



**UNIVERSIDAD  
DE CIENFUEGOS**  
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRABAJO DE DIPLOMA  
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**Título:** *Propuesta para la aplicación de balances de materiales y energía mediante simuladores de procesos en la metodología de P+L para la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”*

**Autor:** César Amador Prieto

**Tutores:** Ing. Daylen Yara Font Prieur

MSc. Elisa María Chou Rodríguez

*Diciembre ,2021  
“Año 63 de la Revolución”*

# Declaratoria de autoridad

Declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado “Propuesta para la aplicación de balances de materiales y energía mediante simuladores de procesos en la metodología de P+L para la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” y por este medio reconozco al Departamento de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos con todos los derechos patrimoniales del mismo.

Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Autor: César Amador Prieto

\_\_\_\_\_

Tutores: Ing. Daylen Yara Font Prieur

MSc. Elisa María Chou Rodríguez

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

\_\_\_\_\_

Firma Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Vicedecano

## **Dedicatoria:**

*A mi querida madre Francisca Prieto Hernández por ejemplos de sacrificio, de perseverancia y constancia que la caracterizan. Por su paciencia, comprensión y apoyo en todas sus decisiones.*

*A mi querido padre Félix Amador Quesada por sus consejos, valores y motivaciones me ha permitido ser una persona de bien.*

*A las demás personas importantes en mi vida, mi inseparable hermano mostrando su apoyo incondicional*

## **Agradecimientos:**

*A mis tutores Daylen Yara Font Prieur y Elisa María Chou Rodríguez y al profesor Fernando E. Ramos Miranda por las ideas, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, por la dedicación y el tiempo brindado a este trabajo.*

# Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general .....	4
Objetivos Específicos .....	4
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
1.1 Las Producción más Limpia como estrategia ambiental. ....	5
1.1.2 Conceptos de Producción más Limpia. ....	7
1.2 Metodologías de la Producción más Limpia. ....	13
1.2.1 Metodología de P+L implementada en el Programa de P+L del ONUDI/PNUMA, consta de cuatro fases fundamentales tal y como se aprecia en la Figura 1.4 (Mille & Eimer, 2002). ....	14
1.2.2 Metodología de P+L descrita por Ochoa, consta de cinco fases fundamentales tal y como se aprecia en la Figura 1.5 (Ochoa, 2007). ....	16
1.2.3 Metodología de Producción más Limpia (P+L), descrita por (Rigola), consta de siete etapas fundamentales como se aprecia la Tabla 1.2 (Rigola, 1998). ....	18
1.2.4 Metodología de Producción más Limpia (P+L) descrita por (Orcés en ESPOL Ciencia 2003), aplicada a una empresa alimenticia, consta de tres fases fundamentales tal y como se muestra en la Figura 1.6. (Orcés, 2004) .....	19
1.3 La evaluación de las P+L como tercera fase de las metodologías. ....	19
1.4 Análisis crítico de los softwares más usados para los balances de materiales. ....	21
1.4.1 La simulación de procesos. Generalidades.....	21
1.4.2 Clasificación de los métodos de simulación.....	22
1.4.2 Software que se utilizan en la simulación de procesos químicos.....	23
1.5 Método de coeficiente de competencia .....	29
CAPÍTULO II. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA INVESTIGACIÓN.....	30
2.1 Propuesta metodológica para la aplicación del criterio de expertos.....	30
2.2 FASE I: Realización del diagnóstico a la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” .....	32
2.2.1 Caracterización de los procesos de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”. con enfoque de procesos.....	32
2.2.2 Descripción del Proceso Tecnológico .....	40
2.2.3 Balance de Materiales de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” .....	45
2.3 FASE II: Discriminación simple .....	50

2.4 FASE III: Aplicación del método Delphi para la selección de la alternativa.....	50
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	55
3.1 Resumen del diagnóstico a la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” .....	55
3.2 Discriminación simple.....	58
3.3 Aplicación del método Delphi para la selección de la alternativa.....	58
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES .....	62
BIBLIOGRAFÍA .....	63
ANEXOS .....	1

## **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una evaluación de la generación de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que afectan el proceso, las cuales pueden mejorar su desempeño ambiental si se aplican técnicas de Producción más Limpia mediante el uso de programas de simulación de procesos químicos. Para la realización de esta investigación fue necesario apoyarse en técnicas de manejo tales como: exploración y recorrido en planta, identificación de malas prácticas, revisión de documentos, criterios de expertos de la fábrica y balances de materia. Se identificó mediante el método de Delphi que de los programas de simulación mencionados el que más se adapta a la industria azucarera es el SIMFAD.

## **Abstract**

The present work aims to carry out an evaluation of the generation of solid, liquid and gaseous wastes that affect the process, which can improve its environmental performance if Cleaner Production techniques are applied through the use of chemical process simulation programs. To carry out this research it was necessary to rely on management techniques such as: exploration and tour in the plant, identification of bad practices, review of documents, criteria of experts of the factory and balances of matter. It was identified by the Delphi method that of the simulation programs mentioned the one that best suits the sugar industry is SIMFAD

# INTRODUCCIÓN

La preocupación por los problemas ambientales es evidente desde mediados del siglo XX, como consecuencia de la degradación provocada por el acelerado desarrollo industrial. A partir de entonces comienzan a difundirse ideas que cuestionan el modelo de crecimiento económico imperante y sus implicaciones en el deterioro del ambiente y la afectación de los recursos naturales.

El modelo de desarrollo que prevalece en el mundo, el cual ha permitido avances importantes, muestra, desde hace algunas décadas, manifestaciones inequívocas de crisis. Al respecto, la degradación ambiental y situaciones que desmejoran la calidad de vida de la población son preocupantes; de hecho, los problemas socioeconómicos y ambientales amenazan la sostenibilidad del propio proceso de desarrollo de la humanidad, a mediano y largo plazo.

La conservación del Medio Ambiente debe considerarse como un sistema de medidas sociales, socioeconómicas, y técnico-productivas dirigidas a la utilización racional de los recursos naturales, la conservación de los complejos naturales típicos, escasos y en vías de extinción, la protección del hombre como principal elemento, así como la defensa del medio ante la contaminación y la degradación.

A partir de aquí es donde se establece por primera vez el concepto de “Desarrollo Sostenible” y donde urge a la industria, desarrollar sistemas efectivos de gestión medioambiental que hagan compatible el desarrollo industrial con la salvaguarda del planeta en que vivimos.

Cuba no está excepto de problemas ambientales destacándose la contaminación de los suelos aguas y la atmosfera, la carencia de agua, pérdida de la superficie boscosa y la degradación de los suelos, todo esto debido a: la concentración de instalaciones industriales en zonas urbanas, lo que determina el empleo de las corrientes superficiales como receptoras de residuales crudos o parcialmente tratados, los que frecuentemente llegan a la zona costera, ausencia de tratamiento para las emisiones, inadecuado control sobre los niveles de ruidos que se generan y poca difusión sobre los efectos nocivos que provoca sobre la salud y el comportamiento social, el mal estado técnico del transporte y la carencia de normas técnicas

sobre emisiones, la carencia de la infraestructura técnica y el aún inadecuado manejo de los productos químicos y de los desechos peligrosos ocasiona problemas de contaminación con riesgo para la salud humana.

Para minimizar estos impactos ambientales resulta imprescindible la implementación de una estrategia de Producción más Limpia (P+L) porque permite perfeccionar las prácticas actuales de producción, de forma tal que se garantice un mejor uso de los recursos naturales, materias primas y productos, la minimización y tratamiento adecuado de los residuales o desechos que en ella se generan y el aprovechamiento económico de los mismos. En procesos productivos, la P+L involucra la conservación de materias primas, agua y energía con la disposición, como residuales de materiales tóxicos y peligrosos. Por consiguiente, la eficiencia y eficacia de dichos procesos se logra a partir de un diseño correcto de los mismos. Para lo cual es de vital importancia lograr efectivos balances de materia y energía. Toda vez, que con ellos se puede asegurar un mejor control de los productos y sus calidades.

Los balances de materia y energía permiten además un correcto diseño de procesos y equipamiento, desde la visión de la P+L, lo que contribuye a que los procesos logren su racionalidad sin que haya que esperar por la metodología al final del proceso. O sea, como una acción preventiva más que paliativa.

Por estas razones la industria cubana se encuentra en una etapa de desarrollo y de incremento significativo de los niveles de producción, que necesariamente requiere de un incremento de las operaciones tecnológicas e implementar prácticas, medidas y tecnologías de P+L que permite la aplicación de soluciones menos costosas, más sencillas y continuas para ayudar a las empresas a reducir los impactos ambientales de sus actividades y los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores.

La producción cañera en concurso con las nuevas tecnologías y la P+L, así como la adecuada intervención de la gestión ambiental encierran una importante estrategia para la economía cubana por ser una agroindustria auto-sustentada por lo tanto la industria de la caña de azúcar puede y debe ayudar a enfrentar un futuro donde los principales desafíos son la erradicación del hambre, la producción de energía y la disminución del cambio climático.

La UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” actualmente genera una gran cantidad de impactos potenciales de sus actividades, productos y servicios sobre el Medio Ambiente. Uno de los problemas ambientales que presenta es la existencia de la carencia de agua para suplir todas las necesidades económicas, sociales y ambientales, agravado por la ocurrencia de fenómenos naturales (sequías prolongadas, lluvias abundantes y variaciones en el régimen estacional). Unido a esto, la no siempre adecuada planificación, uso y ordenamiento; la salinización; el empleo de tecnologías inadecuadas; el insuficiente rehusó y reciclaje del agua; el mal estado de las redes hidráulicas de distribución; así como la insuficiente cultura de ahorro y su uso racional inciden negativamente.

Otro problema que existe es la contaminación de las aguas, los suelos y la atmósfera debido a la existencia del batey alrededor del central azucarero, y otras, lo que provoca el empleo de las corrientes superficiales como receptoras de residuales crudos o parcialmente tratados, el empleo de tecnologías obsoletas, a la indisciplina tecnológica, , insuficiencia en los recursos financieros destinados a la minimización de la contaminación, la cobertura de tratamiento de residuales y el estado técnico de los sistemas de tratamiento existentes, así como la caracterización de estos residuales, el manejo inapropiado de los residuos sólidos, con serios problemas en su disposición y aprovechamiento y la deficiente introducción de prácticas de P+L (MINAZ, 2016-2020).

Unido a lo anterior, en la actualidad, se hace necesario optar en la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” por una propuesta tecnológica para la realización del balance de materia y energía mediante simuladores, en el proceso de obtención del azúcar, con el objetivo de analizar posibles escenarios que conduzcan a la mejora y/o incremento de la eficiencia de los mismos a través de un análisis de P+L, planteándose así el siguiente problema de investigación:

### **Problema de investigación**

La inexistencia en esta industria de un balance de masa y energía mediante softwares de simulación provoca la aplicación de malas prácticas y por consiguiente la cierta ineficiencia de su proceso tecnológico.

El **objeto de estudio** de este trabajo es la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”, con un **campo de acción** definido a la producción de azúcar crudo. Considerando estos elementos se formula la siguiente hipótesis:

### **Hipótesis**

La realización de balances de materia y energía en esta industria mediante softwares de simulación, permitirá una mayor aplicación de las P+L en sus procesos y en consecuencia se logrará mayor eficiencia en los mismos.

### **Objetivo general**

Proponer la utilización de balances de materiales basados en softwares de simulación en la metodología de producciones más limpias para la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”

### **Objetivos Específicos**

1. Establecer los fundamentos teóricos que sustentan las P+L en procesos. Así como, los balances de masa y energía y los simuladores para su desarrollo.
2. Proponer los softwares para probar su funcionalidad en las condiciones reales.
3. Seleccionar el software más adecuado para la realización de los balances de materiales en la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

En este capítulo se aborda acerca del desarrollo sostenible y la Producción más Limpia como estrategia ambiental. Luego, se analizan los conceptos fundamentales y definiciones de la P+L, así como las metodologías existentes. Se aborda sobre la evaluación de las P+L como tercera fase de las metodologías donde se exponen los conceptos de balance de masa y energía y ecuaciones generales para la aplicación de estos. Por último, se hace un análisis crítico de los softwares más usados para los balances de materiales, se identifican los principales softwares tanto comerciales como no comerciales y ventajas que tiene la aplicación de estos, así como el método de coeficiente de competencia.

## **1.1 Las Producción más Limpia como estrategia ambiental.**

Los patrones de consumo de la humanidad, impulsados por el desarrollo del capitalismo, han llevado al planeta a un estrés cada vez más creciente. Gradualmente se ha creado una conciencia de que esta situación es insostenible en el futuro, más evidente cuando muchos países en desarrollo se han incorporado a los modelos de producción industrial, mientras que los más desarrollados no han dejado de crecer. Por eso en la actualidad uno de los conceptos más discutidos en la comunidad científica es el de desarrollo sostenible el cual entró a formar parte del vocabulario habitual a partir de la publicación en 1987 del informe (Nuestro futuro común (Our common future) , 1987), conocido también como informe Brundtland, preparado por la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNWECD, *United Nations Commission on Environment and Development*, por sus siglas en inglés). El objetivo de esta comisión era relacionar los problemas del medio ambiente con los del desarrollo, combinando la lucha contra la pobreza, con la economía y la ecología (Ochoa, 2007). Si bien la definición dada en el informe como “(...) el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (UNWCED, 1987) fue histórico y un avance significativo en la toma de conciencia, no brindaba pautas en cuanto a que rumbo seguir para lograrlo.

La última mitad del siglo XX se ha caracterizado por los efectos nocivos de la contaminación ambiental, degradación y sobreexplotación de los recursos naturales que el hombre ha provocado en el planeta por su actividad económica y social, provocando el cambio climático teniendo como consecuencia: sequías combinadas con presiones sociales y económicas que

afectan la seguridad humana; aumento de la temperatura media por encima de ciertos umbrales en determinados lugares, con importantes consecuencias en la salud humana (por ejemplo, aumento del surgimiento de nuevos virus y la propagación de otros), aumento de la frecuencia y la gravedad de fenómenos climáticos, como inundaciones y sequías, a niveles sin precedentes que afectan tanto el capital natural como la seguridad humana, variación cada vez más rápida de la temperatura y aumento del nivel del mar que influyen en el bienestar humano en determinados lugares; pérdida considerable de diversidad biológica y extinción constante de especies que repercute en la prestación de servicios de los ecosistemas (PNUMA, 2012).

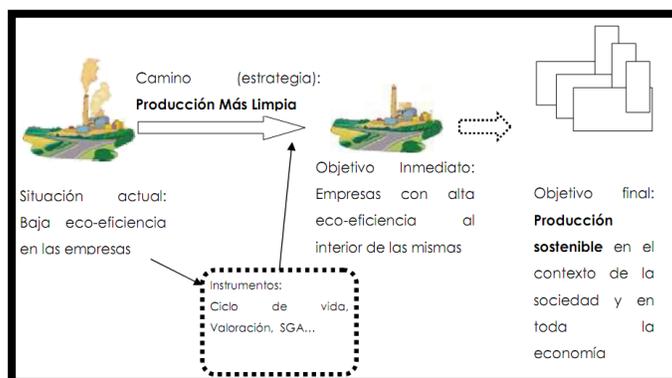
Existen fuentes puntuales de contaminación donde un elevado por ciento corresponde a instalaciones industriales y agropecuarias, destacándose la industria azucarera y sus derivados por el poder contaminante de sus residuos líquidos, sólidos y gaseosos, lo que la convierte en un foco de contaminación. La situación actual de la industria azucarera en cuanto al aporte de la carga contaminante de sus fábricas, representa alrededor del 80% de la carga contaminante total que aportan las Industrias al medioambiente natural del país (Dundand, 2007). Dada la característica de sus residuales líquidos, cuando estos no son bien tratados provocan grandes afectaciones en ríos, zonas costeras, lagunas y el manto freático, constituyen focos de vectores, producen fetidez, afectan la flora, la fauna y el ecosistema en general. Ante la demanda de mejores niveles de calidad y vida, de normas más perfeccionadas de protección y de productos no perjudiciales para el medio ambiente, las empresas solo serán viables si se adaptan a los requisitos de mejora de la calidad ambiental determinados por buen uso de recursos disponibles, una forma distinta de gestionar la tecnología para enfrentar el problema ambiental es el enfoque de las P+L, el cual prevé la contaminación en su punto de generación. Un sistema de gestión ambiental eficaz puede ayudar a una organización a evitar, reducir o controlar los impactos ambientales adversos de sus actividades, productos y servicios, asegura un mejor cumplimiento de los requisitos legales aplicables y otros requisitos que la organización suscriba, y ayuda a la mejora continua del desempeño ambiental (Dundand, 2007).

### 1.1.2 Conceptos de Producción más Limpia.

La P+L es una estrategia de ganar-ganar, evidentemente cada acción que se realice con el fin de reducir el consumo de materias primas y energía, prevean o reduzcan la generación de residuos, puede aumentar la productividad y traer ventajas financieras a la empresa. A ello se suma además de proteger al medio ambiente, la protección al trabajador e incluso al consumidor.

Se trata de una filosofía de “mirar hacia delante, anticipar y prevenir” tal como destacan expertos cubanos (Álvarez Baldoquín & Arias González, 2009).

La P+L es una estrategia para producir eco-eficientemente, que generalmente encamina a las empresas por un camino necesario, pero no suficiente hacia una economía sostenible como se muestra en la Figura 1.1.



**Figura. 1. 1.** Producción más Limpia y su contexto. **Fuente:** (ONUDI, 2004)

La P+L es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva, integrada a los procesos, productos y servicios, con el fin de mejorar la eco-eficiencia y reducir los riesgos para los humanos y el medio ambiente según (ONU, 1999)

Este concepto fue definido sobre la base de cuatro criterios: puesta en práctica de una estrategia ambiental preventiva; conservación de materias primas y energía, la eliminación de los materiales tóxicos, la reducción de la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y residuos antes de que se concluya el proceso productivo; y la reducción de los impactos en todo el ciclo de vida del producto, es decir desde que se extraen las materias primas hasta su destino final; así como la constante aplicación de conocimientos, mejoramiento de la tecnología y cambio de actitudes (Ochoa, 2007).

La P+L está dirigida fundamentalmente a evitar la generación de residuos y emisiones, a disminuir el consumo de materias primas, materiales auxiliares, agua y energía para contribuir así a la elevación del desempeño ambiental y económico de una organización (Rivera, 2002).

Por lo tanto, la Producción más Limpia (P+L) es un término general que describe un enfoque de medidas preventivas para la actividad industrial. Se aplica de igual manera al sector de servicio, a los sistemas de transporte y a la agricultura. Es un término muy amplio que abarca lo que algunos países llaman minimización de desechos, elución de desechos, prevención de contaminación y otros nombres parecidos, pero incluye algo más. También hace referencia a una mentalidad que enfatiza la producción de nuestros bienes y servicios con el mínimo impacto ambiental bajo la tecnología actual y límites económicos (Ochoa, 2007).

Otras definiciones (Ochoa, 2007) de Producción más Limpia son:

1. Un proceso de fabricación, o tecnología integrada en el proceso de producción, concebida para reducir durante el propio proceso, la generación de residuos contaminantes.
2. El método de fabricar productos en el que las materias primas y la energía son utilizadas en la forma más racional e integrada en el ciclo de vida materias primas-producción-consumo-recursos secundarios, de manera que el impacto sobre el funcionamiento del Medio Ambiente sea mínimo.
3. La integración de los objetivos ambientales en un proceso de producción o servicio con el fin de reducir los desperdicios y emisiones en términos de cantidad y toxicidad y por tanto reducir los costos.

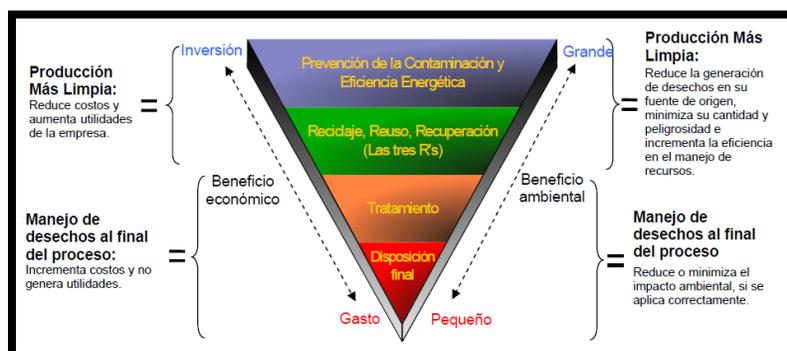
Cualquiera que sea el enfoque dado, el énfasis principal es claro. Al igual que la prevención durante el proceso manufacturero, también es importante el tomar un enfoque del ciclo de vida para los productos en sí. Además de lograr un nivel más bajo de contaminación y de riesgos ambientales, la P+L es, con frecuencia, una buena propuesta de negocios. El uso más eficiente de los materiales y la optimización de los procesos dan como resultado menos desechos y costos operativos más bajos. Por lo general, existe un aumento en la productividad de los trabajadores, con menos tiempo perdido por enfermedad y accidentes.

La P+L aborda la contaminación industrial de manera preventiva. Concentra la atención en los procesos, los productos, los servicios y la eficiencia en el uso de las materias primas e insumos, con el objetivo de promover mejoras que permitan reducir o eliminar los residuos antes que se generen.

La experiencia internacional comparada ha demostrado que, a largo plazo, la aplicación de Producción más Limpia es más efectiva, desde el punto de vista económico y más coherente desde el punto de vista ambiental, con relación a los métodos tradicionales de tratamiento “al final del proceso”.

Con la implementación de P+L se busca pasar de un proceso ineficiente de control de la contaminación "al final del tubo", a un proceso eficiente de prevención de la contaminación desde su punto de origen, a través de la conservación y ahorro de materias primas, insumos, agua y energía en el proceso, previniendo la contaminación al promover la sustitución de materias primas que contengan productos químicos peligrosos o muy contaminantes, y la creación de soportes administrativos que permitan manejar integralmente los residuos (Martínez, Mallo, Lucas, Alvarez, & Salvarrey, 2005).

El proceso de reducción de la contaminación se realiza en 4 niveles de acción como se muestra en la Figura 1.2, dentro de los cuales se encuentran los niveles preventivos, la reducción y el reciclaje o reutilización, y los de control que son el tratamiento y disposición final.



**Figura. 1.2.** Esquema piramidal de los niveles de reducción de contaminación. **Fuente:** (CONAM, 2003)

Es importante destacar que la filosofía del proceso de P+L está sobre todo relacionada con la reducción al máximo de la generación de residuos a lo largo de toda la cadena de producción.

Sin embargo, no existe una producción limpia como tal, la generación de residuos es inherente a cualquier proceso productivo. Lo que busca el proceso es evitar una generación excesiva de residuos, dado que por un lado es considerada una pérdida económica como producto del mal aprovechamiento de los recursos e insumos empleados, y por el otro, los residuos son contaminantes y afectan a la salud y al ambiente, por lo que su reducción permite prevenir impactos ambientales negativos (ONU, 2010).

Por ende, el enfoque de la P+L, trata de reducir de manera continua la generación de residuos y contaminantes en cada etapa del ciclo de vida.

P+L significa: (ONU, 2010)

- Para los procesos.
  - Conservación de materia y energía.
  - Eliminación del uso de materias primas tóxicas.
  - Reducción de la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y desechos antes de que salgan del proceso.
- Para los productos.
  - Reducción de los impactos a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la extracción de materia prima hasta su disposición.
- La Producción más Limpia reduce los riesgos para:
  - Los trabajadores.
  - La comunidad.
  - Los consumidores de productos.
  - Las futuras generaciones.
- La Producción más Limpia reduce los costos de:
  - Producción.
  - Tratamiento al final del proceso (end of pipe o “al final del tubo”).
  - Servicios de salud.
  - Recomposición del ambiente.
- La Producción más Limpia mejora:
  - La eficiencia de los procesos.
  - La calidad del producto.

- Incluso cuando los costos de inversión son altos, el período de recuperación de la inversión puede ser corto.

Política de ahorro de la Producción más Limpia (ONU, 2010).

- Al ahorrar materia prima
  - Al lograr un consumo de energía más eficiente
  - Al generar menos desechos
- } se ahorra más dinero.
- Más del 50 % de los desechos se puede evitar con simples medidas.
  - Más del 65 % de las barreras de la Producción más Limpia están ligadas con la motivación y la actitud humana.

En la Tabla 1.1 se resumen los beneficios para las empresas, clientes y el Medio Ambiente que se pueden obtener al implementar la estrategia de Producción más Limpia (Ochoa, 2007).

**Tabla 1.1.** Beneficios de las Producción más Limpia.

<p>Para la empresa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementa sus beneficios económicos.</li> <li>• Posibilita el acceso a nuevos mercados.</li> <li>• Reduce el riesgo de sanciones de la autoridad ambiental.</li> <li>• Permite la incorporación del concepto de mejoramiento continuo.</li> <li>• Mejora el control de los costos y la satisfacción de criterios de inversión.</li> </ul> <p>Para los clientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra mayor confianza con una gestión de la calidad y ambiental demostrable.</li> <li>• Incrementa la sustentabilidad del producto y su aceptación por el cliente.</li> <li>• Aumento de la vida útil del producto.</li> <li>• Mayores cuidados en la disposición final del producto.</li> <li>• Existe un estímulo para que la empresa piense más en el cliente y reduce el riesgo de esta de no satisfacer a sus clientes.</li> </ul> <p>Para el medio ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso racional de materias primas y otros insumos.</li> <li>• Conservación de los recursos naturales.</li> <li>• Disminución y control de los contaminantes.</li> <li>• Armonización de las actividades con el ecosistema.</li> </ul>
--

Fuente: (Ochoa, 2007)

Además de los beneficios antes mencionados se identifican otros como son: (ONU, 2010)

Beneficios Financieros.

- Reducción de costos por optimización del uso de las materias primas e insumos en general.
- Ahorro por mejor uso de los recursos (agua, energía, etc.).
- Reducción en los niveles de inversión asociados a tratamientos y/o disposición final de residuos.
- Aumento de ganancias.
- Evita o disminuye la inversión en plantas de tratamientos o medidas "end-of-pipe".

#### Beneficios Operacionales.

- Aumento de la eficiencia de los procesos.
- Mejora de las condiciones de seguridad y salud ocupacional.
- Mejora en las relaciones con la comunidad y la autoridad de aplicación ambiental.
- Reducción de la generación de residuos.
- Aumento de la motivación del personal.
- Mejora condiciones de infraestructura de la planta productiva.
- Reduce costos de traslado y disposición de desechos.

#### Beneficios Comerciales.

- Diversificación de productos a partir del uso de materiales de desecho.
- Mejora del posicionamiento de los productos que se venden en el mercado.
- Mejora de imagen corporativa de la empresa.
- Facilita el acceso a nuevos mercados.
- Aumenta las ventas y el margen de ganancia.

Las prácticas de P+L "tiene como objetivo propiciar acciones que contribuyan a disminuir la carga contaminante al ecosistema, en función de garantizar la protección de su diversidad biológica, al mismo tiempo que se incrementan la eficiencia y los beneficios" (Maqueira Leonel, 2005).

Al mejorar la eficiencia en el uso de los insumos de producción y los rendimientos, se reducen los costos, se obtienen mayores ganancias y se mejora la posibilidad de competir con mejores precios en los mercados nacionales e internacionales. El uso eficiente de los recursos, reduce el impacto ambiental y mejora la imagen de la empresa o proyecto.

## **1.2 Metodologías de la Producción más Limpia.**

Desde 1990, La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) ha conducido un programa intensivo y pro ambiental, acompañado de una campaña de información y entrenamiento para promover tecnologías limpias o ambientalmente amigables. En conjunto con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la ONUDI desarrolló el Manual de Auditoria y Reducción de Emisiones y Residuos Industriales que contiene la metodología básica de Producción más Limpia (Álvarez Baldoquín & Arias González, 2009).

Las P+L son un proceso sistemático enfocado a la eliminación de desperdicios en la producción de bienes o servicios, incluyendo la reducción y, eventualmente, la eliminación de los desperdicios en el origen, más que el tratamiento de los residuos al final del proceso de producción.

Para una evaluación e implementación de las Producciones más Limpias existen dos aspectos fundamentales que constituyen el método para su aplicación:

**Evaluación de la Producción más Limpia (EP+L):** Es el proceso de manejo de la información requerida para identificar posibles mejoras del proceso, enfocadas a la reducción de los desperdicios en una empresa y para la preparación de los planes para ejecutar esas mejoras.

**Implementación de la Producción más Limpia:** Es la aplicación y el accionar de los planes de mejoramiento dentro de la empresa.

La metodología de P+L desarrollada por Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) se basa en la evaluación de los procesos e identificación de las oportunidades para usar mejor los materiales, minimizar la generación de los residuos y emisiones, utilizar racionalmente la energía y el agua, disminuir los costos de operación de las plantas industriales, y mejorar el control de procesos e incrementar la rentabilidad de las

empresas. Esta metodología se basa en tres conceptos fundamentales que se conocen en la literatura especializada como las tres 3 R's, Reducción, Reutilización y Reciclaje (ONUDI, 1999) lo que se explica en la Figura 1.3.



**Figura.1.3.** Conceptos básicos de P+L. **Fuente:** (ONUDI, 1999)

**1.2.1 Metodología de P+L implementada en el Programa de P+L del ONUDI/PNUMA, consta de cuatro fases fundamentales tal y como se aprecia en la Figura 1.4 (Mille & Eimer, 2002).**



**Figura.1.4.** Etapas para la Implementación de las Producciones más Limpias. **Fuente:** (Mille & Eimer, 2002)

**Fase I “Planeación y organización.”**

- Obtener el compromiso de la gerencia y de todo el personal de la empresa.
- Organizar el equipo de P+L.
- Definir claramente las metas del Programa de P+L en la empresa.

- Identificar obstáculos y soluciones para el Programa de P+L.
- Capacitar a mandos intermedios y operarios.

#### **Fase II “Evaluación de Planta.”**

- Reunir los datos generales de la empresa y del proceso de producción (volumen de materiales, residuos y emisiones en el flujo).
- Definir el diagrama de flujo del proceso: entradas y salidas.
- Llevar registros y mediciones de materias primas, consumos de agua y energía.
- Organizar el equipo evaluador.
- Generar opciones.

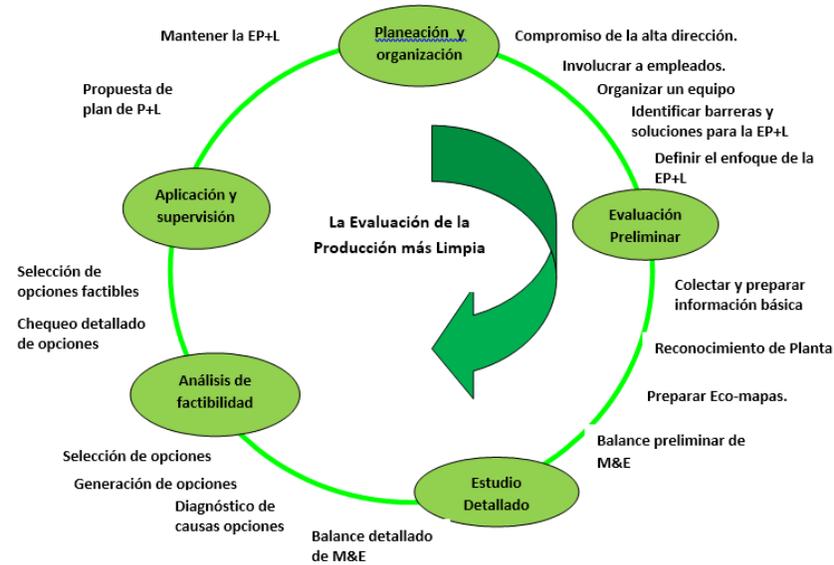
#### **Fase III “Estudio de factibilidad.”**

- Evaluación técnica, económica y ambiental: considerando como estos elementos afectan a la producción, la calidad, el ambiente, los costos de inversión y beneficios.
- Definición de recomendaciones.
- Selección de las medidas a tomar.

#### **Fase IV “Implementación”**

- Establecer la fuente y el monto de los fondos destinados al proyecto.
- Ejecutar las medidas recomendadas: asignación de recursos y determinación de los responsables de llevar a cabo estas medidas.
- Monitorear y evaluar las medidas implementadas, mediante el uso de indicadores que permitan medir el desempeño, de auditorías internas y de reportes de seguimiento.

**1.2.2 Metodología de P+L descrita por Ochoa, consta de cinco fases fundamentales tal y como se aprecia en la Figura 1.5 (Ochoa, 2007).**



**Figura. 1.5.** Etapas de implementación de P+L. **Fuente:** (Ochoa, 2007)

**Pasos del método genérico de la EP+L.**

**Fase I** “Planeamiento y organización”.

- Obtener el compromiso de la dirección superior.
- Involucrar a los empleados.
- Organizar un equipo de P+L.
- Identificar los impedimentos y soluciones a la EP+L como un proceso.
- Decidir el enfoque de la EP+L.

**Fase II** “Evaluación preliminar”.

- Colectar y preparar la información básica (preparación de los diagramas de flujo del proceso, identificar las entradas de materias, agua y energía, salidas del proceso, destinos finales, determinar los niveles iniciales de recirculación interna, de reciclado externo y de reutilización, los niveles iniciales de recirculación interna, de reciclado externo y de reutilización, identificar las corrientes con materiales peligrosos, así como la segregación de corrientes de desperdicios).
- Conducir los reconocimientos de la planta.

- Ejecutar el balance preliminar de materiales y energía (recogida de datos, caracterización del proceso a través de diagramas de flujo, entrada y salida, mapas de consumo, balance de energía).
- Preparar un Eco-mapa.

**Fase III** “Estudio detallado.”

- Elementos del Balance Detallado de M&E:
- Recolección de datos.
- Validación de datos.
- Balances de masa.
- Confección de los Mapas Cuantitativos de Consumo.
- Diagnóstico de causas.
- Generación de opciones.
- Selección de opciones más obvias.

**Fase IV** “Análisis de factibilidad.”

- Chequeo detallado de opciones.
- La evaluación técnica.
- Evaluación medioambiental.
- Aspectos de seguridad.
- La evaluación económica.
- Selección de Opciones Factibles.

**Fase V** “Aplicación y Supervisión”

- Plan de aplicación de la Producción más Limpia.
- Sostener en el tiempo la Evaluación de las Producción más Limpia.

Por su parte, esta Evaluación de P+L contiene dos etapas críticas:

- La evaluación preliminar.
- El estudio detallado.

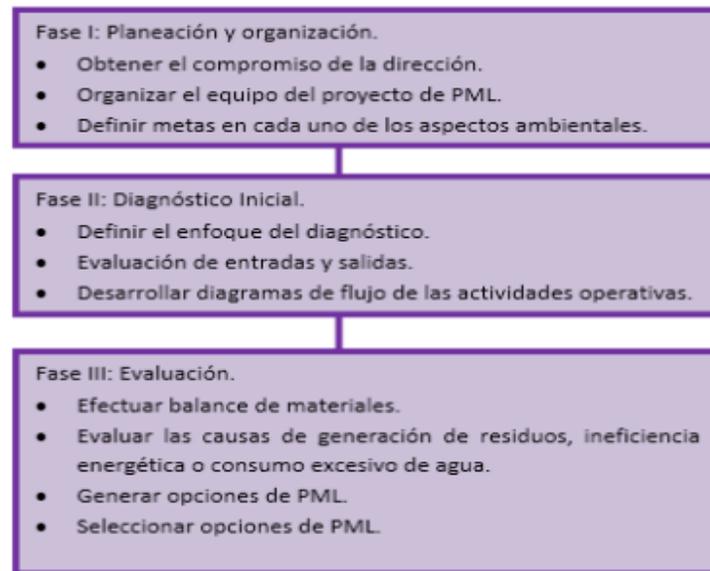
**1.2.3 Metodología de Producción más Limpia (P+L), descrita por (Rigola), consta de siete etapas fundamentales como se aprecia la Tabla 1.2 (Rigola, 1998).**

**Tabla 1.2.** Etapas de implementación de P+L.

<p><b>Etapas de implementación de P+L:</b></p> <p><b>Etapas I. Preparación de la evaluación.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Compromiso de la alta dirección y manifestación expresa de su soporte a la evaluación.</li><li>• Definición de los objetivos final y parcial.</li><li>• Organización del equipo auditor.</li></ul> <p><b>Etapas II. Revisión de la documentación del proceso.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Revisión de las etapas y unidades de proceso, diagramas de proceso incluyendo los tratamientos de corrientes residuales.</li><li>• Identificar las entradas de materias primas, agua y energía.</li><li>• Identificar las salidas del proceso.</li><li>• Identificar los destinos finales.</li><li>• Determinar los niveles iniciales de recirculación interna, de reciclado externo y de reutilización.</li><li>• Identificar las corrientes con materiales peligrosos.</li></ul> <p><b>Etapas III. Verificar la información sobre el terreno.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Realizar una inspección visual sobre el terreno.</li><li>• Revisar datos y completar con datos reales.</li></ul> <p><b>Etapas IV. Análisis de balances y rendimientos del proceso.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Completar los balances de materia y energía.</li><li>• Evaluar la eficacia en el uso de materias y energía.</li><li>• Hacer análisis de energía y ajuste termodinámico (pinch).</li><li>• Investigar el potencial de segregación de las corrientes.</li></ul> <p><b>Etapas V. Identificación de oportunidades y evaluación técnica.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Identificar las opciones más obvias.</li><li>• Identificar otras corrientes con problemas.</li><li>• Desarrollar alternativas a largo plazo.</li></ul> <p><b>Etapas VI. Evaluación económica.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Determinar los costes actuales y anticipar los futuros.</li><li>• Realizar estudios de viabilidad.</li><li>• Determinar prioridades de ejecución.</li></ul> <p><b>Etapas VII. Plan de acción.</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Preparar un informe con conclusiones.</li><li>• Diseñar un plan de acción.</li><li>• Obtener fondos.</li><li>• Ejecutar las opciones.</li><li>• Verificar los resultados.</li><li>• Medir el progreso.</li><li>• Revaluar en su caso.</li></ul>
---

**Fuente:** (Rigola, 1998).

**1.2.4 Metodología de Producción más Limpia (P+L) descrita por (Orcés en ESPOL Ciencia 2003), aplicada a una empresa alimenticia, consta de tres fases fundamentales tal y como se muestra en la Figura 1.6. (Orces, 2004)**



**Figura.1.6.** Fases de implementación de Producción más Limpia. **Fuente:** (Orces, 2004)

### **1.3 La evaluación de las P+L como tercera fase de las metodologías.**

Las metodologías descritas anteriormente tienen en común como tercera fase la realización de balances de masa y energía para la evaluación de estas industrias, siendo un paso fundamental en estas estrategias de P+L, para ello definiremos que es un balance de masa y energía.

El balance de masa y energía puede definirse como una contabilidad de entradas y salidas de masa en un proceso o de una parte de éste. No es más que la aplicación de la ley de conservación de la masa que expresa “La masa no se crea ni se destruye”. La realización del balance es importante para el cálculo del tamaño de los equipos de un proceso que se emplean y por ende para evaluar sus costos. Los cálculos de balance de masa son casi siempre un requisito previo para todos los demás cálculos, además, las habilidades que se adquieren al realizar los balances de masa se pueden transferir con facilidad a otros tipos de balances. (Balance de Masas - UNSJ, 2018)

El balance de masa y energía es aplicable tanto a un proceso como a cada una de las operaciones unitarias.

Los materiales de salida no identificados, generalmente se atribuyen a pérdidas de insumos y productos por derrames, fugas y otras causas similares, cuyo origen no pudo ser detectado y, por ende, sus masas no pudieron ser cuantificadas.

La energía representa un insumo importante en la industria en general y el gasto que representa puede influir, dependiendo del tipo de industria, de manera significativa en la estructura de costos de la empresa. Asimismo, existen interesantes oportunidades para ahorrar energía con beneficios económicos y ambientales (Tobón M & Hoyos, s.f.).

Otras definiciones de balance de masa y energía son:

- “Los balances de materia y energía son una forma de contabilizar la entradas y salidas de materiales de un proceso o de una parte de éste y pueden ser aplicados a aquellos procesos en donde las propiedades de las materias primas tienden a variar, con la finalidad de obtener productos estandarizados que sirvan para cubrir las necesidades de la sociedad. (Jannet Diaz, 2017)”
- Un enfoque actual refiere que el balance de materiales o masa es importante para la Ingeniería de Manufactura ya que determina “qué cantidad de cada compuesto debe ingresar a cada etapa para que al final del proceso se obtenga la cantidad de producto necesaria”. (Moreda, 2020). Además, “las ecuaciones obtenidas son útiles para el estudio del funcionamiento de las plantas de procesamiento industrial, facilitan la resolución de problemas y permiten evaluar el rendimiento obtenido frente al diseño y sus costos.” (Jannet Diaz, 2017).

La ecuación del balance de materiales se puede expresar como (Moreda, 2020):

Materia acumulada en el sistema = Materia que entra en el sistema - Materia que sale del sistema + Materia generada en el sistema - Materia consumida en el sistema.

La aplicación de dichos balances permite dar los primeros pasos para el diseño de una determinada planta industrial, además de ser una herramienta de diagnóstico durante la operación de procesos industriales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los balances, también presentan limitaciones. Entre ellas, se podría destacar que no es posible diseñar y, por tanto, determinar el tamaño de los equipos involucrados en el proceso. Para llevar a cabo

dicha tarea se debe conocer las ecuaciones de transferencia y tener disponibles condiciones especiales que permiten relacionar las variables de operación con las dimensiones del equipo del proceso (Olivares, 2000).

#### **1.4 Análisis crítico de los softwares más usados para los balances de materiales.**

Adentrarnos en el área de la simulación de procesos en Ingeniería Química nos impone recurrir someramente a la historia de la simulación, su definición y las áreas que abarca (Scenna, y otros, 2015).

##### **1.4.1 La simulación de procesos. Generalidades.**

La simulación de procesos químicos, es una técnica moderna indispensable para la ejecución eficiente de tareas como diseño, optimización y operación de plantas industriales (López & Pernalet, 2010).

Podemos considerar a la tarea de simulación como aquella en la cual proponemos ciertos valores de entrada al programa de simulación para obtener ciertos resultados o valores de salida, tales que estiman el comportamiento del sistema real bajo esas condiciones.

La simulación de un proceso químico tiene como objetivo representar las transformaciones químicas o físicas a través de un modelo matemático que implica el balance de masa y los balances energéticos acoplados con el equilibrio de fases y con la cinética de las ecuaciones. Todo se hace con el fin de establecer (predecir) un comportamiento para un proceso determinado de estructura conocida, en el que algunos datos de los equipos utilizados son de conocimiento general. Los modelos matemáticos utilizados en la simulación incluyen ecuaciones lineales, no lineales y diferenciales, que representan a los equipos o las operaciones del proceso, sus especificaciones y las propiedades fisicoquímicas.

En los primeros pasos, la simulación de procesos se basaba principalmente en circuitos analógicos. En efecto, la teoría de sistemas nos muestra que diversos principios físicos tienen asociados modelos matemáticos equivalentes o isomórficos, es decir que tienen la misma forma. Por ejemplo, ciertos circuitos eléctricos, circuitos hidráulicos, procesos de transferencia tanto de materia como energía y cantidad de movimiento, son descritos por el mismo conjunto de ecuaciones diferenciales. Consecuentemente, podría resultar conveniente analizar (simular analógicamente) el comportamiento de un sistema (proceso químico)

observando la evolución de las variables equivalentes en un circuito eléctrico (cuyo modelo es equivalente al proceso estudiado), ya que son fácilmente medibles. Posteriormente, a partir del uso masivo de la computadora digital, y de la revolución que implica la informática en todos los campos de la ingeniería, se evoluciona lentamente de la simulación analógica a la digital, habiendo prácticamente desaparecido la primera en muchas aplicaciones (Cortez de la O, Saballos Sánchez, & Sorto Merino, 2017).

Como consecuencia de estos sucesos, se comienza a cubrir la brecha entre los métodos pre computadora y los algoritmos numéricos programados aplicados a la ingeniería química; como da testimonio, por ejemplo, el libro de (Lapidus, 1962). En el año 1974 aparece el primer simulador de procesos químicos, (el FLOWTRAN). A partir de allí se ha generado una sucesión de acontecimientos que permiten en la actualidad la existencia de varios y eficientes simuladores comerciales como por ejemplo ASPEN PLUS, PRO II, HYSYS, CHEMCAD, y otros (Scenna, y otros, 2015).

#### **1.4.2 Clasificación de los métodos de simulación.**

Las herramientas de simulación pueden clasificarse según diversos criterios, por ejemplo, según el tipo de procesos (batch o continuo), si involucra el tiempo (estacionario o dinámico, el cual incluye a los equipos batch), si maneja variables estocásticas o determinísticas, variables cuantitativas o cualitativas, etc (Cortez de la O, Saballos Sánchez, & Sorto Merino, 2017).

A continuación, se expondrán las características de los distintos tipos de herramientas de simulación generalmente utilizadas (Scenna, y otros, 2015).

- **Simulación cualitativa:** tiene por objeto principalmente el estudio de las relaciones causales y las tendencias temporales cualitativas de un sistema, como así también la propagación de perturbaciones a través de un proceso dado.
- **Simulación cuantitativa:** es aquella que describe numéricamente el comportamiento de un proceso, a través de un modelo matemático del mismo. Para ello se procede a la resolución de los balances de materia, energía y cantidad de movimiento, junto a las ecuaciones de restricción que imponen aspectos funcionales y operacionales del sistema. La simulación cuantitativa abarca principalmente la simulación en estado

estacionario y la simulación en estado dinámico.

- **Simulación en estado estacionario:** implica resolver los balances de un sistema no involucrando la variable temporal, por lo que el sistema de ecuaciones deseará estudiar o reflejar en el modelo las variaciones de las variables de interés con las coordenadas espaciales (modelos a parámetros distribuidos); entonces deberá utilizarse un sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (según el número de coordenadas espaciales consideradas). Un ejemplo puede ser la variación radial de la composición en un plato en una columna de destilación.
- **Simulación en estado dinámico:** plantea los balances en su dependencia con el tiempo, ya sea para representar el comportamiento de equipos batch, o bien para analizar la evolución que se manifiesta en la transición entre dos estados estacionarios para un equipo o una planta completa. En este caso, el modelo matemático estará constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias cuya variable diferencial es el tiempo, en el caso de modelos a parámetros concentrados.

#### **1.4.2 Software que se utilizan en la simulación de procesos químicos.**

Cada vez son más numerosas las propuestas comerciales existentes en el mercado de software de simulación de procesos, que suministran el simulador bajo el criterio de licencias que en la mayoría de los casos son alquiladas a elevados costos. En consecuencia, el hecho de poseer una licencia alquilada, una vez culminado su período de validez, hace imposible la utilización de los modelos generados tras muchas horas labor-esfuerzo, ocasionando dependencia tecnológica (López & Pernalet, 2010).

Los simuladores comerciales suponen una potente herramienta a la hora de diseñar procesos de ingeniería química dado que tienen implementadas por defecto muchas funcionalidades que se adaptan a las necesidades del usuario, facilitándole así la definición del proceso objeto de estudio. Por otro lado, estos simuladores pertenecen a compañías que dedican sus recursos al desarrollo de dichas funcionalidades y por tanto para poder utilizar estas herramientas es necesario adquirir licencias de uso con un alto coste asociado (Sanchiz, 2015). Algunos de los simuladores comerciales actuales son : (Mendivil, 2012)

- **SIMFAD:** Es un paquete de programas orientados a la simulación de procesos de la producción azucarera con fines de análisis creado por el ICIDCA. Con este simulador

se puede estudiar esquemas de calentamiento y evaporación más eficientes, analizar la mejor forma de operación del tren de molinos, realizar balances de materiales y cálculo de purezas en el área de cocción, calcular coeficientes de transferencia de calor de sus equipos de calentamiento y evaporación. SIMFAD está orientado tanto a los técnicos de la industria como a aquellos que laboran en áreas de diseño y análisis de procesos, resultando una poderosa herramienta de consultoría técnica. Está compuesto por los módulos siguientes (ICIDCA, s.f.):

1. MOLINOS. Molienda de caña.
  2. PURIFICA. Purificación de jugo.
  3. CALEVA. Calentamiento y evaporación.
  4. TACHOS. Área de cocción.
  5. CALDERA. Generación de vapor.
  6. TURBINA. Generación de potencia.
  7. CALIFA. Cálculos integrados de fábricas de azúcar.
- **Aspen Plus:** simulador de Procesos Aspen Plus, utilizado fundamentalmente en la esfera industrial. El Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos – Advanced System for Process Engineering (ASPEN), es un mercado líder en herramientas de modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, especialidades químicas, metales y minerales. Desarrollado en la década de 1970 por investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) y comercializado desde 1980 por una compañía denominada AspenTech. Aspen Plus es un simulador estacionario, secuencial modular (en las últimas versiones permite la estrategia orientada a ecuaciones). Actualmente es posible que sea el más extendido en la industria. Se ha utilizado para modelar procesos en industrias: química y petroquímica, refino de petróleo, procesamientos de gas y aceites, generación de energía, metales y minerales, industrias del papel y la pulpa y otros. Aspen Plus tiene la base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de electrolitos. Además, modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra. Posee herramientas para

cálculos de costes y optimizaciones del proceso, generación de resultados en forma gráfica y en tablas y otros (AspenTech, s.f.).

- **HYSYS:** utilizado fundamentalmente en la esfera industrial. HYSYS es un programa interactivo enfocado a la ingeniería de procesos y la simulación, que se puede utilizar para solucionar toda clase de problemas relacionados con procesos químicos. Este simulador cuenta con una interfaz muy amigable para el usuario, además de permitir el empleo de operadores lógicos y herramientas que facilitan la simulación de diversos procesos. Fue adquirido por AspenTech en el 2004 por lo que es desarrollado en la actualidad por Aspen Technology. Es un simulador bidireccional, ya que el flujo de información va en dos direcciones (hacia delante y hacia atrás). De esta forma, puede calcular las condiciones de una corriente de entrada a una operación a partir de las correspondientes a la corriente de salida sin necesidad de cálculos iterativos. Posee un entorno de simulación modular tanto para estado estacionario como para régimen dinámico. Es un software para la simulación de plantas petroquímicas y afines (aspentech, 2021).
- **CHEMCAD:** nace en 1984 cuando un profesor universitario formó un equipo para desarrollar un simulador de procesos para computadoras personales. El simulador fue vendido a la sección de software de McGraw Hill (COADE) y luego siguió siendo desarrollado y distribuido por Chemstations Inc. CHEMCAD ha venido evolucionando durante estos años para convertirse en un paquete de módulos que abarca cálculo y diseño de intercambiadores de calor (CCTHERM), simulación de destilaciones dinámicas (CC-DCOLUMN), simulación de reactores por lotes (CC-ReACS), simulación de destilaciones por lotes (CCBATCH), simulación de redes de tuberías (CC-SAFETY NET). Este sistema es muy usado en todo el mundo para el diseño, operación y mantenimiento de procesos químicos en una gran variedad de industrias incluyendo la exploración de petróleo y gas; y naturalmente en procesos químicos, farmacéuticos, biocombustibles y procesos de fábricas industriales. De forma general este software, como una herramienta de productividad tiene muchas ventajas entre las que cabe mencionar las siguientes (Chemstations, s.f.):
  - Incremento en la productividad por el uso de información obtenida a partir de

la simulación diaria de cálculos relacionados con las condiciones de operación.

- Maximizar la rentabilidad de las operaciones por el diseño más eficiente de nuevos procesos y equipos.
- Reducción de costos e inversiones de capital por la optimización y solución de los cuellos de botella existentes en los procesos y en los equipos.
- **SuperPro Designer:** el simulador de Plantas de Tratamiento de Efluentes Industriales SuperPro Designer de Intelligen, Inc. (USA), es un simulador de procesos de carácter ambiental vinculado con el acondicionamiento de los efluentes líquidos, gaseosos y sólidos producidos en las distintas industrias de proceso. Incluye un balance de materia global de la planta con la posibilidad de un balance térmico, distintos modelos que representan las etapas de tratamiento de un efluente en particular, una salida con las corrientes intervinientes y sus parámetros asociados (presión, temperatura, densidad, caudales totales e individuales por componente), una salida con los costos de los equipos principales, un análisis global de costos asociados al sistema de tratamiento, una salida con el impacto ambiental de las corrientes que ingresan y egresan del sistema y un análisis de factibilidad económica de la alternativa planteada. Posee un banco de datos de propiedades fundamentales (básicas y ambientales) de 350 componentes, las propiedades derivadas de las mismas son calculadas cuando la simulación lo requiere. Existe la posibilidad además de la incorporación de nuevos componentes a la base de datos o de modificar las propiedades relacionadas a los existentes. Incluye reactores químicos y biológicos, columnas de separación (cromatográficas y de intercambio iónico), secadores de fases y componentes, equipos de impulsión de gases y líquidos, entre otros (Navarro, Albertario, & Palladino).
- **Pro II:** el software PRO II (de Simulations Sciences, USA) es un simulador de estado estacionario que posibilita un análisis operacional y diseño de proceso mejorado. Está diseñado para realizar cálculos rigurosos de equilibrio de energía y masa para una amplia variedad de procesos químicos. Desde la separación de gas y petróleo hasta la destilación reactiva, PRO II ofrece a las industrias del procesamiento de sólidos, gas natural, petróleo, químicos y polímeros la solución de simulación de procesos más

integral disponible en la actualidad (Schneider Electric, s.f.).

- **Sugars™:** Sugars International LLC ha desarrollado Sugars™ para simular y modelar el proceso azucarero con una interfaz gráfica fácil de utilizar. Este software permite modelar los diferentes procesos de la industria azucarera de la caña de azúcar, así como de la azúcar de remolacha. Desarrollado en 1986, Sugars™ es el programa de simulador más usado para los procesos azucareros por muchas empresas. Este software ha mejorado significativamente el rendimiento de las fábricas de nuestros clientes al analizar cientos e incluso miles de variaciones en la industria azucarera hasta que el proceso esté completamente optimizado. Es fácil de usar, introducir el equipo, así como sus entradas y salidas. La información del rendimiento de cada equipo es añadida y analiza a través de un proceso simple. El programa Sugars™ realiza cálculos complicados con eficiencia y precisión como los balances de masa y energía. Al utilizar este simulador se puede conocer (Sugars International LLC, s.f.):
  1. Las ganancias generadas por el proceso
  2. La producción de azúcar total
  3. El consumo de vapor
  4. El color
  5. La producción de electricidad
  6. Y otros datos de los flujos del proceso

En cuanto a los simuladores de uso libre, en la mayoría de los casos estos son pequeñas aplicaciones cuyo uso queda restringido a cálculos sencillos de Ingeniería Química, como por ejemplo diseño básico de columnas de destilación. Sin embargo, existen algunos simuladores de uso libre que pretenden ser aproximaciones a los simuladores comerciales, proporcionando al usuario un entorno de simulación similar al que puede encontrarse en dichos programas comerciales, sin embargo, se han desarrollado pocos simuladores gratuitos, algunos de ellos son (Sanchiz, 2015):

- **COCO Simulator:** es un simulador secuencial gratuito, de estado estacionario, desarrollado por la empresa Amsterchem con estándares abiertos CAPE-OPEN. Incluye un entorno para diagramas de flujo de proceso, operaciones unitarias, paquete

de cinética de reacciones y paquete termodinámico. Incluye también la funcionalidad para graficar distintos tipos de variables. El equipo disponible en COCO Simulator es limitado, en especial en comparación con otros programas que requieren del pago de una licencia. A pesar de la apertura del código y su complementariedad con otros programas como MATLAB, la adición de más equipos resulta bastante compleja y poco didáctica (CAPE-OPEN, s.f.).

- **ChemSep**: es un simulador de columna para las operaciones de destilación, absorción y extracción, con una interfaz fácil e intuitiva. Permite un máximo de 40 componentes y 300 etapas de equilibrio utilizando una base de datos que abarca más de 300 productos químicos. ChemSep viene incluido en la descarga de COCO y puede ser utilizado desde COFE (Interfaz gráfica de COCO). Además, ofrece una amplia variedad de formas de analizar los resultados de la simulación, como McCabe-Thiele y diagramas operativos, e incluye un modo de exportación completamente configurable para visualizar los resultados en una gran variedad de formatos, hoja de cálculo, texto, y html (CAPE-OPEN, s.f.).

Como ya se mencionó previamente, el uso de los simuladores tanto en la industria química como en los programas universitarios de ingeniería química, resulta cada vez más necesario puesto que es una herramienta adecuada y oportuna de apoyo para el diseño, evaluación, caracterización, optimización, monitoreo y estudio del funcionamiento de procesos químicos.

Entre las ventajas que ofrece la simulación de procesos químicos se tiene (Mendivil, 2012):

- Realiza cálculos de balances de materia y energía, equilibrio químico y entre fases.
- Reduce el tiempo de diseño de una planta.
- Permite al diseñador examinar rápidamente varias configuraciones de planta.
- Ayuda a mejorar procesos actuales.
- Mejora la eficiencia detectando fallas originadas por la descoordinación entre secciones de una misma planta.
- Permite cambiar las condiciones de operación y analizar los comportamientos.

- Determina condiciones óptimas del proceso dentro de las restricciones dadas.

Se debe de tener en cuenta que los resultados de una simulación se deben de analizar críticamente. Hay que tener en cuenta que los resultados dependen de: la calidad de los datos de entrada y de los paquetes termodinámicos que se elijan para modelar la sustancia.

### 1.5 Método de coeficiente de competencia

El método Delphi es una técnica de recogida de información que permite obtener la opinión de un grupo de expertos a través de la consulta reiterada. Esta técnica, de carácter cualitativo, es recomendable cuando no se dispone de información suficiente para la toma de decisiones o es necesario, para nuestra investigación, recoger opiniones consensuadas y representativas de un colectivo mayor. A continuación, se muestran los pasos para su aplicación.

Se determina el número de expertos que participarán mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{p(1-p) * k}{i^2} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Donde:

$n$  – Cantidad o número de expertos.

$p$  – Proporción de error que se comete al hacer estimaciones del problema con la cantidad de expertos.

$i$  – Precisión del experimento.

$k$  – Constante que depende del nivel de significación estadística  $(1 - \alpha)$ , que se obtiene a través de la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3:** Coeficientes de significación estadística

$(1 - \alpha)$	$k$
99 %	6, 6564
<b>95 %</b>	<b>3, 8416</b>
90 %	2, 6896

**Fuente:** Elaboración propia.

## **CAPÍTULO II. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo se inicia con una descripción detallada de los pasos que conducen a la evaluación de la entidad, así como de los procesos que se realizan en la industria fundamentando así a lo largo del capítulo la obtención de datos, uso de símbolos y ecuaciones. Por último, se definen los criterios de expertos que fueron empleados para la selección del software más adecuado y cómo interpretarlos.

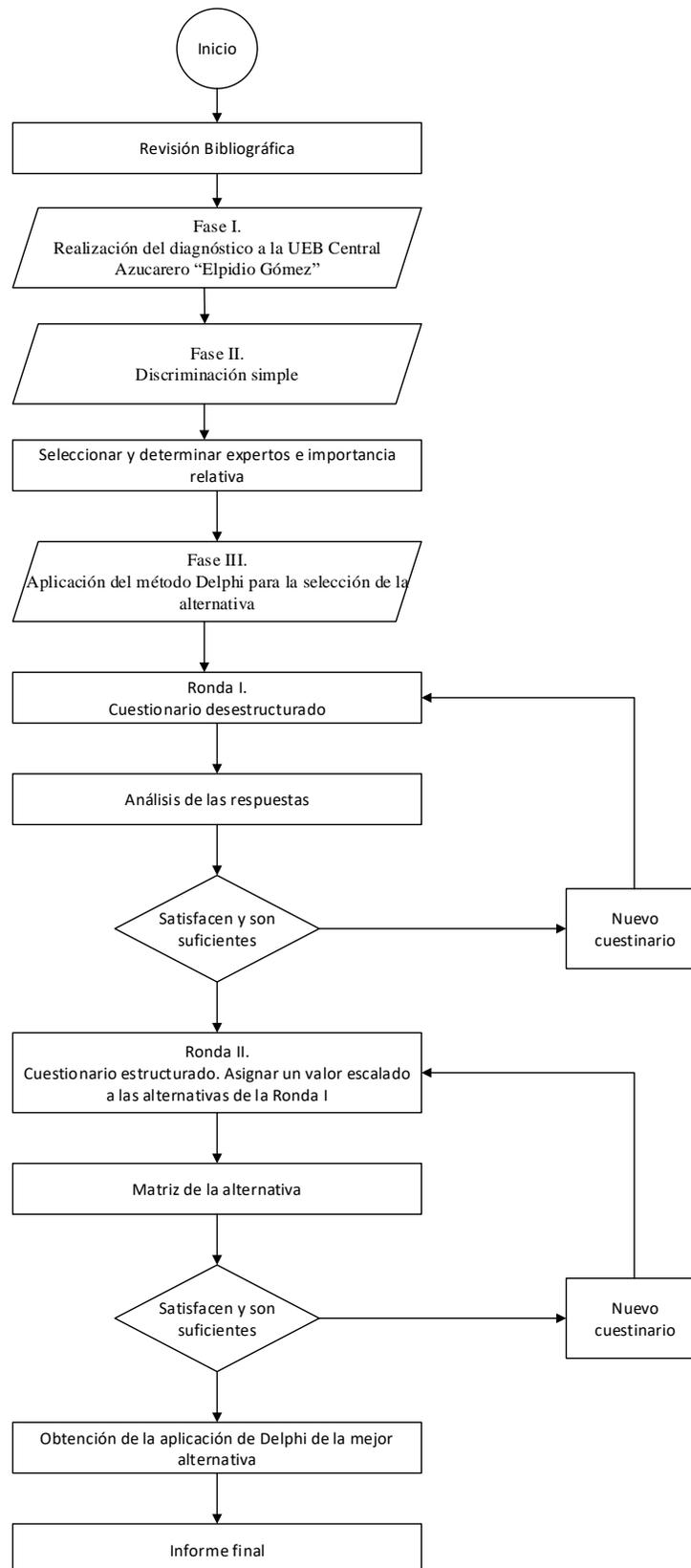
### **2.1 Propuesta metodológica para la aplicación del criterio de expertos.**

Generalmente, las metodologías estudiadas para analizar las mejores alternativas de inversión en un primer paso se fundamentan en criterios económicos a partir de propuestas realizadas por asesores, grupos de proyectos. Para que la metodología que se proponga sea eficaz debe ser capaz de incorporar varios objetivos incluyendo la evaluación de indicadores cualitativos, además, debe ser flexible, realista y relativamente fácil de implementar.

En este capítulo se desarrollará la metodología mostrada en el diagrama heurístico de la Figuras 2.1, que comienza con la revisión bibliográfica para la selección de las alternativas a evaluar en la instalación para la simulación de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” que se seleccionará como estudio de caso y que también servirá para la validación de este.

La metodología aplicada para esta investigación se compone de tres etapas principales: estudios documentales; aplicar método Delphi y la realización del informe final. La metodología de manera general consiste en: elaboración del diagnóstico a la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”; discriminación simple; y seleccionar la mejor alternativa de acuerdo al criterio de expertos.

Para entender mejor los pasos de la metodología anterior se explicarán sus fases.



**Figura 2.1.** Propuesta metodológica para la investigación. **Fuente.** Elaboración propia.

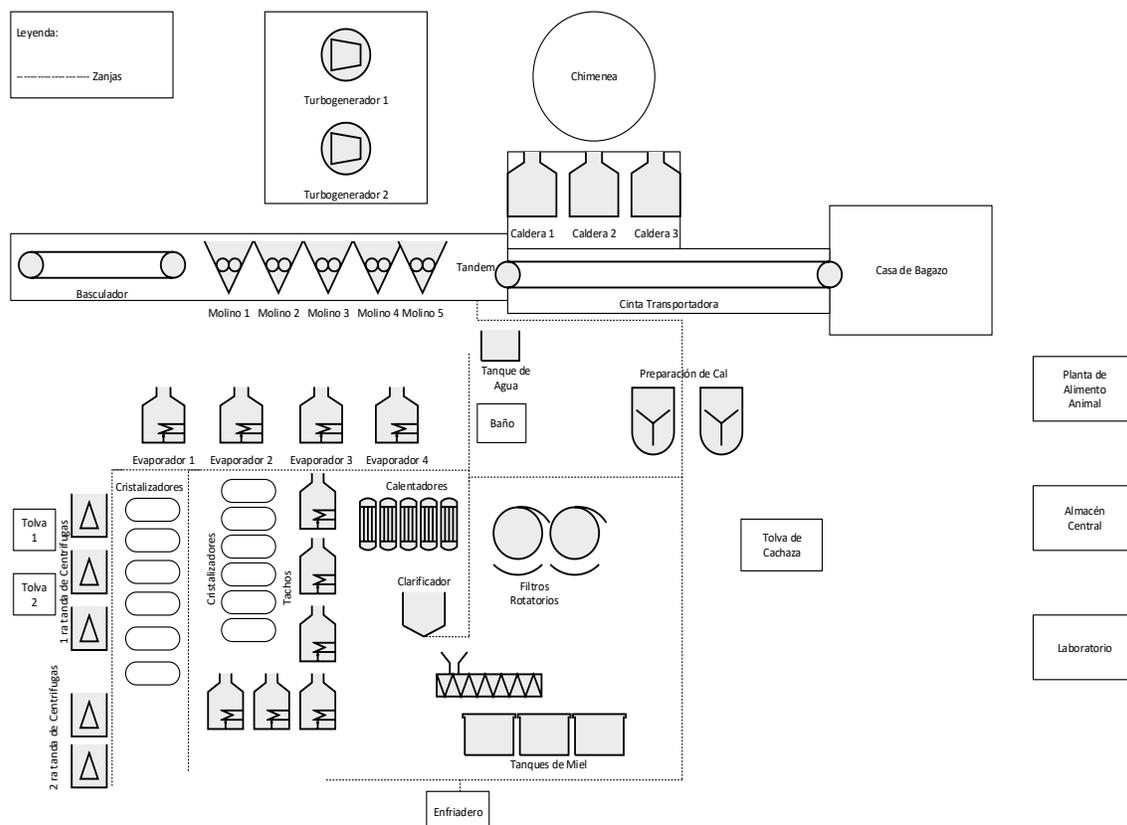
## 2.2 FASE I: Realización del diagnóstico a la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”

En esta etapa se delimitó la zona y el tiempo sometido a análisis. En este sentido, se enmarcó espacialmente la investigación a la zona correspondiente al objeto de estudio. Las especificidades territoriales se basaron en la información obtenida de entrevistas con operadores y tecnólogos del proceso y con los directivos de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”.

La delimitación facilita la identificación de las corrientes de entrada/salida del sistema y su interrelación. Para el escenario escogido la entrevista con los trabajadores permitió identificar los flujos que particularmente afectan al proceso analizado.

### 2.2.1 Caracterización de los procesos de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” con enfoque de procesos.

La figura 2.2 muestra a continuación el diagrama de flujo del proceso de obtención de azúcar crudo de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”.



**Figura 2.2.** Diagrama de flujo del proceso de fabricación de azúcar **Fuente:** Elaboración propia.

## **Descripción General de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”**

La UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez” fue creada por Resolución 321/2011 del Ministro del Azúcar con domicilio legal en el batey del mismo nombre y está situada geográficamente en el municipio Palmira, provincia Cienfuegos. Limita al Norte con las oficinas de la UEB Atención al Productor Cañero, al sur con la bodega El Tulipán perteneciente a la Empresa Municipal de Comercio y el Combinado de Enseres Menores perteneciente a la Empresa Municipal de Servicios, al Este con la Casa del Trabajador Azucarero, y al Oeste con patios de vecinos detrás de la casa de bagazo y el Taller de Maquinado ambos pertenecientes a la propia UEB y dentro de su cercado perimetral. Se localiza por la carretera a Ariete, a 6 Kilómetros del poblado de Palmira y a 16 Kilómetros del municipio de Cienfuegos, y pertenece a la Empresa Azucarera Cienfuegos del Grupo Empresarial “AZCUBA”.

La misma posee una extensión geográfica de 10 468m<sup>2</sup> de ellos 867m<sup>2</sup> dedicadas a oficinas, 288m<sup>2</sup> a laboratorio, y 9 313m<sup>2</sup> a la industria.

Desde el 4 de Mayo de 2014 se da inicio a la Activación del central para su entrada en producción en la campaña 2014 - 2015 y sus objetivos de trabajo para ese año serán la ejecución de la Inversión Activación del Central y la realización de las reparaciones a la tecnología en existencia, sin descuidar la limpieza de la industria y de sus áreas verdes, y la prestación de servicios a las unidades productoras de caña en lo relativo al montaje de sistemas de riego, así como el completamiento de la fuerza laboral y su capacitación.

### **MISIÓN**

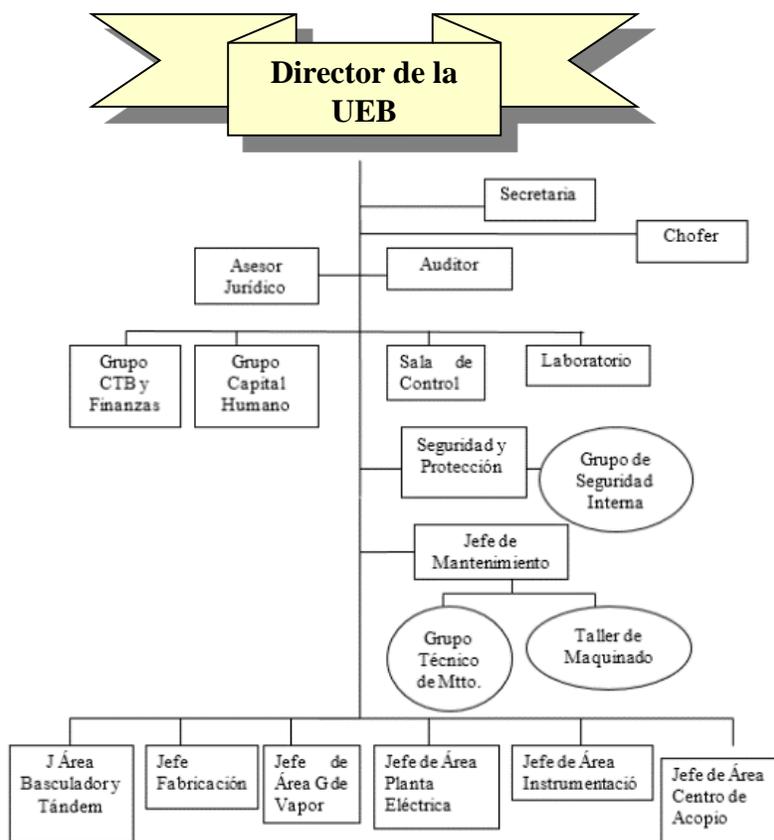
Producir azúcar y derivados a costos competitivos para satisfacer las exigencias del mercado externo.

### **VISIÓN**

Producimos azúcar con eficiencia y satisfacción de los requerimientos de los clientes del mercado exportable con un incremento progresivo en las ventas. La diversificación industrial alcanza el más alto nivel de su historia. Obtiene utilidades razonables para su patrimonio y el estatal. La preparación general y técnica de los trabajadores se ha elevado considerablemente y continúa en ascenso. La innovación forma parte de nuestra cultura

productiva y de los trabajadores. Existe un clima personal y organizacional favorable con predominio de la cooperación mutua en función del interés general de la organización. Nuestro producto fundamental AZÚCAR está certificado. Dirigen la UEB cuadros muy capaces con liderazgo, altamente motivados y con un elevado nivel de gestión. Existe una estrategia ambiental la que permite y garantiza su inserción en el micro –macro entorno.

A tenor del proceso de reordenamiento en las empresas del extinguido ministerio del azúcar la entidad quedó conformada estructuralmente con el siguiente Organigrama:



**Figura 2.3.** Estructura organizativa de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”. **Fuente.** Elaboración propia

### **Diagnóstico Estratégico de la UEB Elpidio Gómez Guzmán**

Para lograr sus objetivos La UEB realizo un análisis de externo e interno de sus fortalezas y debilidades siendo las siguientes:

#### **Análisis Interno**

## **FORTALEZAS**

1. Buena ubicación territorial (centro del país).
2. Incremento de la capacidad industrial instalada.
3. Estamos rodeados de productores cañeros con estabilidad en su gestión en los últimos 9 años.
4. Implantación de un Sistema de Gestión de la Calidad que propicia enfrentar las tareas con mayor eficiencia en su realización.
5. Los precios preferenciales ofertados y la seriedad en el cumplimiento de las inversiones de la zafra.
6. La experiencia y la profesionalidad de los trabajadores en la realización de los procesos productivos de la industria.
7. Contamos con un equipo de dirección joven y capaz.
8. Importante fuerza técnica, lo que puede constituir un punto de apoyo fuerte para la innovación tecnológica.
9. Contamos con un laboratorio de control que se puede fortalecer con la adquisición de equipos modernos.
10. Creciente comprensión de la necesidad y desarrollo de la innovación.

## **DEBILIDADES**

1. En las últimas zafras nos han afectado las demoras en el suministro de caña al basculador.
2. Somos fábrica paralizada desde 2009, distanciándonos del desarrollo industrial.
3. Insuficiente vinculación de los colectivos laborales a los resultados productivos y económicos.
4. Obsolescencia de la tecnología de la industria.
5. Falta de recursos materiales para la producción, venta y mantenimiento.
6. La falta de estimulación que logre la motivación de los trabajadores lográndose la vinculación del salario con los resultados y una mayor identificación con la organización.

7. Deficiente utilización productiva de las capacidades instaladas y los equipos.
8. Parque de equipos e instalaciones productivas con mucho tiempo en explotación.
9. La falta de una estrategia de capacitación que permita la superación adecuada de trabajadores y directivos.
10. Deficiencias organizativas, contables y de gestión financiera en la UEB.
11. Insuficiente empleo del potencial de innovación tecnológica para enfrentar el desarrollo de las inversiones.
12. Deficiente disponibilidad de financiamiento para la Innovación Tecnológica, en MLC y en menor cuantía en moneda nacional.
13. Insuficiente cultura de la innovación por los directivos.
14. Insuficiente integración, en particular entre el sector de dirección y el sector de investigación.
15. Insuficiente empleo de la información y de la gestión del conocimiento, la calidad y la propiedad intelectual.

### *Análisis externo*

#### **OPORTUNIDADES**

1. Apoyo del Partido y del gobierno local.
2. Existencia de un mercado nacional insatisfecho, con precios preferenciales que propician la comercialización del producto para satisfacer la demanda.
3. Apoyo y financiación estatal a la inversión.
4. Aplicación del Perfeccionamiento.
5. Política Laboral y Salarial aprobada para el sector azucarero.
6. Insertarnos en el Perfeccionamiento Empresarial como sistema de dirección de la economía.
7. Proyectos y Convenios de Colaboración para la introducción de nuevas tecnologías.
8. Política preferencial de costos para el sector azucarero.
9. Aperturas de nuevos mercados para nuestros productos y fuerza de trabajo.
10. Los programas de la Revolución que está llevando el país fundamentalmente el

Programa de Ahorro Energético.

11. Utilización eficiente de los Sistemas de Comunicaciones y participación en Ferias.

### **AMENAZAS**

1. Limitada capacidad de la economía nacional para financiar en MLC las necesidades del sector.
2. Competencias de UEB similares en la provincia.
3. Insuficiente abastecimiento y calidad de las materias primas para las producciones.
4. Deterioro climatológico con la ocurrencia de eventos nocivos para la agricultura.
5. Tendencia sostenida de fluctuación en los precios del azúcar en el mercado mundial.
6. Existencia de competidores con menores costos y mayor calidad e imagen.
7. Utilización del azúcar como medio de pago de deudas que obligan a vender el azúcar a futuro.
8. La inestabilidad y los altos precios del combustible que genera desabastecimiento.
9. La existencia de sectores en el país más atractivos en relación con los salarios y otras ventajas.
10. La existencia de Competidores en la actividad con Desarrollo Tecnológico de avanzada.
11. El Bloqueo Económico y la Política agresiva de los Estados Unidos y sus aliados contra Cuba.
12. Falta de financiamiento e ineficiente Sistema de Abastecimiento Material en el Sistema AZCUBA.

### **Objetivos estratégicos a alcanzar**

1. Mantener implantado, según cronograma aprobado, el Perfeccionamiento en la unidad.
2. Lograr integralidad en la gestión mediante la aplicación del Cuadro de Mando Integral en el sistema de trabajo.
3. Incrementar la participación de los trabajadores en la dirección de las tareas, logrando que se sientan y actúen como dueños.

4. Lograr la estabilidad en el respeto y obediencia a la Legalidad Socialista a través de la prevención de las violaciones administrativas, así como la detección y enfrentamiento a las indisciplinas, ilegalidades y manifestaciones de corrupción, política laboral y salarial, entre otras; dándole cumplimiento a todo lo preceptuado en los cuerpos legales en vigencia, en especial, el perfeccionamiento continuo del sistema de control Interno dispuesto en la Resolución 60 del 2011 de la Contraloría general de la República.
5. Implantar un Sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control integrado al Sistema de Gestión de la Calidad.
6. Incrementar el índice de generación eléctrica en las venideras zafras, disminuyendo el consumo de vapor y de electricidad del SEN.
7. Satisfacer las necesidades de fuerza de trabajo, desarrollando Jefes de colectivos líderes con conocimientos, habilidades y aptitudes para dirigir y ejecutar la estrategia de desarrollo.
8. Perfeccionar la organización de la producción de azúcar sobre la base de un modelo tecnológico que dé respuesta a la demanda planificada.
9. Incorporar nuevos productos al mercado interno Agroindustrial Azucarero.
10. Asegurar el desarrollo sostenible, basado en la preservación del medio ambiente y la equidad social.

Para garantizar estos objetivos es necesario partir de evaluar el comportamiento de los volúmenes de producción realizados anteriormente, las capacidades estimadas en la actualidad, las posibles limitantes y restricciones a tener en cuenta a mediano y largo plazo en los diferentes programas así como plantear las posibles respuestas a las necesidades de desarrollo de dominio en términos de metas y Proyectos de Desarrollo Tecnológico, analizando desde el punto de vista de sus efectos y beneficios dirigidos en primer lugar a satisfacer el mercado externo y de estos fundamentalmente a nuestros clientes potenciales, para disminuir las importaciones.

#### **Principales Sustancias Tóxicas utilizadas:**

Se utilizan diferentes tipos de ácidos y el NaOH (Hidróxido de Sodio) también conocido como sosa cáustica para la limpieza de los equipos.

El CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) que se produce mediante la combustión de uno de los residuos que es el bagazo.

Ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) se utiliza cuando el fósforo de la caña da por debajo de 300 partes por millón.

#### Emisiones líquidas:

La industria azucarera utiliza grandes cantidades de agua, sobre todo en el lavado de la caña y la condensación de vapor, también incluye el lavado del carbón animal y carbón activo, suministro de agua a las calderas, soluciones del proceso, lavado de los filtros, para el intercambio de iones en el enfriamiento sin contacto, agua para compensar las pérdidas en la alimentación de la caldera, agua para la ceniza volante y agua para el lavado de los pisos. Estas grandes cantidades de agua utilizada son muy pocas veces tratadas para su descontaminación siendo vertidas en los ríos o arroyos cercanos a la industria provocando un gran efecto de contaminación para las comunidades cercanas a esta.

Al ser vertido en cuerpos de agua o al suelo, las aguas de lavado generan alteraciones importantes en el equilibrio del ecosistema correspondiente, como puede ser la intoxicación de flora y fauna debido a la presencia de compuestos químicos, grasas, aceites, o el crecimiento excesivo de ciertas “algas” (en los cuerpos de agua) debido a la gran cantidad de nutrientes que las aguas residuales de este proceso contienen y cuyo problema principal es que acaban con el oxígeno disuelto provocando así la muerte de otros organismos. También pueden ocasionar la esterilidad del suelo. Para mitigar estos efectos es necesario que el agua residual sea tratada en una planta de tratamiento y la entidad de Elpidio Gómez no cuenta con una de ella.

#### Emisiones sólidas:

La mayor cantidad de residuos sólidos generados está constituida principalmente por bagazo, lodos resultantes de los lavados y partículas de carbón. Las partículas de carbón y cenizas generan importantes daños, como la contaminación de cuerpos de agua, contaminación de suelo e intoxicación de flora y fauna. También pueden ocasionar patologías en la sociedad, principalmente las de índole respiratoria y ocular. Las partículas de bagazo pueden generar

un impacto negativo en la salud humana, ocasionando un padecimiento llamado neumonitis por hipersensibilidad

### **2.2.2 Descripción del Proceso Tecnológico**

Para la obtención del azúcar, se utiliza la caña de azúcar que es la materia prima fundamental en nuestro país, la misma transita por una serie de procesos como son extracción del jugo, purificación y clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación, envasado y almacenamiento, a continuación (ver Anexo 1), se expone brevemente dichas operaciones unitarias.

#### **EXTRACCIÓN DEL JUGO**

La extracción del jugo se realiza moliendo la caña, haciéndola pasar entre pesados rodillos y constituye la primera etapa del procesamiento del azúcar crudo.

En el área de recepción y preparación se encuentra un juego de chuchillas donde se introduce la caña, la función de las cuchillas es exponer la fibra y reducir el tamaño de los tallos. De esta forma se obtiene una mejor extracción de jugo en los molinos.

Los juegos de molinos varían de acuerdo a la capacidad de la planta, cada molino está compuesto por cuatro rodillos, en algunos ingenios los molinos funcionan a base de vapor y energía eléctrica, sin embargo, los más modernos funcionan únicamente con energía eléctrica.

En el primer molino se obtiene el jugo primario y a medida que la caña pasa por todos los molinos de la serie, el jugo obtiene mayor porcentaje de sacarosa; en el último molino se agrega el agua de imbibición para aumentar la velocidad de transferencia de masa y obtener mayor extracción de sacarosa. Una vez el jugo ha sido mezclado con el agua de imbibición se hace pasar por los molinos en sentido contrario al que lleva la caña, esto contribuye a extraer el azúcar por lixiviación.

En las prácticas de molienda más eficientes, más del 95 % del azúcar contenido en la caña pasa al guarapo; este porcentaje se conoce como la extracción de sacarosa (Pol de la extracción).

El bagazo final que sale del último molino contiene azúcar no extraído, fibra leñosa y de un 45 a 55 % de agua. Por lo general, este material pasa a las calderas como combustible o

utilizan el bagazo como cama para el ganado, o cualquier otra utilización comercial de los productos secundarios.

**Tabla 2.1.** Valores promedios de los principales parámetros de operación en el área de molinos

Punto de Control	Parámetros de control	Rango Promedio de Operación
Caña Preparada	Indice de preparación(%)	69.0 - 73.0
	Pureza % jugo	84.0 – 88.0
	Fibra % caña	11.5 – 14.5
	Pol % caña	12.0 – 14.5
Jugo Primario	Pol	16.5 – 18.5
	Brix	22.0 – 29.0
	% Pureza	85.5 – 88
	pH	5.0 – 6.0
	T(C°)	23.5 – 26.5
Jugo Diluido	Pol	12.5 – 15.0
	Brix	15.0 – 17.5
	% Pureza	84.0 – 86.0
	Ph	5.0 - 5.5
	T(C°)	25.0 – 30.0
Bagazo Molino N°5	Brix	41.0 – 43.0
	pH	10.0 – 12.0
	T(C°)	50.0 – 55.0
Sacarato de calcio	Brix	41.0 – 43.0
	pH	10.0 – 12.0
	T(C°)	50.0 – 55.0
Agua de Imbibición	T(C°)	60.0 – 70.0
Desarenadores	Presión entrada desarenadores primarios(psig)	30
	Presión entrada desarenadores secundarios(psig)	15

**Fuente:** (Zepeda Guardado, 2012)

## PURIFICACIÓN DEL JUGO

La purificación del jugo consiste de dos partes, la purificación y la clarificación:

- **PURIFICACIÓN:** Los procedimientos recientes indican la necesidad de eliminar la mayor cantidad de los sólidos en suspensión, especialmente si la caña se cosecha por

medios mecánicos. El material a extraer consiste principalmente en tierra, arena y roca molida que no extrajo el tamizador preliminar. Los dispositivos de decantación de tipo continuo son efectivos para eliminar las partículas más gruesas, pero no eliminan la arcilla y las tierras finas. El proceso inicia cuando el jugo se bombea hasta los tanques de floculación, donde se dosifica floculante, que es una solución de polietilamida al 0.05 %, esto permite que todos los coágulos, flóculos y partículas que tienen carga aniónica se unan con las de carga catiónica y se depositen en el fondo de los tanques, formando lodos. Los lodos se hacen pasar por filtros en forma de tambores que trabajan al vacío, para extraer el contenido de sacarosa remanente, a esto se le llama jugo sucio y es regresado a los procesos para ser tratado, la parte de los lodos que contienen un mínimo de sacarosa es llamada cachaza y es utilizada en los campos de cultivo.

- **CLARIFICACIÓN:** En la producción del azúcar crudo, generalmente, la cal y el calor son los únicos agentes que se utilizan con el fin de clarificar el jugo. Debido a que la cal tiene poca solubilidad, en algunos ingenios, se mezcla con una solución azucarada para formar sacarato, que tiene una mayor solubilidad. La solución de sacarato neutraliza la acidez natural del jugo, cambiando su pH de 5.6 a 7, aproximadamente. El calentamiento de jugo alcalizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba coagula la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas; el precipitado que se formó de esta manera atrapa los sólidos en suspensión al igual que las partículas más finas. Los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en tambores rotativos de filtración. El jugo filtrado regresa al proceso o pasa directamente al jugo clarificado y la torta de la cachaza es desechada o regresada a los campos como fertilizante. El Jugo clarificado transparente y de un color parduzco pasa por los evaporadores sin tratamiento adicional.

## **EVAPORACIÓN**

Tanto la fabricación como la refinación del azúcar crudo de caña requieren evaporar el agua presente en la solución de azúcar a fin de obtener un producto final cristalino.

El sistema de evaporación elimina alrededor de 75 a 80 % del agua presente en el jugo clarificado, aumentando la concentración de los sólidos presentes en el jugo desde

aproximadamente 15 a 65 °Brix. El jugo proveniente del tanque de jugo claro es bombeado a los evaporadores de primer efecto o pre-evaporadores para el inicio de la concentración del jugo hasta alcanzar una concentración de 23 - 28 °Brix y una temperatura entre 115 y 121 C°. Los primeros efectos trabajan con vapor de escape a 20 psi y temperatura de saturación proveniente de los turbogeneradores 109 °C.

El jugo que sale de los primeros efectos llega al tanque de primer efecto desde donde es bombeado hacia los evaporadores de segundo efecto. El vapor vegetal (vapor proveniente de la evaporación del jugo) que se genera en los primeros efectos es utilizado para calentar el jugo en los evaporadores de segundo efecto y el que se genera en estos sirve para calentar el jugo de los terceros efectos y de igual forma con los evaporadores de cuarto efecto o meladores. El jugo en los segundos efectos se concentra hasta 30 - 37 °Brix. El jugo que sale de los segundos efectos se alimenta a los cuerpos de tercer efecto por medio de vacío generado por los condensadores de los meladores donde se concentra hasta 40-65 °Brix. En los meladores el jugo se concentra hasta obtener la meladura (60 - 65 °Brix) calentándola con el vapor que proviene de los terceros efectos. Por efecto del trabajo de los evaporadores de múltiple efecto, al final de toda la operación se evapora aproximadamente el 65 - 75 % del agua presente en el jugo reduciendo su contenido de agua hasta 35 - 40 %.

Se utilizan evaporadores tipo calandria con tubos de cobre o acero inoxidable. Largo de 1.2 a 1.8 metros y diámetro de 0.025 a 0.032 metros. El cobre es preferido porque tiene mayor coeficiente de transferencia de calor.

### **CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR**

Es el proceso en el cual la meladura obtenida es sometida a evaporación hasta su concentración máxima, por lo que a medida que la meladura se concentra su viscosidad aumenta rápidamente y luego comienzan a aparecer los cristales de azúcar.

Esta pérdida de fluidez del material hace necesario que se realice un manejo diferenciado del mismo, ya que no es posible circularlo en tubos angostos de un cuerpo a otro; por lo tanto, la evaporación debe realizarse en un solo efecto, el equipo es similar al de los evaporadores, pero adaptado para manejar el producto viscoso que debe concentrar.

Los cristalizadores, o mejor conocidos con el nombre de tachos, operación de la cual depende la calidad del azúcar final. Los tachos son equipos de evaporación de simple efecto que operan al vacío efectuando la evaporación a baja temperatura para procesar la meladura con el objeto de producir azúcar cristalizada mediante la aplicación de calor, evitando con esto la caramelización del azúcar. El material resultante denominado masa cocida contiene líquido o miel y cristales de azúcar.

La etapa de cocimiento se lleva a cabo mediante un sistema de tres cocimientos. El primer cocimiento se lleva cabo en tachos de primera donde se obtiene masa cocida A, a partir de la cual se obtiene el azúcar de primera o comercial, en los tachos de segunda se produce la masa cocida B y en los de tercera la masa cocida C.

Las masas cocidas se conducen a una serie de cristalizadores que consisten en tanques de agitación horizontal equipados con serpentines de enfriamiento. Aquí se deposita más sacarosa sobre los cristales ya formados y se completa la cristalización.

En los cristalizadores de primera, segunda y tercera se descargan las plantas de masa cocida A, B y C respectivamente. En los cristalizadores se busca maximizar el agotamiento de las mieles de las masas cocidas, depositándose la sacarosa en los cristales de azúcar obtenidos en los tachos por sobresaturación. Las masas cocidas A (MCA) después de descargar los tachos, se depositan en cuatro diferentes cristalizadores, mientras que las masas de segunda o MCB se depositan en otros dos cristalizadores. Debido al menor grado de pureza y mayor viscosidad de las masas de tercera o MCC, la cristalización de las mismas se lleva a cabo empleando un sistema compuesto por tres tipos de cristalizadores.

### **PURGA, ENVASADO Y ALMACENAMIENTO DEL AZÚCAR**

La purga o centrifugación es el proceso por medio del cual se separan los granos o cristales de azúcar de las aguas madres (mieles), para lograr esta separación se utiliza la fuerza centrífuga y una diversidad de mallas que retienen los granos de azúcar.

En la práctica el proceso de centrifugado y la cristalización funcionan en conjunto. De cada separación se obtiene azúcar y mieles que tienen una función en la cristalización. La purga ocurre en tres etapas: A) Purga de primera: en esta etapa se separan el azúcar A, que sale del proceso como producto terminado, de la miel A, que es enviada a los tanques de mieles para

ser utilizada nuevamente en los tachos. B) Purga de segunda: en esta etapa se separan el azúcar B, que se mezcla con agua para formar Magma B, de la miel B, que es enviada a los tanques de mieles para ser utilizada nuevamente en los tachos. C) Purga de tercera: en esta etapa se separan el azúcar C, que se mezcla con agua para formar Magma C, de la miel C, que es enviada a los tanques de miel final y puede comercializarse. La centrifugación también tiene un papel fundamental y complejo en el proceso de refinación.

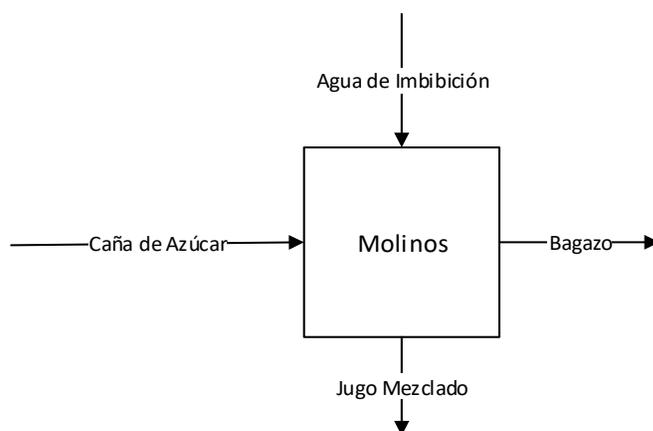
El azúcar se deposita con tolvas en las bandas, y por este medio se transporta hasta su lugar de almacenamiento. El azúcar es almacenado de diferentes maneras de acuerdo a la forma en que va a comercializarse. Por lo general, se utilizan sacos cuyo contenido se ajusta a las necesidades del cliente y procuran mantener las condiciones de exportación para azúcar crudo: pol mínima 98.3, pol máxima 99.4, humedad 0.2 %, color 1200 - 1600 y ceniza 0.2 %. También puede almacenarse a granel, por lo general con paredes reforzadas muy resistentes de 3 metros de altura.

### 2.2.3 Balance de Materiales de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”

En esta fase se plantean los balances de materiales que se utilizan en los procesos de la industria azucarera. Para mejor realizar el balance de la industria completa se realizará por sección.

#### Sección de la Molienda, Clarificación y Evaporación.

##### Molinos:



**Figura 2.4.** Diagrama de bloque de los molinos. **Fuente:** Elaboración propia.

$$A + A_i = JM + B \text{ (Ecuación 2.1),}$$

Donde:

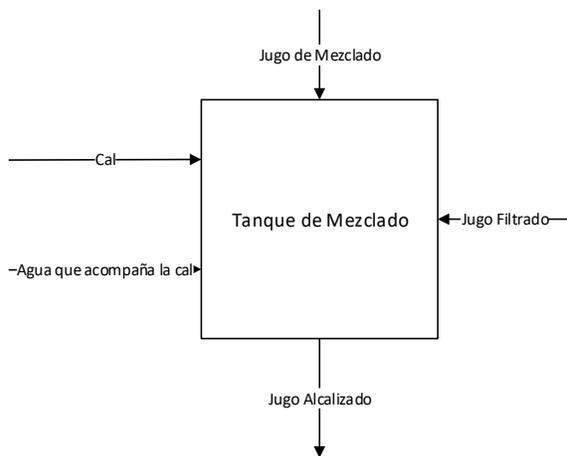
A: Caña de Azúcar.

A<sub>i</sub>: Agua de Imbibición.

B: Bagazo.

JM: Jugo de Mezclado.

**Tanque de Mezclado:**



**Figura 2.5.** Diagrama de bloque del tanque de mezclado. **Fuente:** Elaboración propia.

$$JM + C + A_c + JF = JA \text{ (Ecuación 2.2),}$$

Donde:

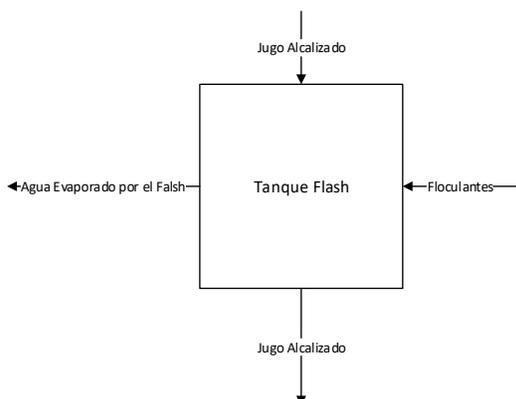
C: Cal.

A<sub>c</sub>: Agua que acompaña la cal.

JA: Jugo Alcalizado.

JF: Jugo Filtrado.

### Tanque Flash:



**Figura 2.6.** Diagrama de bloque del tanque de Flash. **Fuente:** Elaboración propia.

$$JA + F = Ja + Ae \text{ (Ecuación 2.3),}$$

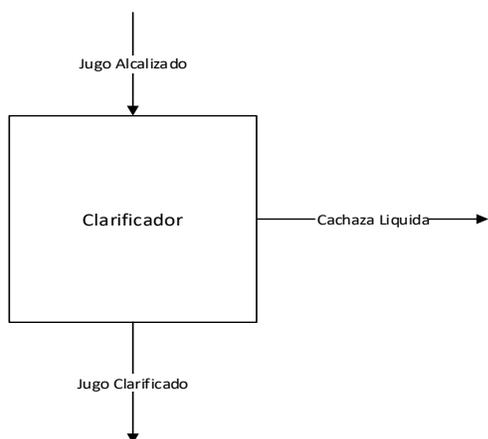
Donde:

F: Floculantes.

Ae: Agua evaporada por el Flash.

Ja: Jugo Alcalizado que sale del tanque Flash.

### Clarificador:



**Figura 2.7.** Diagrama de bloque del clarificador. **Fuente:** Elaboración propia.

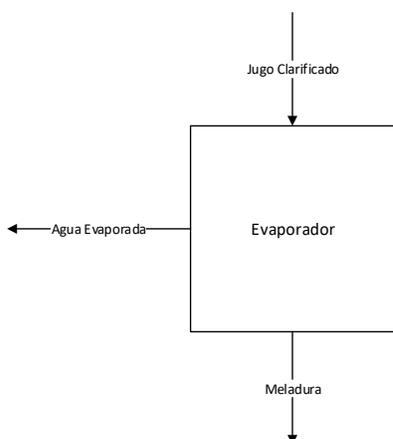
$$Ja = Cl + JC \text{ (Ecuación 2.4),}$$

Donde:

Cl: Cachaza líquida.

JC: Jugo Clarificado.

### Evaporación:



**Figura 2.8.** Diagrama de bloque del evaporador. **Fuente:** Elaboración propia.

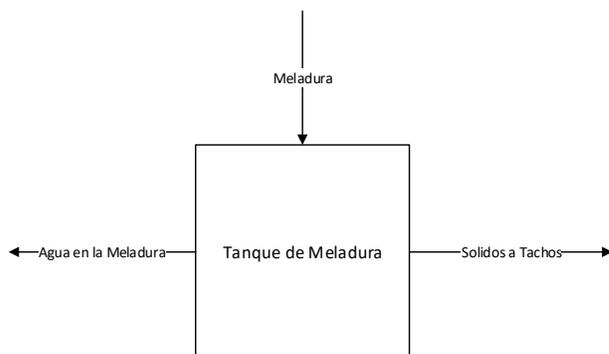
$$JC = M + Aev \text{ (Ecuación 2.5),}$$

Donde:

M: Meladura.

Aev: Agua evaporada.

### Tanque de Meladura:



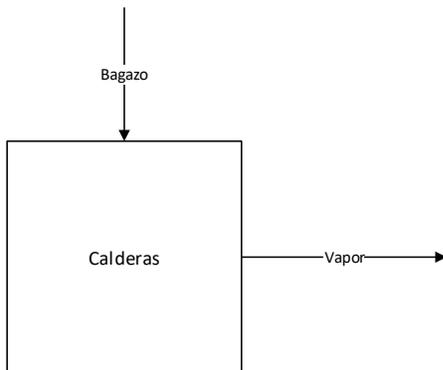
**Figura 2.9.** Diagrama de bloque del tanque de meladura. **Fuente:** Elaboración propia.

$M = A_m + S$  (Ecuación 2.6), donde:

$A_m$ : Agua en meladura.

$S$ : Sólidos en Tachos

Calderas:



**Figura 2.10.** Diagrama de bloque de las calderas. **Fuente:** Elaboración propia.

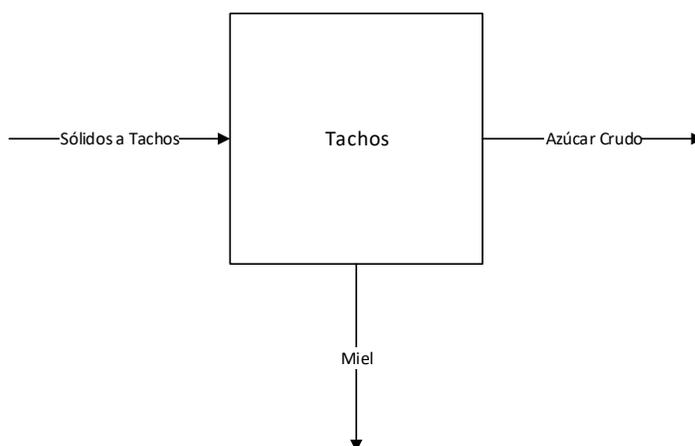
$B = V$  (Ecuación 2.7),

Donde:

$V$ : Vapor

**Cristalización.**

**Tachos:**



**Figura 2.11.** Diagrama de bloque de los tachos. **Fuente:** Elaboración propia.

$S = AC + M$  (Ecuación 2.8),

Donde:

AC: Azúcar crudo.

M: Miel.

Todos estos balances anteriores se deben de aplicar a la alternativa que por el método de Delphi es la mejor para la industria azucarera.

### **2.3 FASE II: Discriminación simple**

En esta etapa se realizó una selección de los programas que más se utilizan para simular procesos químicos y de ellos se escogieron los que más se adaptan a la industria azucarera según criterio de expertos.

Los programas más utilizados para simular procesos químicos son los siguientes:

- SIMFAD
- Aspen Plus
- HYSYS
- CHEMCAD
- SuperPro Designer
- Pro II
- Sugars™
- COCO Simulator
- ChemSep

### **2.4 FASE III: Aplicación del método Delphi para la selección de la alternativa**

En esta fase se explican los pasos del método de Delphi, se seleccionan los expertos y ellos dan su criterio sobre los softwares seleccionados en la etapa anterior que sean mejores para la industria azucarera.

### **Coefficiente de competencia**

Se determina el número de expertos que participarán mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{p(1-p) * k}{i^2} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

En este caso:

$n$  – Cantidad o número de expertos.

$p$  – Proporción de error que se comete al hacer estimaciones del problema con la cantidad de expertos.

$i$  – Precisión del experimento.

$k$  – Constante que depende del nivel de significación estadística  $(1 - \alpha)$ , que se obtiene a través de la Tabla 1.

**Tabla 2.2:** Coeficientes de significación estadística.

$(1 - \alpha)$	$k$
99 %	6, 6564
<b>95 %</b>	<b>3, 8416</b>
90 %	2, 6896

**Fuente.** Elaboración propia.

Sustituyendo valores en la ecuación 2.9 se tiene que:  $n = \frac{p(1-p)*k}{i^2}$

Posteriormente se determina el coeficiente de competencia ( $K_{competencia}$ ) de cada uno de los expertos para la selección. Se determina por la siguiente expresión:

$$K_{competencia} = K_c + K_a \quad (\text{Ecuación. 2.10})$$

Donde:

$K_c$  – Promedio de los valores que el candidato le confiere a cada aspecto que se evalúa en una encuesta presentada. Autoevaluación de manera anónima (ver Anexo 2).

$K_a$  – Coeficiente de argumentación, dado por la sumatoria de los valores adquiridos por el grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación (ver Anexo 3).

**Tabla 2.3:** Coeficiente de argumentación.

Criterio	Expertos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Análisis realizados por usted									
Experiencia adquirida									
Trabajos de autores nacionales que conoce									
Trabajos de autores internacionales que conoce									
Conocimiento propio sobre el estado del tema									
Su intuición									
Suma(Ka)									

**Fuente:** Elaboración propia.

Resulta válido destacar que (ver Anexo 4):

- La Competencia del experto es Alta (A): Si  $K_{competencia} > 8,50$
- La Competencia del experto es Media (M): Si  $0.5 < K_{competencia} \leq 8,50$
- La Competencia del experto es Baja (B): Si  $K_{competencia} \leq 0.5$

**Decisión multicriterio de experto.**

Los expertos seleccionados son los siguientes:

1. Agustín Alfonso López.
2. Yosley Sánchez Pérez.
3. Dayron Pérez Pérez.
4. Marcos A. Cuellar González.
5. Daylen Yara Font Prieur
6. Fernando E. Ramos Miranda
7. Roxana Cortes Martínez
8. Elisa María Chou Rodríguez
9. Eliané Arias Molina

Luego de terminar la selección el número de experto y el orden de las variantes según los criterios analizados mediante el método Delphi se procede a realizar una encuesta a los expertos para determinar, según su criterio, el orden de prioridad de las variantes teniendo en

cuenta los criterios analizados para los cuales se darán los valores de 1 a 5 dando el valor de 5 la mejor opción.

Para recopilar los resultados de la encuesta se realiza la matriz de selección que se muestra en la Tabla 2.4, donde M es el número de expertos,  $A_{ij}$  es el juicio de importancia del experto i sobre el requisito j,  $\Delta$  es la desviación del valor medio que se calcula:

$$\Delta = (\Sigma A_{ij} - \tau) \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

$\tau$ = factor de comparación (valor medio de los rangos) que se calcula

$\tau = \frac{1}{2} M(K + 1)$ , donde K es el número de alternativas.

**Tabla 2.4.** Criterio de expertos.

No.	Variant es	Expertos									Cálculo de indicadores				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma$ $A_i$ $j$	$\zeta$ $M(K+1)/2$	$\Delta$ $\Sigma$ $A_i$ $j - \zeta$	$\Delta$ $\Delta_2$	$\omega$ $(12\Sigma\Delta^2)/$ $M^2(K^3-K)$
Sugars <sup>TM</sup>												↓			↓
SIMFAD															
Aspen plus															
aspen HYSYS															

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 2.5.** Orden de importancia

	Sugars <sup>TM</sup>	
	SIMFAD	
	Aspen plus	
	aspen HYSYS	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 2.6.** Prueba de hipótesis

Número de alternativas	K	
Número de expertos	M	
Chi cuadrado calculado, $\hat{\sigma}x^2$ calculado	$M(K-1)\omega$	
Chi cuadrado tabulado, $x^2$ tabulado	$X^2(0,01;3)$	
Si $x^2$ calculado $>$ $x^2$ tabulado, entonces el modelo seleccionado es el adecuado		

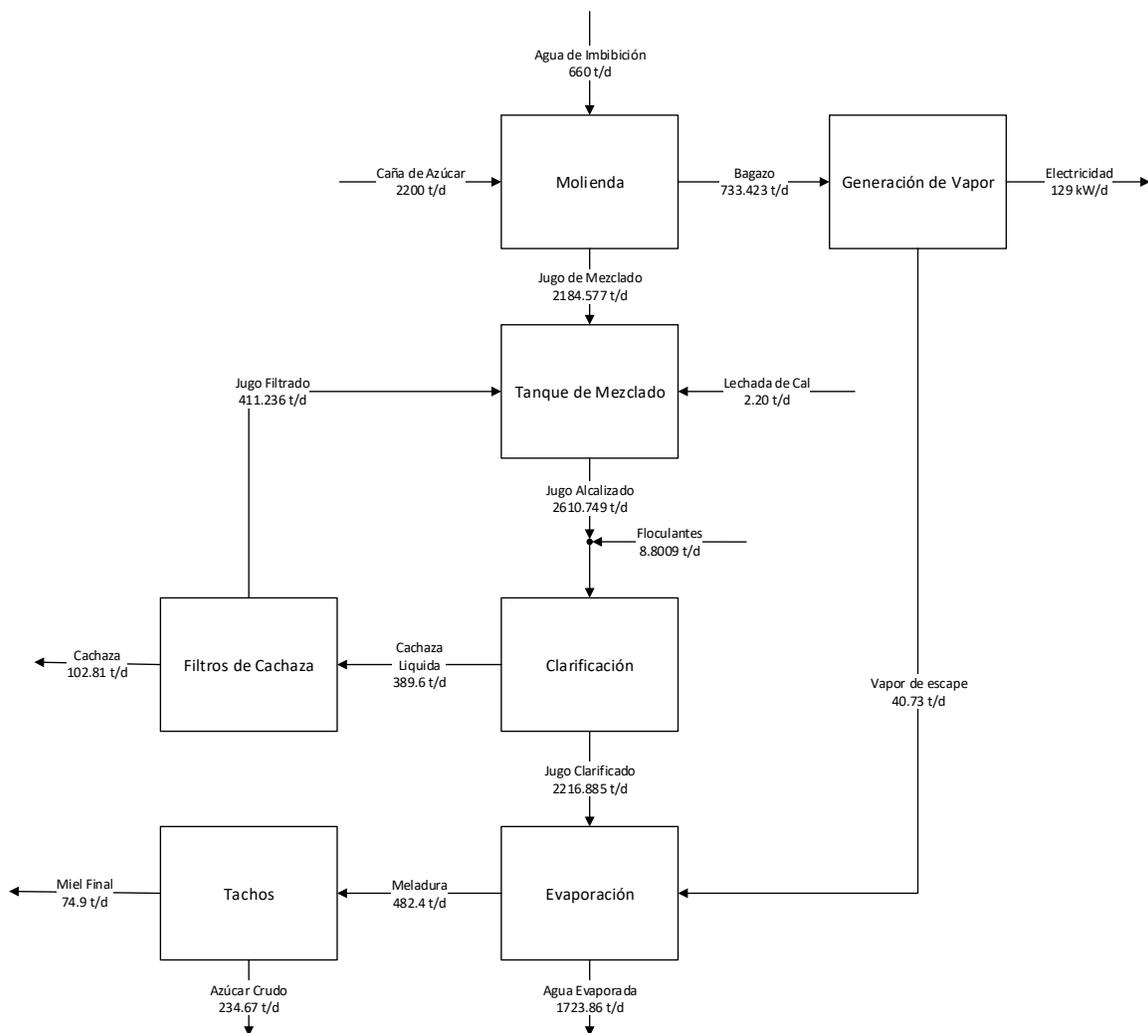
**Fuente:** Elaboración propia



Se evaluó esta unidad durante un año, eligiéndose el año 2018 debido que ese año el central se encontraba en funcionamiento y actualmente no está produciendo porque se encuentra en un proceso de reordenamiento.

Una vez limitados los términos de espacio y tiempo, se identificaron las corrientes entrantes y salientes del proceso azucarero. Por consiguiente, las corrientes principales de entrada al proceso fueron: caña de azúcar, agua, sustancias auxiliares y servicios adquiridos de la economía; obteniendo como salidas: azúcar crudo, cachaza y miel (melaza).

### Balance de materiales en la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”



**Figura 3.2.** Balance de materiales de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez”. **Fuente:** Elaboración propia

El anterior balance se realizó en una hoja de Excel para una capacidad de molienda de 2200 toneladas al día (ver Anexo 5 y Anexo 6).

### **Situación ambiental de la UEB Central Azucarero “Elpidio Gómez Guzmán”**

La UEB presenta problemas ambientales relacionados al proceso de producción siendo los más importantes los siguientes:

Al realizar un estudio de los principales riesgos en la industria encontramos que existe

- Contaminación Química
- Emisiones a la atmósfera
- Contaminación Sonora
- Contaminación de los Suelos y Residuales

### **Las principales vías de contaminación son:**

- El empleo de las corrientes superficiales como receptoras de residuales.
- El empleo de tecnologías obsoletas.
- La deficiente introducción de prácticas de Producción más Limpia.
- Insuficiencia en los recursos financieros destinados a la minimización de la contaminación
- El insuficiente tratamiento de los residuos de la actividad industrial.
- El manejo inapropiado de los residuos sólidos, con serios problemas en su disposición y aprovechamiento
- Inadecuado manejo de los productos químicos y de los desechos peligrosos y la acumulación progresiva y manejo inadecuado de estos desechos sin la solución técnica para su disposición final.
- El ruido es uno de los principales riesgos tanto para los trabajadores como para la población del batey, las principales áreas de contaminación por ruido son: toda el área

de fabricación del central, en la que se encuentra los molinos, las centrifugas, los generadores eléctricos de vapor, los diferentes motores y los salideros de vapor de escape.

### 3.2 Discriminación simple.

De los softwares mencionado en el capítulo II no todos se adaptan a la industria azucarera porque no aparecen los equipos utilizados, no simulan con precisión sus procesos y no permite introducir las variables de operación de la industria azucarera, por eso se seleccionaron los más adecuados para simular el proceso de obtención de azúcar, los cuales fueron el SIMFAD, el Aspen Plus, el Aspen Hysys y el Sugars™ según criterio de los expertos escogidos para la investigación.

### 3.3 Aplicación del método Delphi para la selección de la alternativa

En la Tabla 3.1 se exponen los resultados alcanzados por el método de Delphi. Se muestran las respuestas de los expertos según el orden de importancia. También se calcula el coeficiente Kendal y se realiza la prueba de hipótesis para apreciar el criterio de convergencia de los expertos.

**Tabla 3.1.** Criterio de Expertos.

No.	Variantes	Expertos										Cálculo de indicadores				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma A_{ij}$	$\zeta$ $M(K+1)/2$	$\Delta$ $\Sigma A_{ij} - \zeta$	$\Delta^2$	$\omega$ $(12\Sigma\Delta^2)/M^2(K^3-K)$	
<b>Sugars™</b>	1	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	34	↓	12	25	↓
<b>SIMFAD</b>	2	5	5	4	5	5	4	5	4	5	42	20		380		
<b>Aspen plus</b>	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	28	6		30		
<b>aspen HYSYS</b>	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	-14		182		
											113	22.5	725	0.9		

**Fuente:** Elaboración propia

Si el coeficiente de Kendal es menor que 1 hay concordancia entre los criterios de los expertos, y como es 0.9 se cumplen lo anterior

Los resultados de la Tabla 3.2 muestra que, por orden de importancia, el SIMFAD es el mejor.

**Tabla 3.2.** Orden de importancia

2	<b>Sugars™</b>	34
1	<b>SIMFAD</b>	42
3	<b>Aspen plus</b>	28
4	<b>aspen HYSYS</b>	9

**Fuente:** Elaboración propia

La Tabla 3.3 muestra el cálculo de los estadígrafos mencionados anteriormente.

**Tabla 3.3.** Prueba de hipótesis

Número de alternativas	K	4
Número de expertos	M	9
Chi cuadrado calculado, $\hat{\omega}x^2$ calculado	$M(K-1)\omega$	24.3
Chi cuadrado tabulado, $x^2$ tabulado	$X^2(0,01;3)$	0.115
Si $x^2$ calculado > $x^2$ tabulado, entonces el modelo seleccionado es el adecuado		

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con el método de Delphi el mejor programa de simulación de la industria azucarera para aplicar estos balances es el SIMFAD, donde sí se realizan estos balances en el software anterior los resultados obtenidos serían más exactos y eficientes.

¿Por qué el programa de simulación más adecuado a la industria azucarera es el SIMFAD?

1. Presenta una interfaz fácil de utilizar.
2. Sus autores fueron un equipo de la Agroindustria Azucarera Cubana (AZCUBA) y del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).
3. Representa todas las etapas del proceso azucarero incluyendo sus derivados.
4. Realiza también balances de proceso y análisis económicos.

Como deficiencias se aprecian que no es un software de acceso gratuito.

## CONCLUSIONES

1. El estudio bibliográfico realizado indica que la investigación que se realizó está científicamente sustentada.
2. El software seleccionado por los expertos es el SIMFAD por las posibilidades técnicas y académicas que posee en cuanto al balance de materiales y análisis económico.
3. El software seleccionado por los expertos presenta una interfaz fácil de utilizar, sus autores fueron un equipo de la Agroindustria Azucarera Cubana (AZCUBA) y del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA); en él se representan todas las etapas del proceso azucarero incluyendo sus derivados y también balances de proceso y análisis económicos. Teniendo este como principal deficiencia la no posibilidad de ser un software de acceso gratuito.

## **RECOMENDACIONES**

1. Proponer a la dirección de la empresa y organismo competente, la aplicación de este software de simulación (SIMFAD) con el fin de realizar una evaluación de P+L para mitigar los impactos ambientales que presenta esta institución.
2. Continuar este trabajo integrando el resto de las tesis de grado que se han realizado en la planta en general a fin de evaluar en su integralidad el proceso de producción de dicha fábrica.
3. Generalizar este estudio a procesos de la industria azucarera similares a la fábrica objeto de estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

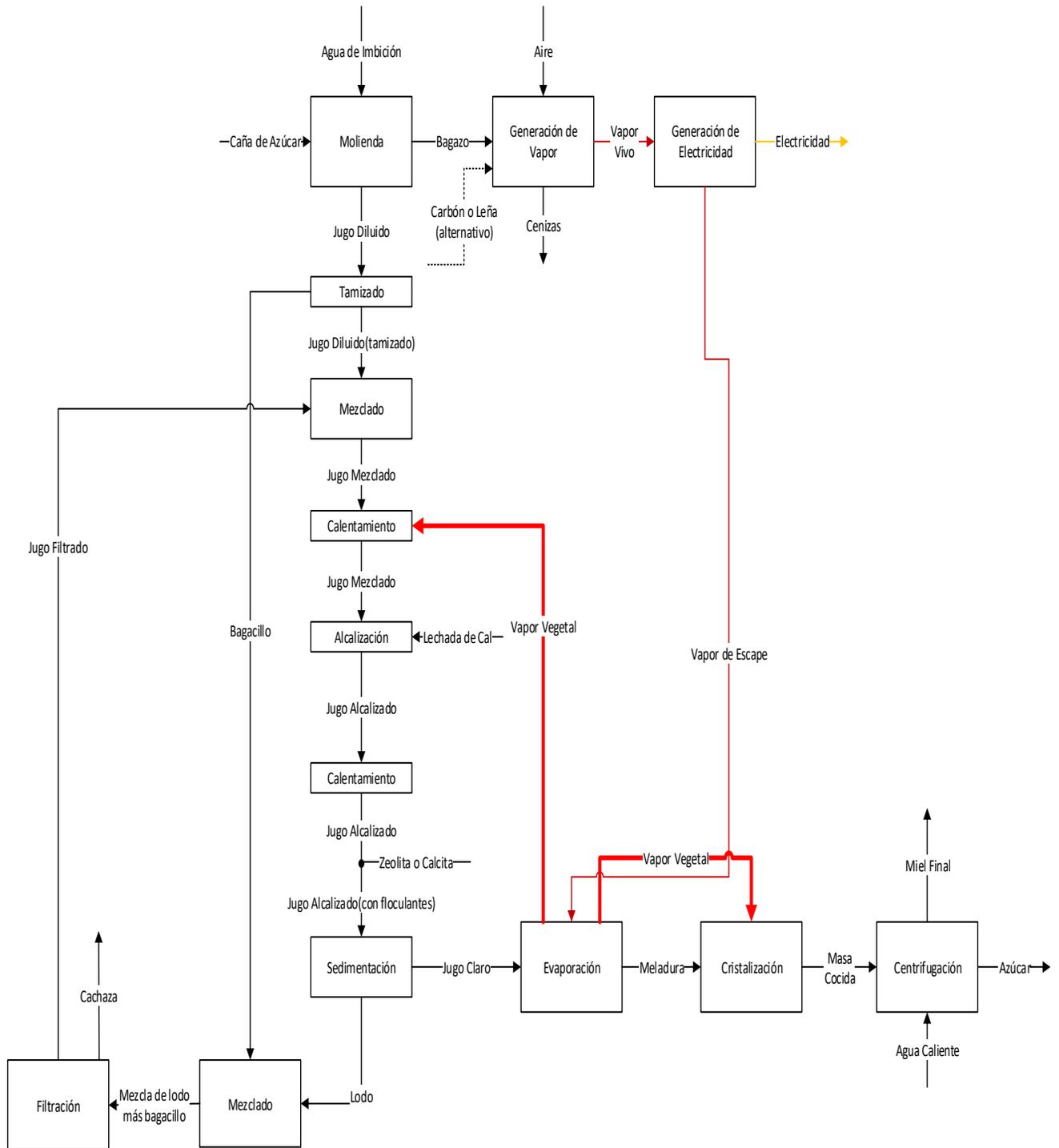
- Álvarez Baldoquín & Arias González (2009). La producción más limpia: una herramienta indispensable. *Revista Electrónica Granma Ciencia*, 13(3).1027-975X
- aspentech. (2021). ¿Qué es Aspen Hysys?  
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/07/que-es-aspen-hysys.html>
- AspenTech. (s.f.). Aspen Plus/Leading Process Simulation Software.  
<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>
- Balance de Masas - UNSJ. (2018).  
<http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>
- CAPE-OPEN. (s.f.). ChemSep/the CAPE-OPEN Laboratories Network.  
<https://www.colan.org/process-modeling-component/chemsep-2/>
- CAPE-OPEN. (s.f.). COCO-the CAPE-OPEN to CAPE-OPEN simulator environment.  
<https://www.cocosimulator.org/>
- Chemstations. (s.f.). Chemical Process Simulation for Academics.  
<https://www.chemstations.com/Industries/Education/>
- Consejo Nacional del Ambiente (CONAM). (2003). Guía de Implementación de Producciones más Limpias. Centro de Eficiencia Tecnológica.
- Cortez de la O, Saballos Sánchez, & Sorto Merino. (2017). Aplicación del programa “COCO simulator” en la simulación de componentes de procesos de industrias químicas en El Salvador, como una herramienta didáctica para la ingeniería química. (Tesis de Grado). Ciudad Universitaria`Dr. Fabio Castillo Figueroa`.
- Dundand C, R. y. (2007). El Tratamiento Magnético y la Disminución de Residuales Líquidos en la Industria Azucarera. II Conferencia Internacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA). ICINAZ.
- Gil Chaves, I. D., Guevara López, J. R., García Zapata, J. L., Leguizamón Robayo, A., & Rodríguez Niño, G. (2016). *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering*. Springer.
- Guardado, Z. (2012). Propuesta de Alternativas para la Reducción de Pérdidas de Sacarosa en un Ingenio Azucarero. (Tesis de Grado) . Ciudad Universitaria`Dr. Fabio Castillo Figueroa`.
- Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). (s.f.). Simfad-Icidca.[https://www.icidca.azcuba.cu/?page\\_id=710](https://www.icidca.azcuba.cu/?page_id=710)
- Jannet Diaz, D. (2017). Desarrollo de la premezcla de harina de trigo duro obtenida por procesos de Nixtamalizado tradicional y modificado.  
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/67745>

- Lapidus, L. (1962). Digital Computation for Chemical Engineers. McGraw-Hill.
- López, R., & Pernalet, C. (2010). Desarrollo de los modelos termodinámicos de chao-seader, grayson-streed y lee-erbar-edmister modificado como componentes CAPE-OPEN. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.
- M. B. (2012). Simulación de Procesos de Producción de Negro de Humo utilizando el Programa UNSIM. Universidad de San Buenaventura Cartagena.
- Maqueira Leonel, C. (2005). La presencia de la concepción de producción más limpia en la legislación ambiental cubana. <http://ama.redciencia.cu/articulos/8.05.pdf>
- Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Alvarez, J., & Salvarrey, A. (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/35868>
- Mille, J., & Eimer, P. (2002). Guía de buenas prácticas de gestión empresarial (BGE) para pequeñas y medianas empresas. Programa piloto para la promoción de la gestión ambiental en el sector privado en países en vías de desarrollo. [http://iadsargentina.org/pdf/ANEXO%20IV%20-%20Guia%20BGE%20\(1\).pdf](http://iadsargentina.org/pdf/ANEXO%20IV%20-%20Guia%20BGE%20(1).pdf)
- Ministerio del Azúcar (MINAZ). (2020). Estrategia Medio Ambiental UEB Elpidio Gomez.
- Moreda, P. E. (2020). Ingeniería de Manufactura. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/97916>
- Navarro, A., Albertario, M., & Palladino, L. (s.f.). Utilizacion de Simuladores en Plantas de Tratamiento de Efluentes Liquidos. [https://www.researchgate.net/profile/agustin-navarro-3/publication/268411616\\_utilizacion\\_de\\_simuladores\\_en\\_plantas\\_de\\_tratamiento\\_de\\_efluentes\\_liquidos/links/54bd60d40cf27c8f2814b710/utilizacion-de-simuladores-en-plantas-de-tratamiento-de-efluentes-liquid](https://www.researchgate.net/profile/agustin-navarro-3/publication/268411616_utilizacion_de_simuladores_en_plantas_de_tratamiento_de_efluentes_liquidos/links/54bd60d40cf27c8f2814b710/utilizacion-de-simuladores-en-plantas-de-tratamiento-de-efluentes-liquid)
- Nuestro futuro común (Our common future) . (1987). En G. Harlem Brundtland, World Commission on Environment and Development (WCED) . Alianza Editorial.
- Ochoa, G. (2007). Las Producciones Más Limpias en la Gestión Empresarial. Universidad de Cienfuegos. Felix Varela.
- Olivares, A. P. (2000). Introducción a la ingeniería química: balances de masa y energía. Tomo I. Universidad Iberoamericana.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1999). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. En Un paquete de recursos para capacitación . <http://www.pnuma.org/industria/documentos/pmlcp00e.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2010). Producciones más limpias conceptos y antecedentes. Buenos Aires. <https://studylib.es/doc/5519937/producci%C3%B3n-y-antecedentes>

- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (1999).  
Manual de producción más limpia.  
[http://www.unido.org/fileadmin/user\\_media/Services/Environmental\\_Management/CP\\_ToolKit\\_spanish/PR-Introduction/Toolkit.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Environmental_Management/CP_ToolKit_spanish/PR-Introduction/Toolkit.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2004).  
Manual de Introducción a las Producciones más Limpias en la Industria. En Centro Nacional de Producciones más Limpias. Guía de Producciones más Limpias .  
INCONTEC.
- Orces, E. (2004). Aplicación de la metodología de Producciones más Limpias en una Empresa Alimenticia. Revista Tecnológica, 17(1), 1-13.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2012). GEO5 perspectivas del medio ambiente mundial : resumen para responsables de políticas. Nairobi.
- Rigola, M. (1998). Producción más limpia. Rubes.
- Rivera, A. (2002). Producción más Limpia en Cervecería Ténima (Informe técnico IIIA 503 002 03. Cervecería Ténima.
- Sanchiz, M. (2015). Implementación de unidades de separación en el simulador de procesos coco. Aplicación al diseño de un proceso de regeneración de aguas de lavado de recubrimientos metálicos. <https://riunet.upv.es/handle/10251/49580>
- Scenna, N. J., Aguirre, P. A., Benz, S. J., Chiotti, O. J., Ferrero, M. B., Montagna, J. M., . . . Vega, J. (2015). Modelado, Simulación y Optimización de Procesos. <http://metabase.uaem.mx:8080/handle/123456789/599>
- Schneider Electric. (s.f.). Pro II. <https://www.chemicalengineeringguy.com/the-blog/process-simulation/what-is-pro-ii-from-schneider-electric-aveva>
- Sugars International LLC. (s.f.). Proceso Simulator. Sugars International, LLC. <https://sugarsonline.com/>
- Tobón M, O. L., & Hoyos, P. (s.f.). Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales (CNPMLTA). <http://biblioteca.esucomex.cl/RCA/Ecobalances.%20Balances%20de%20materia%20y%20energ%c3%ada.pdf>
- La Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNWCED). (1987). En Our Common Future. Oxford University Press.

# ANEXOS

**Anexo 1.** Diagrama de bloque del proceso de fabricación de azúcar. **Fuente.** Elaboración propia.





**Anexo 5.** Diagrama de flujo y balance en los molinos, clarificación y evaporación. **Fuente:** Elaboración propia

