencial menor, mejoramiento de la operatividad y menor costos de operación y mantenimiento                       |
|                 | Más fuertes, materiales de construcción más resistentes (por ejemplo, aleaciones de metal vs. acero inoxidable).                                                                                         |                                                                                                                           |
|                 | Diferentes tecnologías de separación (por ejemplo, extracción por centrifugación vs. decantación; tamiz molecular vs. glicol para secado).                                                               |                                                                                                                           |
| Simplificación  | Simplificar las instrucciones de operación<br>Simplificar la interface hombre-máquina (hacer que el equipo sea más fácil de operar, mejorar los gráficos y pantallas, mejorar la facilidad de controlar. | Riesgo potencial menor, mejoramiento de la seguridad, mucho menor costo y mejor rentabilidad al disminuir los reprocesos. |

|              |                                                                                                                                                 |                                                                                                                                        |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Simplifique el proceso (elimine etapas de procesamiento innecesarios).                                                                          | Menos riesgo de pérdida de contención, incremento de rentabilidad por menor capital de instalación.                                    |
| Moderación   | Disminuir la temperatura, presión y otros parámetros del proceso.                                                                               | Menor riesgo potencial, menor costos de energía.                                                                                       |
|              | Seguridad pasiva (diques); espaciamiento de equipos segregados para reactivos químicos tales como ácidos, bases, oxidantes y combustibles.      | Menor consecuencias de pérdida de contención; reducción de efectos dominó.                                                             |
|              | Disminución de concentraciones (por ejemplo, porcentaje más bajo de ácidos y bases de ensayo; nitrógeno separado del aire vs. nitrógeno licuado | Menor consecuencias de pérdida de contención; reducción de costos                                                                      |
| Minimización | Reducción de inventario (menos material, suministro de materia prima por tubería versus tanqueo)                                                | Menor consecuencias de pérdida de contención, mejoramiento de rentabilidad por menor capital de instalación y menor capital de trabajo |
|              | Intensificación del Proceso (por ejemplo, alta velocidad de mezcla, destilación reactiva, catalizador mejorado, etc.)                           | Permitir equipos más pequeños, menor riesgo de pérdida de contención,                                                                  |
|              | Minimizar recorridos por tuberías                                                                                                               | potencial de mejoramiento de rentabilidad por tasas de procesamiento más altas                                                         |
|              | Eliminar equipo que no se usa                                                                                                                   |                                                                                                                                        |
|              | Eliminar muestreo innecesario                                                                                                                   | Reducción de residuos y de costo, menos riesgo de contacto con materiales peligrosos                                                   |
|              | Eliminar procesos intermediarios peligrosos (comprar en vez de manufacturar)                                                                    |                                                                                                                                        |

---

Riesgo potencialmente  
menor, reducción potencial  
de costos

---

Qian et al. (2024) proponen una metodología avanzada para evaluar la seguridad inherente de un proceso utilizando un índice semicuantitativo llamado Índice de Riesgo Inherente del Proceso (IPRI). Este índice se basa en cálculos de IQ y se desarrolla en tres etapas:

- 1) **Formulación del proceso:** Definir el proceso a evaluar.
- 2) **Identificación de factores:** Identificar los peligros y características del proceso.
- 3) **Cálculo del índice:** Calcular el índice utilizando siete parámetros del proceso.

Un valor alto del IPRI indica una mayor inseguridad. El índice se ajusta incorporando datos de fiabilidad del equipo para calcular un índice de riesgo (RI), que refleja la probabilidad de falla del equipo y su impacto. Para procesos con múltiples subprocesos, el índice general se basa en el valor máximo de los índices de riesgo individuales. La figura 3 ilustra estos pasos, y la figura 4 muestra cómo se representa el nivel de peligrosidad.

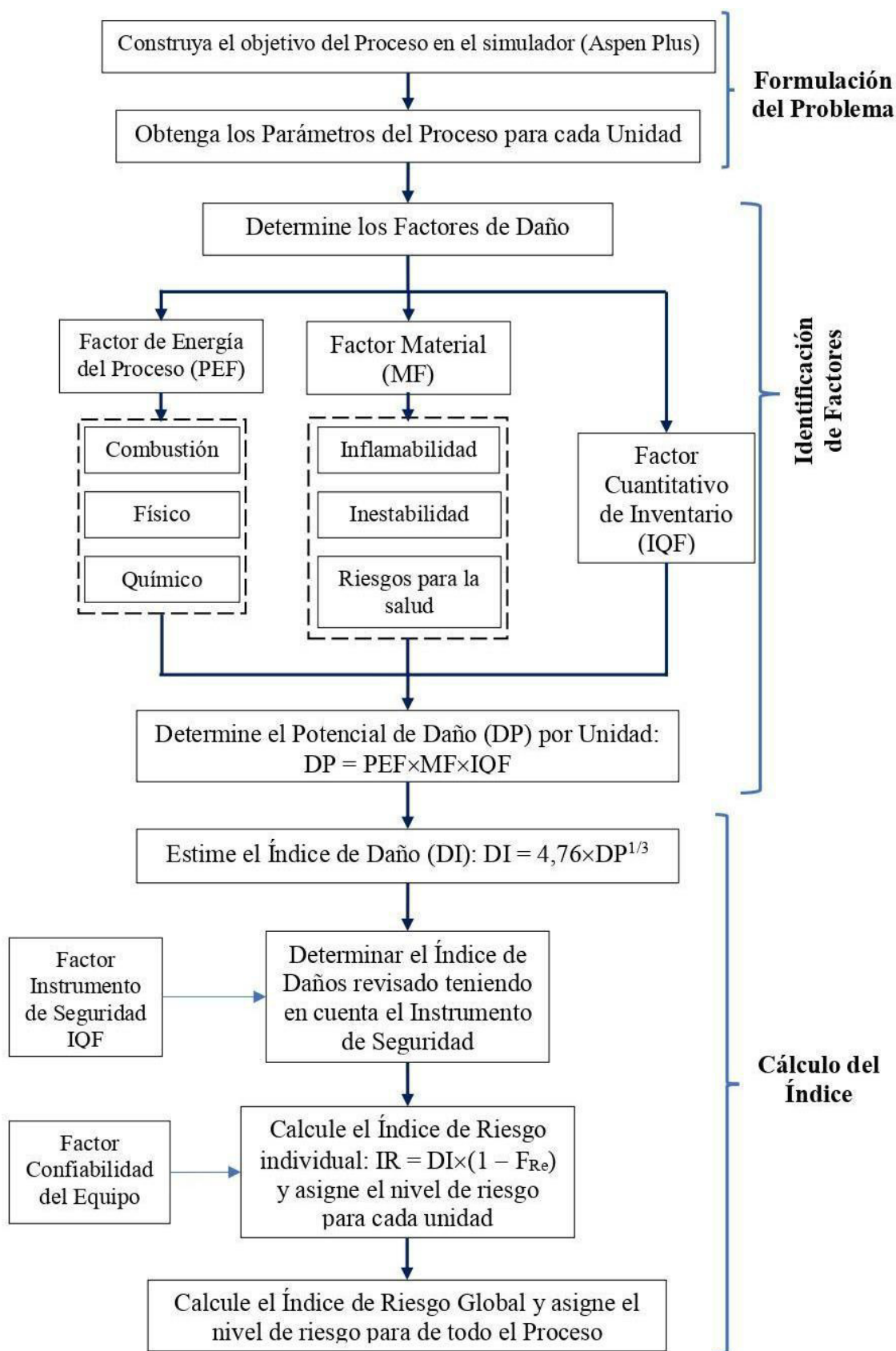


**Figura 3.** Diagrama de flujo de la formulación del IPRI. De Qian et al. (2024).

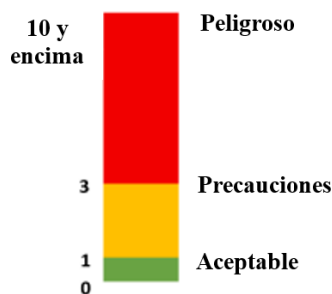


**Figura 4.** Ilustración de la señal de tránsito con clasificación de código de color para diferentes niveles de riesgo. De Qian et al. (2024).

Gao et al. (2020) retrotraen los 14 principios para hacer inherentemente seguro un proceso:

- 1) **Intensificación o minimización:** Reducción del inventario y tamaño de las operaciones unitarias y plantas químicas.
- 2) **Sustitución:** Uso de materiales y procesos menos peligrosos.
- 3) **Atenuación o moderación:** Mantener materiales y procesos bajo condiciones operativas más seguras. Moderación de reacciones y almacenamiento atenuado son métodos discutidos para reducir la severidad de los accidentes.
- 4) **Limitación de efectos:** Diseño de equipos y condiciones de reacción que limiten los efectos de fallas, cambiar las condiciones de reacción, eliminar equipos peligrosos y/u operaciones peligrosas.
- 5) **Simplificación:** Un proceso más simple siempre es más seguro ya que hay menos dispositivos que pueden fallar y menos oportunidades de errores humanos.
- 6) **Evitación de efectos en cascada:** Restringir la propagación de eventos peligrosos si ha ocurrido un accidente (por ejemplo, establecer cortafuegos, adoptar plantas al aire libre cuando se manipulan materiales inflamables).
- 7) **Hacer imposible un ensamblaje incorrecto:** Evitar una instalación incorrecta o un mal uso mediante el diseño correcto del equipo (por ejemplo, diseñar la entrada y la salida con diferentes tamaños de bridas para evitar el intercambio).
- 8) **Claridad en el estado del sistema:** Permita juzgar el estado de funcionamiento visual y evitar equipos complicados y sobrecarga de información; por ejemplo un

indicador de verificación claramente marcado o tanque de almacenamiento plástico translúcido.

- 9) **Tolerancia al mal uso:** Tolerar una mala instalación u operación sin fallas (por ejemplo, los bucles de expansión son más tolerantes que los fuelles en las tuberías).
- 10) **Facilidad de control:** Seleccionar un proceso con menos requerimiento práctico de control antes de invertir.
- 11) **Control por computadora:** Hacer que el control por computadora sea más práctico (por ejemplo, software más comprensible desarrollado por técnicos que se encuentran igualmente ambientados para el proceso específico y las habilidades de programación).
- 12) **Instrucciones y procedimientos claros:** Hacer que las instrucciones sean concisas, en lugar de cubrir todas las eventualidades imaginables.
- 13) **Amigabilidad con el ciclo de vida:** Incorporar consideraciones de seguridad para la construcción, operación y demolición al diseñar o modificar un proceso.
- 14) **Seguridad pasiva:** Desarrollar mecanismos de seguridad que requieran poco o ningún control externo (por ejemplo, aislamiento contra incendios, protección contra incendios).

Crowl & Louvar (2011) describen las capas de protección para reducir la frecuencia de un escenario de accidente específico; la que se muestra en la figura 5

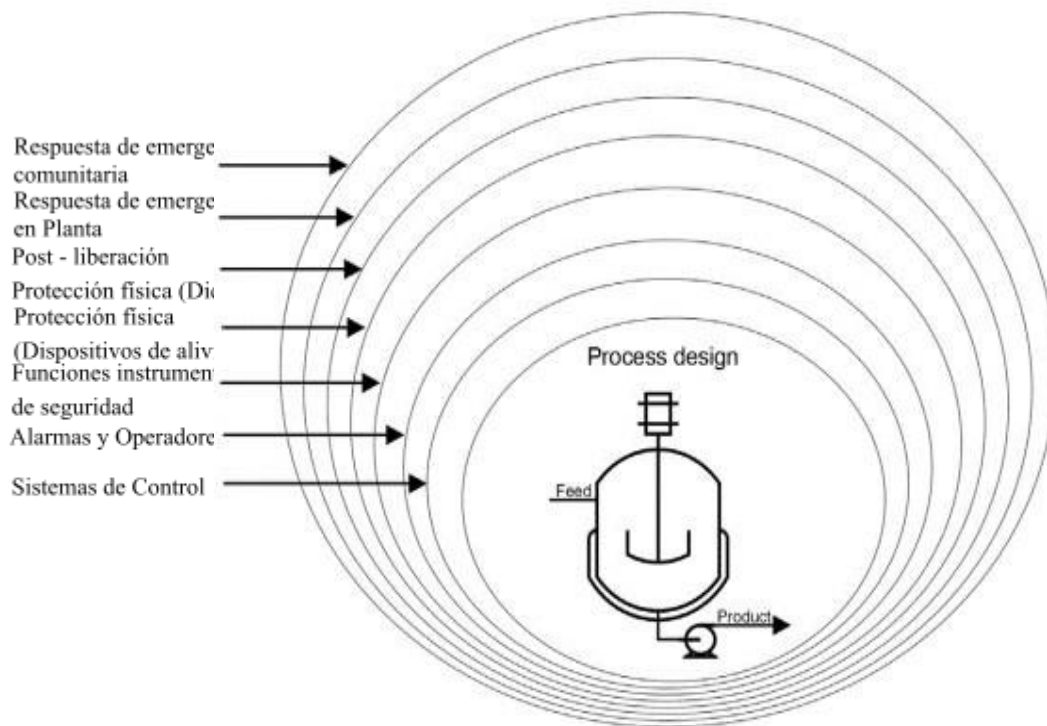


**Figura 5.** Capas de protección para reducir accidentes específicos. De Crowl & Louvar (2011).

Los autores destacan que el objetivo del LOPA (Layer of Protection Analysis) es verificar si hay suficientes capas de protección para prevenir un accidente específico. Cada escenario de accidente puede necesitar una o más capas de protección, dependiendo de la complejidad y el riesgo del proceso. Aunque una sola capa puede ser suficiente para evitar la consecuencia si funciona correctamente, como ninguna capa es infalible, se deben añadir suficientes para reducir el riesgo a un nivel aceptable. El procedimiento de LOPA consta de los siguientes pasos:

- 1) **Identificar una consecuencia** específica.
- 2) **Determinar el escenario de accidente** y su causa (un par causa-consecuencia).
- 3) **Identificar el evento iniciador** y estimar su frecuencia.
- 4) **Enumerar las capas de protección** disponibles y estimar su probabilidad de falla.
- 5) **Combinar la frecuencia del evento iniciador** con las probabilidades de falla para calcular la frecuencia mitigada de la consecuencia.
- 6) **Graficar la consecuencia** frente a la frecuencia para evaluar el riesgo.

- 7) **Evaluar si el riesgo es aceptable;** si no lo es, se deben añadir más capas de protección.

Ruiz-Femenia et al. (2017) proponen una metodología que combina ingeniería de sistemas de procesos con principios de seguridad inherente. Primero, crean una superestructura que incluye diversas alternativas para flujos, equipos y condiciones de proceso, evaluando su rendimiento en términos de indicadores económicos y de seguridad, como el costo anualizado y el índice de incendios y explosiones de Dow. Resuelven este problema multiobjetivo utilizando un conjunto de soluciones de Pareto, que muestra las compensaciones entre los objetivos económicos y de seguridad. Aunque el estudio presenta varias opciones tecnológicas, no aborda todos los pasos metodológicos previamente descritos.

## B) Sostenibilidad

Ruiz-Mercado y Cabezas (2016) abordan la ingeniería y química verde enfocándose en la reducción de sustancias peligrosas y la mejora de la sostenibilidad. Destacan tres puntos clave: el uso de diseños óptimos, el enfoque sistémico y el análisis del ciclo de vida. Este enfoque integral evalúa desde la producción y uso de químicos hasta su eliminación final, utilizando herramientas como la evaluación del ciclo de vida. Los disolventes, aunque esenciales, generan residuos y presentan riesgos ambientales y de salud. El tipo de espacio de reacción afecta la eficiencia del proceso, con el procesamiento continuo siendo más eficiente que el por lotes.

La catálisis es vital en muchos procesos químicos, pero enfrenta desafíos de sostenibilidad. La transición a moléculas renovables y el uso de biocatálisis ofrecen ventajas, como la reducción de reactivos tóxicos. La Intensificación de Procesos (PI) busca minimizar pasos y costos, reduciendo el impacto ambiental y operativos. En general, la sostenibilidad en la industria química implica reducir la contaminación y mejorar la eficiencia para beneficiar al medio ambiente y la sociedad. La tabla 4 resume aspectos tecnológicos a considerar bajo la sostenibilidad. Ruiz-Mercado y Cabezas (2016).

**Tabla 4.** Estado actual y futuro de la manufactura de productos

|                        | Estado actual                                    | Estado futuro                                                             |
|------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>Materias primas</b> | Fuentes de carbono fósiles (p. ej., gas natural, | • El pensamiento sistémico promueve innovaciones que unen las necesidades |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | líquidos de gas natural, petróleo, carbón)                                                                                                                                                                                         | <p>de la sociedad/mercado y los impactos en la salud, la seguridad y el medio ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las materias primas son diversificadas y renovables para evitar el agotamiento de los recursos.</li> <li>• Fuentes de carbono renovables (p. ej., biomasa (p. ej., plantas, árboles, etc.) convertida en azúcares u otras moléculas más simples,</li> <li>• Moléculas estructurales derivadas de organismos unicelulares o multicelulares genéticamente modificados.</li> </ul>                                                                                    |
| <b>Reactivos químicos</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Refinería petroquímica integrada</li> <li>• 120 moléculas estructurales</li> <li>• Rápido agotamiento de elementos fácilmente disponibles y críticos para la sociedad moderna.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biorrefinería integrada</li> <li>• Productos químicos específicos de procesos de fermentación a escala industrial.</li> <li>• Uso de una mayor diversidad molecular</li> <li>• Componentes químicos diversos y renovables más allá de 120 moléculas estructurales</li> <li>• Productos químicos menos peligrosos inherentemente</li> <li>• Diseñar reglas, guías y herramientas disponibles para predecir y optimizar nuevas entidades químicas para lograr un desempeño integrado, costo y ciclo de vida, seguridad, salud e impactos ambientales.</li> </ul> |
| <b>Síntesis química</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformación de productos químicos en estado muy reducido,</li> </ul>                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación de funcionalidad</li> <li>• Reacciones en cascada multicomponente, de un solo recipiente,</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | <p>funcionalización (introducción de heteroátomos como N, S, O, halógenos, etc. en compuestos aromáticos), catalizadores organometálicos utilizando metales del grupo del platino (Pt, Ru, Rh, Pd, etc.), multietapa. rutas sintéticas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de productos químicos ineficientes en masa y energía desarrollados durante los últimos 150 años.</li> </ul> | <p>reacciones de acoplamiento y ciclación, nuevas vías de reacción</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enzimas (biocatálisis)</li> <li>• Productos químicos altamente eficientes que unen transformaciones biológicas y químicas como parte del diseño de rutas sintéticas.</li> <li>• Diseño de rutas sintéticas basado en inteligencia artificial</li> <li>• Desarrollo e implementación de reacciones eficientes en masa y energía.</li> </ul>                                                                                                                                         |
| <b>Procesos</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Petroquímica: gran escala, flujo continuo</li> <li>• Especialidades: plantas químicas polivalentes, reactores discontinuos, etc.</li> <li>• Existe software para escalar desde 1 L hasta varios miles de litros por hora</li> </ul>                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biorrefinería integrada: flujo continuo a gran escala</li> <li>• Especialidades: flujo continuo, micro y minireactores, intercambiadores de calor, mezcladores, etc. numerados para cumplir con los requisitos de volumen</li> <li>• Síntesis bajo demanda utilizando equipos montados sobre patines</li> <li>• Software de diseño de procesos para micro y minirreactores.</li> <li>• Métricas y metodologías de última generación para evaluar la eficiencia de los procesos, los peligros, los riesgos y los impactos en la sostenibilidad.</li> </ul> |

En el capítulo de Vane L. M. (2021), se abordan los problemas en los procesos de separación en la industria química. Los problemas clave incluyen:

- 1) **Destilación:** Muy común debido a su simplicidad y economías de escala, la destilación es ineficiente energéticamente, especialmente para mezclas con puntos de ebullición cercanos. Hay oportunidades para reemplazarla con alternativas más eficientes.
- 2) **Áreas de desafío:** La necesidad de desarrollar métodos de separación más sostenibles y eficientes, especialmente para la recuperación de productos químicos de soluciones diluidas y la separación de compuestos en agua.
- 3) **Alternativas de separación:**
  - **Extracción:** Incluye métodos como la extracción líquido-líquido y la adsorción, que dependen de agentes separadores con características específicas como selectividad y costo.
  - **Procesos basados en membranas:** Estas tecnologías, como la microfiltración y la ósmosis inversa, pueden ser más eficientes energéticamente y útiles para mezclas azeotrópicas. Sin embargo, presentan desafíos como la generación de corrientes de rechazo y la disminución del rendimiento con áreas de membrana incrementadas.
- 4) **Tecnologías híbridas:** Combinar tecnologías emergentes con métodos tradicionales puede mejorar la eficiencia de los procesos de separación y ofrecer mejoras energéticas y operativas.

El enfoque se centra en encontrar alternativas a la destilación y en mejorar la sostenibilidad mediante tecnologías de separación más eficientes.

### C) Moderna

Desarrollar plantas químicas modernas exige un enfoque integral que combine metodologías, estrategias y tecnología. Según Kokossis & Yang (2010), las tecnologías de sistemas tienen un gran potencial para avanzar en el diseño de biorrefinerías, especialmente por el aumento de energías renovables y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las biorrefinerías, que transforman biomasa en combustibles, productos químicos y polímeros, deben igualar la eficiencia de los procesos tradicionales mediante un diseño e integración óptimos. La figura 6 ilustra cómo las

tecnologías de sistemas facilitan el diseño y la integración de procesos, siendo la síntesis y la integración de procesos cruciales para coordinar el análisis a nivel conceptual, antes de estudios detallados. Los métodos termodinámicos y selección de objetivos ayudan a simplificar estos problemas complejos.

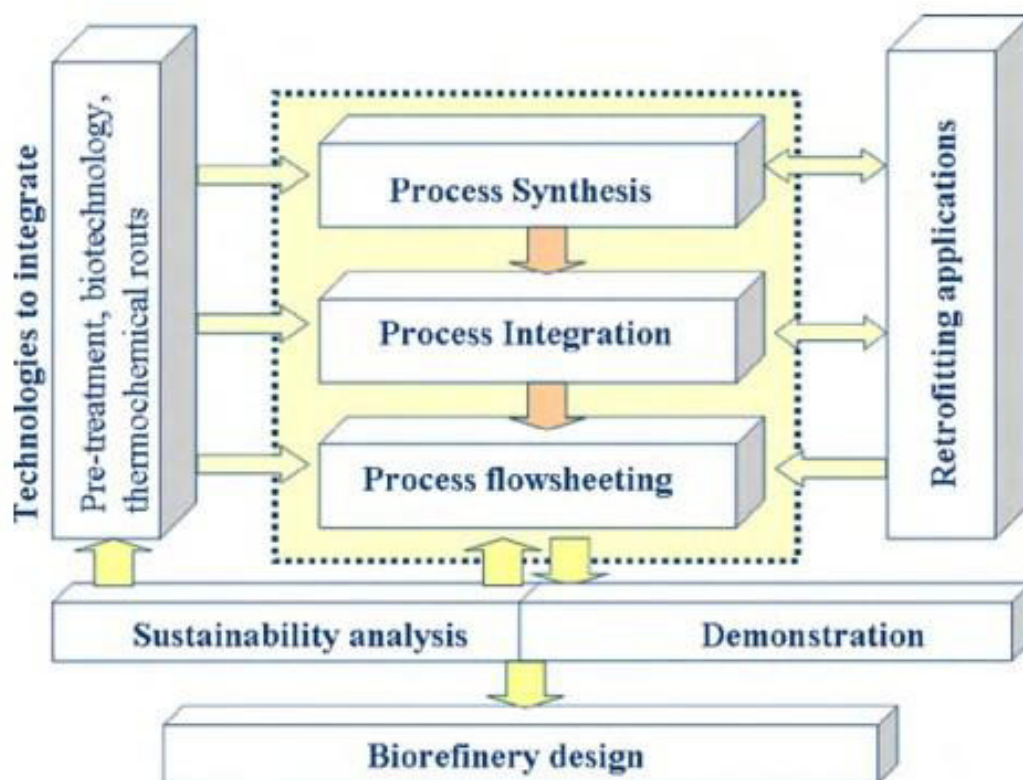


**Figura 6.** Roles de las herramientas de sistemas en el diseño de biorrefinerías. Kokossis & Yang (2010)

Los desafíos incluyen la evaluación de materias primas y rutas de procesamiento, con un enfoque de sistemas apoyando evaluaciones holísticas que aborden incertidumbres del mercado y del proceso. Además, se deben considerar nuevas tecnologías y reingeniería de instalaciones existentes para mejorar la sostenibilidad. La figura muestra un ciclo continuo en el que los procesos se modelan y actualizan, se integran ideas nuevas, y se simulan para evaluar sostenibilidad y conformidad ambiental antes de implementar cualquier proceso.

Kokossis & Yang (2010) argumentan que los estudios tecno-económicos enfrentan una tarea compleja debido a la gran cantidad de datos y dimensiones paralelas, como el potencial de procesamiento de residuos y la viabilidad económica. Los diagramas de flujo básicos son insuficientes si no se combinan con métodos avanzados que integren la producción agrícola, las energías renovables y el procesamiento de biomasa, promoviendo

una agricultura responsable y reduciendo el impacto ambiental. La figura 7 ilustra un enfoque estratificado para abordar estos desafíos, siendo estos niveles de análisis:

- 1) **Escala Estratégica:** Planificación regional y evaluación de rutas de procesamiento, considerando la logística y las carteras de materias primas.
- 2) **Escalas Intermedias:** Desarrollo de diagramas de flujo, definición de productos e integración de unidades.
- 3) **Escalas Detalladas:** Optimización de parámetros unitarios y condiciones de operación.

La integración de modelos de procesamiento y sistemas de producción de biomasa es crucial para una optimización eficiente a lo largo de la cadena de valor. Se sugiere utilizar software de modelado abierto y técnicas avanzadas para explorar tecnologías alternativas y mejorar la coordinación en el diseño y la síntesis de procesos. Este enfoque holístico y multinivel ayuda a estructurar y resolver problemas complejos en las biorrefinerías.

Alvarado-Morales et al. (2010) presentan dos metodologías para el diseño y control de procesos químicos:

- 1) **Metodología IPDC (Integrated Process Design and Controller Design):** Esta metodología busca la estrategia óptima para el diseño y control de procesos. Utiliza los conceptos de **Región Alcanzable (AR)** y **Fuerza Motriz (DF)** para determinar el diseño ideal del reactor y el separador. La metodología identifica el punto máximo en estos diagramas para optimizar el rendimiento de estos equipos.

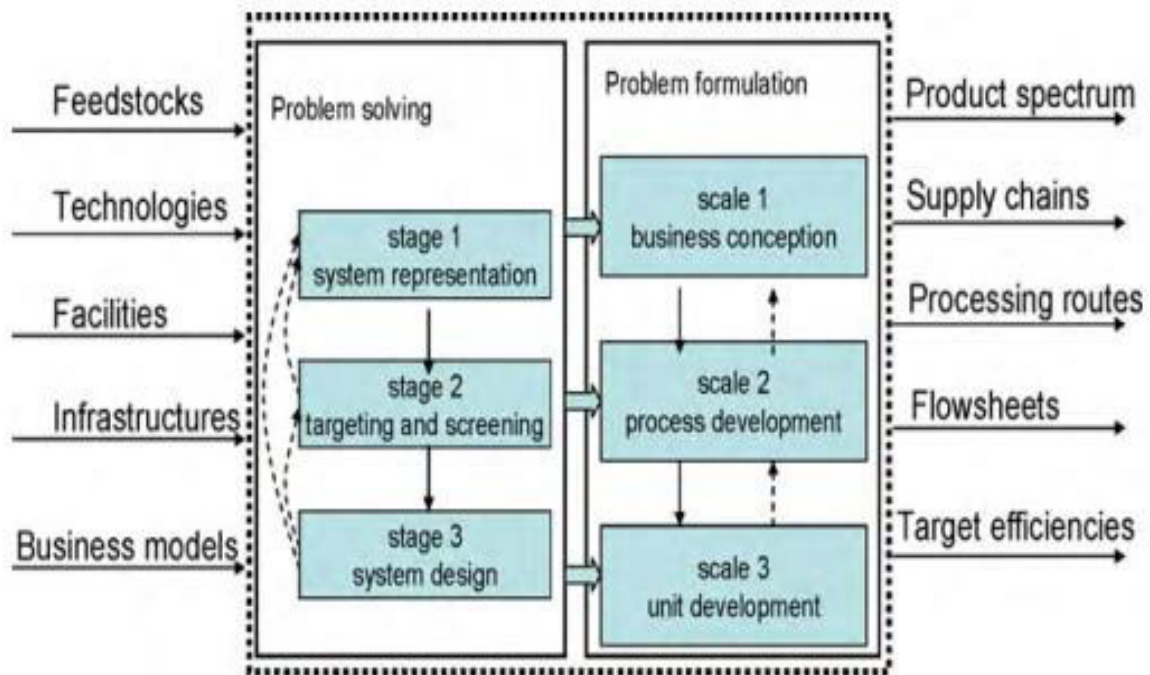


**Figura 7.** Un enfoque de sistemas totales para las biorrefinerías. De Kokossis & Yang (2010).

Las etapas que corresponden a esta estrategia se describen a continuación y en la figura 8.

**Etapas 1:** Análisis previo del producto para definir las necesidades del proceso y establecer un diseño de caso base.

**Etapas 2:** Evaluación del diseño base mediante balances de masa y energía, utilizando simulaciones del proceso.

**Etapas 3:** Identificación de cuellos de botella y establecimiento de objetivos de mejora relacionados con residuos, costos, consumo energético, y control del proceso.

**Etapas 4:** Generación de candidatos de diseño que cumplen los objetivos establecidos. Se utilizan las metodologías IPDC para el diseño y control, y PGC para mejorar el desempeño energético.

**Etapas 5:** Verificación de los candidatos de diseño más prometedores mediante simulación rigurosa, seleccionando el mejor según criterios de rendimiento específicos.

2) **Metodología PGC (Process-Group Contribution):** Se enfoca en mejorar la eficiencia de los diseños de separación al centrarse en la mayor Fuerza Motriz (DF). Aplica un enfoque de contribución de grupos para el diseño de procesos, donde cada grupo de procesos representa una operación unitaria o conjunto de operaciones. Esta

metodología ayuda a generar esquemas de separación más eficientes y a identificar cuellos de botella en la producción, como en el caso del bioetanol.

- **Enfoque:** Se basa en modelos sistemáticos para la optimización de diseño, control y costos, resolviendo un problema de optimización sujeto a restricciones de proceso, constitutivas y condicionales.
- **Proceso:** Se resuelve mediante un enfoque inverso, desglosado en:
  - ▢ **Preamáñis:** Definición de requisitos y restricciones.
  - ▢ **Análisis de Diseño:** Determinación del diseño óptimo.
  - ▢ **Análisis de Controlador:** Diseño y análisis del controlador.
  - ▢ **Selección y Verificación Final:** Validación del diseño y controlador.

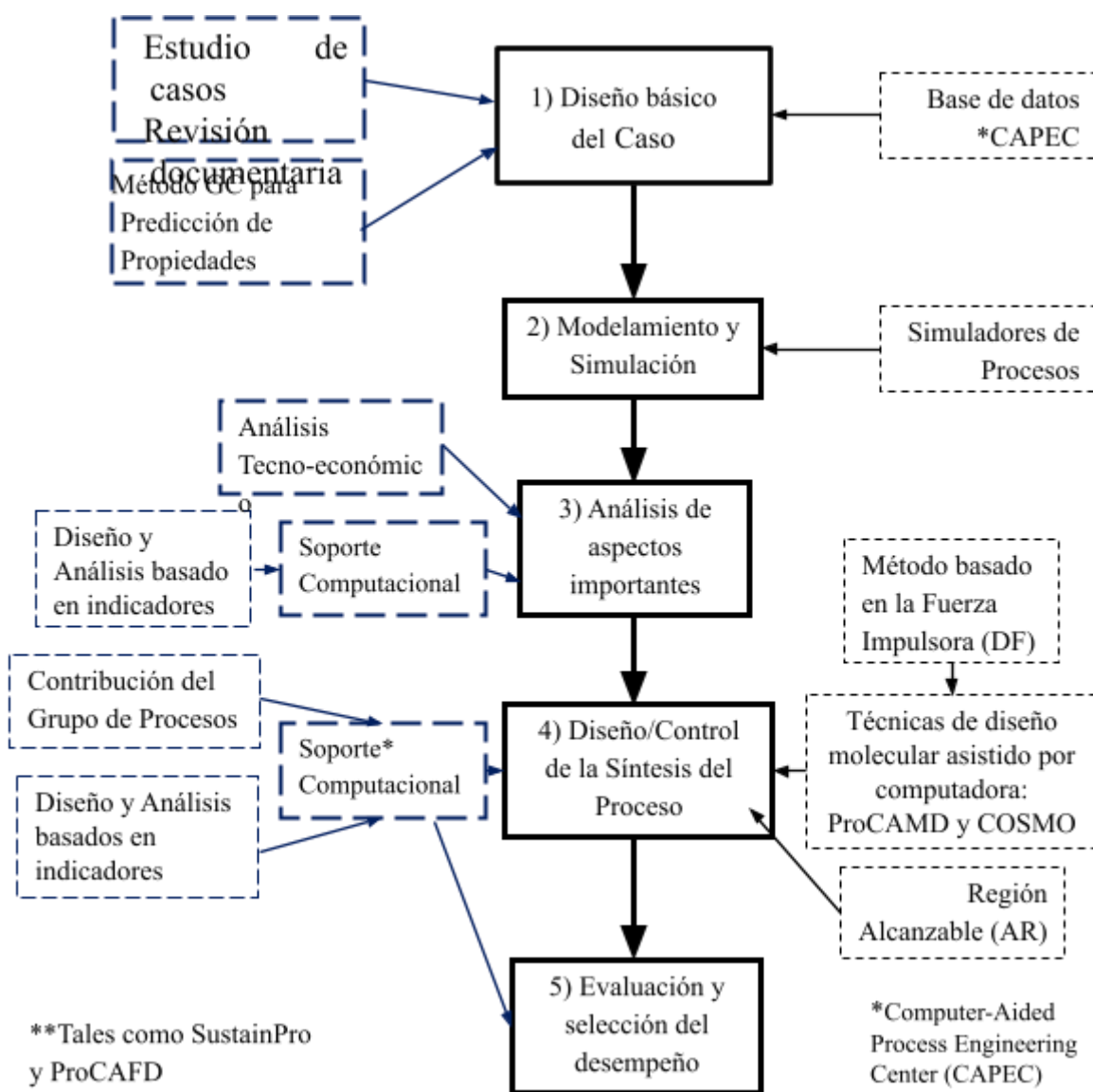


**Figura 8.** Flujo de trabajo del marco-estructural para el diseño y control simultáneos. De Alvarado-Morales et al. (2010).

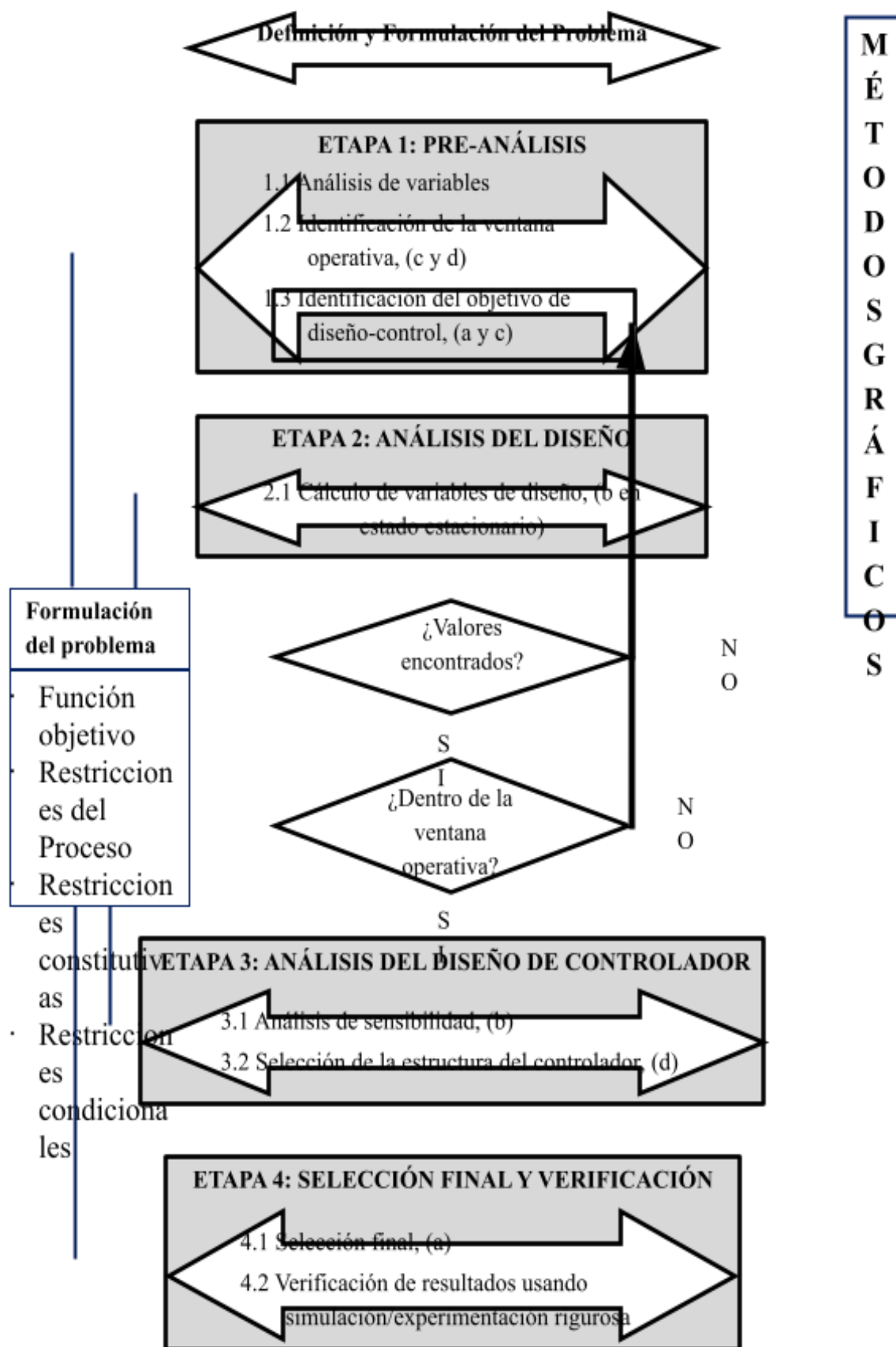


**Figura 9.** Diagrama de flujo de trabajo de la metodología del IPDC. De Hamid et al. (2010).

El uso combinado de IPDC y PGC permite un enfoque integral y optimizado para el diseño y control de procesos químicos, asegurando mejoras tanto en la eficiencia del proceso como en su sostenibilidad. La figura 9 ilustra este flujo de trabajo, mostrando la secuencia de pasos y la resolución de los subproblemas de manera jerárquica.

La Metodología PGC se desarrolla considerando los pasos siguientes:

- **Definición del Problema de Síntesis:** Establecimiento de las restricciones estructurales y la propiedad objetivo del diagrama de flujo.
- **Análisis del Problema de Síntesis:** Incluye el análisis de reacciones necesarias y las propiedades de mezcla/componentes puros.
- **Selección del Grupo de Procesos:** Elección de los grupos de procesos de reacción y separación adecuados.
- **Generación de Candidatos a Diagramas de Flujo:** Combinación de grupos de procesos para crear diagramas de flujo estructurados.
- **Clasificación/Selección de Candidatos:** Evaluación de los diagramas de flujo generados según la propiedad objetivo.
- **Simulación Inversa:** Resolución de balances de masa y cálculo de parámetros de diseño usando simulación inversa.
- **Verificación Final:** Validación rigurosa del diseño con toda la información disponible.

La figura 10 muestra los siete pasos de la metodología PGC, detallando el flujo del proceso desde la definición del problema hasta la verificación final del diseño. Se usan los siguientes métodos o herramientas:

- **ProPred:** Herramienta para estimar propiedades químicas.
- **ProCAMD:** Técnica de diseño molecular asistida por computadora para diseñar moléculas a múltiples niveles.
- **CAPSS:** Herramienta para crear diagramas de flujo de procesos usando un enfoque jerárquico.
- **TML/TMS:** Bibliotecas para modelos termodinámicos y sistemas de disolventes termomórficos.
- **ProCAFD:** Software para el diseño de procesos sostenibles.
- **PDS:** Sistema para la entrega de proyectos.
- **PROII:** Simulador de procesos.

Ambas metodologías proporcionan enfoques sistemáticos para mejorar el diseño y la eficiencia de los procesos químicos, con IPDC enfocándose en el diseño y control integrados, y PGC en la síntesis de procesos mediante la combinación y evaluación de grupos de procesos.

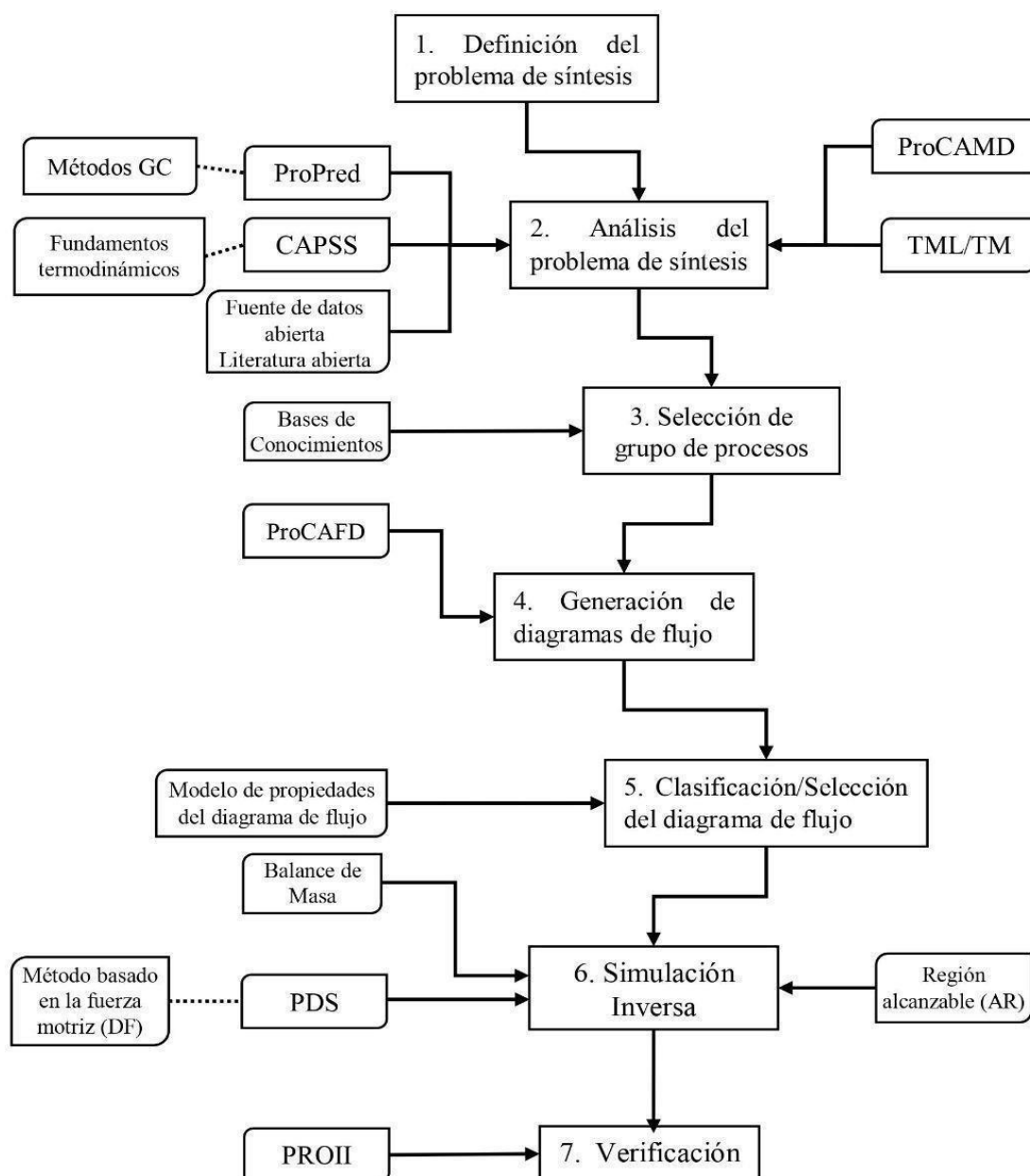


**Figura 10.** Flujo de trabajo del marco estructural para el diseño y control simultáneos.

Basado en De Alvarado-Morales et al. (2010).

#### D) Flexibilidad

Luo et al. (2022) destacan la importancia de la flexibilidad operativa en el diseño de procesos químicos para adaptarse a incertidumbres como cambios en el mercado y

políticas ambientales. Inicialmente, la flexibilidad se centraba en plantas de procesamiento por lotes debido a su capacidad para adaptarse a demandas variables y cambios en productos. Con el tiempo, se ha ampliado para incluir aspectos comerciales, de seguridad y ambientales, reflejando la necesidad de una mejor integración de la flexibilidad con el diseño técnico y la sostenibilidad.

#### **Definición y Tipos de Flexibilidad:**

- **Flexibilidad Operativa:** Capacidad de una planta para operar en un rango de condiciones variables.
- **Flexibilidad de Proceso:** Adaptabilidad del proceso para manejar perturbaciones y cambios en las condiciones.

#### **Tipos de Flexibilidad (Tabla 5):**

- **Flexibilidad de Materia Prima:** Manejo de variaciones en las materias primas, incluyendo la capacidad para utilizar diferentes tipos de materias primas o mezclar varias.
- **Flexibilidad del Producto:** Capacidad para ajustar las características del producto final, como diferentes calidades o tipos de productos.
- **Flexibilidad de Volumen:** Ajuste en la producción para manejar cambios en la demanda o disponibilidad de materias primas.
- **Flexibilidad de Programación:** Ajuste en la programación de producción para adaptarse a cambios en la demanda o condiciones operativas.
- **Flexibilidad de Producción:** Capacidad para cambiar entre diferentes esquemas de producción según las necesidades.

Estos tipos de flexibilidad permiten a las plantas químicas adaptarse a diversas incertidumbres y mejorar la eficiencia operativa, la sostenibilidad y la capacidad de respuesta ante cambios del mercado.

**Tabla 5.** Clasificación de los tipos de flexibilidad y sus respectivas estrategias conceptuales y de diseño.

| <b>Tipo</b>   | <b>Concepto</b>                                                                             | <b>Método de diseño</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Materia Prima | Capacidad de manejar cambios en las cantidades y/o calidades de los materiales que ingresan | (i) implementar diferentes esquemas de producción para producir diferentes tipos de productos<br>(ii) mezclar diferentes tipos de materias primas<br>(iii) seleccionar y/o diseñar el equipo que pueda lidiar con las variaciones en la calidad de la materia prima<br>(iv) instalar unidad(es) de amortiguación para regular las fluctuaciones en la calidad de la materia prima.                                                                                  |
| Producto      | Capacidad de cambiar las calidades de los materiales que salen                              | (i) seleccionar rutas sintéticas que produzcan inherentemente múltiples productos<br>(ii) implementar diferentes esquemas de producción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Volumen       | Capacidad de variar el rendimiento                                                          | (i) seleccionar y/o diseñar (en términos de función) equipo que pueda lidiar con las variaciones en el rendimiento<br>(ii) seleccionar y/o diseñar equipo (en términos de capacidad) que cumpla con amplios requisitos de carga<br>(iii) instalar unidades de amortiguación para desacoplar unidades con variaciones en el rendimiento de unidades operadas de manera constante<br>(iv) instalar unidades paralelas o líneas de proceso<br>(v) programación robusta |
| Programación  | Capacidad de ajustar la asignación de recursos para diferentes ciclos de producción         | (i) equipo de gran tamaño<br>(ii) instalar unidades o líneas de proceso iguales en paralelo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

---

|            |                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Producción | Capacidad de cambiar para implementar otro esquema de producción | (i) seleccionar y/o diseñar equipo que pueda manejar materiales de entrada con diferentes calidades y/o producir materiales de salida con diferentes calidades<br>(ii) seleccionar y/o diseñar esquemas de producción y equipo que se puedan encender/apagar a pedido |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

---

## E) Eficiencia

La energía es uno de los mayores gastos operativos en las empresas, superado solo por el costo de las materias primas. Las inversiones en infraestructura y diseño de equipos suelen estar influenciadas por los costos de energía previstos. Además, las regulaciones ambientales están imponiendo multas por las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con el uso de combustibles fósiles.

Con el creciente uso de energías renovables como solar, eólica e hidroeléctrica, los procesos que requieren mucha electricidad deben adaptarse a la variabilidad en la oferta y los precios de estas fuentes. También deben buscar maneras de reducir costos, como participar en programas de respuesta a la demanda (DR) y utilizar electricidad para calentar procesos.

Desde el principio, se ha entendido que para maximizar los beneficios del Control Predictivo basado en Modelos (MPC), es crucial optimizar en tiempo real los ajustes del controlador. Esta optimización, conocida como RTO (Real-Time Optimization), busca mejorar un objetivo económico ajustando continuamente los puntos de ajuste del MPC.

$$\begin{aligned} \min \quad & V(u_{usp, xsp}, x_{sp}) \\ \text{s. a. } \quad & 0 = f_{RTO}(u_{sp}, x_{sp}), (u_{sp}, x_{sp}) \in \end{aligned} \quad \begin{aligned} (1) \\ (2) \end{aligned}$$

Donde las variables de decisión  $u_{sp}$  y  $x_{sp}$  son los ajustes proporcionados al MPC. A diferencia del MPC, que utiliza un modelo dinámico y generalmente lineal, el modelo  $f_{RT}$  empleado en RTO es generalmente no lineal y de estado estacionario. Bajo la estructura de dos niveles RTO-MPC, los datos relevantes en tiempo real (como precios y/o calidad de materias primas y servicios públicos) y los objetivos económicos globales de la planta informan los puntos de ajuste hacia los cuales el MPC debe dirigir el proceso. La combinación de RTO y MPC lineal es actualmente el estándar en la industria para el control avanzado de sistemas multivariables, aunque persisten brechas significativas entre la literatura académica y su aplicación industrial. Un ejemplo de esto es el desarrollo relativamente reciente de RTO utilizando modelos dinámicos.

A pesar de los factores económicos, la eficiencia energética ha cobrado mayor importancia pública y política debido a la preocupación por la escasez de combustibles fósiles y el impacto del CO<sub>2</sub> en el cambio climático. En lugar de centrarse en la reducción general del consumo energético, en Estados Unidos y en otras partes del mundo se han priorizado las soluciones tecnológicas que hacen que los procesos y productos sean más

eficientes en el uso de energía. En términos generales, la eficiencia energética implica consumir menos energía para obtener la misma cantidad de bienes o productos útiles.

$$\text{Eficiencia energética} = \frac{\text{resultado útil de un proceso}}{\text{entrada de la energía de un proceso}} \quad (3)$$

## F) Rentabilidad

La estimación de costos es crucial para el diseño y viabilidad de plantas químicas. Los ingenieros necesitan realizar estimaciones rápidas para comparar diseños y evaluar proyectos. Estas estimaciones se dividen en tres categorías:

- 1) Estimaciones Preliminares ( $\pm 30\%$  de precisión): Usadas en estudios iniciales para evaluar la viabilidad general del proyecto con datos limitados.
- 2) Estimaciones Presupuestarias ( $\pm 10\text{-}15\%$  de precisión): Utilizadas para autorizar fondos y cubrir posibles costos imprevistos, basadas en un diseño preliminar y datos de proyectos similares.
- 3) Estimaciones Detalladas ( $\pm 5\text{-}10\%$  de precisión): Empleadas para el control de costos y contratos a precio fijo, basadas en diseños casi completos y cotizaciones firmes.

### • Capital fijo

Cubre el costo total para que la planta esté operativa, incluyendo diseño, equipos, construcción y servicios. Es un gasto único y no recuperable, excepto por materiales reciclables. El capital de trabajo es la inversión adicional necesaria para operar la planta hasta generar ingresos, cubriendo costos de inicio, materias primas e inventarios. Varía del 5% al 30% del capital fijo, dependiendo del tipo de proceso.

### • Inflación

Los métodos actuales de estimación de costos usan datos históricos para prever costos futuros. Para ajustar datos antiguos y estimar costos en la fase de diseño, se utilizan índices de costos publicados, que actualizan los datos históricos comparando costos actuales con pasados, basándose en información gubernamental sobre mano de obra, materiales y energía.

$$\text{Costo en el año } A = \text{Costo en el año } B \times \left( \frac{\text{Índice de costos en el año } A}{\text{Índice de costos en el año } B} \right) \quad (4)$$

Un índice para la industria química es expuesto por Anon (2004). Este índice se calcula de la siguiente manera:

$$C = 0.45E_q + 0.1C_i + 0.19C_n + 0.26D_i \quad (5)$$

Donde

- o  $C$  = índice compuesto,
- o  $E_q$  = índice del costo equivalente
- o  $C_i$  = índice de ingeniería civil,
- o  $C_n$  = índice de ingeniería en el sitio,
- o  $D_i$  = índice de diseño.

El año base del índice se actualiza aproximadamente cada cinco años, siendo enero de 2000 = 100 la base actual; Según Anon (2002) es importante tener cuidado al ajustar los costos en períodos que incluyen un cambio en el año base del índice. La evolución del índice según este autor para en un período de diez años (de enero a enero) se ilustra en la figura 11.

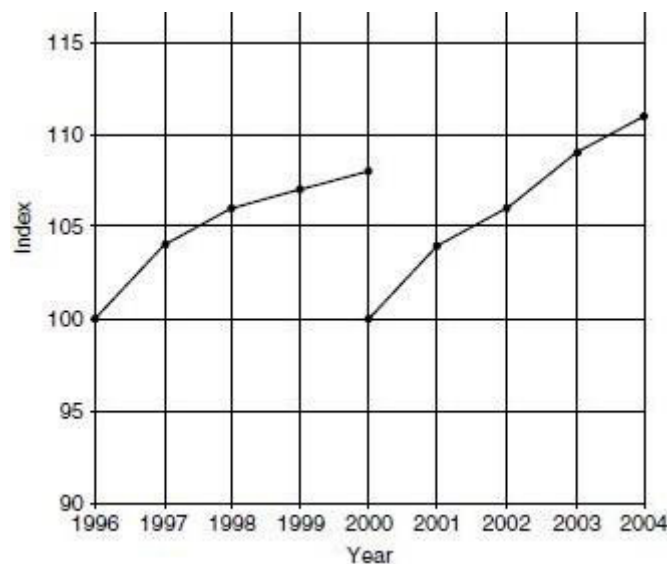


**Figura 11.** Índice de Ingeniería de Procesos a lo largo de los años. Anon (2004).

Es fundamental usar los índices de costos con precaución y criterio, ya que no reflejan necesariamente la estructura exacta de los costos para equipos o plantas específicas, ni el impacto de la oferta y demanda en los precios. A medida que aumenta el período de correlación, la estimación se vuelve menos precisa. Entre 1970 y 1990, los precios subieron significativamente, pero desde entonces el incremento anual ha disminuido a alrededor del 2 al 3 por ciento. Para prever el costo futuro de una planta, es necesario estimar la tasa futura de inflación anual, lo cual se puede hacer extrapolando uno de los índices publicados y ajustando según la evaluación del ingeniero sobre las

condiciones futuras. La evolución del índice CPE durante un período de diez años se muestra en la Figura 12. Una versión más actualizada se presenta en el anexo 3.

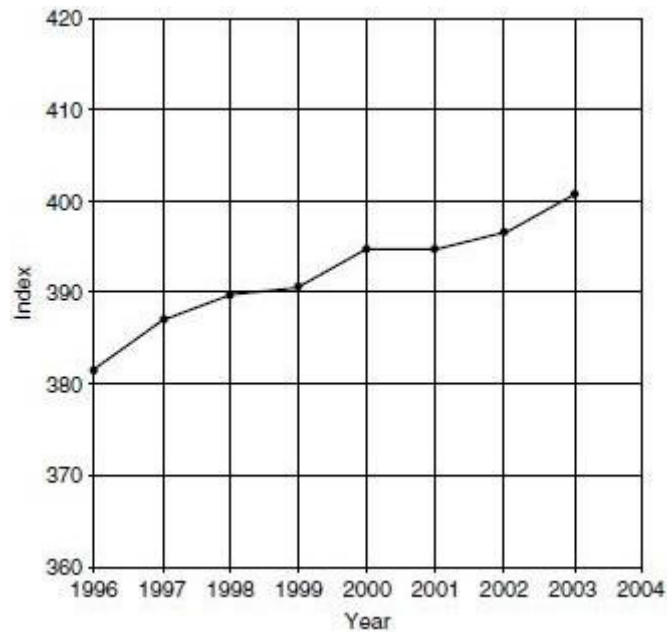


**Figura 12.** Índice de Costos de Plantas Químicas (CPE de sus siglas en inglés). Anon (2004).

- **Métodos de estimación rápida del costo de capital**

Se puede obtener una estimación preliminar del costo de capital de un proyecto basándose en el costo de proyectos similares que usen el mismo proceso de fabricación. Este enfoque es útil antes de desarrollar los diagramas de flujo, ya que proporciona una rápida evaluación de la inversión necesaria. La relación entre el costo de capital de un proyecto y su capacidad se describe mediante la ecuación:

$$C_2 = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^n \quad (6)$$

Donde  $C_2$  es el costo del capital de proyecto con capacidad  $S_2$ , dado  $S_1$  para un costo  $C_1$ .

El valor del índice  $n$  se toma tradicionalmente como 0.6, la conocida regla de los seis dieciseisavos. Este valor se puede usar para obtener una estimación aproximada del costo de capital si no se dispone de suficientes datos para calcular el índice para el proceso específico.

- **Métodos de conteo de pasos**

Los métodos de estimación por conteo de pasos permiten una rápida estimación del costo de capital de un proyecto. Se basa en la idea de que el costo se determina por los pasos significativos en el proceso general. Incluye factores como capacidad, complejidad, material de construcción, rendimiento, presión y temperatura. Bridgwater (1988) ofrece una correlación sencilla para plantas de procesos líquidos y sólidos, ajustada a precios de 2004, para capacidades de planta inferiores a 60,000 toneladas por año.

$$C = 150000 \left( \frac{Q}{s} \right)^n \quad (7)$$

Donde

- o  $C$  = Costo de capital en libras esterlina
- o  $N$  = Número de unidades funcionales
- o  $s$  = conversión del reactor
- o  $Q$  = capacidad del reactor ton/año

La conversión del reactor se define como:

$$s = (\text{masa deseada reactor} / \text{entrada reactor}) \quad (8)$$

#### ● Método factorial de estimación de costos

Factores de Lang: El costo de capital fijo del proyecto se determina como una función del costo total de los equipos comprados mediante la ecuación:

$$C_f = f_L C_B \quad (9)$$

Donde

- o  $C_f$  = costo de capital fijo
- o  $C_e$  = el costo total entregado de todos los equipos principales, como tanques de almacenamiento, reactores, columnas e intercambiadores de calor.
- o  $f_L$  = factor de Lang el cual depende del tipo de proceso
  - $f_L = 3.1$  para plantas que procesan principalmente sólidos
  - $f_L = 4.7$  para plantas que procesan principalmente fluidos
  - $f_L = 3.1$  para plantas que procesan principalmente sólidos-fluidos.

#### ● Estimaciones factoriales detalladas

Para obtener una estimación más precisa, se consideran individualmente los factores de costo que se incluyen en el "factor Lang". Los costos directos asociados con la construcción de una planta, además del costo de los equipos, se dividen en "Costos Directos + Costos Indirectos".

**Tabla 6.** Factores típicos para la estimación del costo fijo de capital del proyecto. Basada en Smith R. (2023).

| Item                                            | Tipo de proceso |               |        |
|-------------------------------------------------|-----------------|---------------|--------|
|                                                 | Fluidos         | sólido-fluido | sólido |
| 1. Costo Total de Compra del Equipo Principal   | PCE             | PCE           | PCE    |
| $f_1$ Montaje de equipo                         | 0.4             | 0.45          | 0.5    |
| $f_2$ tubería                                   | 0.7             | 0.45          | 0.2    |
| $f_3$ instrumentación                           | 0.2             | 0.15          | 0.1    |
| $f_4$ eléctrico                                 | 0.1             | 0.10          | 0.1    |
| $f_5$ edificios de proceso                      | 0.15            | 0.10          | 0.05   |
| $f_6$ utilidades                                | 0.50            | 0.45          | 0.25   |
| $f_7$ almacenamiento                            | 0.15            | 0.20          | 0.25   |
| $f_8$ desarrollo del sitio                      | 0.05            | 0.05          | 0.05   |
| $f_9$ edificios auxiliares                      | 0.15            | 0.20          | 0.30   |
| 2. Costo Físico total de la planta (PPC)        |                 |               |        |
| $PPC = PCE (1 + f_1 + \dots + f_9) = PCE \cdot$ | 0.34            | 3.15          | 2,8    |
| $f_{10}$ diseño en ingeniería                   | 0.3             | 0,25          | 0,2    |
| $f_{11}$ horario de contratistas                | 0.5             | 0.5           | 0.5    |
| $f_{12}$ contingencias                          | 0.1             | 0.1           | 0.1    |

$$\text{Capital fijo} = \text{PPC} (1 + f_{10} + f_{11} + f_{12}) = \text{PPC} \times \begin{matrix} 1.45 & 1.40 & 1.35 \end{matrix}$$


---

### 2.1.7 Modularización

El análisis del valor presente neto (VPN) aplicado a las plantas químicas modulares demuestra que este diseño ofrece ventajas económicas significativas frente a las plantas tradicionales de gran escala, especialmente para productos de rápido crecimiento o demandas volátiles. Las plantas modulares están compuestas por módulos autónomos que permiten una mayor flexibilidad y adaptabilidad a los cambios del mercado. Aunque pierden ciertas economías de escala, reducen los tiempos de desarrollo, permiten ajustes rápidos en capacidad y generan ingresos más tempranos, lo cual es ideal para mercados inciertos y con ciclos de vida cortos (Lier y Grünewald, 2011).

Asimismo, el enfoque modular aborda la complejidad de planificación y escalado en la industria química al ofrecer estructuras reutilizables y estándares que optimizan la operación y el mantenimiento. Aunque presentan costos iniciales de inversión más altos por unidad, estas plantas compensan con su flexibilidad operativa y retorno a largo plazo, haciéndolas competitivas frente a los diseños tradicionales (Lier y Grünewald, 2011).

Además, el diseño modular permite una planificación táctica en redes de producción descentralizadas, optimizando la ubicación y el volumen de plantas químicas en función de demandas dinámicas. Este concepto incluye la posibilidad de reubicar plantas y reconfigurar módulos de procesos para adaptarse a cambios en el mercado, incrementando así la capacidad de respuesta y reduciendo costos de almacenamiento y transporte (Becker et al., 2019).

Además, las plantas modulares son ideales para productos especializados y de bajo volumen, permitiendo una mayor proximidad a clientes y una personalización más eficiente. Estas características fomentan una orientación al cliente y una competitividad elevada en mercados altamente dinámicos, representando una transición estratégica desde la producción centralizada tradicional hacia una más distribuida y flexible (Becker et al., 2019).

Por otro lado, la modularidad y la flexibilidad son pilares fundamentales para modernizar la producción química. Las plantas modulares facilitan la transición hacia diseños más adaptables que permiten la producción de múltiples productos en un mismo

espacio. Esto elimina la necesidad de grandes inversiones en infraestructura fija y reduce los riesgos asociados a fluctuaciones en el mercado (Bieringer et al., 2016).

Por último, Las plantas modulares generan beneficios económicos al reducir costos operativos, optimizar el consumo de recursos y generar ingresos en etapas tempranas del ciclo de vida del producto. Desde una perspectiva ambiental, fomentan la integración de tecnologías limpias y la minimización de residuos, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad (Grünewald et al., 2016).

En mercados emergentes con demandas volátiles y recursos limitados, las plantas modulares se posicionan como una solución escalable y eficiente. Ofrecen una opción competitiva que aborda tanto los desafíos ambientales como las oportunidades económicas de la industria química (Grünewald et al., 2016).

### 2.1.8 Evaluación Económica

Durante el desarrollo de un diseño, se realiza una evaluación de rentabilidad mediante proyecciones de flujos de efectivo a lo largo de la vida del proyecto. La Figura 13 muestra un patrón típico de flujo de efectivo acumulado:

- Punto A: Inicio del proyecto con gastos iniciales sin retorno inmediato, causando una disminución en el flujo de efectivo.
- Punto B: Aumento en los gastos debido a la inversión en infraestructura y equipo, llevando el flujo de efectivo a un nivel más bajo.
- Punto C: Continuación de la inversión con el capital de trabajo para iniciar la planta.
- Punto D: Inicio de la producción, generando ingresos y elevando el flujo de efectivo.
- Punto F: Equilibrio alcanzado, donde los ingresos igualan los costos.
- Punto G: Final del proyecto con posibles disminuciones en el flujo de efectivo debido a mayores costos o competencia.
- Punto H: Conclusión del proyecto, con ingresos finales potenciales de recuperación de capital o costos de descontaminación.

Esta curva de flujo de efectivo acumulado proporciona una base para una evaluación detallada usando índices cuantitativos; las que se describen a continuación.

- A) **Plazo de Recuperación (*Payback*):** El tiempo de recuperación mide el periodo desde el inicio del proyecto hasta que se alcanza el equilibrio. Un tiempo de

recuperación más corto indica un proyecto más atractivo. Se calcula según el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial utilizando el flujo de efectivo anual promedio. En proyectos de remodelación, se basa en el tiempo necesario para recuperar la inversión de capital a través de las mejoras anuales en los costos operativos.

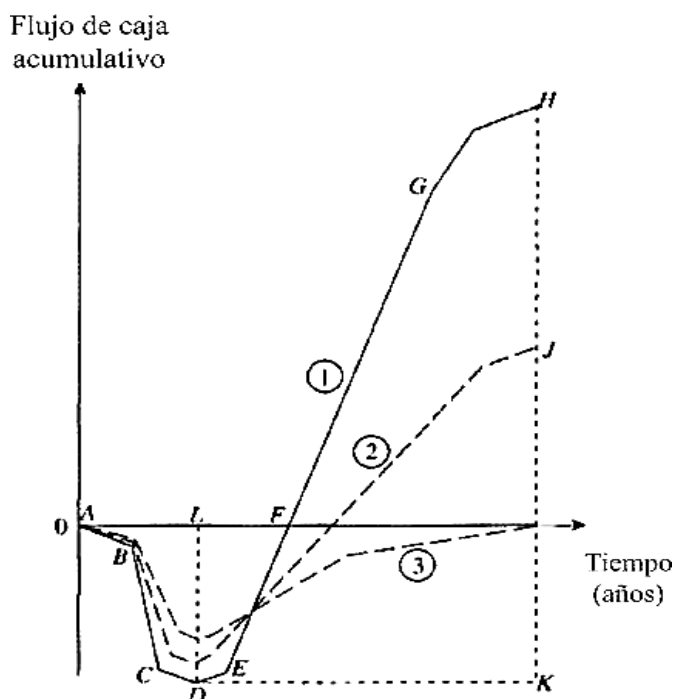


**Figura 13.** Patrón de flujo de caja para un proyecto típico. De Allen D. H. (1980).

- B) **Retorno sobre la inversión (ROI):** El Retorno sobre la Inversión (ROI) mide la relación entre el ingreso anual promedio y la inversión inicial, expresado en porcentaje. A diferencia del ROI y el Tiempo de Recuperación, que solo consideran aspectos específicos del flujo de efectivo acumulativo, el Valor Presente Neto (VPN) y el Retorno de Flujo de Efectivo Descontado proporcionan una evaluación más completa al considerar el patrón cambiante del flujo de efectivo y el valor temporal del dinero.

$$ROI = \frac{KH}{KD} \times \frac{100}{LD} \% \text{ por año} \quad (10)$$

- C) **Valor presente neto (VPN):** Dado que el dinero puede ser invertido para ganar interés, el dinero recibido ahora tiene un valor mayor que el dinero recibido en algún momento en el futuro. El valor presente neto de un proyecto es la suma de los

valores presentes de cada flujo de efectivo individual. En este caso, el presente se toma como el inicio del proyecto.

El tiempo se tiene en cuenta descontando el flujo de efectivo anual (ACF) con la tasa de interés para obtener el flujo de efectivo anual descontado (ADCP). Así, al final del año 1

$$A_{DCF1} = \frac{A_{CF1}}{(1+i)} \quad (11)$$

al final del año 2

$$A_{DCF2} = \frac{A_{CF2}}{(1+i)^2} \quad (12)$$

y al final del año  $n$

$$A_{DCFn} = \frac{A_{CFn}}{(1+i)^n} \quad (13)$$

La suma de los flujos de efectivo anuales descontados durante  $n$  años, es conocida como el valor presente neto ( $VPN = \sum A_{DCF}$ ) del proyecto

$$VPN = \sum_{i=1}^n A_{DCFi} \quad (14)$$

El valor del  $VPN$  depende directamente de la elección de la tasa de interés fraccionaria  $i$  y  $n$  de la duración del proyecto. La curva de flujo de efectivo acumulativo para un proyecto y el efecto del descuento se muestra en la Figura 1. La Curva 1 es la curva original sin descuento, es decir,  $i = 0$ , y el  $VPN$  del proyecto es igual a la posición neta de efectivo final dada por H. La Curva 2 muestra el efecto del descuento a una tasa de interés fija, y el  $VPN$  del proyecto correspondiente se da en J. La Curva 3 en la Figura 1 muestra una tasa de interés mayor, pero se elige de tal manera que el  $VPN$  sea cero al final del proyecto. Cuanto mayor sea el  $VPN$  positivo de un proyecto, más económicamente atractivo será. Un proyecto con un  $VPN$  negativo no es una propuesta rentable.

### 2.1.9 Criterios de Inversión

El análisis económico es crucial en todas las etapas de un proyecto, ya que las decisiones de avance dependen de criterios económicos clave. En un mercado eficiente, el capital debería estar disponible si los rendimientos son adecuados. Los criterios fundamentales para la toma de decisiones incluyen:

- **Valor Actual Neto (VAN):** Mide la ganancia total del proyecto, pero no muestra la eficiencia del uso del capital.
- **Tasa Interna de Retorno Financiero (TIRF):** Indica la tasa de retorno del proyecto, pero no revela su competitividad.

Para maximizar la ganancia, se deben seleccionar los proyectos con el VAN más alto, ya que esto no siempre coincide con la TIRF más alta. Un proyecto con una TIRF más baja, pero una mayor inversión podría tener un VAN mayor que otro con una TIRF más alta y una inversión menor. El VAN es útil para comparar proyectos con diferentes niveles de inversión.

$$VAN_{\text{Eficiencia de Inversión}} = \frac{PVN}{\text{Capital Invertido}} \quad (15)$$

Predecir los flujos de efectivo futuros de un proyecto es complejo debido a incertidumbres como la duración del proyecto y la tasa de interés. La aceptabilidad de la tasa de retorno, como la TIRF, varía según el riesgo del proyecto y la política de inversión de la empresa.

Para asegurar una evaluación precisa, es crucial realizar un análisis de sensibilidad que examine cómo afectan los errores en los supuestos, como los costos de capital, los retrasos, los cambios en costos y precios, y la demanda del mercado. Aunque no se puede obtener certeza absoluta, el análisis económico con supuestos consistentes permite comparar proyectos y tomar decisiones basadas en la estrategia empresarial, como priorizar ciertos mercados o inversiones.

#### 2.1.10 Nivel de Preparación Tecnológica (TRL)

Mide el avance de una tecnología desde su concepto inicial hasta su implementación comercial. En las Industrias de Procesos Químicos (CPI), el desarrollo de tecnología sigue un enfoque escalonado para gestionar la incertidumbre en requisitos técnicos, desempeño del proceso y costos. Cada etapa busca validar y avanzar el TRL, requiriendo más capital a medida que la tecnología se desarrolla.

Un ejemplo de este proceso es el siguiente:

- 1) **Investigación básica:** Entender los principios fundamentales de la tecnología (TRL 1).
- 2) **Identificación de aplicaciones:** Analizar posibles aplicaciones prácticas (TRL 2).

- 3) **Estudios de laboratorio:** Validar predicciones con experimentos y simulaciones a nivel de componentes (TRL 3).
- 4) **Integración en laboratorio:** Ensamblar componentes a escala de laboratorio y comparar resultados con expectativas (TRL 4).
- 5) **Pruebas a escala de laboratorio:** Integrar componentes en un sistema que simula las condiciones de uso final (TRL 5).
- 6) **Prototipo a escala de ingeniería:** Construir y probar un modelo a escala de ingeniería en condiciones industriales simuladas (TRL 6).
- 7) **Prototipo a escala real:** Completar el diseño y construir un prototipo a tamaño real para pruebas iniciales (TRL 7).
- 8) **Operación en caliente:** Poner en marcha y operar el prototipo a escala real (TRL 8).
- 9) **Operación continua:** Funcionamiento continuo del sistema en condiciones reales (TRL 9). La figura 14 presenta la progresión típica de un proyecto CPI, desde las investigaciones iniciales de una idea hasta la puesta en servicio y operación de una instalación.

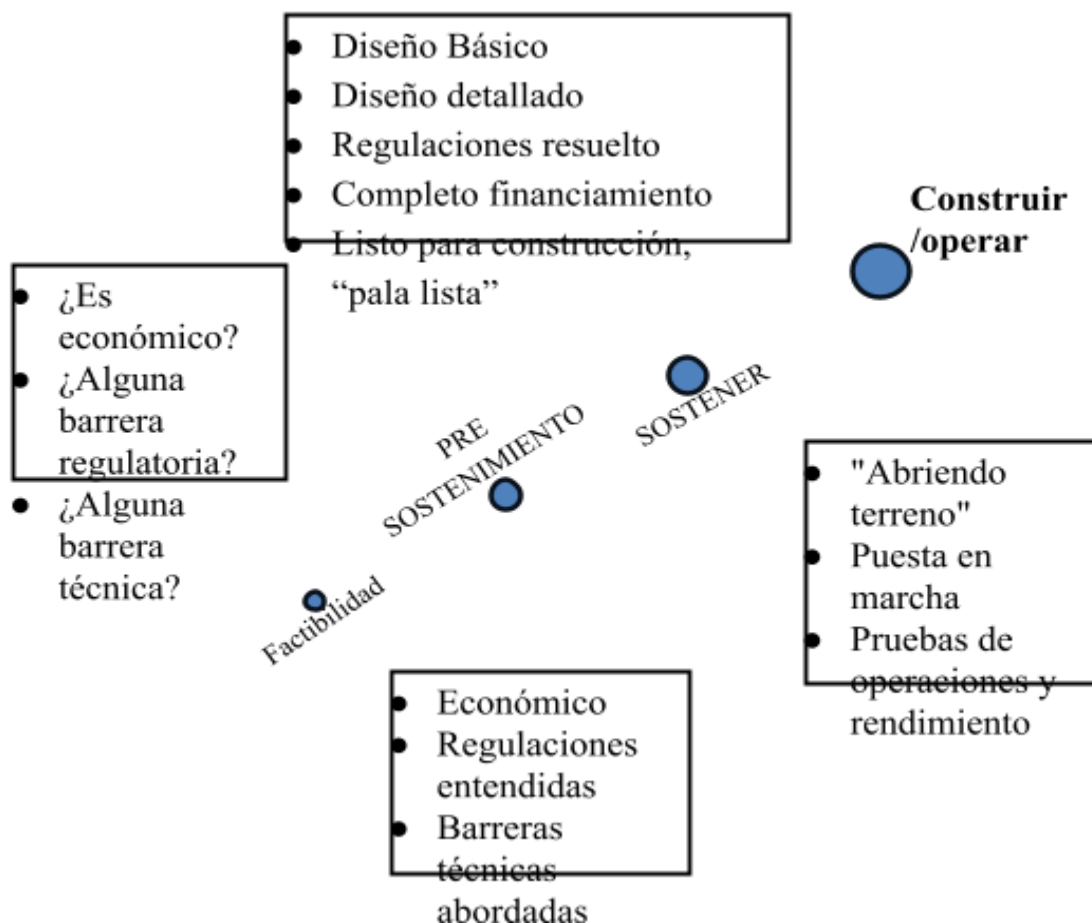


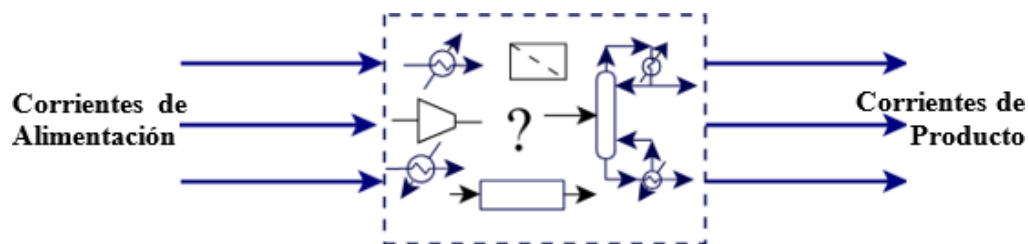
**Figura 14.** Diagrama esquemático de una progresión típica de un proyecto de CPI. De Giardinella et al. (2024).

El Plan de Maduración Tecnológica (TMP) es un documento estratégico diseñado para guiar el avance de una tecnología desde su nivel actual de preparación (TRL) hasta su comercialización. Este plan divide la tecnología en subsistemas o componentes, evaluando el TRL de cada uno para identificar el trabajo necesario y coordinar con el equipo de I+D. Mientras algunos componentes pueden estar avanzados, el enfoque se dirige a mejorar los subsistemas menos desarrollados. A medida que se avanza, especialmente al llegar al TRL 6, es crucial integrar y probar el sistema a escala completa. El TMP se actualiza continuamente para reflejar el progreso del TRL y estimar los recursos y el tiempo requeridos para el siguiente nivel de maduración. (Giardinella et al. 2024)

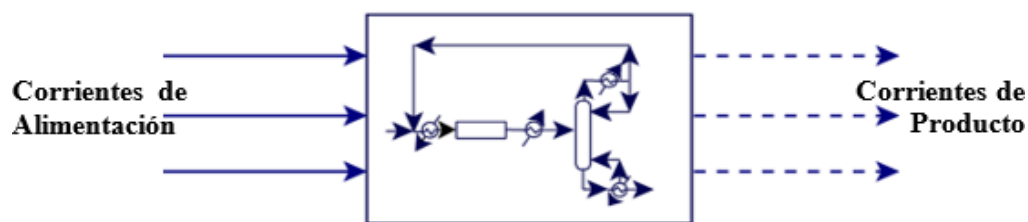
#### 2.1.11 Diseño de proceso

La conversión de materias primas en productos químicos generalmente no ocurre en un solo paso, sino a través de una serie de etapas intermedias que incluyen reacciones, separaciones, mezclas, y ajustes de temperatura, presión y tamaño de partículas. Estos

pasos deben estar organizados e interconectados para lograr la transformación final deseada (ver Figura 15 a).



(a) El diseño del proceso comienza con la síntesis del proceso para convertir la materia prima en los productos deseados



(b) La simulación predice como el proceso se comportará si esta se ha implementado

**Figura 15.** Diseño del proceso de síntesis. De Giardinella et al. (2024).

La síntesis de un proceso químico involucra dos actividades principales: seleccionar los pasos de transformación necesarios y conectar estos pasos para formar un proceso completo. Un Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) representa gráficamente estos pasos y sus interconexiones (ver Figura 15 b). Con este diagrama definido, se puede realizar una simulación del proceso mediante un modelo matemático para predecir su comportamiento. La simulación ayuda a formular balances de materia y energía, dimensionar equipos y estimar parámetros como caudales, composiciones y temperaturas. Esto permite optimizar el diseño del proceso y evaluar su rendimiento antes de la construcción real.

La síntesis es la creación de un proceso para transformar flujos de alimentación en flujos de productos. La simulación predice cómo se comportaría si se construyera.

- 1) **Precisión de los Cálculos de Diseño:** La simulación detallada es crucial para perfeccionar el diseño de un proceso químico. Aunque el diseño inicial se basa en cálculos precisos de caudales, temperaturas, presiones y composiciones, la planta real puede diferir debido a variaciones en las materias primas, incertidumbres en las propiedades físicas, o limitaciones en la instrumentación. Por ello, los diseños suelen incorporar márgenes de seguridad para cubrir estas incertidumbres. Sin embargo, un exceso de diseño puede resultar en costos innecesarios y una operación ineficiente.

El objetivo es encontrar un equilibrio adecuado entre la seguridad y la eficiencia operativa.

- 2) **Propiedades Físicas en el Diseño de Procesos:** Los cálculos de diseño dependen de las propiedades físicas de los materiales (sólidos, líquidos, gases) involucrados. Elegir incorrectamente estas propiedades puede llevar a cálculos erróneos o peligrosos. Es fundamental usar datos precisos y dentro del rango de condiciones para evitar problemas en el diseño.
- 3) **Evaluación del Desempeño:** Un buen diseño no solo debe ser económico, sino también sostenible. Esto implica minimizar el uso de recursos y energía, reducir la producción de residuos y cumplir con los criterios de salud y seguridad. Los procesos deben ser eficientes en términos de recursos y energía, y deben evitar impactos ambientales negativos.
- 4) **Materiales de Construcción:** La selección de materiales afecta el diseño mecánico y el costo del equipo. Factores clave incluyen resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación, y costos. Materiales más baratos con revestimientos adecuados pueden reducir costos sin comprometer la calidad.
- 5) **Seguridad del Proceso:** La seguridad debe ser una prioridad en el diseño de procesos. Se deben incorporar sistemas de seguridad para manejar sobrepresiones y condiciones peligrosas. Además, es crucial diseñar procesos de forma inherente segura, limitando el uso de materiales peligrosos y manteniendo inventarios bajos para minimizar riesgos.
- 6) **Optimización:** Después de evaluar el desempeño inicial del diseño, se deben realizar ajustes para mejorar la eficiencia. Esto puede implicar la reestructuración del diseño, la simulación de nuevas configuraciones, y la optimización de parámetros operativos. La Figura 16 ilustra cómo estos cambios pueden impactar el rendimiento del proceso.  
La optimización se puede realizar como optimización estructural o de parámetros para mejorar la evaluación del diseño.
- 7) **Mantener abiertas las opciones de diseño:** En las primeras etapas del desarrollo de un diseño, es crucial mantener diversas opciones abiertas antes de realizar evaluaciones definitivas. La tendencia a eliminar opciones preliminarmente puede ser prematura debido a las incertidumbres inherentes en esta fase inicial. A menos que una opción sea claramente inviable, es mejor considerar todas las posibilidades, evaluando aspectos cruciales como costos, implicaciones ambientales y seguridad.

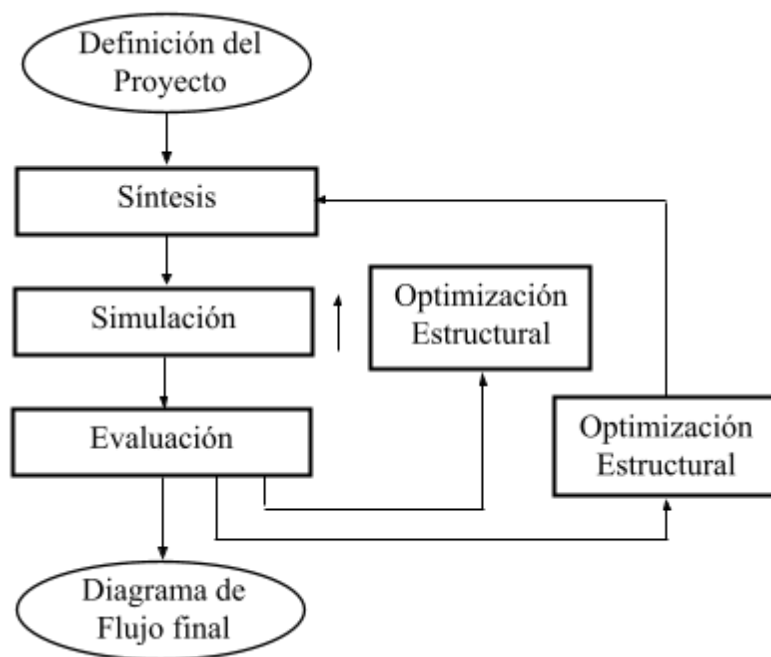


**Figura 16.** Optimización del diseño. De Giardinella et al. (2024).

En el diseño de procesos, como en el de un reactor, se comienza con la conversión de materias primas en productos. El reactor produce una mezcla de productos, subproductos y materiales no reaccionados que deben ser separados y reciclados. El diseño del reactor y del sistema de separación están interrelacionados y determinan el proceso completo, incluyendo las etapas de calentamiento y refrigeración. Esta estructura se representa con un “diagrama de cebolla” (Figura 17), que muestra la jerarquía del diseño. Las capas externas del modelo deben estar completas para evaluar adecuadamente las opciones de diseño de los sistemas de reacción y separación.

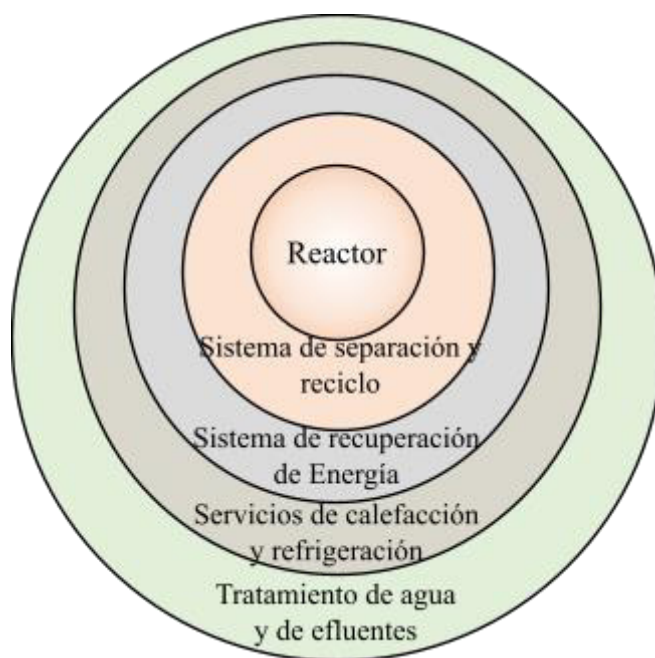


**Figura 17.** Modelo cebolla. De Giardinella et al. (2024).

El modelo cebolla de diseño de procesos dicta que se necesita un reactor antes de poder diseñar el sistema de separación y reciclaje, y así sucesivamente. En el diseño de procesos, como el de un reactor, se debe decidir entre un diseño continuo o por lotes. Los procesos por lotes, ideales para productos especializados y en menor escala, operan de manera discontinua y permiten flexibilidad en la producción y el uso de equipos multipropósito. Estos procesos permiten identificar y retirar lotes problemáticos, que es crucial en industrias como la farmacéutica y alimentaria.

El diseño de un proyecto típico sigue varias fases:

- 1) **Selección y Desarrollo de Conceptos:** Evaluar y seleccionar opciones de proceso basadas en criterios como costo, seguridad y sostenibilidad.
- 2) **Definición:** Crear un diseño de ingeniería detallado y un análisis financiero para establecer la base del proyecto.
- 3) **Ejecución - Ingeniería, Adquisición y Construcción (EPC):** Completar el diseño detallado, construir y adquirir los equipos necesarios.
- 4) **Puesta en marcha:** Probar el equipo y sistemas, iniciar el proceso, y capacitar al personal.
- 5) **Operación:** Operar el proceso, optimizar la producción y gestionar el mantenimiento.

- 6) **Desmantelamiento:** Desmantelar y eliminar de manera segura equipos y materiales al final de la vida útil del proyecto.

### 2.1.12 Diseño conceptual

Seuranen T. (2006) menciona que el diseño conceptual en el desarrollo de procesos implica investigar el problema, identificar barreras, generar y analizar alternativas de proceso para elegir la mejor opción. el objetivo es encontrar el diagrama de flujo de proceso óptimo y estimar las condiciones de diseño más efectivas. Herder y Weijnen (1998) destacan la importancia de criterios de calidad en el diseño, como la seguridad, la operabilidad y el desempeño ambiental, aunque es difícil considerar todos estos criterios debido a su complejidad y al comportamiento no lineal de las decisiones de diseño.

El diseño de procesos debe considerar una variedad de criterios de calidad, algunos explícitos en las Bases de Diseño y otros no. Herder y Weijnen (1998) identificaron criterios importantes como seguridad, operatividad y desempeño ambiental, ver la Figura 18. Estos criterios son relevantes pero difíciles de integrar completamente en la fase conceptual debido a la complejidad y el comportamiento no lineal de las decisiones de diseño.

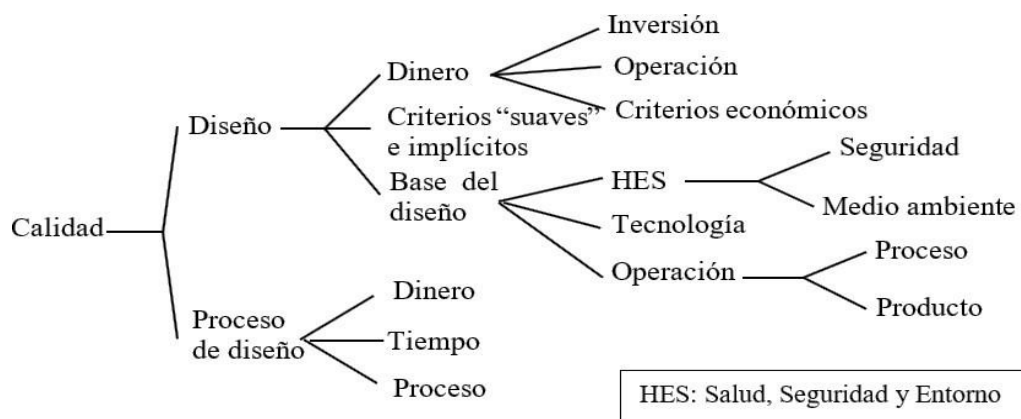


**Figura 18.** Clasificación de criterios de calidad. (Herder y Weijnen 1998).

## 2.2 Antecedentes del estudio

**Estudio de Caso 1:** en base al artículo **Development of Chemical Process Design and Control for Sustainability** de Li et al. (2016).

Li et al. (2016) destacan la importancia de la sostenibilidad a través de la evaluación del ciclo de vida (LCA) para identificar las etapas que más contribuyen al impacto ambiental. La Figura 19 ilustra las distintas etapas del ciclo de vida del producto, donde se

producen fluctuaciones en el flujo de energía, materiales y dinero. Estas fluctuaciones deben ser medidas y controladas para asegurar la viabilidad del negocio. Los enfoques de control y optimización son cruciales para mantener la viabilidad tanto a nivel macro (cadena de suministro) como micro (fabricación de productos). Si el rendimiento de la sostenibilidad necesita ser mejorado o mantenido, se debe implementar control y optimización para asegurar que se cumplan los valores deseados de sostenibilidad.

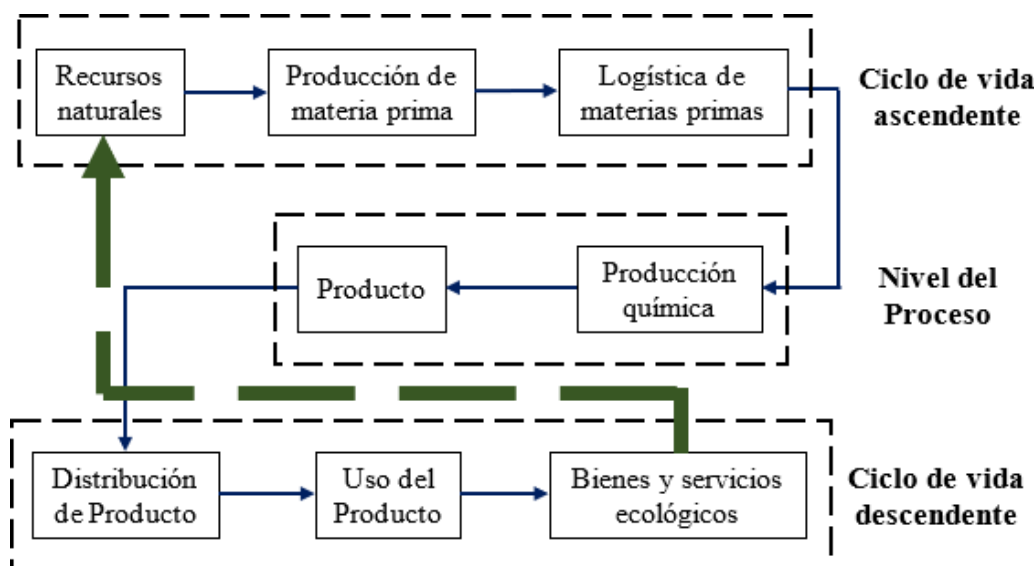


**Figura 19.** Marco para realizar un análisis del ciclo de vida de un producto químico.

Para diseñar procesos de separación económicamente eficientes, es esencial adoptar un enfoque jerárquico que tenga en cuenta factores ambientales, como el cambio climático y las fluctuaciones en la cadena de suministro. Implementar un diseño modular que combine indicadores económicos y ambientales con aspectos sociales es clave para lograr procesos químicos sostenibles. La etapa de diseño debe integrar el control de procesos a través de técnicas de descomposición, formulando problemas complejos que aborden diseño, sostenibilidad y economía.

Se han desarrollado herramientas para seleccionar estructuras de control basadas en conceptos de energía y sostenibilidad, como la matriz de exergía relativa (REA), el factor de ecoeficiencia de exergía (EEF) y la matriz de exergía destruida relativa (REDA). Un estudio de caso, utilizando la herramienta GREENSCOPE, mostró cómo evaluar la sostenibilidad de la producción de biodiésel; también ayudó a medir el desempeño en una escala de sostenibilidad, comparando el rendimiento con los mejores (100%) y peores (0%) escenarios posibles, para identificar áreas de mejora en los procesos y productos químicos. Este análisis ayuda a comparar la sostenibilidad de diferentes procesos y productos,

evaluando su eficiencia en el uso de recursos y su impacto ambiental, mientras maximiza los beneficios económicos.

Los sistemas biológicos, como las colonias de hormigas, han inspirado métodos de control avanzados. El enfoque biomimético combina algoritmos multiagentes, basados en el comportamiento de las hormigas, con conceptos de control óptimo para encontrar soluciones eficaces en procesos químicos. Las hormigas cooperan para formar rutas eficientes hacia fuentes de alimento, un principio aplicable en la optimización de procesos. En la producción de etanol a partir de fuentes renovables, como maíz y caña de azúcar, se utiliza un fermentador continuo con una membrana para eliminar el etanol y mejorar la eficiencia. El proceso se modela como un tanque agitado continuo (CSTR) donde la biomasa actúa como catalizador, y el etanol se elimina in situ para evitar la inhibición de la fermentación. La tasa de formación de un componente clave, relacionado con la biomasa, se calcula en función de las concentraciones de sustrato, producto y componente clave.

### **Estudio de Caso 2: Piloting Bioethanol Production from Source-Separated Food Waste Boosts Technology Readiness de Chatzimaliakas et al. (2023).**

Chatzimaliakas et al. (2023) llevaron a cabo un estudio piloto para demostrar la producción de bioetanol utilizando biorresiduos urbanos de Atenas, Grecia. Los biorresiduos, ricos en nutrientes y con bajo costo, ofrecen una alternativa prometedora para generar bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica no comestible. El estudio abordó técnicas avanzadas de pretratamiento y fermentación, incluyendo métodos hidrotérmicos, químicos y enzimáticos, y técnicas de fermentación separadas y simultáneas. En las 11 pruebas piloto realizadas, lograron una degradación promedio del almidón del  $80,69 \pm 16,27\%$  y de la celulosa del  $79,41 \pm 10,37\%$ , con un rendimiento de bioetanol del  $74,05 \pm 6,82\%$ . Estos resultados son comparables a los obtenidos con métodos de pretratamiento más intensivos. Los métodos de homogeneización y trituración demostraron ser prometedores para el pretratamiento de materia prima húmeda.

El estudio concluye que las pruebas piloto son esenciales para validar y optimizar la tecnología antes de su expansión a gran escala. Además, destaca la importancia de una correcta separación y recolección de los residuos, y sugiere que el proyecto podría servir como modelo para una gestión sostenible y circular de residuos municipales. La investigación también apunta a que las pruebas piloto ayudan a avanzar el Nivel de

Preparación Tecnológica (TRL) de las innovaciones, permitiendo abordar desafíos técnicos y recopilar datos necesarios para una adopción comercial más amplia.

### **3. Hipótesis y variables**

#### **3.1 Hipótesis**

Las siguientes hipótesis se plantean para este trabajo de tesis.

##### **3.1.1 Hipótesis general**

El diseño modular de plantas industriales para la producción de bioetanol permitirá optimizar el consumo de recursos, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la viabilidad económica mediante la integración de procesos, indicadores adecuados y reducción de impacto ambiental.

##### **3.1.2 Hipótesis específicas**

- El análisis proximal de la cáscara de mango Haden, junto con la revisión de publicaciones especializadas, demostrará que esta materia prima es una fuente adecuada y rentable para la producción de bioetanol.
- La implementación de métodos modernos de diseño de procesos, que incluyan criterios de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental, garantizará que la producción de bioetanol cumpla con los estándares establecidos para una planta industrial en Lima.
- El uso de metodologías de diseño de procesos avanzadas, como simulaciones y optimización, determinará la viabilidad técnica y económica de la instalación de una planta de bioetanol utilizando cáscara de mango Haden en la región.

#### **3.2 Variables**

##### **3.2.1 Variables Independientes**

Serán los métodos de diseño de procesos y las configuraciones de la planta de producción de bioetanol obtenido procesando la cáscara de mango Haden, previa determinación de su composición química a partir de análisis de laboratorio.

##### **3.2.2 Variables Dependientes:**

Son la factibilidad técnica y económica, medida a través de diferentes parámetros como rendimiento del bioetanol, seguridad, eficiencia energética y sostenibilidad.

##### **3.2.3 Variables Controladas:**

Las condiciones ambientales y los procedimientos de análisis serán constantes en todas las pruebas y simulaciones para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

## **4. Metodología**

Para obtener bioetanol a partir de la cáscara de mango Haden, se utilizarán diversas metodologías que aborden aspectos técnicos, como configuraciones, selección de las operaciones y las condiciones operacionales del proceso; como también métodos de análisis económico para evaluar la factibilidad e la planta de producción de bioetanol a partir de la cáscara de la fruta.

### **4.1 Análisis Documentario**

Se realizará una revisión de artículos, libros y tesis sobre la producción de bioetanol a partir de residuos vegetales, con enfoque en la cáscara de mango. Esto ayudará a identificar las condiciones óptimas de operación, como temperatura y tiempo de fermentación. Esto se justifica porque la revisión documental es esencial para aplicar buenas prácticas y adaptar el proceso a las características de la cáscara de mango Haden. También por consideraciones de ampliación industrial, pues análisis permitirá ajustar los parámetros operativos para optimizar la producción continua.

### **4.2 Análisis Proximal (Norma AOAC)**

Se analizarán los componentes de la cáscara de mango Haden: humedad, fibra dietaria, carbohidratos, grasas, cenizas y proteínas, con el fin de evaluar su potencial para la producción de bioetanol. Este análisis es clave para determinar la viabilidad de la cáscara como materia prima. Así como también que los resultados guiarán el diseño de procesos para maximizar el rendimiento de la cáscara en grandes volúmenes.

### **4.3 Modularización**

Se documentarán los requisitos específicos de cada módulo del proceso (pretratamiento, hidrólisis, fermentación, destilación) para garantizar su funcionamiento eficiente y seguro. La Modularización permite optimizar cada etapa del proceso de forma independiente. A nivel industrial facilita la expansión de la planta mediante la adición de módulos adicionales sin rediseñar el sistema completo.

### **4.4 Diagrama de Flujo del Proceso**

Se desarrollará un diagrama de flujo para visualizar todas las etapas del proceso, desde la materia prima hasta el bioetanol, optimizando el rendimiento. El diagrama facilita la identificación de cuellos de botella y la mejora del proceso. A nivel industrial, este diagrama será fundamental para la automatización y monitoreo del proceso.

#### **4.5 Diagrama de la Cebolla**

Se diseñarán los diagramas de los reactores y sistemas de separación y reciclaje, optimizando el uso de calor y refrigeración en el proceso. Permite integrar eficientemente las etapas térmicas del proceso, minimizando pérdidas de energía. Así como también que, en una planta industrial, este diseño ayudará a mejorar la eficiencia energética.

#### **4.6 Matriz de Decisión**

Se utilizará para evaluar alternativas de diseño del proceso, considerando criterios como rentabilidad, eficiencia y sostenibilidad. Facilita la toma de decisiones basada en una comparación sistemática de alternativas. Esta metodología ayudará en la selección de tecnologías y proveedores para optimizar los costos operativos.

#### **4.7 Diseño Conceptual**

Se desarrollará un enfoque sistemático para el diseño del proceso, optimizando la selección de equipos y la disposición de la planta. El diseño conceptual asegura un enfoque estructurado para la implementación del proceso. Facilitará la escalabilidad y adaptación del proceso en una planta de mayor capacidad.

#### **4.8 Metodología Desperdicio Cero (*Zero Waste*)**

Se aplicará para minimizar los residuos y maximizar el uso de recursos durante todas las etapas de producción. Este enfoque promueve la sostenibilidad y reduce el impacto ambiental del proceso. En una planta industrial, permitirá el reciclaje de subproductos y la reducción de residuos.

#### **4.9 Metodologías Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Se emplearán para evaluar la viabilidad económica del proyecto, asegurando su rentabilidad a largo plazo. Estas metodologías son esenciales para asegurar que el proyecto sea económicamente viable. A nivel industrial, estas herramientas permitirán garantizar la sostenibilidad financiera del proyecto.

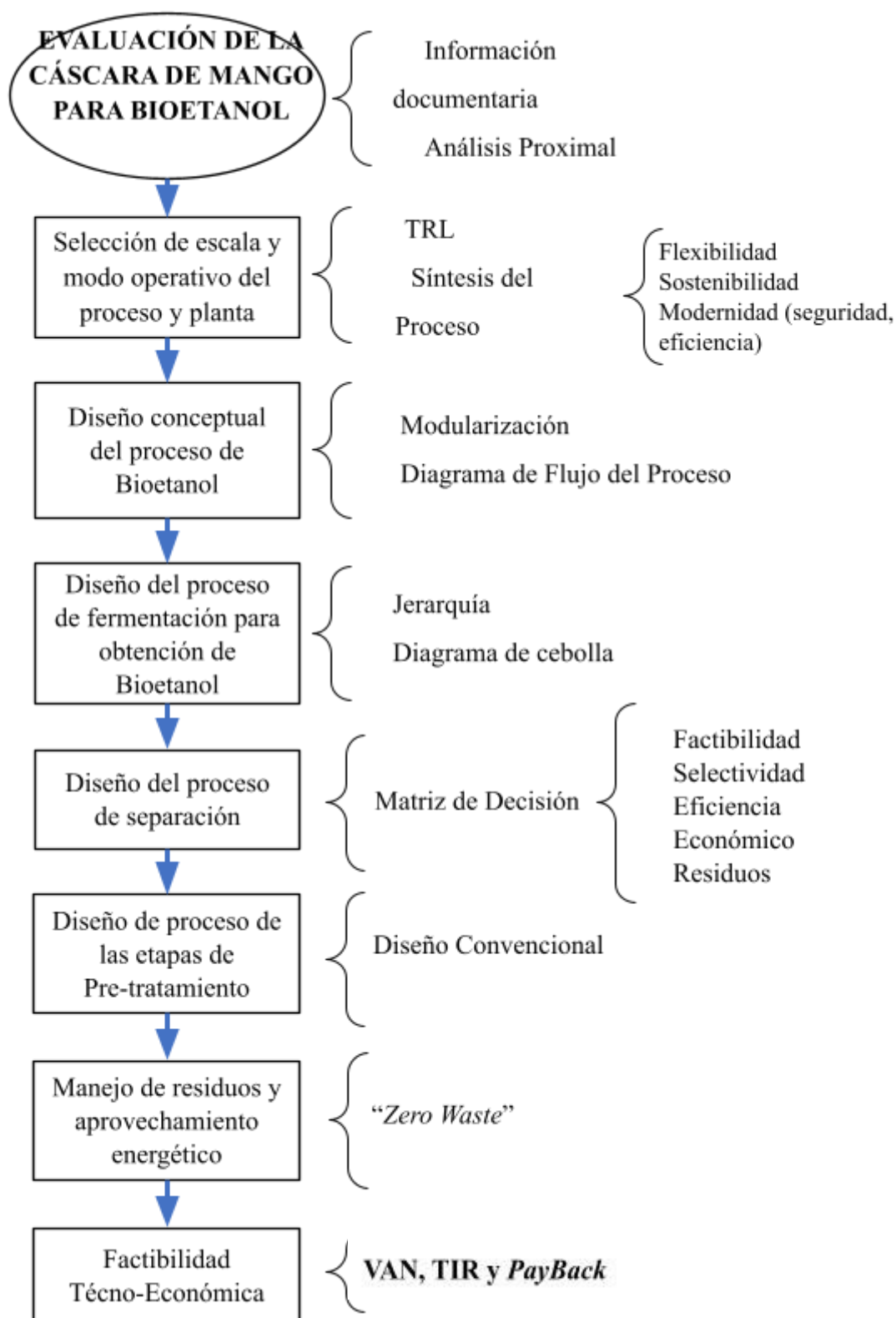


**Figura 20.** Diagrama de flujo del Proceso Metodológico.

La figura 21 presenta el desarrollo esquemático detallado de las etapas involucradas en el proceso de obtención de bioetanol a partir de la cáscara de mango.

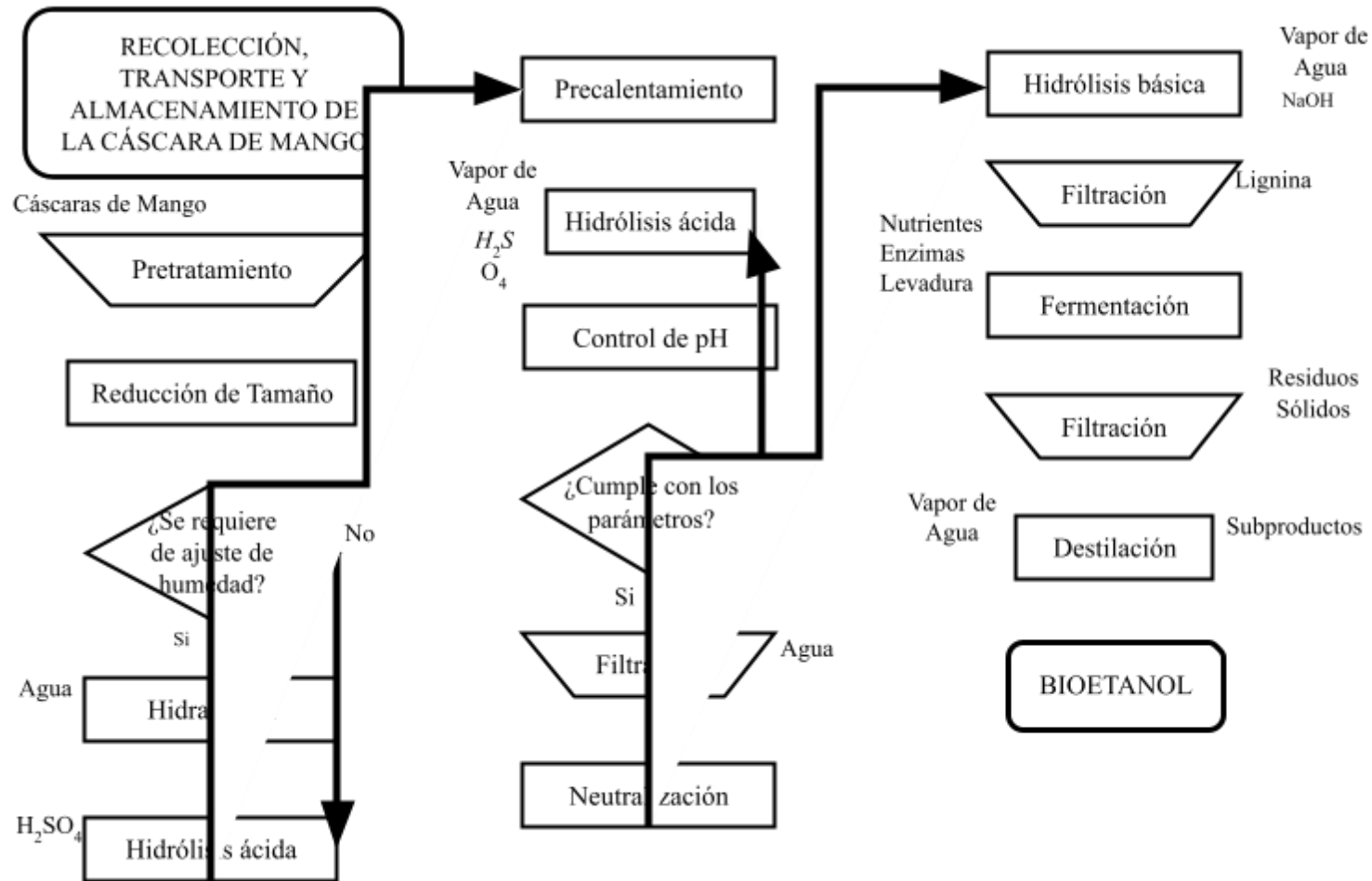


**Figura 21.** Diagrama de Flujo de la obtención de Bioetanol de la cáscara de mango.

## 5. Resultados

La modularización es una estrategia clave en el diseño y operación de plantas químicas, permite mejorar la flexibilidad operativa, reduce costos y promueve la sostenibilidad, Lier y Grünewald (2011) y Becker et al. (2019). Su implementación en el diseño de la planta de bioetanol a partir de cáscara de mango responde a la necesidad de optimizar recursos y alineándose con los principios de la sostenibilidad.

### 5.1 Diseño Modular Adaptable

El diseño modular propuesto sigue el enfoque de modularización funcional, cada etapa del proceso (pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación) se configura como un módulo independiente, permitiendo:

**5.1.1 Flexibilidad Operativa:** Ajustes según la disponibilidad de materia prima y las **necesidades** del mercado. Por ejemplo, se pueden agregar reactores en el módulo de fermentación para satisfacer picos de demanda.

**5.1.2 Reducción de Costos:** La fabricación off-site de los módulos minimiza tiempos de construcción y costos operativos.

### 5.2 Análisis previos.

Se determinó experimentalmente la composición de cáscara de mango seco con la cual se trabajará en esta tesis y se contrastó esta información con lo reportado en la literatura. La determinación fue hecha por TYPASA. Se reporta este análisis proximal en el Anexo 1.

**Tabla 7.** Análisis proximal de la cáscara de mango seco.

| Parámetro     | Unidad             | Resultado | Método                                                      | Técnica empleada | L.D. |
|---------------|--------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|------------------|------|
| Carbohidratos | %<br>Carbohidratos | 82.09     | PNTE-LTG-29. Rev.0<br>Determinación de Carbohidratos        | Cálculo          |      |
| Ceniza        | %                  | 1.53      | AOAC 940.26-1940,<br>Ceniza de frutas y productos de frutas | Gravimetría      | 0.01 |

|                         |   |       |                                                                                                           |                                |      |
|-------------------------|---|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| Fibra Cruda             | % | 20.84 | AOAC 985.29, 20 <sup>a</sup> Ed. 2016, Fibra Dietética Total en alimentos. Método enzimático-gravimétrico | Método enzimático-gravimétrico |      |
| Grasa                   | % | 2.58  | Extracto etéreo de plantas. Método gravimétrico.                                                          | Gravimetría                    | 0.5  |
| Humedad                 | % | 8.22  | AOAC 930.15 Pérdida por secado                                                                            | Gravimetría                    | 0.09 |
| Proteína (ADAC 920:152) | % | 4.68  | Método Oficial AOAC 920.152 Proteína en Productos de Frutas, 20 <sup>a</sup> Ed. 2016                     | Volumetría                     | 0.01 |

Con esta información se procede a formular los módulos del sistema productivo del proyecto, para esto se toma como referencia la literatura estudiada en el ítem 2.1.7.

### 5.3 Módulos, Componentes y Parámetros

Estos corresponden a los siguientes ítems:

#### 5.3.1 Módulo de Pretratamiento

Objetivo: Preparar la cáscara de mango para maximizar la eficiencia en etapas posteriores mediante la descomposición de su estructura lignocelulósica. Sus componentes:

- A.** Reducción de tamaño: Trituradora de cuchillas para disminuir la partícula a un tamaño óptimo.
- B.** Hidratación: Sistema de mezclado y humidificación.
- C.** Explosión de vapor (SE): Pretratamiento seleccionado por su alta eficacia en la ruptura de lignocelulosa
- D.** Separación de sólidos: Centrífuga para remover residuos sólidos no reactivos.

Parámetros operativos:

- ☐ Presión: 10-20 bar.

- Temperatura: 180-220 °C.
- Tiempo de trabajo: 5-10 minutos.

### 5.3.2 Módulo de Hidrólisis Ácida y Básica

Objetivo: Liberar los azúcares fermentables de la hemicelulosa y la celulosa presentes en la biomasa. Los Subprocesos y Componentes son:

- A. Hidrólisis Ácida: Reactores de acero inoxidable resistentes a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  diluido (2-5%).
- B. Filtración: Filtros prensa para separar líquidos y sólidos residuales.
- C. Hidrólisis Básica: Reactores para hidróxido de sodio (NaOH), optimizando la liberación de azúcares adicionales.

Parámetros operativos:

- Ácida: pH 5, temperatura de 120-150 °C, tiempo de reacción 30-60 minutos.
- Básica: pH 12-13, temperatura de 80-100 °C, tiempo de reacción 1-2 horas.

### 5.3.3 Módulo de Fermentación

Objetivo: Convertir los azúcares fermentables en etanol utilizando levaduras especializadas. Los Subprocesos y Componentes son:

- A. Reactores de fermentación: Agitación y control de temperatura.
- B. Sistemas de aireación: Ajuste según las condiciones de oxígeno requeridas.
- C. Separadores de biomasa: Centrifugadoras para eliminar levaduras agotadas.

Parámetros operativos:

- Temperatura: 25-35 °C.
- pH: 4-5.
- Tiempo: 48-72 horas.

### 5.3.4 Módulo de Destilación y Purificación

Objetivo: Separar el etanol del licor fermentado y aumentar su pureza. Los Subprocesos y Componentes son:

- A. Destilación fraccionada: Columnas de placas con control térmico.

- B. Deshidratación: Uso de tamices moleculares para alcanzar purezas mayores al 99%.
- C. Recuperación de calor: Intercambiadores térmicos para optimizar el consumo energético.

Parámetros operativos: Temperatura: Inicio a 78.37 °C (punto de ebullición del etanol).

### 5.3.5 Módulo de Manejo de Residuos y Energía

Objetivo: Reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad del proceso. Los Subprocesos y Componentes son:

- A. Valorización de residuos sólidos: Producción de biogás o compost a partir de lignina y otros subproductos.
- B. Reciclaje de agua: Circuito cerrado para minimizar el consumo hídrico.
- C. Integración energética (PINCH): Optimización del uso de energía térmica mediante recuperación de calor.

### 5.4 Modelo Preliminar de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA)

Se propone la implementación de un modelo preliminar de evaluación del ciclo de vida (LCA) para estimar:

- **Reducción de Residuos:** Cuántas toneladas de cáscara de mango se desviarán de los vertederos.
- **Impacto Ambiental:** Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas al utilizar bioetanol en lugar de combustibles fósiles.
- **Contribución a la Economía Circular:** Porcentaje de residuos transformados en productos de valor agregado.

Objetivo: Evaluar la sostenibilidad de la planta modular de bioetanol a partir de cáscara de mango mediante métricas clave de sostenibilidad: reducción de residuos, impacto ambiental, y contribución a la economía circular.

#### Reducción de Residuos

$$R_{dev} = P_M \times 12 \quad (16)$$

Donde:

- o  $R_{dev}$ : Residuos desviados.

- o  $P_M$ : Producción mensual.

### **Impacto Ambiental (Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas)**

Datos base: Combustible fósil reemplazado: 1 litro de bioetanol = 2.3 kg de CO<sub>2</sub> evitados (según estándares del IPCC).

Rendimiento del bioetanol: 0.90 litros por kg de mango procesada (Figura 22).

#### **Producción anual de bioetanol:**

$$P_E = R_P \times R_E \quad (17)$$

$P_E$ : Producción de etanol.

$R_P$ : Rendimiento de bioetanol.

#### **Emisiones evitadas:**

$$E_E = P_E \times R_{CO_2} \quad (18)$$

$E_E$ : Emisiones evitadas

$R_{CO_2}$ : Reducción de CO<sub>2</sub> por litro

## **5.5 Indicadores de desempeño**

La Modularización implica ecuaciones específicas que permiten evaluar los costos, beneficios y productividad del proceso:

### **5.5.1 Costo de un proceso convencional:**

$$C_c = (k_c P)^{e_c} \quad (19)$$

Donde:

- o  $C_c$  es el costo del proceso convencional.
- o  $k_c$  es el parámetro de dependencia del costo con la capacidad de la planta.
- o  $P$  es la capacidad del proceso.
- o  $e_c$  es el factor de escala (entre 0 y 1, el artículo Modularization in Chemical Processing menciona que comúnmente es 3/2).

### **5.5.2 Costo de un proceso modular:**

$$C_M = \left( k_c \frac{P}{n_M} \right)^{e_c} \quad (20)$$

Donde:

- o  $C_M$  es el costo del proceso modular.
- o  $n_M$  es el número de módulos.

### 5.5.3 Beneficio anual de un proceso centralizado convencional:

$$B_c = \pi_p P - \left[ \left( \pi_a + \pi_i \right) P + \alpha \left( k P \right)^{e_c} \right] \quad (21)$$

Donde:

- o  $B_c$  es el beneficio anual del proceso convencional.
- o  $\pi_p$  es el precio unitario del producto.
- o  $\pi_a$  es el precio unitario de adquisición de materia prima.
- o  $\pi_i$  son los costos logísticos.
- o  $\alpha$  es el coeficiente relacionado con el costo de capital.

### 5.5.4 Beneficio anual de un proceso modular distribuido:

$$B_m = \pi_p B P - \left[ \left( \pi_a + \frac{\pi_i}{n} \right) P + \alpha * n * \frac{1}{n^{e_c}} \left( k P \right)^{e_c} \right] \quad (22)$$

Donde  $B_m$  es el beneficio anual del proceso modular distribuido.

### 5.5.5 Relación modular:

$$P_M = \frac{P}{n_M} \quad (23)$$

Donde:

- o  $P_M$ : Capacidad de cada módulo.
- o  $P$ : Capacidad total requerida.
- o  $n_M$ : Número de módulos.

### 5.5.6 Productividad modular:

$$P_{mod} = e_M * Q_{mod} * Y \quad (24)$$

Donde:

- o  $P_{mod}$ : Productividad del módulo.
- o  $Q_{mod}$ : Capacidad del módulo.
- o  $Y$ : Rendimiento del producto por unidad de materia prima.
- o  $e_M$ : Eficiencia operativa del módulo.

## 5.6 Evaluación Económica

La evaluación económica de proyectos de bioetanol a partir de residuos agroindustriales es fundamental para determinar su viabilidad financiera y competitividad en el mercado. Siguiendo el modelo de biorrefinerías basado en economía circular, el diseño modular propuesto para la producción de bioetanol a partir de cáscara de mango debe analizarse desde una perspectiva económica para cuantificar costos, beneficios y el retorno de inversión. Este análisis se inspira en estudios previos sobre la producción de bioetanol y bebidas destiladas a partir de camote, demostrando la aplicabilidad del concepto en diferentes materias primas (Weber et al., 2020).

### 5.6.1 Costos de Producción.

#### A) Balance de Materia

Se presenta la Figura 22, la cual muestra el balance de materia correspondiente al proceso de producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango *Mangifera indica* L., variedad Haden. Este balance detalla las entradas y salidas de cada una de las etapas del proceso, permitiendo visualizar las cantidades de materia prima utilizada y el volumen del producto generado.

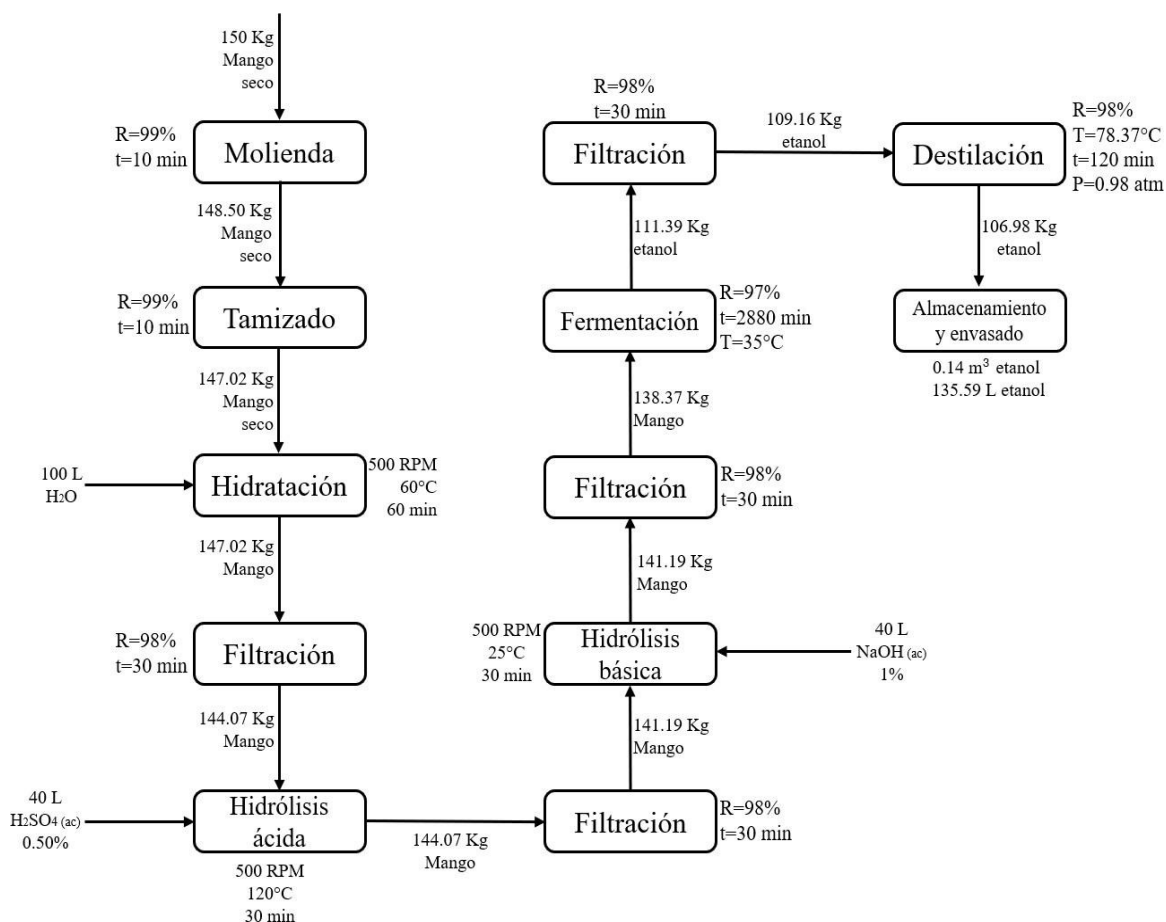


**Figura 22.** Diagrama del balance de materia de una planta piloto de bioetanol de *Mangifera indica L.*, ubicado en Lima- Perú.

## B) Balance de energía y costos

El balance de energía es crucial para evaluar los costos del proceso, ya que permite identificar el consumo energético en cada etapa de producción. Esto facilita la optimización de recursos y la reducción de gastos operativos. La Tabla 8 muestra los costos por cada insumo necesario para la producción de un lote de bioetanol utilizando cáscaras secas de la fruta descrita en esta investigación, se tomó en cuenta el precio y el proveedor de cada reactivo.

**Tabla 8.** Costos de producción para un lote de bioetanol elaborado a partir de *Mangifera indica L.*

| Insumo | Unidad<br>de<br>compra | Proveedor<br>(Fuente) | Precio unitario |
|--------|------------------------|-----------------------|-----------------|
|--------|------------------------|-----------------------|-----------------|

|                                |        |                    | Precio<br>euros | Precio<br>dólares | Precio<br>soles | unidades | Total  |
|--------------------------------|--------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------|--------|
| Cáscara de<br>Mango seco       | kg     | Villegas<br>(2023) | -               | 0.01              | 0.04            | 150      | 1.50   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | L      | IBD+ ciencia       | 20.55           | 22.61             | 84.09           | 0.2      | 4.52   |
| NaOH                           | kg     | IBD+ ciencia       | 12.10           | 13.31             | 49.51           | 0.4      | 5.32   |
| Botella PET<br>1L              | Unidad | Industrias<br>PET  | -               | -                 | 0.60            | 135      | 81.00  |
| Costo por lote                 |        |                    |                 |                   |                 |          | 92.35  |
| Costo total por mes            |        |                    |                 |                   |                 |          | 923.45 |

La inversión en equipos es un paso crucial al iniciar una planta piloto, ya que estos garantizan la capacidad operativa y la calidad de los procesos productivos. Contar con maquinaria adecuada permite simular las condiciones reales de producción a pequeña escala, facilitando el ajuste de variables y la optimización de procesos antes de escalar. Además, los equipos especializados aseguran mayor precisión y eficiencia, reduciendo posibles fallos o pérdidas durante la fase experimental. Esta inversión inicial contribuye a validar la viabilidad técnica y económica del proyecto, minimizando riesgos y mejorando la toma de decisiones futuras.

La Tabla 9 presenta la lista detallada de los equipos necesarios para la operación de la planta piloto, incluyendo precios, proveedores y cantidades requeridas. Esta información es fundamental para evaluar los costos de inversión inicial y asegurar que los equipos seleccionados cumplan con las especificaciones técnicas para los procesos planificados.

**Tabla 9.** Costos de inversión en los equipos para una planta piloto de bioetanol a partir de *Mangifera indica* L.

| Equipo | Marca | Modelo | Precio<br>(euros) | Precio<br>(dólares) | Precio<br>(soles) | Unidades | Costo<br>Total<br>(soles) |
|--------|-------|--------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------------|
|--------|-------|--------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------------|

|                   |                                                                 |             |              |              |           |       |           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|-----------|-------|-----------|
| Molino            | Guangzhou<br>Gelgoog Foods<br>Co.                               | GG-S<br>20B | 1,888.3<br>3 | 2,077.1<br>6 | 7,727.05  | 1     | 7,727.05  |
| Tamizado<br>r     | Xinxiang<br>Chenwei<br>Machinery Co.,<br>Ltd.                   | S49-B       | 912.00       | 1,003.2<br>0 | 3,731.90  | 1     | 3,731.90  |
| Reactor           | Labfirst<br>Scientific<br>Instruments<br>(shanghai) Co.,<br>Ltd | JGR-2<br>0L | 2,599.8<br>7 | 2,859.8<br>6 | 10,638.67 | 1     | 10,638.67 |
| Filtro            | Shanghai<br>Topace<br>Scientific<br>Instruments<br>Co., Ltd.    | BVF-5<br>0S | 775.40       | 852.94       | 3,172.94  | 1     | 3,172.94  |
| Bomba de<br>vacío | Wenling<br>Hongbaoshi<br>Vacuum<br>Equipment Co.,<br>Ltd        |             | 31.93        | 35.12        | 130.66    | 1     | 130.66    |
| Destilado<br>r    | Wenzhou Rayen<br>Machinery Co.,<br>Ltd.                         | -           | 869.98       | 956.98       | 3,559.96  | 1     | 3,559.96  |
|                   |                                                                 |             |              |              |           | Costo | 28,961.1  |
|                   |                                                                 |             |              |              |           | total | 7         |

El consumo de los equipos utilizados en una planta piloto es un factor clave, ya que impacta directamente en los costos operativos y la eficiencia energética del proceso. Es crucial monitorear y optimizar el uso de energía, agua, y otros recursos para garantizar que la planta funcione de manera rentable y sostenible. Un consumo eficiente no solo reduce gastos, sino que también minimiza el impacto ambiental, lo que es esencial para cumplir con regulaciones y promover prácticas responsables. Además, conocer el consumo permite proyectar los requerimientos a mayor escala en caso de expansión.

La Tabla 10 presenta un análisis detallado de los consumos y costos de la energía utilizados por los equipos en la operación de producción de bioetanol a partir de *Mangifera indica L.* Esta tabla proporciona información clave sobre el uso energético de cada equipo, permitiendo una estimación precisa de los costos asociados a la fase operativa. Al incluir estos datos, se facilita la evaluación del impacto económico y ambiental del proceso, lo cual es esencial para optimizar la producción y garantizar la viabilidad del proyecto en términos de eficiencia energética y costos operativos.

**Tabla 10.** Consumos y costos de la energía proveniente de los equipos utilizados en la operación de producción de bioetanol a partir de *Mangifera indica L.*

| Equipo                                               | Consumo<br>indicado<br>por el<br>proveedor | Consumo<br>(KW) | Tiempo<br>de<br>operación<br>(min) | Tiempo de<br>operación<br>(h) | Consumo de<br>energía<br>(kWh) | Costo<br>(soles<br>) |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Molino                                               | 5.5 kW                                     | 5.5             | 10                                 | 0.17                          | 0.92                           | 0.11                 |
| Tamizador                                            | 0.4 kW                                     | 0.4             | 10                                 | 0.17                          | 0.07                           | 0.11                 |
| Reactor                                              | 90 W                                       | 0.09            | 3000                               | 50.00                         | 4.50                           | 33.00                |
| Bomba<br>de vacío                                    | 0.25 HP                                    | 0.18            | 120                                | 2.00                          | 0.37                           | 1.32                 |
| Destilador                                           | 4KW                                        | 4               | 120                                | 2.00                          | 8.00                           | 1.32                 |
| Costo de la energía en Lima (San Juan de Lurigancho) |                                            |                 |                                    |                               |                                | 0.66                 |
| Costo total por lote                                 |                                            |                 |                                    |                               |                                | 35.86                |
| Costo total por mes                                  |                                            |                 |                                    |                               |                                | 358.6                |
|                                                      |                                            |                 |                                    |                               |                                | 0                    |

La Tabla 11 presenta las características del local en alquiler propuesto para la instalación de la planta piloto de bioetanol. En esta tabla se reportan aspectos clave como el precio mensual, el área total disponible y otras características relevantes, como la ubicación, el acceso a servicios básicos y la infraestructura eléctrica. Estos factores son

determinantes para evaluar la idoneidad del espacio, asegurando que cumple con los requisitos técnicos y de seguridad necesarios para el correcto funcionamiento de la planta piloto. Además, la tabla permite una comparación objetiva para tomar decisiones informadas sobre la selección del local más adecuado.

**Tabla 11.** Características del local para la instalación de la planta piloto de producción de bioetanol a partir de cáscara de *Mangifera indica* L.

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Costo mensual del alquiler</b>     | S/ 3500                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Ubicación del local industrial</b> | Campoy, 153 Avenida Principal Malecón Checa                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Distrito-Provincia</b>             | San Juan de Lurigancho-Lima                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Área</b>                           | 150 m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Características</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Local totalmente techado</li> <li>• Cuenta con gran portón para facilitar la entrada de vehículos o camiones.</li> <li>• Zona para oficina y baño. cuenta con agua y corriente trifásica.</li> </ul> |

**Imagen de Referencia**



### 5.6.2. Financiamiento.

La Tabla 12 presenta el plan de financiamiento propuesto para cubrir la inversión inicial en la producción de bioetanol a partir de la cáscara de mango. En esta tabla se

detalla el monto del préstamo requerido, las condiciones del financiamiento, incluyendo la tasa de interés, el plazo de amortización, y el cronograma de pagos. Esta información es fundamental para comprender el flujo de capital necesario para poner en marcha el proyecto, asegurando la liquidez adecuada durante las primeras etapas de operación. Las características del plan de financiamiento se reportaron en la Tabla 12. El plan de financiamiento es un componente esencial para evaluar la viabilidad económica del proyecto y gestionar adecuadamente los recursos financieros.

**Tabla 12.** Plan de financiamiento económico para la construcción de una planta piloto de bioetanol producido a partir de *Mangifera indica* L.

| Mes | Cuota       | Capital     | Intereses   | Saldo (soles) |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 0   |             |             |             | 30000         |
| 1   | S/ 3,338.99 | S/ 338.99   | S/ 3,000.00 | 29661.01      |
| 2   | S/ 3,338.99 | S/ 372.89   | S/ 2,966.10 | 29288.11      |
| 3   | S/ 3,338.99 | S/ 410.18   | S/ 2,928.81 | 28,877.93     |
| 4   | S/ 3,338.99 | S/ 451.20   | S/ 2,887.79 | 28,426.73     |
| 5   | S/ 3,338.99 | S/ 496.32   | S/ 2,842.67 | 27,930.41     |
| 6   | S/ 3,338.99 | S/ 545.95   | S/ 2,793.04 | 27,384.46     |
| 7   | S/ 3,338.99 | S/ 600.55   | S/ 2,738.45 | 26,783.91     |
| 8   | S/ 3,338.99 | S/ 660.60   | S/ 2,678.39 | 26,123.31     |
| 9   | S/ 3,338.99 | S/ 726.66   | S/ 2,612.33 | 25,396.65     |
| 10  | S/ 3,338.99 | S/ 799.33   | S/ 2,539.66 | 24,597.32     |
| 11  | S/ 3,338.99 | S/ 879.26   | S/ 2,459.73 | 23,718.06     |
| 12  | S/ 3,338.99 | S/ 967.19   | S/ 2,371.81 | 22,750.87     |
| 13  | S/ 3,338.99 | S/ 1,063.91 | S/ 2,275.09 | 21,686.97     |
| 14  | S/ 3,338.99 | S/ 1,170.30 | S/ 2,168.70 | 20,516.67     |
| 15  | S/ 3,338.99 | S/ 1,287.33 | S/ 2,051.67 | 19,229.34     |
| 16  | S/ 3,338.99 | S/ 1,416.06 | S/ 1,922.93 | 17,813.28     |
| 17  | S/ 3,338.99 | S/ 1,557.67 | S/ 1,781.33 | 16,255.62     |
| 18  | S/ 3,338.99 | S/ 1,713.43 | S/ 1,625.56 | 14,542.19     |
| 19  | S/ 3,338.99 | S/ 1,884.77 | S/ 1,454.22 | 12,657.41     |
| 20  | S/ 3,338.99 | S/ 2,073.25 | S/ 1,265.74 | 10,584.16     |
| 21  | S/ 3,338.99 | S/ 2,280.58 | S/ 1,058.42 | 8,303.58      |

|    |             |             |           |          |
|----|-------------|-------------|-----------|----------|
| 22 | S/ 3,338.99 | S/ 2,508.64 | S/ 830.36 | 5,794.95 |
| 23 | S/ 3,338.99 | S/ 2,759.50 | S/ 579.49 | 3,035.45 |
| 24 | S/ 3,338.99 | S/ 3,035.45 | S/ 303.54 | - 0.00   |

**Tabla 13** Condiciones del plan de financiamiento.

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| <b>Tasa interés</b>           | 10%    |
| <b>N° periodos</b>            | 24     |
| <b>Valor préstamo (soles)</b> | 30000  |
|                               | 3338.9 |
| <b>Cuota nivel (soles)</b>    | 9      |

La Tabla 14 presenta el flujo de caja proyectado para la planta piloto de bioetanol a partir de la cáscara de mango. En ella se detalla el ingreso esperado, los costos operativos, y las salidas de efectivo durante el periodo de evaluación. Esta tabla permite analizar la sostenibilidad financiera del proyecto, identificando los momentos de entrada y salida de capital, así como el balance neto en cada periodo. Además, proporciona una visión clara del comportamiento del flujo de caja a lo largo del tiempo, facilitando la toma de decisiones financieras estratégicas.



|                    |       |          |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |          |
|--------------------|-------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| <b>Costo Total</b> | Soles | 30161.17 | 13171.0<br>4 | 13137.1<br>4 | 13099.8<br>5 | 13058.8<br>4 | 13013.7<br>2 | 12964.0<br>8 | 12909.4<br>9 | 12849.4<br>3 | 12783.3<br>7 | 12710.7<br>1 | 12630.7<br>8 | 12542.85 |
| <b>Flujo Neto</b>  |       | -30161.1 | -2371.0      | -1077.1      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |          |
| <b>Financiero</b>  | Soles | 7        | 4            | 4            | 1300.15      | 3141.16      | 3246.28      | 3295.92      | 3350.51      | 3410.57      | 3476.63      | 3549.29      | 3629.22      | 3717.15  |

[illegible]

|                         |          |       |           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------|----------|-------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Servicio de Instalación |          | Soles | 1200      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Fijos                   | Alquiler | Soles | 0         | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    | 3500    |
| Costo                   |          | Soles | 30161.1   | 12446.1 | 12339.7 | 12222.7 | 12093.9 | 11952.3 | 11796.6 | 11625.2 | 11436.7 | 11229.4 | 11001.4 | 10750.5 |
| Total                   |          |       | 7         | 3       | 4       | 1       | 8       | 7       | 1       | 6       | 8       | 6       | 0       | 4       |
| Flujo Neto Financiero   |          | Soles | -30161.17 | 3813.87 | 3920.26 | 4037.29 | 4166.02 | 4307.63 | 4463.39 | 4634.74 | 4823.22 | 5030.54 | 5258.60 | 5509.46 |

La Figura 23 ilustra el patrón de flujo de caja correspondiente a los costos operativos de la planta piloto de bioetanol a partir de la cáscara de mango. En este gráfico se visualizan las salidas de efectivo a lo largo del tiempo, permitiendo identificar tendencias, picos de gasto y variaciones en los costos operacionales. Esta representación gráfica es clave para comprender cómo se distribuyen los costos a lo largo del proyecto, facilitando el análisis de eficiencia financiera y la planificación de estrategias para optimizar el uso de recursos en cada etapa del proceso productivo.

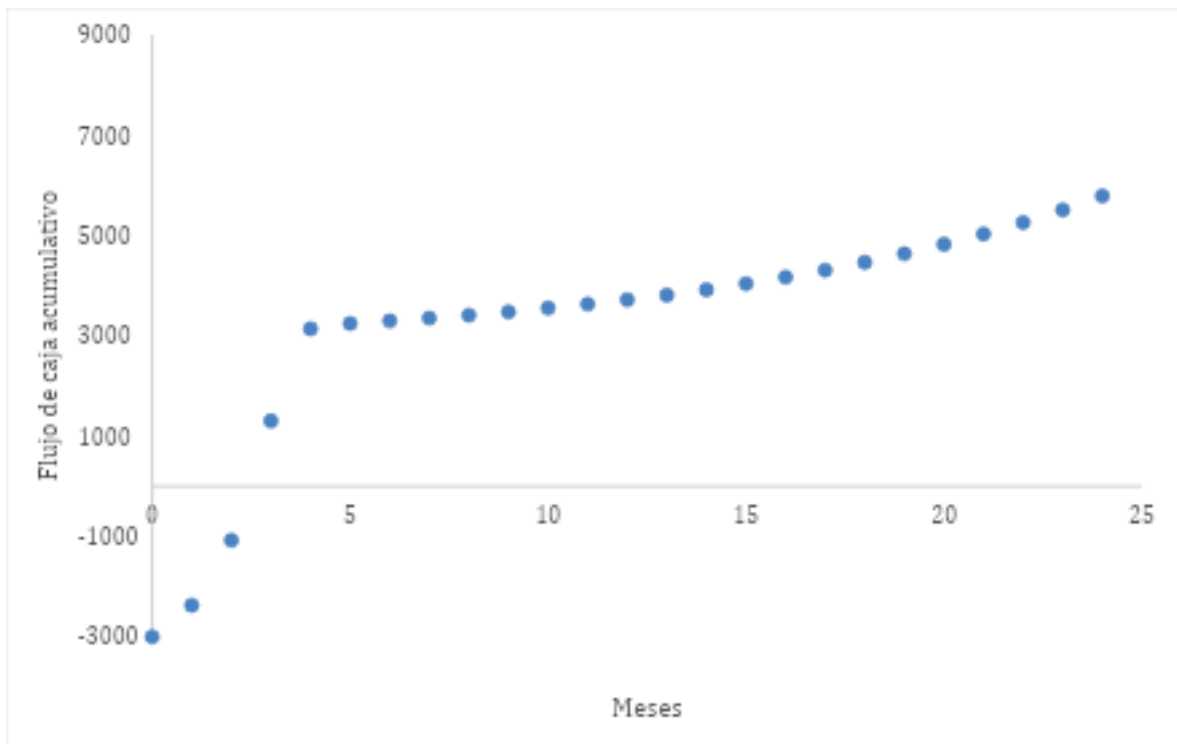


**Figura 23.** Patrón de flujo de caja correspondiente a la planta piloto de bioetanol a partir de *Mangifera indica* L.

#### A) Variables y parámetros notables

Los parámetros económicos como el Valor Actual Neto (VAN), el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno Financiera (TIRF) son fundamentales en la toma de decisiones de inversión en proyectos. Estos indicadores permiten a los inversionistas evaluar la viabilidad financiera de un proyecto al comparar los flujos de caja esperados con la inversión inicial. Un VAN positivo sugiere que un proyecto generará valor para la empresa, mientras que el VPN ajusta esos flujos al tiempo, proporcionando una visión más precisa del rendimiento. Por otro lado, la TIRF ofrece una tasa de retorno que ayuda a determinar si el proyecto supera el costo de capital. Juntos, estos parámetros facilitan una

toma de decisiones informada, optimizando la asignación de recursos y maximizando los retornos esperados.

La Tabla 15 presenta los parámetros económicos clave para evaluar la viabilidad financiera del proyecto de una planta piloto de bioetanol a partir de la cáscara de mango (*Mangifera indica L.*). En esta tabla se incluyen métricas como el Valor Actual Neto (VAN), el Valor Neto Actual (VNA), el Retorno sobre la Inversión (ROI) y la Tasa Interna de Retorno Financiera (TIRF). Estas cifras son esenciales para analizar la rentabilidad del proyecto y su capacidad para generar flujos de caja sostenibles en el tiempo. A través de estos indicadores, se busca proporcionar una visión clara de los beneficios económicos que se pueden obtener, así como los riesgos asociados a la inversión. La evaluación de estos parámetros ayudará a los tomadores de decisiones a determinar la viabilidad y la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

**Tabla 15.** Variables y parámetros notables para la evaluación de la rentabilidad de una planta piloto de bioetanol en base a cáscara de *Mangifera indica L.*

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tasa descuento</b>                          | 5%        |
| <b>VAN (soles)</b>                             | 11,045.39 |
| <b>TIRF</b>                                    | 7%        |
| <b>ROI (2 años)</b>                            | 79.89%    |
| <b>Eficiencia energética</b>                   | 75.06%    |
| <b>Costo de inversión en el mes 24 (soles)</b> | 30,975.52 |
| <b>Costo del capital</b>                       | 13.49%    |
| <b>Costo de capital fijo (soles)</b>           | 93,499.63 |
| <b>PPC (soles)</b>                             | 22,873.14 |
| <b>Capital fijo (soles)</b>                    | 9,042.87  |
| <b>VPN (soles)</b>                             | 11,045.39 |

## 6. Discusión de Resultados

Existen metodologías, herramientas computacionales y las bases técnicas-económicas para plantear un diseño de proceso y de planta de producción de bioetanol a partir de la cáscara de *Mangifera indica* L.; sin embargo, no ha sido posible usar todo ese potencial de recursos debido a no existencia de trabajos previos o relacionados a este tópico. No obstante, se ha podido lograr un trabajo incipiente que se espera sea un punto de partida o base para trabajos posteriores. A continuación se detallan los logros obtenidos por este trabajo.

Los resultados obtenidos del potencial de la cáscara de mango como materia prima para la producción de bioetanol indican que tienen importantes implicaciones para el diseño y la viabilidad de la planta. El alto contenido de carbohidratos (82.99%) sugiere que la cáscara de mango es una excelente fuente para la producción de bioetanol. Esto implica que la planta debe incorporar procesos de pretratamiento eficientes, como la hidrólisis ácida o enzimática, para descomponer la fibra y liberar los azúcares fermentables. Además, la adecuada gestión de la humedad (8.22%) y el bajo contenido de ceniza (1.53%) son factores que facilitarán un ambiente propicio para la fermentación, mejorando la calidad y el rendimiento del proceso.

En cuanto a los indicadores de desempeño, se destacan los siguientes aspectos:

- 1) Eficiencia de conversión: el rendimiento del bioetanol obtenido a partir de la cáscara de mango se ha evaluado en función de la conversión de azúcares fermentables. Se determinó que el proceso logra una eficiencia de conversión del 0.90 litros de bioetanol por kg de mango procesado, lo que indica un aprovechamiento efectivo de la materia prima. Esta cifra es competitiva en comparación con otras fuentes, donde los rendimientos varían entre 0.7 y 1.0 L/kg, dependiendo del pretratamiento y las condiciones de fermentación. El control de variables operativas como temperatura (25-35°C), pH (4-5) y tiempo de fermentación (48-72 horas) son clave para optimizar la conversión de azúcares.
- 2) Consumo energético: el análisis del consumo energético en la planta piloto de producción de bioetanol a partir de cáscara de mango Haden revela una eficiencia energética del 75.06%, lo que indica un uso optimizado de los recursos energéticos en el proceso. El desglose de consumo por equipo muestra que los equipos con mayor demanda de energía son:

- Destilador (8.00 kwh por lote)
- Reactor (4.50 kwh por lote)
- Molino (0.92 kwh por lote)
- Bomba de vacío (0.37 kwh por lote)
- Tamizador (0.07 kwh por lote)

En términos económicos, el costo total de energía por lote asciende a 35.86 soles, mientras que el gasto mensual se estima en 358.60 soles. Estos valores reflejan un consumo eficiente en comparación con otros sistemas de producción de bioetanol, aunque siempre puede existir oportunidades de mejora para incrementar la sostenibilidad del proceso.

- 3) Emisiones de  $CO_2$ : el análisis de las emisiones de  $CO_2$  generadas y evitadas en la producción de bioetanol a partir de cáscara de mango indica que el proceso tiene un impacto ambiental significativamente menor en comparación con los combustibles fósiles. Según los cálculos del modelo preliminar de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), se estima que por cada litro de bioetanol producido se evitan 2.3 kg de  $CO_2$ . Dado que el rendimiento del bioetanol en esta planta es de 0.90 L por kg de mango procesado, la producción anual proyectada contribuiría a una reducción sustancial de emisiones. Además, el diseño modular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales refuerzan el enfoque de economía circular del proceso, minimizando desechos y promoviendo un uso más eficiente de los recursos.

Por último, el análisis financiero demostró que el proyecto es viable, con un Valor Actual Neto (VAN) de S/ 11,045.39 y un Retorno sobre la Inversión (ROI) del 79.89% en dos años. Estos valores están estrechamente relacionados con la eficiencia energética del proceso, que alcanza un 75.06%, permitiendo reducir los costos operativos. El costo total de energía por lote es de 35.86 soles, lo que representa un gasto mensual de 358.60 soles para la producción continua en la planta piloto.

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los indicadores más importantes en la evaluación de proyectos. Un VAN de S/ 11,045.39 indica que el proyecto generará un retorno adicional significativo por encima de la inversión inicial, lo que sugiere que es financieramente viable. Este resultado implica que, descontando los flujos de caja futuros a una tasa de interés apropiada, el proyecto aún ofrece un valor positivo.

La Tasa Interna de Retorno Financiera (TIRF) del 7% es otro parámetro clave que proporciona una visión del rendimiento esperado del proyecto en comparación con el costo de capital. Este valor sugiere que, si bien el proyecto genera un retorno, puede ser considerado relativamente bajo en comparación con las expectativas del mercado o con proyectos de mayor riesgo. Sin embargo, en sectores donde los márgenes son más estables, una TIRF del 7% puede ser suficiente para justificar la inversión.

El Retorno sobre la Inversión (ROI) de 79.89% en un periodo de dos años resalta la eficiencia del proyecto en la generación de beneficios en relación con la inversión inicial. Este valor es notablemente alto y sugiere que el proyecto no solo es viable, sino que también ofrece un retorno atractivo en un corto plazo.

Al considerar los tres parámetros en conjunto, se observa que el proyecto de bioetanol a partir de cáscara de mango no solo es financieramente viable, sino también altamente rentable; además, los costos estimados en esta tesis para el diseño modular son consistentes con los hallazgos de estudios similares, donde se resalta que la Modularización puede reducir hasta un 30% los costos iniciales de inversión.

## 7. Conclusiones

- El análisis proximal de la cáscara de mango Haden confirma que esta materia prima es una fuente rentable y eficiente para la producción de bioetanol. La composición química evaluada demuestra que tiene el contenido adecuado de carbohidratos fermentables, haciéndola una materia prima ideal para la producción de bioetanol.
- El diseño modular ha permitido establecer que el proceso de producción de bioetanol puede escalar a diferentes niveles industriales sin comprometer su eficiencia y rentabilidad. Su flexibilidad lo convierte en una opción viable para distintos contextos productivos, garantizando estabilidad en los costos operativos y en la calidad del producto final.
- Los indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN), el Retorno sobre la Inversión (ROI) y la Tasa Interna de Retorno Financiera (TIRF), sobre la base de un análisis económico usando un proceso de simulación, indica que este proyecto es financieramente viable y también altamente rentable.
- Finalmente, se puede afirmar que, aunque no se ha seguido un procedimiento riguroso ni se ha usado metodologías modernas, los resultados obtenidos no solo destacan la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino también su sostenibilidad ambiental. Los indicadores de desempeño y el análisis LCA ofrecen un marco integral para evaluar la rentabilidad y el impacto del proyecto, lo que facilita la toma de decisiones informadas y estratégicas. La combinación de un alto ROI, un bajo impacto ambiental y una viabilidad financiera sólida posiciona al proyecto de bioetanol a partir de cáscara de mango como una opción prometedora para el futuro.

## **8. Recomendaciones**

La investigación realizada hasta el momento indica que aún faltan pruebas y experimentaciones necesarias para determinar la escalabilidad del proyecto. La escalabilidad implica llevar a cabo pruebas en diferentes niveles: laboratorio, banco y planta piloto, antes de su implementación a gran escala. Por lo que se requiere completar las pruebas en laboratorio, banco y planta piloto para asegurar que el proceso sea escalable y viable para su implementación a gran escala. Cada fase de pruebas aporta información crucial que permite refinar y optimizar el proceso antes de considerar su aplicación industrial.

## 9. Referencias bibliográficas

- Agricultura de precisión | infoagro.pe | Perú. (2015.). Infoagro.pe. <https://www.infoagro.pe/>
- Aguilar, A. Características fisicoquímicas de fibra y mezclas de fibra dietética obtenidas a partir de residuos de naranja (*Citrus sinensis*), salvado de cebada (*Hordeum vulgare*) y cáscara de tomate (*Ipomoea botatas* (L.) Lam)". Tesis para obtener el Grado de Magíster Scientiae UNALM. Lima – Perú. 2002
- Allen D. H. (1980). A Guide to the Economic Evaluation of Projects. Institution of Chemical Engineers.
- Alvarado-Morales, M., Hamid, M. K. A., Sin, G., Gernaey, K. V., Woodley, J. M., & Gani, R. (2010). A model-based methodology for simultaneous design and control of a bioethanol production process. *Computers & Chemical Engineering*, 34(12), 2043–2061. doi:10.1016/j.compchemeng.2010.07.
- Anon. (2004). Design and Calculation of Chemical Engineering Projects. *Process Engineering*, 85(6), 123-130.
- Aquije Zurca, K. C. (2021). Diseño de un proceso para la producción de bioetanol a partir de cáscara de papa. Tesis de Título Profesional, Universidad de Ingeniería y Tecnología. Repositorio Institucional UTEC. <http://repositorio.utec.edu.pe/handle/20.500.12815/255>
- Arias, X. R. (2018). Estudio del comportamiento del motor a gasolina utilizando bioetanol a partir de despojos de maíz en la provincia de Imbabura - Ecuador. Tesis de grado.
- Arora, A., Banerjee, J., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., Patti, AF, (2018). Diseño de procesos y análisis tecnoeconómico de una biorrefinería integrada de residuos de procesamiento de mango. *Indiana Prod. de cultivos*. 116, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.061>
- Balcázar, J. Y. (2020). Estudio comparativo de producción de bioetanol a través de la fermentación en batch usando *saccharomyces cerevisiae*, entre *mangifera indica*, *vitis vinifera* y biomasa hidrolizada de la *eichhornia crassipes*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11371/3231>

Baldea, M., Edgar, T. F., Stanley, B. L., Kiss, A. A. (2017). Modular manufacturing processes: Status, challenges, and opportunities. *AIChE Journal*, 63(10), 4262–4272. doi:10.1002/aic.15872.

Becker, T., Lier, S., & Werners, B. (2019). Value of modular production concepts in future chemical industry production networks. *European Journal of Operational Research*.

Bieringer, T., Grünewald, M., & Lier, S. (2016). Advances in flexible modular chemical plants. *Chemical Engineering Progress*.

Bridgwater, A. V. (1988). Costing and Project Evaluation. Instituto de Ingenieros Químicos (IChemE).

Cedeño-Reyes, J. L., y Zambrano-Delgado, J. B. (2014). Cáscaras De Piña Y Mango Deshidratadas Como Fuente De Fibra Dietética En Producción De Galletas. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López, Calceta, Ecuador.

Chatzimaliakas, F.; Christianides, D.; Malamis, D.; Mai, S.; Barampouti, E.M. (2023). Piloting Bioethanol Production from Source-Separated Food Waste Boosts Technology Readiness. *Sustainability*, 15, 16349. <https://doi.org/10.3390/su152316349>.

Crowl, D. A. & Louvar, J. F. (2011). Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications (3rd ed.). Prentice Hall.

Edwards D., Girouard G. (2024). Sustainable Delivery of Modular Process Plan Projects. *Chemical Engineering Progress*, 120(1), 35-39.

El-Halwagi M. M. Capítulo 4: Process Integration for Sustainable Design del libro: Ruiz-Mercado G. y Cabezas H. (2016). Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes. Butterworth-Heinemann – Elsevier.

Ellis M, Durand H, Christofides PD. 2014. A tutorial review of economic model predictive control methods. *J. Process Control* 24:1156–78 54. Amrit R, Rawlings JB,

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2004). Terminología unificada sobre bioenergía: Terminología de los dendrocombustibles sólidos. Roma, Italia: Departamento Forestal de la FAO, 58p.

Fruist In Peru. (2019, 1 abril). *HADEN* | Perú Fruits - Deliciosos Mangos de exportación. Fruits In Peru. <https://fruitsinperu.com/producto/mango-haden/>

Gao, X., Abdul Raman, A. A., Hizaddin, H. F., & Bello, M. M. (2020). Systematic review on the implementation methodologies of inherent safety in chemical process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 104092. Doi: 10.1016/j.jlp.2020.104092.

Gebre G, Gebremariam S, Keneni Y, Marchetti J. (2023) Valorización de residuos y subproductos del procesamiento de frutas tropicales para la producción de biocombustibles. *Sociedad de Química Industria*, 17, 1807–1842, doi: 10.1002/bbb.2531

Giardinella, S.; Brownstein, S.; Dietsch, J.; Gioja, L.; O'Brien, K. (2024). Managing 'First-of-a-Kind' Projects. *Chemical Engineering*; 131 (6), 23-32.

Grünewald, M., Lier, S., & Wörsdörfer, M. (2016). Economic and environmental benefits of modular chemical plants. *Journal of Process Systems Engineering*.

Han Seer, Q., & Nandong, J. (2016). Advanced Expanded Microbial Kinetics (EMK) Model for Ethanol. *ScienceDirect*, 417-425.

Hendershot, D. C. (2012). Inherently Safer Design: The Fundamentals. *Chemical Engineering Progress*; 108(1), 40-42.

Infante Valdivia, D. L., & Pampa Ayala, E. N. (2019). Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en el rendimiento de biocombustible etanol a partir de residuos lignocelulósicos de la cáscara de arroz (*Oryza sativa*).

Katarzyna Robak, Maria Balcerek, Current state-of-the-art in ethanol production from lignocellulosic feedstocks, *Microbiological Research*, Volume 240, 2020, 126534, ISSN 0944-5013, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126534>.

Kokossis, A. C., & Yang, A. (2010). On the use of systems technologies and a systematic approach for the synthesis and the design of future biorefineries. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1397–1405. Doi: 10.1016/j.compchemeng.2010.020.

Kostermans, A. J. G. H., Bompard, J. M. (1993). The mangoes: their botany, nomenclature, horticulture and utilization. Academic Press, London

Lebaka, V. R., Wee, Y.-J., Ye, W., & Korivi, M. (2021). Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Three Different Parts of Mango Fruit. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 741. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020741>.

Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2008). Principles of Biochemistry (5th ed.). W.H. Freeman and Company.

Li S, Mirlekar G, Ruiz-Mercado GJ, Lima FV. Development of Chemical Process Design and Control for Sustainability. *Processes*. 2016; 4(3):23. <https://doi.org/10.3390/pr4030023>

Lier, S., & Grünewald, M. (2011). Net present value analysis of modular chemical production plants. *Chemical Engineering & Technology*.

Llenque-Díaz, L. A., Quintana Díaz, A., Torres Lino, L., & Segura Vega, R. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. *REBIOL*, 40(1), 21-29. Recuperado a partir de <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/2991>

Lung Ong, K., Kaur, G., Pensupa, N., Uisan, K., & Ki lin, C. (2018). Trends in food waste valorization for the production of chemicals. *ELSEVIER*, 100-112

Luo J., Moncada J., Ramirez A. (2022). Development of a Conceptual Framework for Evaluating the Flexibility of Future Chemical Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61 (9), 3219-3232. Doi: 10.1021/acs.iecr.1c03874

Manhongo TT, Chimphango A, Thornley P, Röder M, (2021) Evaluación económica y ambiental de biorrefinerías integradas de desechos de mango. *Journal of Cleaner Production*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129335>.

Marín, T., & León, A. (2018). Producción de bioetanol a través de la fermentación en BATCH de la cáscara de mango (*Mangifera indica*) usando como inóculo la *Saccharomyces cerevisiae* (Vol. 2). Fundación Universitaria los Libertadores

Melo, M., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2006). Challenges and opportunities in modular chemical plant design. *Journal of Operational Research Society*, 57(8), 907–921.

MOK, C., Puligundla, P., Obulam, V. S. R., & Oh, S. E. (2014). Biotechnological potentialities and valorization of mango peel waste: a review. *Sains Malays*, 43(12), 1901-1906.

Mujica J, Fernández-Maldonado E, Sousa E, Itzel Silva Monroy, Katherine Paucar, Joe Infante, Estefany Rojas, Alejandro Chirinos. (2023) REPSOL: UNA CATÁSTROFE QUE SE PUDO EVITAR Impactos del derrame de petróleo en el mar peruano y en los derechos de la población en Ventanilla (1ed) Perú EQUIDAD

Orizano Acuña, V., & Valdizán Espinoza, H. (2021). Aprovechamiento de cáliz de aguaymanto (*Physalis Peruviana*) y cáscara de yacón (*Smallanthus Sonchifolius*) para la producción de bioetanol.

Petroperú (2023) Estadística mensual de hidrocarburos 2023  
<https://www.perupetro.com.pe/wps/wcm/connect/corporativo/d0c43328-9eb5-4e6a-9fd1-37d7168f3162/Estadistica+Mensual+-+Enero+2023.pdf?MOD=AJPERES>

Química de los alimentos (Segunda edición **1997**). H.D. **Belitz** y W. Grosch. ISBN 13: 9788420008356. Idioma: Español. Librería: Libros Angulo, Madrid, MADRID

Reddy L, Avila S., Reddy S. (2015). La viabilidad de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) como sustrato alternativo para la producción de butanol, *BioResources* 10(3), 4453-4459.

Reddy L.V., Vijaya O., Reddy S., Wee, Y., (2011). Production of ethanol from mango (*Mangifera indica* L.) peel by *Saccharomyces cerevisiae* CFTRI101. *African Journal of Biotechnology*. 10. 4183-4189.

Robak, K. and Balcerek, M. (2020). Current state-of-the-art in ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Microbiological Research*, 240:126534

Ruiz-Femenia, R., Fernández-Torres, M. J., Salcedo-Díaz, R., Gómez-Rico, M. F., & Caballero, J. A. (2017). Systematic Tools for the Conceptual Design of Inherently Safer Chemical Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(25), 7301–7313. Doi: 10.1021/acs.iecr.7b00901.

Ruiz-Mercado G. y Cabezas H. (2016). Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes. Butterworth-Heinemann – Elsevier.

Rusiecki JA, Denic-Roberts H, Thomas DL, Collen J, Barrett J, Christenbury K, Engel L. S. (2022). Incidence of chronic respiratory conditions among oil spill responders: Five years of followup in the Deepwater Horizon Oil Spill Coast Guard Cohort study. *Environ Res*. doi: 10.1016/j. envres.2021.111824.

Santo R., Rose, M.; Keller A-; Moore D. (2023). *Chemical Engineering Progress*; 119(8), 43-49.

Shaik, A. M., Rao, V. V. S. K. & Rao, C. S. (2015). Development of modular manufacturing systems—a review. *Int J Adv Manuf Technol* 76, 789–802. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6289-2>.

Sharma, B., Larroche, C., Dussap, C.-G. (2020). Comprehensive assessment of 2g bioethanol production. *Bioresource Technology*, 313:123630.

Simkoff, J. M., Lejarza, F., Kelley, M. T., Tsay, C., & Baldea, M. (2020). Process control and energy efficiency. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 11(1), 423-445.

Singh, S. P., & Agarwal, A. K. (2010). Bioethanol production from lignocellulosic biomass: Technology and economics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2672-2685. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.024>

Smith R. (2023). *Process Plant Design*. Wiley

Stark K., Hoernicke M., Haller A. (2019). Modular Process Plants: Part 1 - Process module engineering. *ABB Review* (2):72-77.

Sulogna R. (2017). Consider Modular Plant Design. *Chemical Engineering Progress*, 113 (5); 28-31.

Tejeda L., Teja C., Villabona A., Tarón A., Henado D., Marimon W., Castillo C. y Alvear M. (2010). Producción de etanol carburante a partir de la cáscara de mango (*Mangifera indica*) y papaya (*Carica papaya*). *Revista Ciencias e Ingeniería al Día de la Facultad de Ingeniería*, 4(1), 41-47. <https://www.researchgate.net/publication/327920092> Produccion de etanol carburante a partir de las cascara de mango Mangife

Trillo, E. (2021). Los tres grandes problemas del biodiésel. *Auto Bild España*. <https://www.autobild.es/noticias/tres-grandes-problemas-biodiesel-970575>

Tye, Y. Y., Lee, K. T., Wan Abdullah, W. N., & Leh, C. P. (2016). The world availability of non-wood lignocellulosic biomass for the production of cellulosic ethanol and potential pretreatments for the enhancement of enzymatic saccharification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.072>

Villegas, D. (2023). Propuesta de instalación de una planta de producción de pectina para el aprovechamiento de la cáscara de mango. [Tesis para optar por el título de Ingeniero Industrial]. UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

Vinotha, T.; Umamaheswari, N.; Pandiyan, J.; Al-Ghanim, KA; Nicoletti, M.; Govindarajan, M. (2023) Producción de biocombustibles a partir de cáscaras de mango,

naranja y tapioca mediante fermentación utilizando un consorcio de bacterias: valorización de residuos agrícolas y alimentarios. *Fermentación* 2023,9, 678. Doi: 10.3390/fermentation9070678

Wills, B.A., & Napier-Munn, T.J. (2006). "Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery". Elsevier.

Wörsdörfer, M., Lier, S., & Crasselt, C. (2016). Modular plants in the context of the circular economy. *Sustainable Process Engineering Journal*.

## 11. Anexos

### Anexo 1 Análisis proximal de la cáscara de mango seco



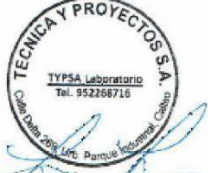
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE-099

#### INFORME DE ENSAYO N° 000154731

CLIENTE: MARIELAADCO  
DOMICILIO LEGAL: Mz. A Lt.15 AA.HH. Paraiso - Villa María del Triunfo ( LIMA )  
REFERENCIA CLIENTE: CASCARA DE MANGO HADEN - SECO  
CÓDIGO TYPESA: 000140398  
MATRIZ: Frutas y hortalizas  
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: Cotización N° 00020013339  
DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTO TOMA DE MUESTRA: Tomada por el cliente  
CONDICIONES AMBIENTALES EN LA TOMA DE MUESTRAS:  
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO: Villa María del Triunfo  
FECHA DE TOMA: 24/06/2024 08:00:00 a.m.  
FECHA DE RECEPCIÓN: 24/06/2024  
FECHA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS: 24/06/2024 - 11/07/2024

| RESULTADOS ANALÍTICOS FÍSICO-QUÍMICOS GENERALES |                    |           |                                                                                              |                              |      |
|-------------------------------------------------|--------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------|
| Parámetro                                       | Unidad             | Resultado | Método                                                                                       | Técnica Empleada             | L.D. |
| Carbohidratos                                   | %<br>Carbohidratos | 82.99     | PNTE-LTG-29, Rev.0<br>Determinación de Carbohidratos                                         | Cálculo                      |      |
| Ceniza                                          | %                  | 1.53      | AOAC 940.26-1940, Ash of<br>fruits and fruit products                                        | Gravimetría                  | 0.01 |
| Fibra Cruda                                     | %                  | 20.84     | AOAC 985.29 20th Ed. 2016,<br>Total Dietary Fiber in foods.<br>Enzymatic-gravimetric method. | Enzymatic-gravimetric method |      |
| Grasa                                           | %                  | 2.58      | AOAC 930.09-1930, Ether<br>extract of plants. Gravimetric<br>method                          | Gravimetría                  | 0.5  |
| Humedad                                         | %                  | 8.22      | AOAC 930.15 Loss on Drying                                                                   | Gravimetría                  | 0.09 |
| Proteína (AOAC 920.152)                         | %                  | 4.68      | AOAC Official Method 920.152<br>Protein in Fruits Products 20th<br>Ed.2016                   | Volumetría                   | 0.01 |

Callao, 11 de Julio de 2024

  
 Fdo. Vanessa León Legua  
 Jefe de Laboratorio General y Espectroscopia  
 CQP N° 927

L.C. Límite de cuantificación/L.D. Límite de detección

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el **INACAL - DA**

NOTA:

Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de TYPESA, S.A. Sucursal del Perú. Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC. Las muestras serán conservadas de acuerdo con el periodo de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días calendario después de la recepción en el laboratorio. Resultados válidos para la muestra referida en el presente informe. El laboratorio TYPESA no se responsabiliza del origen o fuente de las muestras y su información cuando es proporcionada por el cliente.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

LABORATORIO TYPESA PERÚ, Urb. Parque Industrial Callao, Cl Delta, 269, Callao. Telf 511-711-9736/711-9753 E-mail: [labperu@typesa.com](mailto:labperu@typesa.com)

## **Anexo 2** Pensamientos Concluyentes de Sostenibilidad

El-Halwagi M. M. Capítulo 4: Process Integration for Sustainable Design del libro: Ruiz-Mercado G. y Cabezas H. (2016). Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes. Butterworth-Heinemann – Elsevier.

De acuerdo a un informe de la ORNL se identificó las siguientes necesidades de materiales/equipos de procesos de baja energía para su implementación:

1. Proporcionar la selectividad requerida;
2. Proporcionar el rendimiento requerido;
3. Proporcionar un rendimiento adecuado durante largos períodos de tiempo;
4. Ser lo suficientemente duradero para mantener un rendimiento óptimo en entornos hostiles;
5. Proporcionar suficientes incentivos de economías de escala para procesos de gran volumen.

Algunos de los principales pilares que sustentan el diseño sostenible de procesos industriales son:

- Utilización y conservación efectiva de los recursos naturales (masa y energía)
- Desarrollo y aplicación de tecnologías y moléculas más ecológicas.
- Mejora del rendimiento, la eficiencia y la rentabilidad del proceso.

Estos pilares se pueden lograr de manera metódica y efectiva mediante el uso de un marco poderoso y un conjunto de herramientas denominado "integración de procesos". Una posible definición de integración de procesos es que es un "enfoque holístico del diseño y operación del proceso que enfatiza la unidad del proceso". Todas las unidades, corrientes, especies y recursos se analizan, sinergizan y optimizan desde una perspectiva general. Hay tres categorías clave de integración de procesos: (1) energía, (2) masa y (3) integración de propiedades, que ofrecen un enfoque holístico para el diseño con atención específica a diversas formas de energía, especies y corrientes, y funcionalidades, respectivamente. La integración de procesos generalmente implica los siguientes pasos:

1. Identificación de tareas: para determinar los objetivos y actividades ejecutables.
2. Focalización: establecer un punto de referencia de excelencia para el desempeño
3. Generación y selección de alternativas (síntesis): generar alternativas que puedan alcanzar los objetivos deseados y seleccionarlas en función de criterios específicos (por ejemplo, económicos, ambientales, etc.)

4. Análisis de las alternativas seleccionadas: para predecir, validar o mejorar el desempeño de los esquemas de implementación elegidos.

La integración másica es una "metodología sistemática que proporciona una comprensión fundamental del flujo global de masa dentro del proceso y emplea esta comprensión para identificar objetivos de rendimiento y optimizar la generación y ruta de especies a lo largo del proceso". La figura 22 esquematiza la jerarquía de estrategias de integración masiva

Se pueden utilizar herramientas de evaluación comparativa para determinar los objetivos de consumo, producción y descarga de cada especie involucrada en el proceso. Una vez que se determinen estos objetivos, se podrán utilizar herramientas de integración masiva para alcanzar estos puntos de referencia. Se pueden utilizar varias estrategias para la implementación. Además de estos objetivos rigurosos, el diagrama también ofrece tres reglas de diseño que pueden usarse para sintetizar nuevas redes de reciclaje o criticar los sistemas existentes. Estas reglas son:

- No se debe pasar ningún caudal a través del pellizco (pinch) (es decir, los dos composites deben tocarse)
- No se deben descargar residuos de fuentes situadas debajo del punto de pellizco.
- No se debe usar alimento fresco en ningún fregadero por encima del punto de apuro.

Una categoría importante de las redes de conservación y reciclaje de recursos es la minimización del uso de agua dulce y la descarga de aguas residuales

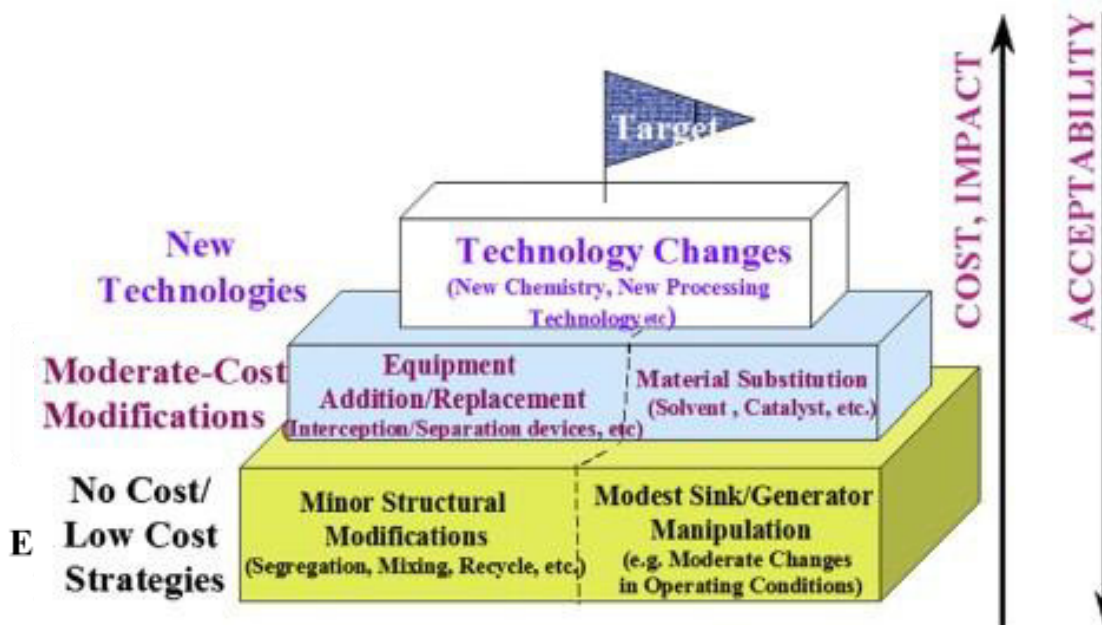


**Figura 24** Jerarquía de estrategias de integración masiva. De El-Halwagi (2016).

**Anexo 3** Índice de costos de las plantas de ingeniería química. *Chemical Engineering*, <http://www.chemengonline.com>.

