

CONTRIBUCIÓN DEL ANÁLISIS DE PROCESOS AL DESARROLLO DE INSTALACIONES DE ETANOL DE VARIAS GENERACIONES



Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional
de Misiones / Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES

Compiladores

Erenio González Suárez
Juan Esteban Miño Valdés

**CONTRIBUCION DEL ANALISIS DE PROCESOS
AL DESARROLLO DE INSTALACIONES DE ETANOL
DE VARIAS GENERACIONES**

Colección: Ediciones especiales

Coordinación de la edición: Juan Esteban Miño Valdés

Revisión técnica y corrección: Juan Esteban Miño Valdés

Correo electrónico: minio@fio.unam.edu.ar

Cel. 00 - 54 - 9 - 376 - 4683455

Facultad de Ingeniería (FI) / Universidad Nacional de Misiones (UNaM)

Rosas 325 - 3360 Oberá - Misiones - Argentina

Tel.: 00 - 54 - 3755 - 422170 Int. 147

Primera edición: Noviembre de 2019

Miño Valdés, Juan Esteban, González Suárez Erenio.

Contribucion del analisis de procesos al desarrollo de instalaciones
de etanol de varias generaciones

1a edición - Posadas, Misiones, Argentina.

140 p. ; 21x15 cm.

ISBN 978-987-86-2875-2

Biocombustibles.

CDD 662.60286

ISBN Nº 978-987-86-2875-2

Diagramación y diseño de tapa: **Gráfica Libertad**

Todos los derechos reservados - Prohibida su reproducción
total o parcial, por cualquier método

Queda hecho el deposito que previene la ley 11.723



EDICIONES **gráficalibertad**
servicios & soluciones de calidad

Impreso en **Gráfica Libertad**, Dutra 3369

3300 Posadas, Misiones, Argentina

serviciosimpresiones@hotmail.com

Noviembre de 2019

SOBRE LOS AUTORES

Aguirre Pio // Capítulo 5

Ingeniero Químico

Dr. en Ingeniería Química

PosDoc. en Ingeniería Química / Universidad técnica de Munich,
Alemania

Profesor Titular Regular / Facultad de Ingeniería Química /

Universidad Nacional del Litoral , Argentina

Investigador Superior del CONICET / Instituto de Desarrollo y Diseño
INGAR (CONICET-UTN)

(pagir@santafe-conicet.gov.ar)

Castro Galiano Eulogio // Capítulo 6

Ingeniero Químico

PhD en Ingeniería Química

Docente e Investigador / Dpto. de Ingeniería Química, Ambiental y
Materiales,

Universidad de Jaén, España

(ecastro@ujaen.es)

de Armas Martínez Ana Celia // Capítulos 1 y 6

Ingeniera Química

Máster en Ingeniería Química

Aspirante a Doctor en Ciencias Técnicas

Docente e Investigador / Dpto. de Ingeniería Química /

Facultad de Química y Farmacia / Universidad Central “Marta Abreu”
de Las Villas, Cuba.

(anaceliam@uclv.edu.cu)

Domínguez Elena Rosa // Capítulo 3

Ingeniera Química,

Máster en Análisis de Procesos,

Dr. en Ciencias Técnicas,

Profesor Titular e Investigador / Centro de Análisis de Procesos /

Dpto. Ingeniería Química /

Facultad de Química y Farmacia / Universidad Central “Marta Abreu”
de Las Villas, Cuba.
(dominguezer@uclv.edu.cu)

Galindo Llanes Pablo Ángel // Capítulo 4

Ingeniero Químico
Dr. en Ciencias Técnicas
Profesor Titular e Investigador
Dpto de Ingeniería Química / Facultad de Ciencias Aplicadas /
Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Cuba.
(pablo.galindo@reduc.edu.cu)

Gómez Pérez Carlos René // Capítulo 6

Ingeniero Mecánico
Doctor en Ciencias Técnicas
Profesor Titular e Investigador / Centro de Investigaciones de
Soldadura
Facultad de Ingeniería Mecánica / Universidad Central “Marta Abreu”
de Las Villas, Cuba.
(crene@uclv.edu.cu)

González Cortés Meylin // Capítulo 1

Ingeniera Química,
Máster en Análisis de Procesos,
Dr. en Ciencias Técnicas,
Profesora e Investigadora Auxiliar / Centro de Análisis de Procesos /
Dpto. Ing. Química / Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas,
Cuba.
(mgonzalez@uclv.edu.cu).

González Morales Víctor Manuel // Capítulo 6

Ingeniero Químico
Doctor en Ciencias Técnicas
Profesor Auxiliar Investigador / Facultad de Química y Farmacia
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba.
(vmgonzalez@ucf.edu.cu)

González Suárez Erenio // Capítulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6

Ingeniero Químico

Dr. en Ciencias Técnicas y Dr. en Ciencias

PosDr. en Gestión Ambiental y Seguridad Industrial

Profesor Titular y Emérito, Dpto. de Ingeniería Química de la Facultad de Química y Farmacia /

Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba.

Miembro de Mérito de la Academia de Ciencias de Cuba.

Premio Nacional de Ingeniería Química 2013 de la Asociación de Química de Cuba. (erenio@uclv.edu.cu)

Laborde Miguel Ángel // Capítulo 2

Licenciado en Ciencias Químicas, orientación Tecnología Química

Doctor en Ciencias Técnicas

Profesor Titular e Investigador / Laboratorio de Procesos Catalíticos

Dpto. de Ingeniería Química / Facultad de Ingeniería Química /

Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Premios internacionales al Laboratorio de Procesos Catalíticos:

1. Mercosur de Ciencia y Tecnología 2004 de UNESCO y RECYT, categoría Integración.
2. Interciencia Energía 2005, Asoc. Interciencias Hydroquebec y Assoc. francophone pour le savoir.

(miguel@di.fcen.uba.ar)

Lauchy Sañudo Armando // Capítulo 2

Licenciado en Economía

Dr en Ciencias Económicas

Director de Contabilidad y Finanzas / Ministerio de Educación Superior, Cuba

Profesor e Investigador / Facultad de Ciencias Económicas /

Universidad de la Habana, Cuba.

(lauchy@mes.gob.cu)

Layanis Mesa Garriga // Capítulo 6

Licenciada en Química

Dra. en Ciencias Técnicas
Docente e Investigadora / Dpto. Ingeniería Química, Facultad de
Química y Farmacia,
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.
(layanismg@yahoo.es)

Miño Valdés Juan Esteban // Capítulos 2, 3 y 5
Laboratorista Químico Industrial, Ingeniero Químico,
Especialista en Gestión de Producción y Ambiente
Máster en Tecnología de los Alimentos
Dr. en Ciencias Técnicas y 4 PosDoc. en Desarrollo de la Industria
Química
Profesor Titular Regular e Investigador Categoría II, Dpto de Física
Facultad de Ingeniería / Universidad Nacional de Misiones, Argentina.
(minio@fio.unam.edu.ar)

Oquendo Ferrer Hilda // Capítulo 4
Ingeniera Industrial
Doctora en Ciencias Técnicas
Profesor Titular, Investigador / Dpto. Ing. Química / Fac. de Ciencias
Aplicadas /
Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”. Cuba.
(hilda.oquendo@reduc.edu.cu)

Pérez Martínez Amaury // Capítulo 4
Ingeniero Químico
Máster en Análisis de Procesos
Doctor en Ciencias Técnicas
Profesor Titular e Investigador / Facultad de Ciencias de la Tierra /
Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.
Profesor Titular, Investigador / Dpto. de Ing. Química / Facultad de
Ciencias Aplicadas,
Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Cuba
(amperez@uea.edu.ec) y (aperezmartinez2009@gmail.com)

Viatcheslav V. Kafarov // Capítulo 2

Ingeniero Químico

Máster en Matemática Aplicada

Dr. en Ciencias Técnicas y Dr. en Ciencias

PosDr. en Matemática Aplicada e Ingeniería de Procesos

Director Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en
Industria y Energía (CIDES)

Director del Centro de Investigación en Simulación y Control de
Procesos (CISYC)

Profesor Titular e Investigador de la Facultad de Ingeniería Química,
Universidad Industrial Santander, Colombia.

(kafarov@gmail.com)

Prólogo

Los capítulos que los compiladores han seleccionado para conformar este libro presentan los siguientes objetivos generales:

- Minimizar el impacto ambiental a través del análisis y la integración de procesos.
- Evaluar el riesgo y la incertidumbre de inversiones en plantas de la ruta alcoquímica.
- Considerar la fiabilidad de los equipos en el diseño de instalaciones de la industria química.
- Aplicar modelado y simulación de procesos en la industria azucarera.
- Analizar la solución de problemas ambientales evaluando el proceso de producción de bioetanol.
- Aplicar estrategia investigativa a un escalado industrial de nueva tecnología, para la obtención de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar.

Por los objetivos enumerados, este libro resultará de interés a investigadores, docentes y alumnos de grado y posgrados, que requieran del análisis de procesos para desarrollar instalaciones de etanol de varias generaciones en la industria química y fermentativa.

Dra. Ing. Quím. Sandra Liliana Hase Ordieres
Profesor Titular Regular, Dpto. de Ing. Química
Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales
Universidad Nacional de Misiones, Argentina
(sandra.hase2011@gmail.com)

INDICE

Acerca de los Autores	3
Prólogo	9
CAPITULO I	13
Estrategia para minimizar el impacto ambiental a través del análisis y la integración de procesos.	
CAPITULO II	37
El riesgo y la incertidumbre en la evaluación de inversiones en plantas de la ruta alcoquímica integrada a un complejo agroindustrial azucarero.	
CAPITULO III:	61
Consideración de la fiabilidad de los equipos en el diseño de instalaciones de la industria química.	
CAPITULO IV:	77
El análisis de procesos en la solución de los problemas ambientales en la producción de bioetanol.	
CAPITULO V:	95
La modelación y simulación de procesos y sus aplicaciones en la industria azucarera	
CAPITULO VI:	129
Fundamentación y avances de la estrategia investigativa para el escalado industrial de una nueva tecnología de obtención de etanol con bagazo de caña de azúcar.	

CAPÍTULO I

ESTRATEGIA PARA MINIMIZAR EL IMPACTO AMBIENTAL A TRAVÉS DEL ANÁLISIS Y LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS

Erenio González Suárez
Meylin González Cortés
Ana Celia de Armas Martínez

1.1. Integración de masa y energía en la Industria de Procesos Químicos

La Integración de Procesos es una tecnología sistemática, basada en un enfoque hacia el desarrollo de procesos que permite al ingeniero ver un gran escenario primero y los detalles después, permitiendo identificar los objetivos globales de eficiencia antes de cualquier actividad de desarrollo, y encontrar la estrategia óptima para llevarlo a cabo. Estos objetivos pueden ser, por ejemplo, minimizar los requerimientos energéticos, minimizar la generación de residuales, maximizar la eficiencia del proceso, optimizar un proceso ó una etapa de éste, etc. Un aspecto interesante es que puede aplicarse durante el diseño de las plantas o en plantas que ya se encuentren funcionando y que no fueron diseñadas teniendo en cuenta los criterios de la integración de procesos.

La integración de procesos se caracteriza por dos elementos: la energía y la masa (*Cripps, 2000*).

La integración de energía caracteriza el flujo global dentro de cualquier proceso, e identifica las políticas óptimas para su distribución y redistribución, tal de obtener la configuración óptima para su consumo mínimo.

La integración de masa es una técnica relativamente nueva que se ha desarrollado mucho en los últimos años. Las investigaciones en este tema han conducido al desarrollo de una herramienta sistemática y potente para el entendimiento total del proceso y sus posibilidades de integración material (*Dunn, 2000*).

La integración de masa facilita un entendimiento global de los flujos de masa dentro del proceso, guía al ingeniero a través de sus

complejidades y le permite extender el alcance de cualquier actividad de desarrollo del proceso (*Hamad, 1998*).

La Integración material y energética de Procesos ha sido utilizada fundamentalmente para enfrentar tareas de prevención de la contaminación, para mejorar los procesos desde los puntos de vista ambiental, tecnológico y económico. Como ejemplos de herramientas de integración material de procesos se pueden mencionar:

- Diagrama fuente /sumidero, a través del cual se pueden identificar las posibilidades que existen en el proceso para el reciclado, mezclado o intersección de flujos residuales, con el objetivo de reducir los residuales que se generan en el proceso (*Parthasarathy, 2000*); (*Dunn, 1997*); (*Garrison, 2000*).

- Redes de intercambio de masa, Mass Exchange Network (MEN), que permiten identificar en un proceso las posibilidades de intercambio de flujos materiales con el objetivo de recuperar productos químicos de las corrientes y reutilizarlos en el proceso, (*El-Halwagi, 1989*), (*Wilson, 1997*); (*Shelley, 2000*); (*Srinivas, 1996*).

- Síntesis de redes de reacción, Reaction Network (RN), para analizar la factibilidad en un proceso de sustituir los productos usados por productos químicos menos agresivos al medio, permite identificar tecnologías más limpias y evaluar la posibilidad de introducir las en un proceso existente (*Tripathi, 1996*); (*El-Halwagi, 1998*).

Por lo general, todas estas estrategias de prevención de la contaminación incluyen segregación, mezcla y reciclo de flujos, intersección con equipos de separación, cambios en las condiciones de diseño y operación de los equipos, sustitución de materiales, así como cambios en la tecnología. De acuerdo con los cambios que comprendan las mismas, se han clasificado y ordenado jerárquicamente en cuatro categorías (*Noureldin, 1999*):

1. Herramientas que implican cambios de bajo/ ningún costo.
2. Herramientas que implican cambios con nuevos equipos.
3. Herramientas que implican cambios con nuevos productos químicos.
4. Herramientas que implican cambios de tecnología.

En la *figura 1.1*, (Dunn, 2000), se muestran las herramientas que pueden utilizarse en cada uno de los puntos anteriores. Este esquema constituye el punto de partida a tomar en cuenta para el desarrollo de la metodología de integración de procesos a través de la cual se pueda lograr una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular, ya que en el mismo se resumen las herramientas de integración de procesos que pueden ser empleadas para enfrentar problemáticas ambientales en la industria de procesos químicos.

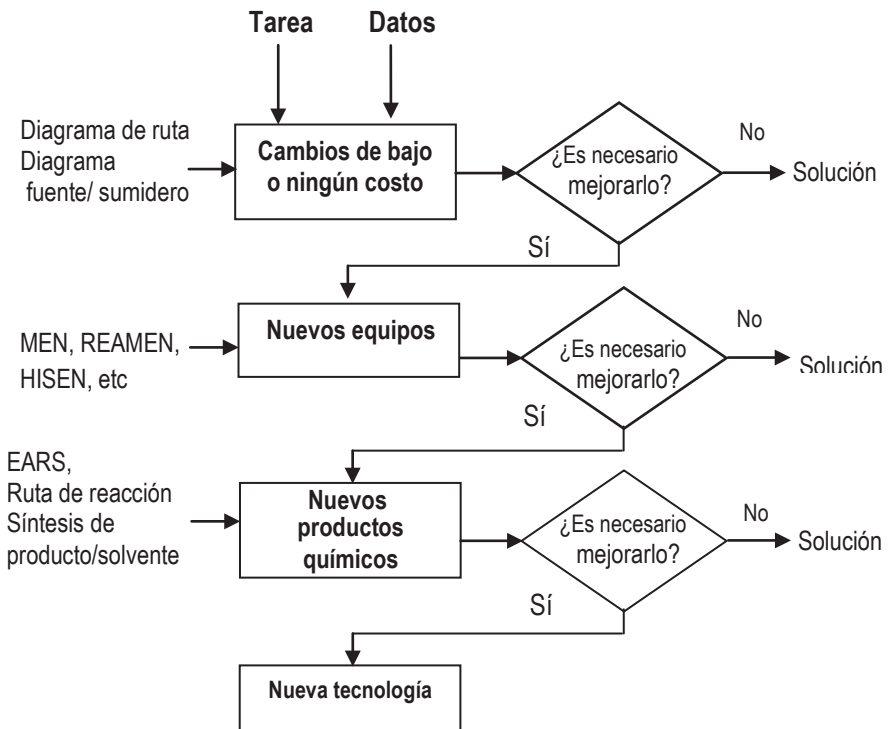


Figura 1.1. Herramientas de diseño y análisis para la integración de procesos

En el establecimiento de la jerarquía expresada anteriormente, se han tenido en cuenta tres factores principales, a saber, el factor económico, el impacto de la herramienta y la aceptabilidad. El

aspecto económico puede ser valorado por una variedad de criterios económicos, tales como, costo de capital, período de recuperación de la inversión y valor neto presente. El impacto, es una medida de la efectividad de la solución propuesta en la reducción de las consecuencias ecológicas y de peligrosidad negativas del proceso, tales como reducción en emisiones y efluentes de la planta. La aceptabilidad es una medida de la probabilidad que tiene una estrategia propuesta a ser aceptada e implementada por la planta. (Noureldin, 2000).

De acuerdo a lo que se ha explicado, puede observarse en la figura anterior, que las estrategias y los cambios que estas provocan en el proceso aparecen en orden ascendente en relación al costo y al impacto y en orden descendente de acuerdo a la aceptabilidad. (Garrison, 1997); (Bédard, 2000). Lo que significa que las herramientas que implican cambios con nuevos productos químicos y cambios de tecnología, puntos 3 y 4, son más costosas y por ende menos aceptadas para su implementación, pero a la vez de un mayor impacto en el logro del objetivo principal de su aplicación, que las que implican cambios de bajo o ningún costo y cambios con nuevos equipos, puntos 1 y 2.

1.2. Integración de procesos en la prevención de la generación de un efluente contaminante

En el epígrafe anterior se mostraron ejemplos referidos en la literatura donde se analizaba el empleo de las herramientas de integración de procesos en las estrategias de reciclaje de corrientes residuales al proceso, con el objetivo de reducir el vertido de flujos líquidos al medio y las pérdidas de energía térmica. Es decir, se han analizado las posibilidades de emplear las herramientas que se refieren en los puntos 1 y 2 de la jerarquía que se estableció en el epígrafe 1.2.

1.2.1. Análisis de las alternativas de integración material y energética de los procesos de producción azúcar-papel-alcohol-torula

La integración material y energética de los procesos de producción de azúcar y papel tiene varios propósitos entre estos podemos

mencionar: racionalizar el uso de los portadores energéticos, particularmente el bagazo, dado su cualidad de ser materia prima y combustible; disminuir el efecto negativo sobre el medio ambiente de los residuales de ambos procesos, particularmente el papelerero donde se genera en la etapa de pulpeo del bagazo con sosa cáustica el licor negro el cual como se ha planteado en epígrafes anteriores es un residual muy agresivo para el medio ambiente. Por tanto, la estrategia que se sigue al analizar la integración de estos procesos comprende los siguientes puntos:

- Disminuir los consumos energéticos en los sistemas involucrados
- Implementación del pulpeo con etanol para la cocción del bagazo usando proporciones pequeñas de sosa. Se mantiene en esta etapa el uso del vapor de agua a 7 Kg/cm² y 170°C como medio de calentamiento. En estas condiciones los residuales obtenidos son menos agresivos y existe la posibilidad de proponer a la fábrica un sistema de tratamiento factible técnico y económico.

- Se propone producir en fábrica adjunta a la de azúcar instalada al efecto las cantidades de alcohol etílico necesarias para el pulpeo con etanol, utilizando como sustrato miel B, jugo de los filtros y jugos secundarios. La fábrica de azúcar además aportaría las cantidades necesarias de vapor de agua y electricidad.

- Se propone para cerrar el circuito de producción y residuales la instalación de una pequeña planta para la producción de levadura torula.

- Producir toda la energía necesaria en un sólo lugar que sería la fábrica de azúcar en una planta termoeléctrica única.

- Usar como combustibles posibles: bagazo, residuos agrícolas cañeros (RAC) y fuel oil.

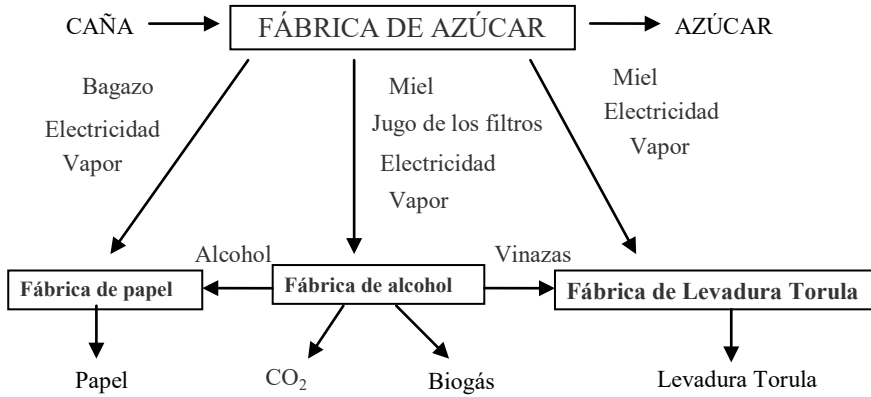
- Satisfacción total de las demandas térmicas y eléctricas para el sistema integrado.

- Garantizar las cantidades de bagazo usadas como combustible y materia prima para la papelería para la operación del sistema integrado todo el año (320 días); particularmente papelería, destilería y planta de levadura torula

De forma tal, que se está hablando de la integración de cuatro fábricas fundamentales: fábrica de azúcar, fábrica de pulpa y papel,

fábrica de alcohol y fábrica de alimento animal, cuyos procesos intercambiarían recursos materiales y energéticos, viendo la posibilidad de incorporar otras plantas de derivados como: recuperación de CO₂ y Biogás.

El esquema general para la integración material y energética de las fábricas puede representarse de la siguiente forma:



1.2.2. Características y diseño de la fábrica de producción de alcohol

Como se ha explicado se diseñará una planta para la producción de alcohol etílico de 95º GL para ser utilizado en el pulpeo del bagazo en el proceso tecnológico de la papelera Damují.

Los consumos fundamentales que se tendrán para la producción del alcohol serán: nutrientes para la fermentación, ácido sulfúrico para ajustar PH, miel final, jugo de los filtros del central en tiempo de zafra para ahorrar miel que es materia prima importante tanto para la destilería como para la planta de levadura de posterior diseño. Se requiere de vapor, electricidad y agua que los proporcionará la fábrica de azúcar.

El desecho principal de la producción de alcohol, las vinazas, serán utilizadas en una planta de levadura torula cuyas características se analizarán en el próximo epígrafe.

La estructura tecnológica de la planta para producir alcohol estará dividida en las siguientes etapas:

1. La disolución:

Esta etapa requiere de un disolutor donde se llevará a cabo la agitación y mezclado de la miel final. Para la misma se necesitan bombas para las corrientes a alimentar, no se necesita tanque de almacenamiento de miel porque el central tiene.

2. Prefermentación:

Es una etapa donde se requiere de aire. También se necesita un buen depósito de ácido sulfúrico por su alto grado corrosivo y lugar de almacenamiento de los nutrientes, para su utilización se necesita de instrumentación y control del PH.

3. Fermentación:

En esta etapa ocurre la reacción química, hay transformación de azúcares en alcohol. Se requiere de fermentadores (reactor biológico). Se necesita bombas para las corrientes a alimentar. Se harán refrescos para el control de temperatura por lo que se requiere de instrumentación para los análisis necesarios.

4. Destilación:

La destilación es la etapa donde se va a separar el producto final y se utilizará vapor. El central cuenta con las calderas necesarias para suministrar vapor al proceso. Esta etapa requiere de columnas de destilación, condensadores e intercambiadores de calor.

1.2.3. Características y diseño de la fábrica de producción de torula

La destilería de alcohol se diseña con el objetivo de suministrar el alcohol producido a la papelería para la implementación del pulpeo de bagazo con etanol, esto como se sabe disminuiría la agresividad del licor negro generado en la etapa de cocción.

Por otro lado se conoce que en el proceso de obtención del alcohol se produce como residual las vinazas. Para dar uso a las mismas se propone el diseño de una planta de levadura torula en crema que utilice como sustrato las vinazas de la destilería y miel final de la fábrica de azúcar.

De acuerdo a la cantidad de materia prima disponible para la elaboración de este producto, la **capacidad de producción** será de **11,5 ton/día**, esto se determinó tomando como referencia la

literatura que para producir una tonelada de torula se necesitan 1,3 toneladas de miel final y 96 m³ de vinaza.

En este punto debemos señalar que como alternativas de sustratos para la producción de torula tenemos:

- miel final de la producción azucarera
- vinazas y miel final
- jugo de los filtros

El proceso se basa en la utilización de un sustrato azucarado para producir biomasa, para ello es necesario un aporte de nitrógeno y fósforo asimilables en el medio. El resultado es la transformación de los azúcares reductores en aminoácidos de la levadura. Se le realiza un tratamiento al producto para que quede en las condiciones óptimas de consumo.

El proceso está dividido en cinco etapas:

1. Preparación de la materia prima

En esta parte del proceso primeramente se diluye la miel con la vinaza aprovechando la alta temperatura que ésta trae, para de esta forma inhibir el crecimiento microbiano, luego esta mezcla se pasará por una centrífuga para eliminar la mayor cantidad de sólidos posible que puedan dificultar el desarrollo de los microorganismos. Luego esta mezcla ya centrifugada se pasará por un intercambiador de calor para disminuir la temperatura hasta 35⁰C que es la temperatura óptima para el desarrollo de los microorganismos.

2. Fermentación

Ocurre un proceso continuo de crecimiento de los microorganismos, para ello es necesario el suministro de aire así como de ácido sulfúrico para controlar el pH.

3. Desemulsión

Tiene como objetivo controlar el nivel de emulsión formado en los fermentadores con la adición de antiespumante.

4. Separación y lavado

Se lleva a cabo en varios pasos: el primer paso es la primera separación donde se obtiene una crema de levadura entre 50-100 g/L. La crema obtenida se lava por disolución con agua hasta una concentración de 30 g/L de levadura y luego es

bombeada a la segunda separación en la cual se obtiene una crema con una concentración de 140 g/L

5. Evaporación

Tiene como objetivo lograr una crema concentrada de 220 g/L por evaporación, la misma es recolectada en tanques de almacenamiento para posteriormente ser embasadas en pipas y ser llevada hacia el lugar del consumo.

1.2.4. Evaluación económica de las modificaciones propuestas

En la siguiente tabla 1.1 aparece un resumen de los indicadores económicos que deben tenerse en cuenta en el estudio de integración y en la tabla 1.2 la producción diaria de las fábricas a integrar y sus requerimientos de servicio.

Tabla 1.1. Resumen de los indicadores económicos para las fábricas a integrar

FÁBRICA	Costos Inversión \$	Costos Producción \$/año
Fábrica de etanol	1 241 596	821 706
Fábrica lev. torula	1 045 187	572 724

Fuente: elaboración propia (2018)

Tabla 1.2. Producción diaria de las fábricas a integrar y sus requerimientos

	Producción en cada FÁBRICA				
	Papel ton/día	Etanol hL/día	Levadura ton/día	CO₂ ton/día	Biogás ton/día
	60	120	11,5	1,86	4 243,2
REQUERIMIENTOS de cada Fábrica					
Agua (m ³ /día)	5 280	360	80	16,90	-
Vapor (ton/día)	960	54	34,5	-	-
Electricidad (KWh/día)	72 240	720	824,55	227,91	424,22

Fuente: elaboración propia (2018)

En este punto es importante hacer notar algunas situaciones que según el trabajo de Puerta, limitan la integración energética de las fábricas de azúcar y papel (*Puerta, 2001*):

- La capacidad instalada, 8 MW de potencia eléctrica, es insuficiente para la demanda de los procesos integrados considerando los estimados de la planta de alcohol.
- Los niveles de presión y temperatura del vapor que se requieren en la fábrica de azúcar y la planta de alcohol pueden ser satisfechos con el escape de los turbogeneradores, pero no así los de la papelera, que necesita presiones de 3,5 y 8 kgf/cm², por lo que tendrían que satisfacerse con vapor directo reducido y enfriado en una estación de reducción-enfriamiento desde las condiciones de la caldera hasta las de papelera, procedimiento termodinámicamente indeseable por su baja eficiencia.
- El bagazo integral 50% de humedad que sobra después del consumo combustible del central solamente (8,7 ton/h), es insuficiente para satisfacer la demanda de bagazo materia prima de la papelera a máxima capacidad, que de acuerdo a los índices de consumo son de 11 ton/h.
- El esquema de cogeneración actual de Moncada con turbina de contrapresión no proporciona facilidades para la cogeneración en el período de no zafra.

Por otro lado, en el diseño de la fábrica de alcohol se tuvo en cuenta la posibilidad de utilizar el jugo de los filtros en la producción, lo que reduce el consumo de vapor en la casa de calderas. No obstante a esto, Puerta en sus trabajos sobre la integración energética entre la fábrica de azúcar y la papelera (*Puerta, 2001*); (*Puerta, 2002*), concluye que no es viable pues económicamente no se justifica, como causas principales de la irritabilidad del proyecto se considera la escasez de combustible, los altos consumos de calor y electricidad en contraposición a elevados costos de inversión.

En nuestro caso insistimos en analizar otras variantes, por ejemplo en este trabajo ya se logra una integración primero de la papelera y luego en la fábrica de azúcar, donde se proponen soluciones que reducen el consumo de combustible.

Además se pretende emplear modernos métodos de integración energética los que ofrecen posibilidades superiores y de valoración de alternativas a la vez a través de la modelación matemática. Con los mismos se exploran escenarios que se obvian con los métodos tradicionales de integración usados hasta la fecha.

1.2.5. Integración de varias plantas en un sitio total para obtener ahorros energéticos

La integración energética entre varias plantas involucra flujos de las diferentes plantas en un complejo, esto ha sido considerado siempre impracticable por varias razones. Entre los argumentos usados está el hecho de que las plantas están físicamente separadas y los costos de bombeo y tuberías se encarecen. Un poderoso argumento contra la integración es que las plantas casi siempre tienen diferentes horarios de arrancada y parada: si la integración es hecha entre dos plantas y una de las plantas es puesta fuera de servicio la otra tiene que tener una alternativa de red de intercambio de calor para alcanzar los niveles de temperatura requeridos en el proceso.

Las plantas pueden también operar en diferentes relaciones de producción, desviarse de las condiciones de diseño y se necesitan entonces intercambiadores de calor para alcanzar las temperaturas de operación deseadas. Todos estos aspectos desalentadores del problema, conducen a que se dejen oportunidades sin explorar para la integración de calor entre plantas.

No obstante lo anteriormente mencionado, se tienen ejemplos prácticos en los que oportunidades de ahorros reales se han implementado a través del aprovechamiento de flujos de procesos, (*Rodera, 1999*); (*Ahmad, 1991*), o indirectamente a través del uso del sistema de vapor en lo que ha sido llamado cinturón de calor, (*Hui, 1994*). Uno de los interrogantes es si la transferencia de calor debe realizarse usando un flujo del proceso o un flujo intermedio. Pero la pregunta más importante es qué hacer cuando tiene lugar paradas de las plantas no simultáneas.

El objetivo en este caso es tener un diseño dual donde la integración de calor y la operación independiente puedan lograrse.

Para obtener este diseño dual se deben seguir los siguientes pasos:

1. Aplicar el análisis pinch en cada planta para garantizar que individualmente estén trabajando de forma óptima desde el punto de vista energético.

2. Valorar las necesidades de calentamiento y enfriamiento de las plantas en un sitio total para aplicar el método pinch en la misma y aprovechar las posibilidades de integración de los procesos

Si se garantizan los dos puntos anteriores, al ocurrir alguna parada en las plantas integradas el resto podrá seguir trabajando en su condición óptima energética.

1.2.6. Análisis de la posibilidad de integración en un complejo de fábrica de azúcar – destilería - papel – torula

Nuestro principal objetivo es minimizar los consumos comunes en las plantas de derivados y en la fábrica de azúcar. Se comenzará al análisis por la fábrica de azúcar ya que esta garantizaría el vapor y la energía a otras plantas.

Se analizan las posibilidades de tomar subproductos y residuales de la fábrica de azúcar y de las plantas de derivados para su uso en las producciones.

Para calcular los subproductos del proceso de fabricación de azúcar se utilizó:

- Índice de miel = 3,5%
- Índice de cachaza = 3,5%
- Índice de bagazo = 30%
- Índice de jugo de los filtros extraídos = 11%

Para la producción de alcohol el índice de consumo de miel que se utilizó fue de 0.39 ton/hL.

Para la producción de levadura torula seca se considera la utilización de vinazas. La destilería genera en vinazas 1.56 m³/hL y la torula consume 45 m³/ton, para sustituir 3 ton de miel de las 4 ton/ton que se emplean en la torula a partir de miel, consumiendo entonces de miel 1 ton/ton.

Para la producción de levadura torula húmeda empleando vinazas se considera como índice de consumo de vinazas 9 m³/ton y miel 0.2 ton/ton.

Para determinar las posibilidades de la integración energética se consideró que la energía se generará en un mismo lugar, la fábrica de azúcar Guillermo Moncada, que se propone combinar el bagazo con fuel-oil a razón del 50%, los residuos agrícolas cañeros generados en los centros de acopio y limpieza empleándose un índice de 9% y efectivo el 70% de estos, la fábrica de azúcar va a generar energía a máxima capacidad en tiempo de no zafra.

Como índices de producción de energía empleo para el bagazo 132.26 Kwh/ton y para los residuos agrícolas 180 Kwh/ton. Cuando se emplea combustible el índice de generación es de 601.18 Kwh/ton.

Para llevar a cabo la estrategia de integración en cada planta se tuvo en cuenta la incertidumbre en:

- Disponibilidad de la materia prima
- Incertidumbre en los balances de materia y energía
- Incertidumbre financiera
- Incertidumbre en el entorno

1.2.7.Minimización de vapor en la fábrica de azúcar

El primer paso que se debe hacer es analizar energéticamente la fábrica de azúcar ya que esta será la encargada de satisfacer las demandas térmicas y eléctricas del sistema integrado. Para ello es necesario conocer las características actuales de la fábrica de azúcar Guillermo Moncada.

En estos momentos la fábrica opera con dos calentadores y un rectificador de jugo alcalizado, después el jugo clarificado es calentado antes de entrar en el pre-evaporador al cual se le alimenta vapor de escape y la extracción de este es utilizada en los calentadores antes mencionados, a continuación siguen 2 múltiples efectos (cuádruples): uno de 3 530 mcsc y otro de 1 858 mcsc a los cuales no se le practica extracciones de vapor secundario y normalmente solo opera el mayor y la alimentación al primer vaso es vapor de escape igual que en los tachos. No existe calentador para jugo clarificado (**JC**). La demanda de agua de los **GV** se cubre con los condensados provenientes del **PRE**, tachos y primeros vasos del evaporador.

Análisis de la factibilidad de aplicación de un estudio de Integración de Procesos en una fábrica de azúcar.

Se debe determinar si es factible realizar en esta fábrica un estudio de Integración de Procesos.

Pues se realiza un análisis de los costos energéticos en la fábrica de azúcar observándose que los mismos ascienden a más de 1000.000 \$/año.

En la siguiente tabla 1.3 aparecen de forma resumida los indicadores que mayor incidencia tienen en estos costos.

Tabla 1.3. Indicadores de mayor incidencia en los costos energéticos de la fábrica de azúcar.

	FABRICA DE AZÚCAR			
	Consumo	Costo Unitario	Gasto total	Índice consumo
Combustibles	ton	USD/ton	USD	%
Fuel oil	2964.57	217.15	643 756.38	0.3312
Diesel	183.70	347.70	63 872.49	0.0185
Gasolina	39.48	680.00	26 846.40	0.0040
Total			734 475.27	
Eléctricidad MWh	91 351	75.13	686 320	1.0032

Fuente: elaboración propia (2018)

En la producción de la fábrica se consume combustible fósil en un 50% del usado para la generación de energía. Además todos los flujos tanto fríos como calientes tienen requerimientos de utilidades mayores de 50 kW por lo que podemos considerar que existe potencial suficiente para reducir el consumo de energía e implementar un estudio de Integración de Procesos.

Aplicación del análisis Pinch a la empresa azucarera

Para la realización del estudio se utilizó el **software TARGET II**, al cual luego de suministrarle los datos necesarios de cada una de las corrientes frías y calientes involucradas en las distintas etapas, nos

ofrece una amplia gama de información a cerca de los fenómenos internos de los procesos.

Esta información nos llega a través de distintos gráficos y tablas dentro de las que se encuentran las curvas de composición, las curvas de composición grande, a partir de las cuales se puede determinar el Pinch del proceso y el consumo de las utilidades en cada etapa.

Para comenzar el estudio se requieren de los siguientes datos: flujos de cada corriente, capacidades caloríficas, entalpías y temperatura de entrada y salida de cada corriente que intervienen, con esto se conforma una tabla problema, correspondiente con ΔT_{\min} = (valores de 3, 6 y 10°C), en la literatura consultada se halló que este valor fluctúa entre 3 y 8°C para procesos azucareros remolacheros y entre 3 y 12 °C para procesos donde se utiliza la caña de azúcar.

Se aplicó primero la tecnología al cuádruple efecto por ser este el principal consumidor de energía y el área donde se pueden llevar a cabo mayores modificaciones al respecto. Para conocer las corrientes se realizaron los balances de materiales y de energía.

Se muestran los resultados obtenidos para cada ΔT_{\min} analizado en la tabla 1.4, observándose los puntos Pinch y el consumo mínimo de las utilidades calientes

Tabla 1.4. Resultados obtenidos para el cuádruple efecto

ΔT_{\min} (°C)	Puntos Pinch (°C)	Consumo mínimo de las utilidades calientes (kW)
3	102 y 101.5	24 334.29
6	97	24 398.29
10	99 y 98	38 555.28

Fuente: elaboración propia (2018)

Si se comparan estos valores con el consumo obtenido del balance energético realizado al esquema actual que es de 39 201.87 kW, notamos que existe un consumo de utilidad caliente superior al mínimo requerido. Esto está dado porque existe una violación de una de las reglas básicas de la tecnología Pinch que se refiere a la no transferencia de calor a través de Pinch.

Luego se aplica el análisis Pinch a la fábrica en su conjunto tomando los mismos ΔT_{\min} antes mencionados. En este caso los flujos considerados fueron: jugo alcalizado a los calentadores, vapor de extracción del pre-evaporador, jugo clarificado, alimentación al pre-evaporador, alimentación a cada vaso del cuádruple, evaporación de los vasos, vapor de alimentación a cada vaso, condensado del último vaso y la meladura.

En este caso se puede apreciar que los intercambios de calor entre las corrientes del proceso no se producen de forma vertical, esto implica que no se está utilizando adecuadamente el potencial energético instalado, consecuencia fundamental de los altos consumos de vapor de escape del mismo. En la tabla 1.5 se observan los resultados obtenidos de los puntos Pinch y el consumo mínimo de las utilidades calientes para cada ΔT_{\min} cuando es analizado la fábrica en su conjunto.

Tabla 1.5. Resultados obtenidos para la fábrica de azúcar en su conjunto

ΔT_{\min} (°C)	FABRICA DE AZÚCAR	
	Puntos Pinch (°C)	Consumo mínimo de utilidades calientes (kW)
3	31.5	26 812.36
6	33	26 812.36
10	98	41.560.02

Fuente: elaboración propia (2018)

Si estos valores se comparan, con el consumo obtenido del balance energético realizado al esquema actual que es de 60 843 kW, notamos que existe un consumo de utilidad caliente superior al mínimo requerido. Esto puede estar dado por la suciedad de los vasos de los evaporadores, las fallas de operación: como el no trabajo con el volumen requerido, en los intercambiadores de calor que no se logre el intercambio esperado, y existen pérdidas de calor por aislamiento.

De los análisis termodinámicos realizados cuando se trabaja con $\Delta T_{\min} = 6^{\circ}\text{C}$ se observa mejor la verticalidad de las curvas de composición y las curvas de composición grandes, a pesar que el punto Pinch se encuentra a una temperatura inferior a lo descrito en la literatura, donde se refiere a valores cercanos a los 97°C , para las empresas de este tipo en el país, por lo que se deben analizar alternativas en los equipos consumidores de energía para elevar el mismo.

Atendiendo a lo descrito anteriormente en la fábrica de azúcar se plantean cambios para disminuir los consumos de vapor así como elevar el punto Pinch.

Para ello se plantean las siguientes modificaciones: dos calentadores de jugo alcalizado, la extracción del pre-evaporador destinarla completamente para cocer la meladura en los tachos y a la vez reducir el consumo de vapor de escape en el área, realizar extracción en el primer vaso del cuádruple efecto para llevar a cabo el calentamiento en el primer calentador.

Ahora solo se analiza para $\Delta T_{\min} = 6^{\circ}\text{C}$ por ser está donde mejor se observan los resultados, para el cuádruple efecto se obtiene una verticalidad adecuada para estos procesos y una definición clara de los equipos, presentando dos puntos Pinch a los intervalos de temperaturas de 104 y 100°C incumpléndose las reglas de la tecnología en dicho intervalo.

Las utilidades mínimas calientes dadas para el valor de ΔT_{\min} es de $28\ 111.03\ \text{kW}$ lo que es menor que las necesidades actuales del sistema propuesto que es de $44\ 136.8\ \text{kW}$ dando la posibilidad de mejorar aún más este proceso.

Mientras que en la fábrica de azúcar en su totalidad después de haber propuesto las modificaciones mencionadas se aprecia una mejoría con respecto a su trabajo actual. Puede observarse que en el intervalo de temperatura de 61°C , existe un punto Pinch, por tanto en este momento no se pueden ajustar los vapores producidos a las diferentes corrientes del proceso pues todavía se encuentra bajo el punto Pinch y será necesario aumentarlo aún más. Un dato importante es con estas modificaciones se realiza un intercambio de

calor vertical, cuestión esta que no ocurre en las curvas compuestas del esquema actual.

1.2.8. Minimización de los residuales en la fábrica de azúcar.

Se comienza el estudio analizando la posibilidad de minimizar el consumo de agua fresca en la fábrica, a través de herramientas de bajo costo. Para aplicar la estrategia es necesario seleccionar el contaminante que se tomará como base para realizar el análisis y recopilar todos los datos para los balances

La concentración de azúcar en las corrientes residuales constituye el elemento decisivo para considerar la recuperación de estas corrientes al proceso, por lo que se vierte al medio un gran volumen de agua de calidad, la cual se puede incorporar a la caldera, y se disminuiría el consumo de combustible que debe emplearse cuando se usa agua cruda fría, con la posterior consecuencia además de formar incrustaciones en la fluseria de la caldera y aumentar el consumo de combustible. Unido a ello hay otras consecuencias técnicas y económicas tales como: aumento de consumo de productos químicos para el tratamiento de las aguas en las calderas, aumento en las extracciones en la misma, deterioro de la caldera por acción incrustante y aumento de volumen de residuales para el ingenio

De los balances de masa y energía se toman las fuentes consideradas y los equipos sumideros, de allí se pueden considerar 8 flujos fuentes para las oportunidades de reciclo, y dos equipos como sumideros..

La demanda total de agua que requiere el proceso es de 4229,16 m³/día y se generan 4 353,84 m³/día de residuales acuosos, es decir que si se realiza el reciclo de todas las fuentes, el consumo de agua se reduciría a 0 m³/día y se verterían 124.68 m³/día por lo que el proceso es lo suficientemente tentador para llevar a cabo el análisis de las posibilidades de reciclo. Con los datos que se tiene se procede a su representación en el diagrama fuente – sumidero

En el mismo para suplir la necesidad de agua de un equipo se emplea la regla de la palanca la cual explica que se debe considerar primero para el reciclo aquella fuente que tenga un menor brazo de palanca con respecto a un sumidero, en este diagrama fueron analizadas

todas las posibilidades de reciclo, observándose que al tener las fuentes un bajo % de composición de azúcar, estas podían ser segregadas y recicladas directamente, o se pudieran mezclar fuentes para suplir la demanda de un sumidero determinado.

De la estrategia gráfica se obtuvo que las fuentes generadas por el pre-evaporador, vaso 1 del evaporador, vaso 2 del evaporador, vaso 3 del evaporador, vaso 4 del evaporador, tachos, y calentadores pueden ser recicladas directamente a los sumideros, siempre teniendo en cuenta las características de cada sumidero.

Una vez que se tiene estas soluciones iniciales a partir del diagrama fuente sumidero, pues se propone aplicar la estrategia matemática planteada para la minimización de residuales en la papelera, la cual ha sido descrita detalladamente anteriormente. Para la solución de la estrategia matemática se utilizó el **programa LINGO™** para resolver las ecuaciones planteadas.

A través de esta estrategia se logra una redistribución óptima de las fuentes que intervienen, lográndose recuperar hacia la caldera 681 m³/día, lo que representa el 35% del agua consumida y solo quedan para el vertido 104 m³/día los cuales se pueden utilizar en la limpieza de equipos y otros consumos.

1.2.9. Integración en un sitio total. Determinación de la alternativa óptima.

Con el análisis material y energético antes descrito en la fábrica de azúcar y en la fábrica de papel, se procede a la integración en un sitio total.

El estudio se realiza a partir del planteamiento más sencillo para este tipo de problema, se analiza la factibilidad económica de la variante propuesta con un grupo de alternativas, como una forma de validar la metodología propuesta y aportar más elementos al proceso de la toma de decisiones. Se programó en una hoja de cálculo del EXCEL para cada año, hasta el 2008, en la que se reflejaron datos de costos, precios, inversiones, cálculos de flujo de caja, balances de materiales para la fábrica de azúcar, papelera y las plantas de derivados, y el tratamiento de los residuales.

El problema consiste en determinar para un criterio de efectividad de máximo VAN, la mejor alternativa de producción e inversión, la distribución óptima de mieles por las plantas consumidoras, de manera que se compren las cantidades mínimas, determinar la capacidad óptima para la planta de etanol, el consumo óptimo de miel para está, según la tecnología a utilizar, el rendimiento óptimo de mieles que debe lograr el complejo agroindustrial y determinar la mínima cantidad de energía que debe comprarse al servicio electro energético nacional.

El problema queda formulado de la siguiente forma:

Como variables continuas se consideró

- La miel externa, la energía externa, el vapor extra y el bagazo extra que hay que comprar en zafra y no zafra para que trabajen las plantas de derivados 300 día/año (X_i) para i desde 2004 hasta el 2008.

Como variables externas:

Y_i : Plantas de torula seca, torula crema, saccharomyces seca y crema.

W_{fc} : Capacidad de la planta de etanol en función del interés financiero f y de la disponibilidad de caña c , inicial y final.

U_r : Índice de generación de miel del central.

Z_k : índice de consumo de miel de la planta de etanol, de acuerdo a la tecnología empleada.

- Como restricciones se definieron, para zafra y no zafra:

$$U_r * C_i + X_i \geq Z_k * W_{fc} + K_j$$

Donde:

C_i : Cantidad de caña producida en el año i .

X_i : Miel externa que hay que comprar en zafra y no zafra.

K_j : Consumo de miel de las demás plantas j , excluyendo la de etanol.

- Como restricciones de números enteros, se definieron:

Para la planta de levadura torula (seca o crema):

$$Y_{ts} + Y_{tc} \leq 1$$

Para la planta de levadura saccharomyces (seca o crema):

$$Y_{ss} + Y_{sc} \leq 1$$

Para el índice de rendimiento en mieles de la fábrica de azúcar (U_r):

$$r_1 + r_2 + r_3 = 1$$

Se consideró como función objetivo maximizar el VAN:

$$VAN = -CI + \sum \frac{FC - (8.3 * X4 + 0.09 * X5 + 13.95 * X7)}{(1 + K)^A}$$

K = 0.15

Donde:

X4: Miel Externa que compra en Zafra y No Zafra

X5: Energía de la SEN

X7: Consumo de Bagazo Extra

Las cuales están afectadas en cada caso por el precio unitario de producción incluido el costo de transportación de estos productos.

El costo de inversión de de las plantas de derivados que se proponen se calculó por la regla de la 0.6 Peters, Max S., (1980), como lo indica la siguiente ecuación:

$$C_{nuevo} = \left(\frac{CAPAC.referenc.}{CAPAC.nueva} \right)^{0.6} * C_{referenc.}$$

Además tenemos:

FC = FC Z – FC NZ

FC Z = Ingresos por Venta – Egresos (en período de zafra)

FC NZ = Ingresos por Venta – Egresos (en período de no zafra)

Siendo:

FC: Flujo de caja.

FCZ: Flujo De caja en período de zafra.

FCNZ: Flujo de caja en período de no zafra.

Para dar solución al problema formulado se utilizó el **Macro Solver del Excel**, obteniéndose la mejor alternativa, entre las múltiples consideradas, siendo la variante que hace máximo el VAN la siguiente:

- Producción de etanol, para una capacidad de 200 hL/día
- Producción de biogás para tratar los mostos de la destilería.
- Producción de recuperación del CO₂.
- Tecnología con consumo de 0.3 ton miel/hL etanol, que corresponde a la mejor tecnología de las consideradas.

- Índices de rendimiento en mieles de 4% de miel /ton caña, que corresponde al mejor índice.
- La fábrica de azúcar debe generar 130 000 kWh/día quedando en tiempo no zafra un potencial que puede ser vendido al SEN.
- No se requiere comprar miel externa.

En la tabla 1.6 se observan los resultados comparativos de los indicadores económicos para la variante óptima con incertidumbre y sin ella.

Tabla 1.6. Resultados de Indicadores económicos: con y sin incertidumbre

Indicadores	VARIANTE	
	con	sin
Económicos Dinámicos	incertidumbre	incertidumbre
VAN (USD)	15 057 012	17 034 420
TIR (%)	54	83
PRD(año)	2.98	2

Se puede apreciar la influencia que tiene la consideración de la incertidumbre en la toma de decisiones de un proyecto inversionista, permitiendo que se realice un análisis más integral del problema en estudio.

1.3. Conclusiones

1. A través de la aplicación de la tecnología Pinch en la fábrica de azúcar estudiada se reduce en 30% el consumo de vapor con las modificaciones propuestas.
2. Se pueden aplicar otras alternativas para elevar el valor del punto Pinch y minimizar aún más el consumo de vapor en la fábrica de azúcar.
3. Es posible dar una solución factible para la minimización de residuales, implementando herramientas como el diagrama fuente-sumidero, que involucran cambios de bajo costo.

4. Como resultado de la estrategia desarrollada se obtuvo como solución óptima de redistribución de flujos, que se logran recuperar para la caldera 681 m³/d de agua lo que representa el 35 %, quedando solo para el vertido 104 m³/d.
5. Queda demostrado que la fábrica de azúcar estudiada se puede convertir en un centro para el suministro de varias producciones de derivados de la caña de azúcar.
6. El análisis de los indicadores económicos dinámicos de la variante óptima de los procesos integrados considerando la incertidumbre arroja los resultados siguientes: VAN = \$ 15 057 012; TIR = 54% y se recupera la inversión en un periodo de 2,98 años.

1.4. Bibliografía

1. Ahmad, S., Hui C., Heat recovery between areas of integrity. Computer Chemical Engineering, 12, 809, 1991.
2. Berbard, S; Sorin, M. "Water minimization in the washing area". Tappi Journal. Vol. 83, No 9, pp. 1-12. September, 2000.
3. Cripps H., " Process integration in the pulp and paper industry". Tappi Journal. Vol. 81, No 10. February, 2000.
4. Dunn, R; Bush, G. E. "Using process integration technology for cleaner production". Journal of cleaner production. Vol. 8, pp 1-23, 2000
5. El-Halwagi, M. M; Sheley, M. "Mass integration for the optimal design of optimal recovery and allocation of infinite pollutants", 2000.
6. El-Halwagi, M. M; Spriggs, H. D. "Solve design puzzles with mass integration". Chemical Engineering Progress. pp. 25-42 August,1998.
7. Garrison, G. W; El-Halwagi, M. M. "A Global Approach to Integrating Enviromental, Energy, Economic, and Technological Objectives" American Chemical Society. Spring Meeting Session, 2000.
8. Hamad, A; Varma, V. "Mass integration analysis: a technique for reducing methanol and effluent discharge in pulp mills". Tappi journal. Vol. 81, No 10.October,1998.

9. Hui C., Ahmad S., Total site heat integration using the utility system. *Computer Chemical Engineering*, 18, 729, 1994.
10. Noureldin, M. B; El-Halwagi, M. "Interval-based targeting for pollution prevention via mass integration". *Computers and Chemical Engineering*, 23 pp 1527-1543, 1999.
11. Parthasarathy, G; Krishnagopalan, G. "Systematic reallocation of aqueous resources using mass integration in a typical pulp mill". *Advances in environmental research*. August, 2000.
12. Puerta, F., "Análisis de alternativas de integración energética del central Guillermo Moncada Empresa Papelera Damují". Parte I. *Revista Centro Azúcar*, pp. 16, No. 4, 2001
13. Puerta, F., "Análisis de alternativas de integración energética del central Guillermo Moncada Empresa Papelera Damují" Parte II. *Revista Centro Azúcar*, pp. 26, No. 1, 2002.
14. Rodera H., Bagajewics M., Targeting procedures for energy savings by heat integration across plants. *Aiche Journal*, Vol. 45, No. 8, August 1999.

CAPÍTULO II

EL RIESGO Y LA INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACION DE INVERSIONES EN PLANTAS DE LA RUTA ALCOQUÍMICA INTEGRADA A UN COMPLEJO AGROINDUSTRIAL AZUCARERO

Armando Lauchy Sañudo
Erenio González Suárez
Viatcheslav Kafarov
Miguel Laborde
Juan E Miño Valdés

2.1. Resumen

En el presente trabajo se realiza una evaluación del riesgo y la incertidumbre que el inversionista debe enfrentar en los estudios de implementación de una planta para producir derivados por vía alcoquímica, integrada a un complejo agroindustrial azucarero. Este estudio se lleva a cabo a través de la determinación de los indicadores económicos clásicos tales como, Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), el Período de Recuperación Descontado (PRD) para diferentes alternativas de producción; calculando además el valor de la esperanza matemática, la varianza, la desviación típica y el coeficiente de variación para el primer VAN.

2.2. Introducción

Es conocido que toda empresa, debe invertir siempre que se genere un producto marginal superior al costo marginal de la inversión. Ante tal circunstancia al empresario le queda por determinar dos cuestiones importantes:

- Las condiciones necesarias para que una inversión resulte viable desde el punto de vista económico.
- Los criterios de selección de inversiones cuando no pueden realizarse la totalidad de los proyectos, por su carácter sustitutivo, aún siendo todas ellas viables.

Para estas cuestiones precisamos de una medida de la rentabilidad de proyectos de inversión que nos permita determinar si es económicamente viable y si es también financieramente rentable.

Para la aprobación de un proyecto de inversión, el evaluador debe analizar cinco estudios principales de viabilidad: la viabilidad legal, la viabilidad técnica, la viabilidad comercial, organizacional y financiera. Existe otra razón importante que determina la realización de un proyecto: la viabilidad política, que implica implementar o no un proyecto al margen de su rentabilidad.

Para la preparación de un proyecto será necesario efectuar una serie de estimaciones de lo que se espera sean en el futuro los beneficios y costos asociados al proyecto, lo que precisará que previamente se tomen un sinnúmero de decisiones respecto a casi la totalidad de las características que debiera tener el proyecto, las cuales influirán sobremanera en el resultado de la evaluación

En este contexto pasa a jugar un papel importantísimo el análisis y evaluación de proyectos de inversión bajo los efectos del riesgo y la incertidumbre por la cantidad de variables que intervienen en cualquiera de ellos para la toma de decisiones en la asignación de recursos en condiciones restrictivas.

El siguiente trabajo, realiza la evaluación de la incertidumbre en un proyecto para la producción de un derivado de la caña de azúcar obtenido por vía alcohólica, asociado a un Complejo de Producción de Azúcar; teniendo en cuenta las ventajas operacionales que desde el punto de vista de disponibilidad de materiales y recursos energéticos puede brindar esta asociación para las futuras producciones.

El objetivo es presentar una propuesta de incorporación a los estudios de factibilidad del riesgo y la incertidumbre como vía para lograr un análisis más integral de esta problemática del campo de la economía aplicada.

La introducción del riesgo en las decisiones de inversión.

El futuro u horizonte económico de la inversión difícilmente puede conocerse con precisión, pues una serie de factores o agentes externos incontrolables, ajenos al propio proyecto, condicionan e influyen en los resultados del mismo. El desembolso inicial, los flujos

netos de caja e incluso el tiempo de la inversión, en innumerables casos se comportan de forma aleatoria. Por ello es lógico afirmar que en el mundo económico actual nos movemos casi siempre en el campo de la incertidumbre.

Lo anterior es así básicamente, porque se exige que con gran anticipación se determine la conveniencia de implementar una cierta iniciativa de inversión, mediante la estimación de los costos y beneficios que se asocian a la puesta en marcha y futura operación de un proyecto, incluso sin que dependa del evaluado ni siquiera la fecha en que se iniciará la construcción. Este carácter anticipado determina, que el resultado del proyecto pueda estar totalmente equivocado y no necesariamente por un mal trabajo del evaluador, ya que el resultado dependerá del comportamiento de las variables que lo condicionan y sobre las cuales este no tiene ningún grado de control, variables como: la naturaleza, la política económica, los cambios tecnológicos, los precios relativos internacionales, etc. Sin embargo, no todos los cambios incontrolables son contrarios a la rentabilidad de un proyecto, porque en cada cambio de las políticas económicas, alguien obtiene lo que otro pierde.

La dificultad de poder prever en qué áreas del entorno es posible ocurran cambios, se ve incrementada por la imposibilidad de saber si ellos serán beneficiosos o contrarios a los intereses del proyecto. Muchas veces mientras el inversionista está en la etapa de búsqueda de las fuentes de financiamiento para iniciar las inversiones proyectadas, los cambios en el entorno dejan obsoleto el resultado del estudio. En muchos casos, sin embargo, las distintas magnitudes que definen la inversión se conocen con un grado de aproximación tal que pueden ser consideradas en la práctica como ciertas o subjetivamente ciertas, sin que por ello se corra el riesgo de incurrir en errores importantes. En resumen:

- No parece aconsejable llamar riesgo a la desviación positiva de un resultado.
- El hecho de que un peligro no pueda ser probabilizado no elimina su amenaza.
- El riesgo no es una incertidumbre probabilizable porque: a) la incertidumbre no se probabiliza, lo que se puede probabilizar son

decisión clásicos (criterio de Laplace o de igual verosimilitud, pesimista o de Wald, Harwicz, etc.), que no han resuelto el problema. Cada uno de los criterios de decisión clásicos puede dar un resultado distinto, por lo que la subjetividad se halla ahora en la selección del criterio ya que es necesario decidir la manera de decidir. El problema se ha trasladado de nivel sin lograr resolverlo.

Ahora bien, el sujeto decisor no se encuentra nunca realmente ante situaciones de total incertidumbre. La hipótesis de ignorancia total es tan irreal como la de información perfecta. Ante un universo incierto resulta difícil evitar la ponderación de diferentes situaciones. De ahí que en la actualidad se haya llegado a la conclusión de que **en dichas situaciones, aparentemente de máxima incertidumbre, el mejor criterio de decisión sea el de la esperanza matemática, calculada utilizando las probabilidades subjetivas.**

La probabilidad de un suceso ya no es tan solo como se ha entendido clásicamente igual a la relación entre el número de casos favorables y el número de casos posibles, o igual al límite de una frecuencia. La probabilidad subjetiva es un número que cuantifica el concepto cualitativo de verosimilitud del sujeto decisor y se basa en su experiencia, su intuición, sus sentimientos o en sus conocimientos. Esta idea de la probabilidad ha sido rehabilitada por los teóricos de la decisión estadística al mostrar su utilidad en la toma de decisiones económicas.

El sujeto decisor elegirá aquella línea de acción que le proporcione la máxima esperanza matemática de beneficio. Concretamente, el inversor preferirá en primer término aquellas inversiones con un capital medio mayor. El criterio de la esperanza matemática no puede aplicarse más que a los fenómenos sometidos a la ley de los grandes números, ya que solamente en razón del carácter reiterativo del fenómeno estudiado por lo que el centro de decisión tiene la seguridad de ver su ganancia media converger hacia el valor medio esperado. Esto hace que dicho criterio tenga a veces un valor práctico limitado, ya que la mayoría de los problemas económicos no presentan ese carácter reiterativo.

La elección de aquellas inversiones con unas esperanzas matemáticas de valor capital (o de tasa de retorno) mayores constituye, como

también hemos visto, una línea de conducta racional. Ahora bien, el empresario no debe conformarse solamente con el conocimiento de la esperanza matemática del valor capital para la adopción de la decisión de inversión. Dos inversiones con el mismo valor capital pueden no ser indiferentes para el inversor, debido precisamente al distinto grado de riesgo. **El riesgo de un proyecto viene definido por la variabilidad de sus flujos de caja y suele convenir tomar como medida del mismo la varianza del valor capital.**

El inversor tiene que moverse entre dos fuerzas de sentido opuesto: intentar maximizar la esperanza matemática de la ganancia y al mismo tiempo tratar de minimizar la varianza o riesgo de la inversión. Pero ocurre que generalmente las inversiones más rentables son las más arriesgadas o viceversa. La conducta racional del inversor consistirá en escoger entre las inversiones con igual capital aquellas que tengan una varianza menor; o lo que es equivalente, en elegir entre las inversiones que tengan igual varianza aquellas que tengan un valor capital medio mayor.

El valor capital de una inversión calculado en base a los flujos de caja medios debe ir acompañado de la varianza. El valor de este parámetro le advertirá al inversor del riesgo que lleva implícito la decisión de inversión y entre las inversiones con igual valor capital serán preferibles aquellas que tengan una menor varianza. Un inversor puede preferir una inversión con un valor capital menor que otra con un valor capital mayor, porque tiene también una varianza menor.

La esperanza matemática (o media teórica) de una suma de variables aleatorias, sean estas independientes o dependientes, es siempre igual a la suma de las esperanzas matemáticas de cada una de dichas variables, aplicado al valor capital se describe como:

$$\begin{aligned}
 E[VC] &= -E[A] + \frac{1}{(1+k)} \cdot E[Q_1] + \frac{1}{(1+k)^2} \cdot E[Q_2] + \dots + \frac{1}{(1+k)^n} \cdot E[Q_n] \\
 &= -E[A] + \sum_{t=1}^n \frac{E[Q_t]}{(1+k)^t}
 \end{aligned}$$

donde:

$$E[A] = \sum_{r=1}^h A_o^r \cdot P_o^r$$

$$E[Q_t] = \sum_{r=1}^h Q_t^r \cdot P_t^r$$

A_o^r : posible valor que puede tomar el desembolso inicial ($r=1,2,\dots,h$)

P_o^r : probabilidad de ocurrencia de A_o^r

Q_t^r : posible valor que puede tomar el flujo de caja en el momento t ($r=1,2,\dots,h$; $t=1,2,\dots,n$)

P_t^r : probabilidad de ocurrencia de Q_t^r

Cuando el desembolso inicial, o alguno de los flujos de caja, es una magnitud perfectamente conocida y no una variable aleatoria ya se sabe que su esperanza matemática es idéntica a su valor y su varianza es nula. En realidad, solo tiene sentido hablar de esperanza matemática y de varianza de una variable aleatoria. Sin embargo, al determinar estos parámetros puede ocurrir que no todos los sumandos sean variables estocásticas y unos pueden conocerse con exactitud mientras que otros solo es posible conocerlos en términos de probabilidad.

En los casos donde la esperanza matemática coincide, es muy importante conocer la dispersión o variabilidad, la cual es mayor mientras más alejados se encuentran los posibles valores, respecto al valor esperado y cuanto mayores son las probabilidades de estos valores que se encuentran distanciados de la media. Aunque existen diversos parámetros por los que se mide la dispersión, los más empleados son la varianza y la desviación típica.

La varianza de una variable aleatoria, es igual a la media aritmética ponderada de las desviaciones cuadráticas de dicha variable con respecto a su valor medio. Para un período de tiempo t , la varianza del flujo de caja correspondiente vendrá dada por:

$$\sigma^2(Q_t) = \sum_{r=1}^h (Q_t^r - E[Q_t^r])^2 \cdot P_t^r$$

donde:

Q_t^r : flujo de caja de la posibilidad en el período t

P_t^r : probabilidad de que ocurra Q_t^r

$E[Q_t^r]$: esperanza matemática de Q_t^r

La varianza de una suma de variables aleatorias es igual a la suma de varianzas cuando tales variables son independientes; en el caso de que las variables sean dependientes habrá que tener en cuenta los momentos mixtos. En el cálculo de la varianza del valor capital se distinguen tres casos: a) los distintos flujos de caja son independientes, b) los flujos de caja están perfectamente correlacionados, c) situación intermedia entre las dos anteriores.

La desviación típica o estándar es igual a la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma(Q_t) = \sqrt{\sum_{r=1}^h (Q_t^r - E[Q_t^r])^2 \cdot P_t^r}$$

Es necesario ser cuidadoso al utilizar la desviación típica, ya que solamente es un indicador absoluto de dispersión y no considera la dispersión de valores en relación a un valor esperado. En comparaciones de proyectos con valores esperados diferentes, la utilización de la desviación estándar se puede mejorar fácilmente convirtiéndola en un coeficiente de variación.

Existe un parámetro, denominado **coeficiente de variación (CV)**, que combina el riesgo y la esperanza matemática:

$$CV = \frac{\text{Desviación típica}}{\text{Esperanza Matemática}}$$

Representa el porcentaje de la desviación típica respecto al valor esperado de la variable.

Mientras más alto sea el CV más riesgoso es el proyecto.

La utilidad real de este coeficiente está en la comparación de proyectos que tengan valores esperados diferentes.

El análisis de sensibilidad en las decisiones de inversión

Cuando todas o algunas de las magnitudes que definen una inversión no son consideradas como ciertas sino más bien como variables aleatorias, cobra especial interés el análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos, utilizando el criterio del valor capital, tasa de

retorno, etc. Mediante este análisis se trata de ver la sensibilidad del resultado obtenido ante la variación de alguna de las magnitudes que definen la inversión (desembolso inicial, flujos netos de caja o tasa de descuento), y tener una idea aproximada del grado de confianza de los resultados obtenidos.

El análisis de la sensibilidad se puede utilizar con éxito en cualquier modelo económico decisionista, con el objeto de determinar la variabilidad del resultado final al variar alguno de los parámetros estimados. Aquellos a los que el resultado obtenido es más sensible, deben estimarse con mayor precaución; por el contrario, aquellos que pueden variar dentro de un amplio intervalo sin que por ello varíe de forma significativa el resultado pueden estimarse con menor cuidado. El estudio de la sensibilidad de las decisiones de inversión constituye una forma indirecta de introducir el riesgo en el análisis de las inversiones, dado que las magnitudes fundamentales que definen una inversión ya no son consideradas como ciertas, lo que nos obliga a tomar los resultados obtenidos, en base a ellas, con cierta cautela.

Sin embargo, para muchos evaluadores el análisis de sensibilidad están reemplazando a los métodos tradicionales de incorporación del riesgo, ya sea en los flujos de caja como en los criterios de evaluación que lo incorporan en la tasa de actualización. También es cada vez menor la cantidad de proyectos donde se incluye una cuenta "Imprevistos" para mostrar los cambios que se pueden producir en las estimaciones.

El principal problema de los modelos de riesgo radica en que básicamente consideran información histórica para suponer, por ejemplo, probabilidades de ocurrencia que le asignaran a los flujos de caja proyectados. Todos sabemos que los cambios en los factores climáticos, si bien muestran muchas veces un comportamiento predecible, también en muchos casos el momento de su ocurrencia o la intensidad que manifiesten son imposibles de predecir.

Lo mismo ocurre con el factor desarrollo tecnológico. Si bien es posible graficar incluso una curva que muestre el avance en la innovación tecnológica, difícilmente podrá calcularse una probabilidad de ocurrencia creíble acerca de cuándo y con qué características aparecerá una nueva tecnología utilizable, ya sea por

la competencia, los directores del proyecto o los proveedores. Lo mismo podemos decir de las restantes variables del entorno.

Los métodos de incorporación del riesgo son insuficientes para agregarlos por sí solos a una evaluación, por ello los métodos de sensibilidad, si bien en ciertos casos reemplazan a los de riesgo, se proponen como un complemento de estos últimos, siempre con la finalidad de mejorar la información que se le proporcionará al inversionista para ayudarlo en la toma de decisiones.

La sensibilidad de la decisión óptima adoptada en base al criterio del valor capital.

Una inversión conviene llevarla a cabo según el criterio del valor capital, cuando este es positivo. El valor capital de una inversión en el caso general viene dado, como se sabe, por la expresión:

$$VC = -A + \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Las magnitudes que definen el valor capital son A, Q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) y k, que se necesitan estimar en el momento de decidir la conveniencia de la inversión. Como en toda predicción, los valores reales pueden diferir de los valores estimados y la decisión considerada como óptima tomando como base los valores esperados puede resultar errónea. La decisión consistente en aceptar la inversión puede no ser la óptima, cuando el valor capital *ex-post* es nulo o negativo; por el contrario, la decisión consistente en no aceptar la inversión no será óptima cuando el valor capital *ex-post* sea positivo. La decisión de aceptar no aceptar una inversión, que siempre tiene que adoptarse tomando como base valores estimados, encierra por lo tanto un cierto grado de riesgo, que es debido al posible fallo en las predicciones.

La variación de cada una de las magnitudes no afecta en igual medida al valor capital. Por ello, debemos preguntarnos: ¿dentro de qué intervalo puede variar cada una de las distintas magnitudes sin que el valor capital cambie de sentido?. En forma equivalente, y en el supuesto de que el valor capital esperado sea positivo (es decir, la decisión óptima es aceptar la inversión), podemos preguntarnos: ¿dentro de qué intervalo puede variar cada una de las magnitudes

para que el valor capital siga siendo positivo?. La respuesta a esta pregunta constituye el objeto del presente apartado.

Variación de A: a partir de la ecuación del valor capital (VC), podemos observar que para que VC siga siendo positivo, el valor A tendrá que verificar:

$$A < \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Variación de Q_j : para que VC siga siendo positivo tendrá que verificarse la siguiente relación:

$$Q_j \left[A - \frac{Q_1}{(1+k)} - \frac{Q_2}{(1+k)^2} - \dots - \frac{Q_{j-1}}{(1+k)^{j-1}} - \frac{Q_{j+1}}{(1+k)^{j+1}} - \dots - \frac{Q_n}{(1+k)^n} \right] \cdot (1+k)^j$$

Variación de k: como VC es una función decreciente de k, la tasa de actualización que anule a la ecuación de VC será la tasa fronteriza entre aceptar y no aceptar. Cuando k supere dicha tasa fronteriza, la decisión consistente en aceptar la inversión deja de ser la óptima.

La tasa fronteriza, entonces, vendrá dada por la ecuación:

$$VC = -A + \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n} = 0$$

de donde se despeja k.

La sensibilidad del orden de preferencia cuando se utiliza como criterio de decisión el valor capital.

Cuando tenemos un conjunto de alternativas de inversión ordenadas, según el criterio del VC, de mayor a menor preferencia, puede interesar analizar la sensibilidad del orden inicialmente establecido ante la variación de algunas de las magnitudes que definen las distintas inversiones.

La comparación se debe establecer ahora, no con relación a un valor capital nulo, sino con relación al valor capital de la inversión siguiente. Una inversión desciende en el orden de la lista cuando su VC desciende por debajo del VC de las inversiones siguientes. La

inversión primera pasará al segundo lugar cuando su VC descienda por debajo del de la segunda y siga siendo superior al de la tercera y así se analizará con el todas las inversiones.

La sensibilidad de la decisión óptima adoptada en base al criterio de la tasa de retorno.

La tasa de retorno es, como se sabe, aquel tipo de actualización o descuento que anula el valor capital; es decir, es aquel valor de r que verifica la ecuación:

$$V(r) = -A + \frac{Q_1}{(1+r)} + \frac{Q_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+r)^n} = 0$$

La inversión interesará llevarla a cabo cuando r sea mayor que k , siendo k el tipo de rendimiento exigido (costo de capital) o suelo mínimo de rentabilidad. Al igual que ocurre con el valor capital, la tasa de retorno es calculada en base a unos valores estimados de A y Q_j y el valor real que en el futuro van a tomar dichas magnitudes puede coincidir o no con los valores previstos. La desviación en más o menos de A y Q_j con relación a los valores previstos afectará al valor de r en diferente proporción. ¿Cuál es el efecto de esas desviaciones sobre el valor de r y por ende, sobre la decisión de inversión?.

Variación de A : al variar A , la inversión dejará de interesar cuando r descienda por debajo de k . El valor máximo que puede tomar A para que la inversión siga siendo interesante, será aquel que verifique la ecuación:

$$A = \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Variación de Q_j : como se observa de la ecuación de la tasa de retorno, al aumentar Q_j (en el supuesto de que sea positivo) la tasa de retorno también aumentará. El menor valor que puede tomar Q_j para que la inversión siga interesando (es decir $r \geq k$), se obtendrá despejando de la tasa de retorno y será:

$$Q_j \geq \left[A - \frac{Q_1}{(1+k)} - \frac{Q_2}{(1+k)^2} - \dots - \frac{Q_{j-1}}{(1+k)^{j-1}} - \frac{Q_{j+1}}{(1+k)^{j+1}} - \dots - \frac{Q_n}{(1+k)^n} \right] \cdot (1+k)^j$$

Variación de k: la inversión seguirá interesando mientras r sea mayor o igual que k. El mayor valor que puede tomar k será aquel que verifique la ecuación de la tasa de retorno.

La sensibilidad del orden de preferencia cuando se utiliza como criterio de decisión la tasa de retorno.

Las inversiones aparecerán ordenadas de mayor a menor tasa de retorno y la comparación se establecerá no con relación a k (costo de capital) sino con relación a la tasa de retorno de la inversión siguiente o con relación a la tasa de cualquier otra inversión. Al variar algunas de las magnitudes de cualquier inversión, el orden de preferencia de la lista de proyectos puede cambiar. Para que el orden de preferencia siga siendo el mismo, habrá que estudiar la sensibilidad de aquella inversión cuyas magnitudes varían con relación a la inversión anterior y a la siguiente. De esta forma, se obtiene para cada una de las magnitudes: A, Q_j y k unos intervalos de variación dentro de los cuales la inversión se mantendrá en el mismo lugar de la lista.

La sensibilidad de la decisión óptima adoptada en base al modelo unidimensional.

El modelo unidimensional permite trabajar con una sola variable cada vez, de ahí su nombre. A diferencia del modelo anterior, en vez de analizar que pasa con el VAN cuando se modifica el valor de una variable, busca determinar hasta cuanto podría modificarse el valor de la variable estimada en el flujo inicial para que el proyecto siga siendo atractivo para el inversionista. Este método es mucho más eficiente, por cuanto busca un solo valor límite, el cual al ser conocido por el inversionista, le permite incorporar a la decisión su propia aversión al riesgo.

Con este método se busca el punto límite; o sea, determinar hasta donde podría bajar la demanda para que el proyecto siga siendo conveniente. Esto es lo mismo que buscar la cantidad que hace al VAN igual a cero.

Por ejemplo, si el método anterior consideraba la demanda como una variable necesaria de sensibilizar, podía analizar el VAN para un decrecimiento de 1%, 2%, 3%, y así sucesivamente hasta llegar a un 10% o 15%. Con el método unidimensional, la respuesta indicaría que el límite se encuentra en una reducción de hasta 4,35% en la estimación de ventas. De acuerdo con esto, la tasa interna de retorno correspondería a una sensibilización de la tasa de costo capital, que indicaría hasta dónde podría aumentar esta para que el proyecto siga siendo favorable de llevar a cabo.

2.4. Resultados y Análisis

Análisis de Caso. Opciones para medir la rentabilidad.

Para llevar a cabo el análisis económico del proyecto, se concibe un sistema alcohol-torula-procesos alcohólicos como un todo, de forma que se consideren los costos de la materia prima para la producción combinada alcohol-torula y se evalúe finalmente su repercusión en las producciones alcohólicas.

Las siguientes ecuaciones serán usadas para obtener los costos de inversión y de producción totales del complejo, necesarios para el cálculo de los indicadores dinámicos.

$$CI_{\text{COMPLEJO}} = CI_{\text{P,ALCOHOL}} + CI_{\text{P,ALDEHIDO}} + CI_{\text{P,ACETAL}}$$

$$CP_{\text{COMPLEJO}} = CP_{\text{ALCOHOL-TORULA}} + CP_{\text{ALDEHIDO}} + CP_{\text{ACETAL}}^*$$

* No se consideran los costos de la materia prima

$$\text{Ingresos} = I_{\text{TORULA}} + I_{5\% \text{ALCOHOL}} + I_{\text{ACE}} + I_{\text{ACETAL}}$$

Teniendo en cuenta que $I_{\text{ACE}} = (277 \text{ ton/año}) (440 \text{ \$/ton}) = 121\,880 \text{ \$/año}$.

Se evalúan cuatro alternativas que combinan diferentes costos de producción de alcohol y precios de venta de acetal:

1.1- Alternativa I para la producción combinada alcohol-torula y precio de venta alto de acetal.

1.2- Alternativa I para la producción combinada alcohol-torula y precio de venta bajo de acetal.

2.1- Alternativa II para la producción combinada alcohol-torula y precio de venta alto de acetal.

2.2- Alternativa II para la producción combinada alcohol-torula y precio de venta bajo de acetal.

Tabla 2.1. Costos de inversión, producción e ingresos por venta de las alternativas

INDICADOR	ALTERNATIVAS (en \$)			
	1.1	1.2	2.1	2.2
Ingresos por Venta	39 503 750	28 395 950	39 503 750	28 395 950
Costo Producción	20 378 826	20 378 826	19 255 458	19 255 458
Inversión	9 280 690	9 280 690	9 280 690	9 280 690

Sobre el precio de venta del acetal tiene marcada incertidumbre, no existe información que reporte su precio para ser usado como aditivo en combustibles. Se adopta como precio alto y bajo en las alternativas anteriores, el 60% y 40% del precio del acetal como reactivo (Sigma Cell Culture Reagents. Catalogue pricelist /U.S.A/1991), respectivamente. Esto redunda en un precio alto de 2 662.37 \$/ton y un precio bajo de 792.37 \$/ton.

Determinación de los flujos de caja.

Para este análisis se han tenido en cuenta los siguientes supuestos:

- Se consideran los flujos de caja al final de cada año y constantes.
- Terminado el primer año ya se han realizado las inversiones iniciales del proyecto.
- Al final del segundo año, el costo inicial del proyecto es de 5 568 419 \$ (60% Inversiones fija) y al final del segundo, de 3 712 279 \$.
- En el segundo y tercer años del proyecto solo se receptorán el 50% y 80% de los ingresos totales, respectivamente; hasta que en el cuarto año se normalice la producción.
- Dada la magnitud de la inversión, será indispensable obtener préstamos monetarios que se reintegrarán con un 10% de interés.
- El préstamo equivale a 4 000 000 \$.
- Se convenia que la devolución del préstamo sea en un término de dos años.

A continuación se muestra como ejemplo, el cálculo del flujo de caja de la alternativa 1.1; de igual forma se procede para todas las variantes.

Tabla 2.2. Flujo de caja. Alternativa 1.1

INDICADOR	AÑO (en \$)					
	0	1	2	3	4	5
Signo						
+ Ingresos por ventas.	-	-	19 751 875	31 603 000	39 503 750	39 503 750
- Cost variab por ventas	-	-	10 189 413	1303 060	20 378 826	20 378 826
= Beneficio en operación.	-	-	9 562 462	15 299 940	19 124 924	19 124 924
- Depreciación.	-	-	928 069	928 069	928 069	928 069
= Benef. antes impuestos.	-	-	8 634 393	14 371 871	18 196 855	18 196 855
- Impuestos.	-	-	1 975 187	3 160 300	3 950 375	3 950 375
= Ingreso neto.	-	-	6 659 206	11 211 571	14 246 480	14 246 480
+ Depreciación.	-	-	928 069	928 069	928 069	928 069
= Flujo de fond. Operativo.	-	-	7 587 275	12 139 639	15 174 549	15 174 549
- Inversión en capital fijo.	5 568 419	3 712 279	-	-	-	-
- Inver. en capit. de trabajo	-	2 399 663	-	-	-	-
+ Desinversiones.	-	-	-	-	-	-
= Flujo del proyecto en sí.	-5 568 419	-6 111 942	7 587 275	12 139 639	15 174 549	15 174 549
- Devolución financiera.	-	-	2 200 000	2 200 000	-	-
= Flujo de fondos financ.	-5 568 419	-6 111 942	5 387 275	9 939 639	15 174 549	15 174 549

Determinación de los indicadores de evaluación de inversiones.

Se procede a calcular los indicadores: VAN, TIR y PRD para cada alternativa.

Tabla 2.3. Indicadores dinámicos de la evaluación económica

INDICADOR	ALTERNATIVAS			
	1.1	1.2	2.1	2.2
VAN (\$)	20 581 983	-2 593 206	22 605 703	1 221 138
TIR (%)	45	5	49	13
PRD	1 año, 326 días		1 año, 285 días	3 años, 265 días

Aplicación de los criterios de tratamiento de riesgo.

Considerando que el costo de inversión es una variable conocida y que los flujos de cajas es una variable aleatoria que se conocen en términos de probabilidad, pueden existir tres tipos de flujos de caja: pesimista, probable y optimista. Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a la aplicación de los métodos de análisis de riesgo para cada alternativa.

Tabla 2.4. Cálculo de la esperanza matemática. Alternativa 1.1.

PERÍODO	FLUJO (\$)	PROBABILIDAD
	Pesimista = - 19 516 924.	0.2
Año 2	Probable = 5 387 275	0.5
	Optimista = 10 774 550	0.3
	Pesimista = - 17 454 980	0.2
Año 3	Probable = 9 939 639	0.5
	Optimista = 12 424 548	0.3
	Pesimista = - 14 959 532	0.2
Año 4	Probable = 15 174 549	0.5
	Optimista = 18 968 186	0.3
	Pesimista = - 17 972 940	0.2
Año 5	Probable = 15 174 549	0.5
	Optimista = 30 349 098	0.3

Aplicando la fórmula de la esperanza matemática del valor capital será:

$$E (VC) = -E[A] + \sum_{t=1}^n \frac{E[Q_t]}{(1+k)^t}$$

$$E (VC) = (-) - 11 124 730 + \frac{2 022 617.2}{(1+0.1)^2} + \frac{5 206 187}{(1+0.1)^3} + \frac{12 977 823.8}{(1+0.1)^4} + \frac{13 097 415.9}{(1+0.1)^5}$$

$$E (VC) = 11 454 831$$

Cálculo de la varianza $\sigma^2(Q_t) = \sum_{r=1}^h (Q_t^r - E[Q_t^r])^2 \cdot P_t^r$

$$\sigma^2(Q_2) = 121 429 725 \text{ M}; \quad \sigma^2(Q_3) = 129 539 901 \text{ M}; \quad \sigma^2(Q_4) = 169 277 196 \text{ M.}; \quad \sigma^2(Q_5) = 284 516 802 \text{ M.}$$

La varianza del valor capital vendrá dada por:

$$\sigma^2(VC) = \sigma^2(A) + \frac{1}{(1+k)^2} \cdot \sigma^2(Q_1) + \frac{1}{(1+k)^4} \cdot \sigma^2(Q_2) + \dots + \frac{1}{(1+k)^{2n}} \cdot \sigma^2(Q_n)$$

= 489 961 539 M.

Desviación típica

$$\sigma(Q_t) = \sqrt{\sum_{r=1}^h (Q_t^r - E[Q_t^r])^2 \cdot P_t^r} \quad \text{y} \quad \sigma(VC) = \sqrt{489\,961\,539 \text{ M}} = 699\,972$$

Coefficiente de variación.

$$CV = \frac{\text{Desviación típica}}{\text{Esperanza matemática}} = \frac{699\,972}{11\,454\,831} = 0.06$$

El comportamiento probabilístico del VAN.

La variable aleatoria VAN es igual, como puede observarse en su fórmula, a la suma de varias variables aleatorias. En virtud del teorema central del límite, la suma de variables aleatorias independientes tiende a la distribución normal cuando el número de sumandos tiende a infinito. Si el número de sumandos es inferior a 10 o los flujos de caja de los distintos períodos no son independientes, no se puede fundamentar la hipótesis de normalidad en el teorema central del límite. La variable VAN puede seguir cualquier otra ley de probabilidad, y para descubrirla se necesita hacer pruebas de adherencia utilizando alguno de los métodos que proporciona la Estadística Matemática. Como tales pruebas requieren de un nivel de información del que no se dispone y de laboriosos cálculos, es frecuente que el analista de inversiones acepte la hipótesis de normalidad, lo cual es aceptado también en este trabajo. Entonces, la variable normal E [VAN], σ (VAN) se relaciona con la normal (0.1), que es la que aparece calculada en las tablas, mediante la siguiente relación fundamental:

$$VAN = E(VAN) + \sigma(VAN) \varepsilon.$$

Donde $\varepsilon \rightarrow N(0,1)$ = variable aleatoria normal de media nula y desviación estándar = 1.

Procedemos a calcular las siguientes probabilidades

- Probabilidad de que el VAN sea positivo:

$$P[\text{VAN} \geq 0] = P[11\,454\,831 + 699\,972 \geq 0] = P\left[\varepsilon \geq -\frac{11\,454\,831}{699\,972}\right] = 16.36$$

$$= P[\varepsilon \geq -16.36] = P[\varepsilon \leq 16.36] = 0.998 = 99.8\%$$

- Probabilidad de que el VAN sea negativo.

$$P[\text{VAN} < 0] = 1 - P[\text{VAN} \geq 0] = 1 - 0.998 = 0.002 = 2\%$$

Ajustes a la tasa de descuento.

Suponiendo las siguientes tasas de descuento incrementadas: 15%, 30%, 50%.

El valor capital será:

$$VC = -A + \frac{Q_2}{(1+s)^2} + \frac{Q_3}{(1+s)^3} + \frac{Q_4}{(1+s)^4} + \frac{Q_5}{(1+s)^5}$$

s=15% → VC = \$ 15 339 968 y con esta tasa se puede llevar a cabo la inversión

s=30% → VC = \$ 5 981 171 y como es positivo interesa llevarla a cabo.

s=50% → VC = \$-789 583 y con esta tasa la inversión no es conveniente.

Reducción de los flujos de caja a condiciones de certeza.

Partiendo, que el riesgo del flujo neto de caja es mayor en los últimos años que en los primeros y que cuando mayor sea el riesgo menos vale dicho flujo para el inversor y por ello menor tiene que ser el coeficiente σ_1 , tenemos los siguientes coeficientes de ajuste:

$$\sigma_2=0.9 \quad \sigma_3=0.6 \quad \sigma_4=0.4 \quad \sigma_5=0.2$$

El VC de la inversión, una vez ajustados los flujos de caja será:

$$VC = -11124730 + \frac{0.9(5387275)}{(1.1)^2} + \frac{0.6(9939639)}{(1.1)^3} + \frac{0.4(15174549)}{(1.1)^4} + \frac{0.2(15174549)}{(1.1)^5}$$

VC = -11 124 730 +10 786 750 = - 337 980, y la inversión no conviene llevarla a cabo.

Tabla 2.5. Resultados del cálculo de los indicadores según alternativa

INDICADOR	ALTERNATIVA			
	1.1	1.2	2.1	2.2
Esperanza Matemática	11 454 831	-	19 951 546	1 346 636
Varianza	489 961 539	-	559 160 466	3 243 171
Desviación Típica	699 972	-	747 770	56 949
Coef. Variación	0.06	-	0.03	0.04

Análisis de Sensibilidad.

Método tradicional. Alternativa 1.1.

$$\text{Variación de A: } A < \frac{Q_2}{(1+r)^2} + \frac{Q_3}{(1+r)^3} + \frac{Q_4}{(1+r)^4} + \frac{Q_5}{(1+r)^5}$$

A < 31 706 713; siempre que A varíe dentro del intervalo (0;31706713), la inversión seguirá siendo conveniente.

$$\text{Variación de } Q_j: Q_2 > \left[A - \frac{Q_3}{(1+r)^3} - \frac{Q_4}{(1+r)^4} - \frac{Q_5}{(1+r)^5} \right] (1+r)^2$$

Q₂ > - 19 516 924; puede variar en el intervalo (-19 516 942; ∞).

$$Q_3 > \left[A - \frac{Q_2}{(1+r)^2} - \frac{Q_4}{(1+r)^4} - \frac{Q_5}{(1+r)^5} \right] (1+r)^3$$

Q₃ > - 17 454 980; puede variar en el intervalo (-17 454 980; ∞)

$$Q_4 > \left[A - \frac{Q_2}{(1+r)^2} - \frac{Q_3}{(1+r)^3} - \frac{Q_5}{(1+r)^5} \right] (1+r)^4$$

Q₄ > - 14 959 532; puede variar en el intervalo (-14 959 532; ∞)

$$Q_5 > \left[A - \frac{Q_2}{(1+r)^2} - \frac{Q_3}{(1+r)^3} - \frac{Q_4}{(1+r)^4} \right] (1+r)^5$$

$Q_5 > -17\,972\,940$; puede variar en el intervalo $(-17\,972\,940; \infty)$

Variación de k: $k=45\%$, por lo tanto mientras k se mantenga dentro del intervalo $(0; 0.45)$ la decisión de aceptar la inversión sigue siendo la óptima.

Tabla 2.6. Resultado del análisis de sensibilidad. Método tradicional

Variable	Intervalo de variación/Alternativa			
	1.1	1.2	2.1	2.2
A	(0;31 706 713)	(0;8 531 524)	(0;33 730 433)	(0;12 345 868)
Q_2	$(-19\,516\,924; \infty)$	$(3\,526\,544; \infty)$	$(-21\,451\,891; \infty)$	$(-527\,128; \infty)$
Q_3	$(-17\,454\,980; \infty)$	$(5\,403\,926; \infty)$	$(-19\,449\,080; \infty)$	$(1\,215\,383; \infty)$
Q_4	$(-14\,959\,532; \infty)$	$(8\,985\,622; \infty)$	$(-17\,099\,089; \infty)$	$(5\,441\,098; \infty)$
Q_5	$(-17\,972\,940; \infty)$	$(9\,366\,431; \infty)$	$(-20\,408\,790; \infty)$	$(5\,262\,311; \infty)$
K	(0; 0.45)	(0;0.05)	(0;0.49)	(0;0.13)

Modelo unidimensional

Alternativa 1.1

Según el flujo de caja correspondiente a la alternativa, el VAN = \$ 20 581 983, a una tasa de descuento de 10%. La sensibilización se realizará sobre dos variables: el precio de venta del acetal y la cantidad por ser las variables respecto a las cuales existe fuerte incertidumbre y porque un cambio en sus valores puede provocar un cambio en el resultado de la rentabilidad del proyecto.

El primer paso de la sensibilización es calcular el valor actual de cada partida del flujo de caja. Como se podrá observar en la tabla siguiente, la suma de todos los valores actuales debe coincidir con el VAN. El segundo paso es igualar el VAN a cero y partiendo a la inversa, determinar cual es el valor de la utilidad antes de impuesto que hace que se cumpla esa condición y, por último, determinar el valor actual de los ingresos que determina que ésa sea la utilidad antes de impuesto.

INDICADOR signo	Valor Actual (\$)	Sensibilización del precio
+ Ingresos por ventas.	91 578 202	65 200 929
- Costos variable por ventas.	-47 242 391	- 47 242 391
= Beneficio en operación.	44 335 811	17 958 538
- Depreciación.	- 2 674 413	- 2 674 413
= Beneficios.	41 661 398	15 284 125
- Impuestos.	- 9 157 797	- 3 362 507
= Ingreso neto.	32 503 601	11 921 618
+ Depreciación.	2 674 413	2 674 413
= Flujo de fondo operativo.	35 178 014	14 596 031
- Inversión en capital fijo.	- 8 943 218	- 8 943 218
- Inver.en capital de trabajo + Desinversiones	-	-
= Flujo del proyecto en sí.	24 053 284	3 471 301
- Devolución financiera.	- 3 471 301	- 3 471 301
VAN	20 581 983	0.00

Si a un precio de \$ 2 662.37 el valor actual de los ingresos era \$ 91 578 202, el precio que determina que ese valor sea ahora de \$ 65 200 929 es \$ **1 895.52**. Es decir, el precio podría caer a \$ 1 895.52 y todavía el inversionista obtendría el 10% exigido a la inversión.

Para la sensibilización de la cantidad se procederá de igual forma, aunque en esta oportunidad al aparecer la incógnita que se busca en dos partidas, se agruparan dichas partidas en una sola, es decir, la diferencia entre los ingresos y los costos variables se agrupa en la partida Margen de contribución.

INDICADOR signo	Valor Actual (\$)	Sensibilización de la cantidad
Margen de contribución.	44 335 811	17 958 538
= Beneficio en operación.	44 335 811	17 958 538
- Depreciación.	- 2 674 413	- 2 674 413
= Benef. Antes impuestos.	41 661 398	15 284 125
- Impuestos.	- 9 157 797	- 3 362 507
= Ingreso neto.	32 503 601	11 921 618

+ Depreciación.	2 674 413	2 674 413
= Flujo de fond. Operativo.	35 178 014	14 596 031
- Inversión en capital fijo.	- 8 943 218	- 8 943 218
- Inver. en capit. De trabajo + Desinversiones.	- 2 181 512 -	- 2 181 512 -
= Flujo del proyecto en sí.	24 053 284	3 471 301
- Devolución financiera.	- 3 471 301	- 3 471 301
VAN	20 581 983	0.00

Si para una cantidad de 5 940 ton/año el valor actual del margen de contribución era de \$ 44 335 811, para un margen de \$ 17 958 538, la cantidad mínima que se obtiene es **2 406 ton/año**.

Como puede apreciarse, el inversionista dispone mediante la aplicación de este método de una clara y valiosa información acerca de la variabilidad máxima que puede resistir el precio y la cantidad. La decisión de ejecutar el proyecto la tomará si él estima que ambas variables no podrán caer hasta el valor calculado.

Tabla 2.7. Resultado del análisis de sensibilidad. Método unidimensional

VARIABLE	ALTERNATIVA		
	1.1	2.1	2.2
Precio de venta, (\$)	2 662.37 - 1 895.52	2 662.37 - 1 189	792.37 - 753.52
Demanda,(ton/año)	5 940 - 2 406	5 940 - 2 272	5 940 - 5 035

2.5. Conclusiones

1. La producción de acetaldehído y acetal en un esquema tecnológico al combinar CAI-Destilería-Torula, permite una rápida multiplicación del valor agregado del producto.
2. Las alternativas 1.1, 2.1 y 2.2, muestran resultados favorables en el resultado de los indicadores: VAN, TIR y PRD; presentando la alternativa 2.1 los valores superiores.
3. La conducta racional del inversor le llevará siempre a maximizar la esperanza de ganancia y a minimizar la varianza. La elección de

la combinación media-varianza dependerá, en definitiva, de la actitud hacia el riesgo del inversor.

4. El análisis de sensibilidad permite predecir y acotar la incertidumbre que pueden producir las variables del sistema y disminuir en cierta medida el riesgo de la inversión. La aplicación de este análisis al precio de venta y la cantidad demandada resulta de gran importancia por la novedad del producto en el mercado.

2.6. Bibliografía

1. Aguirre Sadaba, A. Fundamentos de economía y administración de empresas: dirección y coordinación./ Alfredo Aguirre Sadaba.- Madrid: Ediciones Pirámide, S.A, 1992.--400p.
2. Antunes, A. La alcoquímica y la industria azucarera. Primer Seminario para el desenvolvimiento de la industria azucarera del Estado de Río de Janeiro./ s.n./ 1991.
3. Ballestero, E. Principios de economía de la empresa./ Enrique Ballestero.-- Madrid: Alianza Universitaria Textos S.A, 1992.-- 335p.
4. Bed, K. J. Estimating performance in uncertaintyl. Revista Chemical Engineering Progress, Julio, 1981.
5. Bueno Campos, E. Economía de la empresa./ Eduardo Bueno Campos.--La Habana: Edición Revolucionaria, 1994.
6. Costa Rica. I Curso Taller Centroamericano y de los países del Caribe de habla hispana sobre economía, política y planificación energética.-- San José, 1994.
7. Fernández Font, M. Prospectiva Tecnológica en gestión Tecnológica y competitividad./ M. Fernández Font.-- Ciudad Habana, 1995.
8. Fuentes, M. Determinación de la incertidumbre en la estrategia de desarrollo de un complejo para la producción de acetal./ Mauren Fuentes Mora.-- Santa Clara: UCLV, 1997./Tesis para optar por el grado de Master en Ingeniería Química.
9. _____ Producción de aditivos oxigenados para gas-oil y otros combustibles a partir de bioetanol. Proyecto CYTED.

- Subprograma IV./ M. Laborde./ et al./ Universidad de Buenos Aires, Argentina, 1997
10. Pérez Goróstegui, E. Economía de la empresa. Introducción./ Eduardo Pérez Goróstegui.—Madrid: Editorial Centro de Estudio Areces, S.A, 1993.-- 210p.
 11. Sapag Chain, N. Evaluación de proyectos: no solo una cuestión de números./ Nassir Sapag Chain.—Chile: Universidad de Chile, 1994.-- 197p.
 12. Suárez Suárez, A. Decisiones óptimas de inversión y financiación en la empresa./ Andrés Suárez Suárez.-- Madrid: Ediciones Pirámide, S.A, 1993.—859p.
 13. Urquijo, J.L. Análisis y estados financieros./ José Luis Urquijo.-- Madrid: Ediciones Deusto, S.A, 1993.-- 180p.
 14. _____ Análisis de proyectos./ José Luis Urquijo.-- Madrid: Ediciones Deusto, 1993.-- 137p.
 15. _____ Riesgo y decisiones./ José Luis Urquijo.-- Madrid: Ediciones Deusto, 1993.—245p.

CAPÍTULO III

CONSIDERACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS EQUIPOS EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES DE LA INDUSTRIA QUÍMICA

Elena Rosa Dominguez
Erenio González Suárez
Juan Esteban Miño Valdés

3.1. Introducción

La fiabilidad se ha convertido ya en una ciencia independiente, relativamente joven, que se ha formado como consecuencia del **estudio teórico y experimental multifacético de las regularidades relacionadas con el aseguramiento del trabajo sin fallo de los artículos técnicos**, teniendo como base y utilizando en gran medida, entre otras:

- La teoría de las Probabilidades y la Estadística Matemática
- La Electrónica
- La Ciencia de los Materiales
- La teoría del Desgaste
- La Economía

Uno de los riesgos a que está sometida una inversión en la Industria Química es la **incertidumbre** en lo referente a la correcta **operación de la planta**, datos coleccionados de diferentes industrias químicas cubanas reportan valores de disponibilidad de alrededor de un 60%, motivado por problemas de mal funcionamiento. Disminuir el riesgo que implica la incertidumbre en la operación de la planta conduce obligatoriamente a la inclusión de los estudios de fiabilidad en el análisis de alternativas de inversión aspecto este que no ha sido suficientemente tratado en los análisis de la industria química y solo ha sido considerado de forma parcial luego que la instalación se encuentra en funcionamiento, provocando un rediseño que se puede

evitar si se tienen en cuenta en la etapa de diseño estos aspectos. Teniendo en cuenta lo anterior es de gran interés destacar la gran importancia que reviste el aseguramiento de un nivel de fiabilidad óptimo y económico para la intensificación de un proceso tecnológico industrial.

El análisis de la **fiabilidad** en los sistemas complejos de la industria química comprende varias etapas:

1. Análisis de la función del sistema.
2. Análisis de cada componente del sistema.
3. Evaluación de la fiabilidad incluyendo los parámetros estimados.

En la literatura científica vinculada a la industria de procesos químicos se han reportado numerosos trabajos sobre el tema de la fiabilidad, HIMMENBLAU (1978) SHORE (1977) SHAA (1979), SNEYAMA (1978) CREUS (1991), BALBIR y SUBRAMANYAM (1992). Un aspecto muy importante en el trabajo con la fiabilidad es determinar la función de intensidad de **fallos** en función del tiempo.

Existen varios métodos para determinar la función de distribución de fallo. Uno de los métodos más usados es buscar desde el punto de vista estadístico la distribución a la que más se ajustan los tiempos de trabajo sin fallo. Las distribuciones que más se utilizan en este tipo de trabajo son la weibull, exponencial, Normal, Poisson y Log – Normal, aunque se han encontrado otros casos muy específicos como La Pareto y Erlang. Las formulaciones matemáticas y las expresiones de cálculo se encuentran en GAAL Y KOVACCS (1985), BARLOW y ROSCHAN (1979), SOTSKOV (1972), GRUHNG (1978), así como los límites de confianza unilaterales y bilaterales.

Existen configuraciones series y paralelo que ocurren frecuentemente y su fiabilidad puede ser descrita de manera muy

elemental; en otros casos la estructura es de una naturaleza más compleja y se necesitan técnicas más potentes para su análisis.

Cuando los fallos son dependientes, entonces los modelos que gobiernan estos casos contienen probabilidades condicionales y se pueden utilizar las Cadenas de Markov como un enfoque aproximado para su solución.

Técnicas generales de análisis de fiabilidad de sistemas complejos

Método de inspección

Cuando el sistema bajo estudio involucra un pequeño número de unidades, es fácil desarrollar la expresión de la fiabilidad por simple inspección y este método resulta entonces muy útil. Por ejemplo, dos unidades pueden funcionar en dos formas, en serie o en paralelo; pero cuando tres o más unidades son consideradas, entonces la situación se vuelve interesante pues se presentan los casos siguientes:

- todas en serie
- todas en paralelo
- dos en serie formando un camino y otra en paralelo

El método de inspección es empleado para resolver aquellas estructuras de fiabilidad mixtas pero formadas por configuraciones elementales como sistemas serie - paralelo.

Método de espacios y eventos

Para aplicar este método se requiere de una lista de todas las ocurrencias lógicas posibles que pueden haber en el sistema, esto es, todos los eventos posibles, para luego distinguir los eventos favorables y no favorables, o sea, los que garantizan que el sistema opere bien y los que provocan la interrupción de su operación. Se debe preparar esta lista cuidadosamente para garantizar que todos los elementos listados sean mutuamente excluyentes. La probabilidad de éxito del sistema se obtiene entonces como la suma de las probabilidades de cada evento exitoso y la probabilidad de

falla como la suma de las probabilidades de ocurrencia de los eventos desfavorables. Para la tabulación de todos los eventos posibles se forman $(n+1)$ grupos de eventos (n cantidad de unidades del sistema). Este método se dificulta en extremo cuando $n \geq 6$.

Método de trazado de caminos

Muchos de los detalles del método de espacios y eventos pueden ser omitidos si los caminos exitosos son localizados desde un inicio en el gráfico. Entonces, cada camino exitoso forma un evento favorable y la unión de estos efectos, que por lo general no son mutuamente excluyentes, forman la expresión de fiabilidad del sistema.

Procedimiento para encontrar los caminos exitosos:

1. Todos los bloques del diagrama se consideran fallidos.
2. Se reemplazan por bloques en buen estado en combinaciones simples, en pares, en triadas, etc.
3. Examinando el diagrama de bloque se determinan todas las combinaciones exitosas.
4. La suma de todas las combinaciones forman la fiabilidad del sistema.

Este método es una técnica más simple que el método de espacios y eventos en el hecho de eliminar la larga tabulación que engendra este último, sin embargo, involucra más álgebra en la simplificación de la expresión de fiabilidad por la no garantía en la exclusión de todos los eventos.

Método de descomposición

El método consiste en descomponer la estructura de fiabilidad de un sistema complejo en subestructuras más simples, a través de sucesivas aplicaciones de la probabilidad condicional. El paso inicial y decisivo en la aplicación del método es la selección de un componente clave, el cual debe aparecer uniendo a la mayoría de los elementos que conforman el diagrama de fiabilidad. Luego se expresa la fiabilidad del sistema en términos del elemento clave X.

Este método es muy simple y rápido cuando la estructura de fiabilidad del sistema resulta en subestructuras que pudieran ser analizadas por inspección.

En problemas muy complejos, el método puede ser aplicado nuevamente para evaluar las subestructuras y aún así esta técnica resulta más simple que las anteriores.

La utilidad de este método depende de la localización por inspección de un componente clave apropiado, lo cual deviene en una descomposición significativa.

3.3. Uso de los estudios de fiabilidad en los sistemas de la industria química.

El objetivo de los estudios de fiabilidad es lograr cada vez niveles más altos de disponibilidad de la instalación, lo cual se logra mediante la adición de elementos adicionales o de reservas al sistema, estos elementos se conocen con el nombre de elementos redundantes y son los que garantizan el estado de capacidad en caso de fallo del elemento principal. Se relacionan en la literatura varios tipos de redundancias, GNYEGYENKO (1970).

Como se trató anteriormente la fiabilidad ocasiona costos por los tanto se pueden formular tres problemás típicos de trabajo con la fiabilidad.

1- Asignación óptima de la redundancia.

El problema consiste en encontrar la redundancia óptima en cada módulo (son especificadas las fiabilidades de cada unidad) así como maximizar la fiabilidad del sistema sujeto a restricciones lineales o no lineales de costo, lo que se establece como:

Maximizar las fiabilidades del sistema $P(n, r)$, donde r es especificada. Sujeto a restricciones lineales o no de costo: $g_{ij}(u_i, r_i) < G_j$ $j=1,2,\dots,n$. (24) y restricciones no negativas y enteras. $n_i > k_i$ $i=1,2,\dots,n$ n_i entero. (10); donde k_i es el número mínimo de unidades en el modulo i que deben ser operadas para que el modulo funcione adecuadamente. Esto constituye un programa no lineal de programación en enteros.

II- Asignación óptima de fiabilidad a las unidades o intervalo óptimo de mantenimiento a unidades.

El problema entonces consiste en encontrar las fiabilidades óptimas de unidades o los intervalos óptimos de mantenimiento para cada una de ellas así como maximizar la fiabilidad del sistema sujeto a restricciones de costo lineales o no lineales. Una vez que se conocen las fiabilidades óptimas de las unidades el intervalo de mantenimiento óptimo puede calcularse por la relación:

$$p_i = e^{-T_i/T_{m_i}} \quad (1)$$

T_i = intervalo de mantenimiento de una unidad perteneciente al módulo i

T_{m_i} = tiempo medio entre fallos de una unidad perteneciente al modulo i

El problema de optimización puede ser establecido como sigue
Maximizar la fiabilidad del sistema $P(n, p)$ donde n es especificada.

Sujeto a restricciones lineales o no de costo y restricciones de no negatividad.

$$G_{ij} (n_i, p_i) < G_j \quad j=1,2,\dots,m \quad (2)$$

El problema anterior es un problema de programación no lineal.

III- Problema mezclado de optimización.

Maximizar la fiabilidad del sistema $P(n, p)$ con respecto al número de unidades redundantes (n) y las fiabilidades unitarias (p) sujeta restricciones de costo lineales y no lineales. Esto es un Problema de Programación de Enteros mezclado no lineal.

Por su importancia los problemas de optimización de la redundancia y la fiabilidad de los sistemas tecnológicos merece una especial atención, con relación a la optimización el proceso de Markov es principalmente usado para modelar la fiabilidad BLUME (1978), COCKS (1978), KARDOSY WALDE (1978), GRUHN ET AL (1979).

El resultado de la optimización depende mucho del modelo usado, en la literatura revisada se pueden encontrar trabajos relacionados con la determinación del número óptimo de elementos, entre ellos resaltan los trabajos de TINNEY (1978) en la determinación de sistemas de bombeo libre de fallos y los realizados por ROSA y GONZÁLEZ (1996) en la búsqueda de un diseño óptimo, para plantas de derivados de la industria azucarera.

En la determinación de la medida óptima de almacenamiento intermedio puede consultarse el trabajo de ROSA y GONZÁLEZ (1995) en la determinación de la medida óptima de un tanque de meladura en un central azucarero, en la búsqueda de un valor de fiabilidad óptima resaltan los trabajos realizados por WILLIAMS 1978 en la búsqueda del valor de fiabilidad óptimo en una planta de amonio y de KARDOS y LORENZ (1978), sobre la determinación de la fiabilidad óptima en sistemas de Ingeniería Química.

Otros autores reportan el uso de la programación dinámica BELLMAN y DREYFUS (1968), MESSINGER y SHOOMAN (1987), y el

uso de la programación no lineal en enteros por GHARE y TAYLOR (1969).

LITTSNHWAYER (1974) considero la optimización de la fiabilidad de un sistema serie paralelo con la utilización de un modelo de programación dinámica.

En general podemos apreciar que la tarea consiste en diseñar un sistema donde los siguientes problemas son típicos:

1- Minimizar el costo total.

2- Maximizar la disponibilidad.

Considerando los aspectos tratados anteriormente es que elabora un procedimiento que permite evaluar las alternativas de inversión de forma tal que se eliminen los riesgos de operación de la futura planta utilizando métodos científicos ROSA (1996). Esto se representa gráficamente a través del siguiente diagrama heurístico para el análisis de alternativas considerando la optimización de la fiabilidad, ver figura 3.1.

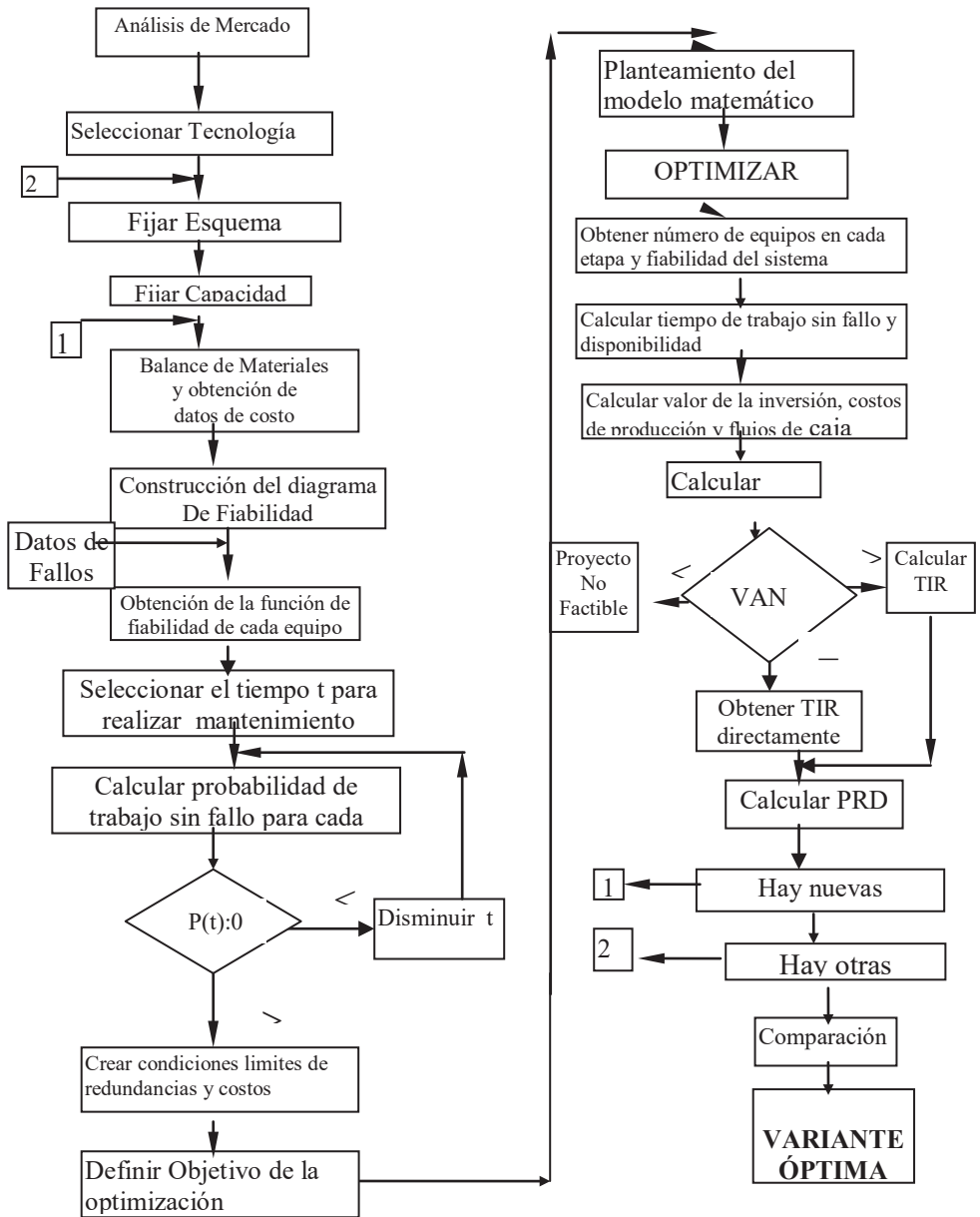


Figura 3.1. Diagrama heurístico para el análisis de alternativas considerando la optimización de la fiabilidad.

Como puede verse en la estructura de la metodología general el objetivo es optimizar la cantidad de equipos que deben colocarse en cada módulo para que este opere correctamente limitado esto por el costo de cada equipo y condicionado por la fiabilidad del mismo. Por este motivo es importante definir las condiciones límites de redundancias y costos una vez que se ha establecido el objetivo de la optimización.

Para lograr este objetivo se realiza el siguiente análisis:

Se parte de una planta química que esta compuesta por m módulos, ver figura 3.2:

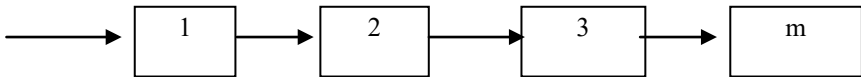


Figura 3.2 Diagrama de bloques de una planta química de m módulos

Las variables del sistema son $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ que se corresponden con la cantidad de unidades en cada modulo desde $i=1$ hasta m , si se conocen las fiabilidades de cada módulo (p_i) desde $i=1$ hasta m , el costo de adquisición (C_i) y operación (O_i) de cada unidad i ; se pueden entonces proponer dos problemas, maximizar la fiabilidad del sistema sujeto a restricciones de costo o minimizar el costo sujeto a restricciones de fiabilidad.

Si el objetivo es maximizar la fiabilidad, el planteo del problema es el siguiente:

Maximizar la ecuación (3) que es la función de fiabilidad del sistema

$$\prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - p_i)^{n_i} \right] \quad (3)$$

Sujeto a las restricciones de costo que se expresarán por:

$$\sum_{i=1}^m (C_i + O_i)n_i \leq CF \quad (4)$$

Donde:

C_i = costo de adquisición

O_i = costo de operación

CF = cantidad de capital disponible para la inversión

Y a las restricciones que provienen del balance de materiales y energía

$$n_i \geq K_i \quad (5)$$

K_i = nº de unidades que deben funcionar en cada módulo.

Si el objetivo es minimizar el costo entonces el modelo que se obtiene es el siguiente:

Minimizar el costo que viene expresado por:

$$\sum_{i=1}^m (C_i + O_i)n_i \quad (6)$$

Sujeto a restricciones de Fiabilidad

$$\prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - p_i)^{n_i} \right] \geq RS \quad (7)$$

Y restricciones de número de equipos en cada módulo.

$$n_i \geq K_i \quad (8)$$

El planteamiento de uno u otro modelo depende de las condiciones específicas del problema a tratar. Para la solución del problema se necesita seleccionar un método de optimización, para lo que se estudio la forma que tienen la función objetivo y las restricciones del problema además de la solución que se desea obtener.

En el primer caso se tiene una función objetivo no lineal con restricciones lineales y en el segundo caso se tiene una función

objetivo lineal con restricciones lineales y no lineales, la solución en los dos casos tiene que ser entera.

Estos problemas con estas características, se pueden solucionar usando diferentes métodos de optimización entre los que se destacan la Programación Dinámica y la Programación No Lineal en Enteros. BUFFHAM y COLABORADORES (1971), MC FATHER (1971), KLETZ (1971).

3.4. Conclusiones.

1- El estudio de disponibilidad de los sistemas de procesos, a través de la fiabilidad incluido convenientemente en el análisis de alternativas de inversión enriquece el enfoque multilateral de la estimación de la eficiencia de las inversiones

2- El modelo matemático que describe el comportamiento del sistema puede expresarse desde dos puntos de vista:

- ◆ Minimizar el Costo Total, con restricciones de fiabilidad y número de equipos en cada etapa.

- ◆ Maximizar la fiabilidad, con restricciones de costo y número de equipos en cada una de las etapas.

3- La Programación Dinámica y la Programación No Lineal en Enteros permiten la optimización de los modelos matemáticos planteados para el perfeccionamiento del análisis inversionista.

4- El análisis de alternativas de inversión que incluye la optimización del número de equipos en cada etapa de un proyecto de inversión y el análisis de rentabilidad utilizando métodos dinámicos, proporciona una metodología que minimiza la incertidumbre en lo que respeta a los fallos de operación de la planta y a la vez permite valorar el efecto que sobre la eficiencia económica de la planta tienen los futuros ingresos y los costos de producción.

3.5. Bibliografía

1. BALBIR S. DHILLON AND SUBRAMANYAM, N. : Reliability Analysis of chemical devices, 1992.
2. BARLOW, R. E. and ROSCIAN, F. : Mathematische theorie der zuverlassigkeit" Akademie Verlag Berlin, 1979.
3. BELLMAN R. y S. DREYFUS : Dynamic programming and the reliability of multicomponent devices Operations 200 1968.
4. BENCSIK A. And Z. GAAL. : " Relationship of reliability and safety in chemical technological systems " Hungarian Journal of industrial chemistry . Vol . 17 pp 148- 151, may GAAL,1989
5. BEVRIDGE, G. : Optimization: Theory and practice Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 1970.
6. BLUME, J. , WERNER, G.W. : Experiences with the development one trial of methods and means for security systematically Quality and reliability in the process of reproduces of chemical equipment Chem. Tech Vol. 30 no 5 ,1978.
7. BUFFTHAM , B. A., D. C. FRESHAWATTER AND F.P. LEES : "Reliability Engineering " I. Chem. Eng Symp(, London No 34 pp87 1971.
8. COCKS, R. E. , J. E. ROGERSON : Organizing a process Safety Program Chem. Eng. Vol 85 No 23, 1978.
9. CREUS SOLE , A. : " Fiabilidad y seguridad de procesos industriales" Barcelona: Macombo, 1991.
10. DILLON BALBIR S. : " Modes and effects Analysis a useful tools to design reliable engineering systems." S PEDAD 83 International Conference Dep of production Eng. Univ. Of Alexandria 27 dec. 1983 Egypt.
11. GAAL Z. and Z. KOVACK : " Reliability of Chemical technological systems II" Hungarian Journal of industrial chemistry. Vol . 13 pp 271- 286 ,1985.

12. GAAL, Z. , KOVACCS, Z. The reliability of the systems of chemical technologies II Hungarian Journal of Industry Chemistry . Budapest, Vol 13 p 181 – 191, 271 – 286, Marzo , 1985.
13. GHARE, P.M. and R. E. TAYLOR: "Optimal redundancy for reliability in series systems operations" res 17 , 838 1969.
14. GNYEGYENKO, B. V. , BELJAJEV, J.K : " The mathematical methods of reliability" Analysis Budapest, 1970.
15. GRUHN, G. , KAFAROV, V.V., MESALKIN, V.P. NEUMANN, ZZuverlässigkeit von chemienalgen VEB Deutcher verlag fur Grunstoffindustrie, Leipzig 1979.
16. HIMMENBLAU, D. M. : " Fault detecction and diagnosis in chemical and petrochemical process." Amsterdam Elsevier Scientific Publishing, 1978.
17. KARDOS J. y K. LORENZ : Reliability Analysis and optimization of chemical engineering systems" Hungarian Journal of Industry Chemistry . Budapest, Vol 15 p 29-38 , Marzo , 1978.
18. KARDOS, J. , R. WALDE: " The present status, progress and development theads of reliability for chemical plants. "chem. Tech p 389 Vol. 30 1978.
19. KLETZ, T.A. : "Hazard Analysis – Quantitative Aproach to safety ", Int Chemical engineering, Symposium , London, No 34, 82, 1971.
20. LITTCHWAGE, J.M. : Dynamic Programing in the solutions of a multy stage problem" Chem Eng. Progress Vol. 15, 168, 1974.
21. MC FATHER W. E. : "Reliability experience in a large refinery", Int Chemical engineering, Symposium , London, No 47, 82, 1971.
22. MESSINGER M. y M.L. SHOOMAN : "Reliability approximations for complex structure" proc. IEEE Ann Symposium of reliability 292, 1987.
23. ROSA E. "Análisis de alternativas de inversión en la industria quimica considerando la fiabilidad de los equipos" Tesis de doctorado. UCLV, 1996.

24. ROSA E. y E. GONZÁLEZ "Análisis de la medida óptima de almacenamiento intermedio en un central azucarero con capacidad para 300 000 arrobas diarias" Conferencia de la ATAC. 1995.
25. SHAA, G. C. " Troubles Shooting Reboiler Systems. " Chem. Eng. Prog. Vol 75 No 7 pp 53 – 58. 1979.
26. SHORE J.S. " System reliability Analysis and optimization " Hydrocarbon Process 56 12 1977.
27. SNEYAMA, T. And TAKAMIK : " Ammonia Plant safety Chemical Engineering Progress. " No. 20 1978.
28. SOTSKOV, B. " Fundadmentos de la teoria de la fiabilidad", Editorial Mir, Moscu, 1972.
29. TINNEY, W.S.: "How to obtain trouble free performance from centrifugal pumps" Chem. Eng. Vol 85 No13 1978.
30. WILLIAMS, G.P: "Causes of Ammonia Plant shutdowns" Chem Eng progress vol 74 , 1978.

CAPITULO IV

EL ANÁLISIS DE PROCESOS EN LA SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS AMBIENTALES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Pablo Angel Galindo Llanes
Amaury Pérez Martínez
Hilda Oquendo Ferrer
Erenio González Suárez

4.1. Introducción

En el mundo se están produciendo cambios en el desarrollo de la producción industrial, influidos principalmente, por la innovación tecnológica bajo la influencia de la microelectrónica, la informática, las comunicaciones, los nuevos materiales y los novedosos conceptos en práctica que sitúan como principal, recurso, el conocimiento. (Gálvez, L. 1999)²

Una parte importante de los productos fabricados en la actualidad, tiene cada vez menor valor en las materias primas y materiales, mientras crecen los costos por concepto de diseño, presentación e innovación. Los productos van teniendo, cada vez, un mayor componente abstracto en sus costos, de manera que junto con el valor de la producción están los valores creados por su forma de envase, presentación, publicidad, comercialización, servicios, postventa y otros, puede deberse entre otros factores a la imagen ambiental de los mismos para ganar lugar en el mercado a partir de las exigencias sobre protección ambiental requerida por los consumidores. Los productos con mayores componentes abstractos serán producidos en los países desarrollados, mientras que en los que prevalezcan componentes concretos serán producidos en los subdesarrollados, que no tendrán otra alternativa sino se preparan a tiempo. (Gálvez, L., 1999)² (Sáenz, T., 1999)

En estas condiciones los productos que elabora la industria moderna han pasado a tener, en la composición de sus costos, menos de un 10 % de materias primas, mientras que a inicios del siglo las industrias líderes en aquel momento gastaban en esos recursos por encima del

50 %.

Según Mascone, Keller y Bryan, Edgar y Gálvez los signos que caracterizan la industria del próximo siglo, entre ellas la química y la biotecnología, serán su sostenibilidad, una alta flexibilidad para el cambio, la permanente innovación tecnológica y el conocimiento, como elemento central y más importante. (Gálvez, L. 1999)² (Edgar, T.,2000) (Keller, J., 2000) (Mascone, C., 1999)

Estos investigadores plantean que las principales metas de los científicos e ingenieros están dirigidas al desarrollo de procesos de alta eficiencia energética, por medio de la utilización de mayores presiones y una utilización múltiple del vapor, de tecnologías que aprovechen las posibilidades de la bioquímica, la bioingeniería y del aprovechamiento de materias primas renovables, no contaminantes al medio. (Gálvez, L. 1999)² (Edgar, T.,2000) (Keller, J., 2000) (Mascone, C., 1999)

La estrategia debe trazarse atendiendo a las condiciones de cada país, de cada territorio y deben considerarse factores económicos, políticos y sociales, entre ellos: los problemas del mercado, disponibilidad de materias primas y energía, financiamiento y fuente de suministro, tecnología, equipamiento, indicadores económicos, disponibilidad y calificación de la fuerza de trabajo, perspectivas del territorio, sin perder de vista el componente ambiental.

La aplicación de herramientas de análisis de procesos permite al ingeniero ver un gran escenario primero y los detalles después, permite identificar los objetivos globales de eficiencia antes de cualquier actividad de desarrollo y encontrar la estrategia óptima para llevarla a cabo. Contar con una data de valores estadísticamente consistente, que describa de forma acertada el comportamiento del proceso y los fenómenos que lo conforman, así como el conocimiento de los valores óptimos para el funcionamiento de sus operaciones, garantiza un proceso industrial óptimo. Si a su vez se integran herramientas de gestión y control de calidad, capaces de manejar estratégicamente los datos disponibles para prevenir deficiencias durante el desarrollo del proceso y tomar soluciones acertadas que permitan bajo la filosofía de las herramientas de gestión ambiental prevenir posibles afectaciones al medio, se

alcanzará entonces el desarrollo de una industria verdaderamente sostenible.

Respecto a la necesidad de la protección del ambiente, Cordovés se refiere a las alternativas que deben ser consideradas en la industria azucarera y sus derivados (*Cordovés, M., 2000*) y Rosa refiere la importancia de considerar la fiabilidad en el diseño de plantas para el tratamiento de los residuales de la industria azucarera y sus derivados, buscando un compromiso entre lo costoso de los sistemas y la necesidad de protección del medio. (*Rosa, E., y col., 2000*), así como realizar los estudios inversionistas en la introducción de tecnologías limpias. (*Rosa, E., y col., 2001*)

Por otro lado, en las decisiones formuladas de capital invertido de los proyectos de ingeniería, los procesos de toma de decisiones están básicamente concentrados en las estimaciones siguientes: ¿que salidas adicionales o reducciones del flujo de caja están asociadas con las alternativas propuestas?, ¿cómo determinar los ingresos adicionales o los gastos reducidos del flujo de caja que resultarán de ello?, ¿cómo evaluar las fluctuaciones de ingreso de los proyectos bajo incertidumbre y cuáles son los límites inferiores y superiores? Sin embargo aún es insuficiente el grado de incorporación del componente ambiental a estos análisis.

Ante la posibilidad de una inversión es vital que la empresa actúe con economía, competencia, organización y otros elementos con perspectiva y prospectiva, sobre todo cuando se evalúan proyectos que tienen impactos en el futuro. Se trata de utilizar como criterios los indicadores de eficiencia, como lo hacía la ingeniería económica clásica e incorporarle, los cambios tecnológicos y organizacionales, con base en las áreas operacional, táctica y estratégica sin perder de vista la sostenibilidad de las inversiones, los posibles impactos negativos al medio y las posibles medidas correctoras; importante en este aspecto será la incorporación a los sistemas de costos de la industria cubana presupuestos para revertir los impactos negativos causados al ambiente.

El horizonte de planeación o período de evaluación en estudios estratégicos es mucho más extenso. En general debemos considerar, que cuando se enfrenta a un problema con múltiples objetivos, como

es el caso de una inversión será necesario sopesar las ventajas y desventajas de cada alternativa con relación a cada uno de los objetivos y realizar un balance de ellos.

Además de la utilización de una medida económica de efectividad (VAN, TIR y PRD), medidas no económicas envuelven la decisión final de las alternativas disponibles. Cuando se añaden factores explícitamente incluidos en la evaluación, se utilizan criterios múltiples en la toma de decisiones. Es necesario establecer un método de criterios múltiples de evaluación, Blank y Tarquin (*Blank, L., Tarquin, A., 1993*) plantean la necesidad de definir claramente los programas alternativos, de determinar y definir los factores a evaluarse (económicos y técnicos), de seleccionar o desarrollar y utilizar una técnica de criterios múltiples de evaluación, de escoger la alternativa con la mejor combinación de resultados. (Oquendo, 2002) incorpora al análisis la incertidumbre en el proceso inversionista, por diversos factores: en el tamaño de las plantas, las materias primas, el mercado, los intereses financieros definiendo proyectos alternativos determinando los factores que van a ser evaluados. Puede observarse que desde los inicios no se incorpora la dimensión ambiental en el análisis de los procesos inversionistas y por consiguiente la protección ambiental no ha sido un componente a tener en cuenta en el análisis del desarrollo de los procesos productivos, al menos no con la potencialidad que actualmente se requiere.

En el Análisis de Procesos, la aplicación de la modelación matemática y de los modelos de optimización constituye un importante medio auxiliar para la solución de problemas. Las limitaciones financieras y en tiempo obligan a emplear métodos breves y económicos de experimentación, así como a la utilización de modelos globales del proceso, vinculados al análisis de alternativas. Especial importancia ganan la utilización de modelos estadísticos, que cuantifiquen el efecto de los parámetros tecnológicos, los indicadores de consumo de materiales y energía, así como los costos de producción y de inversión y de desempeño ambiental, sobre todo cuando bajo las condiciones económicas de Cuba se trata de dotar a la industria de alternativas viables con un orden jerárquico para facilitar el proceso

inversionista.

El Análisis de Procesos sugiere utilizar modelos de indicadores económicos (costo, ganancia), en función de las variables que inciden en el modelo tecnológico, con ayuda de los balances de masa y energía, los estudios cinéticos e incluyendo las variables externas del proceso, que inciden en la eficiencia económica del sistema. Si se analiza el concepto de sostenibilidad y la visión de aplicación de esta herramienta se está garantizando la producción, la economía del proceso, pero se está dejando a un lado la necesidad de no comprometer el bienestar futuro de la humanidad, práctica común en la industria actual.

El análisis de procesos, según el cambio de visión planteado por (Gálvez, L. 1999)² (Edgar, T.,2000) (Keller, J., 2000) (Mascone, C., 1999) para la industria del próximo siglo ha continuado desarrollándose, la Integración de Procesos es una tecnología sistemática, basada en un enfoque hacia el desarrollo de procesos que persigue diferentes objetivos entre los que puede mencionarse la minimización de los requerimientos energéticos, de la generación de residuales, la maximización de la eficiencia del proceso, optimización de un proceso ó de una etapa de éste. La integración de procesos se caracteriza por dos elementos: la energía y la masa. (Cripps, 2000)

La integración de masa facilita un entendimiento global de los flujos de masa dentro del proceso, guía al ingeniero a través de las complejidades de éste y le permite extender el alcance de cualquier actividad de desarrollo de proceso. Las investigaciones en este tema han conducido al desarrollo de una herramienta sistemática y potente para el entendimiento total del proceso y explotar así sus posibilidades de integración (Dunn & Bush, 2000). González Cortés, 2004 con resultados satisfactorios, planteó una metodología para implementar producciones más limpias a través del pulpeo con etanol como alternativa para incrementar la competitividad de fábricas de papel mediante su desarrollo prospectivo integrado a industrias de la caña de azúcar que permite aplicar un enfoque proactivo a través de las herramientas de integración. A su vez, (Catá S., 2006 f) analizó la importancia que tiene la consideración de la

incertidumbre, en los balances y en la disponibilidad de los equipos, para abordar las barreras de la Integración de Procesos, minimizando los riesgos de la inversión en un complejo fabril integrado, obteniendo impactos positivos a través de la integración másica y energética.

Otros enfoques han surgido, se han desarrollado herramientas de gestión empresarial que de ser aplicadas con el enfoque previsto, sin lugar a dudas conllevarían a un mejoramiento del desempeño técnico, económico y ambiental de la industria química cubana.

En este momento además de los criterios anteriormente expuestos se requiere una estrategia de aplicación considerando como un sistema integrado los elementos de sistemas de gestión de calidad, ambiental, basados en el análisis de procesos para la solución de los problemas ambientales a través de la síntesis en los resultados obtenidos en el análisis de los procesos industriales que se desarrollen, requiriéndose una articulación de la metodología de trabajo, que garantice un carácter objetivo y estratégico de los estudios.

Se hace necesario la concepción y estructuración de una metodología que resuelva las insuficiencias actuales que presenta el sector empresarial para sintetizar las dimensiones técnica, económica y ambiental.

4.2. Metodología para generación de opciones de producción ambientalmente compatibles en la producción de Bioetanol, a partir de la integración de herramientas de análisis de procesos

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se propone una metodología para la generación de opciones de producción ambientalmente compatibles en empresas del sector industrial, a partir de la integración de herramientas de análisis de procesos. Se representa su diagrama heurístico en la figura 4.1.

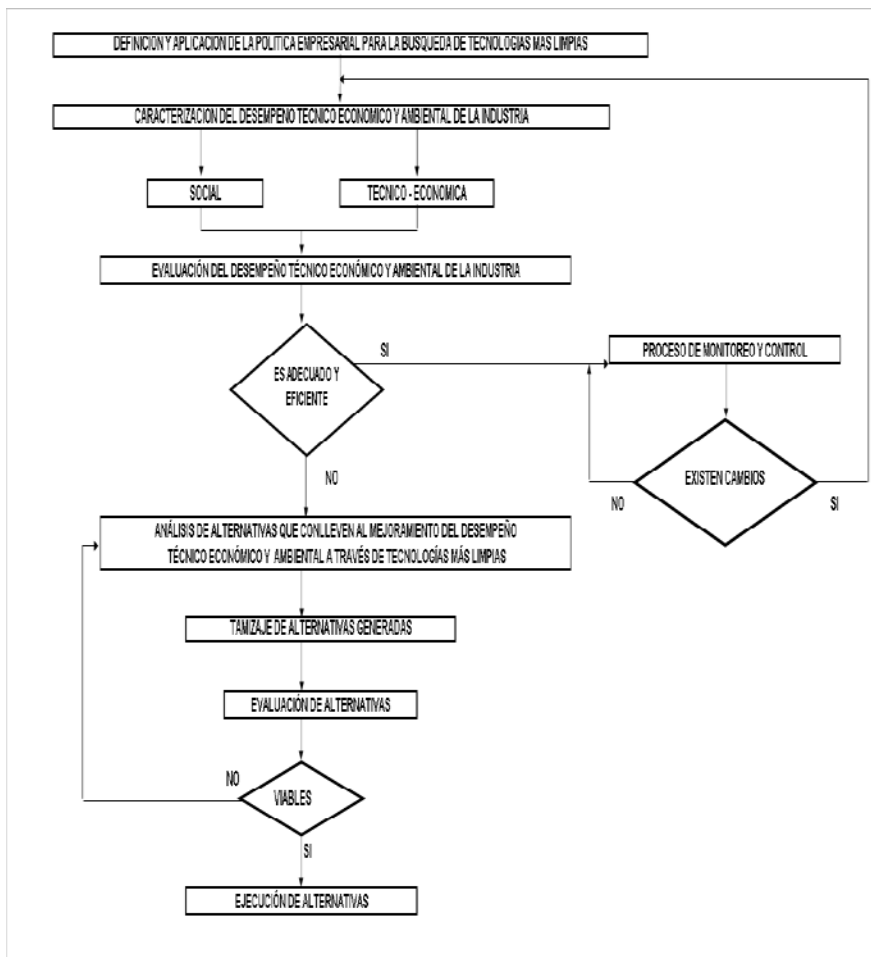


Figura 4.1. Diagrama heurístico para la generación de alternativas ambientalmente compatibles.

La metodología consta de seis etapas, considera las interacciones entre el ambiente interno y externo de la organización e integra elementos de herramientas de gestión ambiental, de gestión de la calidad en el análisis de procesos, permitiendo lograr un sistema de gestión empresarial para la generación de opciones de producción

ambientalmente compatibles a través de técnicas de producciones más limpias que conlleven a una mayor eficiencia e imagen ambiental de la industria.

Etapa I: Definición y aplicación de la política ambiental empresarial. Corresponde a la definición, por parte de la dirección de la industria, de la política empresarial para este fin. Contiene la misión y visión de la empresa para el mejoramiento continuo ambiental en concordancia con la legislación existente. Debe estar caracterizada por un elevado compromiso de la dirección de la industria.

Etapa II: Caracterización del desempeño técnico–económico y ambiental de la industria. En esta etapa se desarrolla el proceso de caracterización ambiental de la industria atendiendo a dos aspectos el social y el técnico – económico. Incluye la conformación del equipo auditor encargado de desarrollar todo el proceso de caracterización, evaluación y de generación de alternativas. Se caracteriza por ser el momento de búsqueda, recolección y procesamiento de los datos necesarios para la evaluación del desempeño técnico económico y ambiental de la industria.

Etapa III: Evaluación del desempeño técnico – económico y ambiental de la industria. En esta etapa se desarrolla la evaluación del desempeño técnico económico y ambiental de la industria y/o etapas del proceso, a través de la definición y determinación de los indicadores necesarios y más relevantes en el orden de responsabilidad social de la empresa y técnico - económico.

Etapa IV: Generación de alternativas para implementación de opciones que conlleven al mejoramiento del desempeño técnico–económico y ambiental a través de las técnicas de producción más limpia. Constituye todo el proceso de identificación, análisis y evaluación de posibles alternativas con un enfoque proactivo en el tratamiento de los problemas ambientales. Aquí se integran los diferentes elementos que componen a la herramienta de gestión ambiental de producciones más limpias.

Etapa V: Ejecución de alternativas. Constituye todo el proceso de inversión y puesta en marcha de las alternativas viables a corto, mediano y largo plazos en dependencia del orden de prioridad definido. Por parte de la dirección técnica de la industria deberá

llevarse a cabo un proceso de medición de los beneficios obtenidos resultado de la explotación de las alternativas aplicadas.

Etapa VI: Monitoreo y control. Esta etapa tiene como objetivo establecer un carácter sistémico en el proceso de gestión empresarial a partir de la evaluación y mejora continua del sistema dando seguimiento a los indicadores técnico – económicos y ambientales para el alcance de mejores niveles de desempeño ambiental y eficiencia del proceso industrial en el período de tiempo que se establezcan.

La metodología permite a la organización generar opciones de producción ambientalmente compatibles a partir de los procesos de gestión empresarial con un enfoque estratégico, sistémico y dialéctico, basado en los requisitos exigidos en el sistema de la calidad a través de las NC-ISO 9000. Las ventajas de utilizar la metodología propuesta en la búsqueda de tecnologías más limpias es que permite generar alternativas de diferente naturaleza, jerarquizarlas para facilitar la toma de decisiones y que el empleo de los indicadores definidos para cada caso de estudio garantizan la aplicación de un proceso de mejora continua.

4.3. Aplicación de la metodología para la generación de opciones de producción ambientalmente compatibles en la producción de Bioetanol

Como se conoce las industrias de los derivados de la caña de azúcar ha provocado cambios irreversibles en el entorno donde se encuentran ubicadas. Dentro de los derivados, es la producción de bioetanol a partir de la miel final, obtenida como subproducto de la industria azucarera, la que mayor demanda ha tenido en nuestro país, convirtiéndose hoy en uno de los principales renglones en los procesos de diversificación azucarera.

En la producción de bioetanol se generan una serie de residuos perjudiciales al medio ambiente y es de vital importancia tratarlos adecuadamente para evitar la contaminación y hacer un uso racional de los recursos naturales.

Atendiendo a la visión actual sobre el tratamiento a los problemas ambientales hacia un enfoque proactivo de los mismos, se sugiere la

aplicación de tecnologías más limpias en este sector.

Se recopilaron y procesaron estadísticamente los datos de la producción de bioetanol de una destilería referidos a dos etapas del proceso Fermentación y Destilación.

En la etapa de fermentación se controló el consumo de miel, °Brix de la miel, % bioetanol del día y la batición destilada y la producción de bioetanol y las características de la vinaza, en la etapa de destilación. Los análisis realizados para las variables medidas muestran un comportamiento probabilístico Normal.

En el caso de las variables tecnológicas del proceso: °Brix de la miel y % alcohólico de la batición, los coeficientes de variación son menores que un 25 % lo que resulta favorable al incrementarse su representatividad estadística.

La caracterización de las vinazas, a partir de la medición de los grados °Brix, el pH y la temperatura dio como resultado en el caso de la primer variable que la media fue de 5.9 lo cual indica que no todo el azúcar fue consumido en el proceso de fermentación, en el caso del pH y la temperatura, cuyos valores medios fueron de 4.2 unidades y 93.7 °C, no cumplen con las normas de vertimiento establecidas por la NC 27-99 por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).

Atendiendo a las cartas de control realizadas para la evaluación del desarrollo del proceso, puede decirse que en todos los casos las variables se encuentran fuera de control estadístico, por lo que puede aseverarse que al no estar controlado el mismo, el desempeño técnico - económico y ambiental de la industria puede considerarse bajo, este aspecto deberá ser demostrado en el proceso de evaluación del desempeño técnico económico y ambiental de la industria.

Al ser analizadas cada una de las variables controladas en las dos etapas mencionadas, se definieron los siguientes indicadores para evaluar el desempeño técnico-económico y ambiental.

Los indicadores técnico-económicos definidos fueron:

En el área de Fermentación:

- Índice de Miel Física (IMF) normalizado.

$$IMF_n = IMF \cdot \frac{[Brix][\%AR]}{[Brix_n][\%AR_n]}$$

Donde

$[Brix_n]$: Valor normalizado según ICIDCA = 85 °Bx

$[\%AR_n]$: Valor normalizado según ICIDCA = 52 % Azúcares

- Reductores Totales (ART)

Este indicador permite determinar si existe un sobreconsumo de miel en el proceso, evitando pérdidas económicas, el cual tiene un valor normalizado de 425 kg de miel base 52 % ART y 85 °Bx / hL de producción.

- Eficiencia de Fermentación (EF):

$$EF(\%) = \frac{\text{Alcohol ponderal} \times 0.01 \times 1.553}{\text{kg de azúcares fermentables}} \times 100$$

Según las normas de la entidad debe tener como margen un 80% m³ de agua/ t de miel

Este indicador debe oscilar entre 3,5 y 4 partes de agua por una parte de miel en peso

En el área de Destilación

- Eficiencia de Destilación (ED)

$$ED(\%) = \frac{\text{Alcohol a 100}}{\text{Alcohol ponderal}} \times 100$$

Según las normas de la entidad debe tener como margen un 94%.

Los Indicadores ambientales seleccionados fueron la producción de:

- ton CO₂ /m³
- m³ vinaza / hL bioetanol

Comparación de los valores obtenidos con las Normas Técnicas, Económicas y Ambientales:

- (%) de bioetanol/día

Según las normas el % de bioetanol del día debe variar entre 6-7 %, al analizar los resultados se observó que no se cumple con esta norma.

Los valores promedios se encuentran en el rango de 5,11-4,96 %.

Puede afirmarse entonces que existen afectaciones en el proceso

productivo.

Propiedades de la miel

En caso del °Brix de la miel, de acuerdo a las cartas de control se obtuvieron valores por encima del límite superior del rango normado (81-86 °Brix). Estos valores influyen en el valor final del contenido de azúcares fermentables presentes en la miel.

La data de valores procesados muestra que el % de Azúcares Reductores Totales y el % de Azúcares Fermentables están por debajo de lo establecido por las normas, (64) y (61-66) % respectivamente.

Los valores obtenidos se encuentran en el rango de (56.76 -57.78) y (53.13 -54.35) % respectivamente.

Esto demuestra que esta materia prima no cuenta con los azúcares necesarios para lograr como mínimo un 6 % de bioetanol establecido en la Norma.

Puede afirmarse entonces que existen afectaciones en el proceso productivo.

Propiedades de la vinaza

La caracterización de la vinaza mostró que el 100 % de los valores no cumplen con lo citado por las normas de vertimientos. Además de tener valores de pH muy ácidos, poseen valores altos de temperatura.

Índice de Miel Física normalizado (IMF n): El comportamiento muestra que un alto porcentaje de los valores de este indicador están por encima de lo establecido en la norma. Esto implica un sobreconsumo de miel para producir un hL de bioetanol o una fermentación muy pobre que genera como residual del proceso un alto contenido de azúcares fermentables referente al consumo de miel.

Eficiencia de Fermentación (EF)

Los resultados obtenidos son menores que el valor citado por las normas del proceso. Este resultado puede deberse a que en el área de fermentación no se logra consumir la cantidad de azúcares fermentables a causa de una disminución en el crecimiento microbiano. En este caso existe un control adecuado del pH, y en el caso del bioetanol se sabe que generalmente bajas concentraciones

de etanol pueden inhibir su síntesis. Sin embargo, la temperatura de trabajo oscila entre 40-42 °C (temperatura óptima de trabajo de la levadura 33-34 °C), provocando pérdidas en el rendimiento de esta etapa.

- m³ de agua/ t de miel

El comportamiento del indicador muestra que los valores no cumplen con los valores normados (3,5-4 partes de H₂O por parte de miel) que es la proporción correspondiente a la dilución de la miel.

Eficiencia de Destilación (ED)

El comportamiento indica que todos los valores están por encima de la norma (94 %) por lo tanto hay eficiencia en la etapa de destilación.

- ton CO₂ / m³ de producción

Este indicador según los resultados obtenidos en el balance de masa varía en el rango de 0.64 a 0.91 ton/m³ de producción.

Si se tiene en cuenta que la recuperación puede constituir una fuente de ingreso económico puede afirmarse entonces que se deja de ingresar una suma considerable al no aprovechar económicamente este residual.

Según la resolución del MFP p -32-2007 la tonelada métrica de Gas Carbónico (CO₂) generado por fermentación alcohólica tiene un precio de salida de la empresa productora de 199.00 \$ de ello un componente en pesos cubanos convertibles es de 113.94 CUC.

- m³ vinaza / hL bioetanol producido

Los valores correspondientes a este indicador varían entre 1,6-2,3 (m³ vinaza/hL bioetanol).

Si se tiene en cuenta el volumen de producción de bioetanol, y el valor mínimo de m³ de vinaza por hL de bioetanol, puede estimarse que fueron vertidos al medio 56 873.46 m³ de vinaza en el período de estudio.

Atendiendo a todo lo anteriormente expuesto existen problemas en el orden técnico, económico y ambiental, que pueden ser solubles y que permitirían a la industria trazarse metas para la búsqueda de un impacto global positivo. Los problemas principales identificados fueron:

- Contaminación del medio ambiente por el alto contenido de CO₂ emitido en el proceso de fermentación.

- Baja eficiencia en el proceso de fermentación.
- Sobreconsumo de agua.
- Contaminación del medio ambiente por las características que poseen la vinaza.
- Generación de alternativas para implementación de opciones que conlleven al mejoramiento del desempeño técnico – económico y ambiental a través de tecnologías más limpias.

Tener en cuenta las vías planteadas para la búsqueda de soluciones a partir de la aplicación de técnicas de producciones más limpias propuestas en la metodología, se evaluaron las siguientes alternativas:

Alternativa 1: Recuperación del CO₂ para venta a otras empresas.

Otro aspecto a destacar y que justifica la alternativa que se propone, es que este gas resulta de importancia por su aporte al efecto invernadero, considerado como uno de los principales problemas globales de contaminación que afectan a la humanidad, puede considerarse además que pueden generarse elevadas concentraciones de este gas provocando afectaciones a los trabajadores y a la seguridad industrial.

Surgida a partir del análisis de posibilidad de reuso externo que permite su aprovechamiento como materia prima en otros procesos productivos, es un caso típico de aportación de valor agregado a residuales y por tanto de generación de ganancias a la entidad a partir del aprovechamiento económico de residuales.

Con un flujo que varía de 649,58 a 2168,33 kgCO₂/h producidos en los fermentadores destilados en el día. Se estimó el costo de inversión que asciende a \$ 1 304 657,00.

Si se logra recuperar las cantidades de CO₂ producidos diarios en la fábrica, se lograría, disminuir el efecto ambiental negativo que tiene este gas y la empresa obtendría un beneficio económico a mediano plazo. Los resultados del análisis técnico, económico y ambiental de esta alternativa se analizarán posteriormente.

Considerando que se logra recuperar el 80% del gas carbónico que sale del reactor, al final de un año se debe recuperar como promedio

880 t de gas carbónico en el mes dando como promedio, 10 500 ton/año. Teniendo en cuenta el precio de una tonelada de gas carbónico, se logrará alcanzar un ingreso de 1148515.20 en CUC con egresos en los gastos de las utilidades auxiliares necesarias en el empleo de la alternativa. Como ventajas predominantes de esta alternativa se tienen un ingreso que bastará para la implementación de otros proyectos de importancia y la disminución en gran cantidad de la cantidad de gas carbónico emitida al medio ambiente.

Alternativa 2: Instalación de un sistema de enfriamiento de agua para la batición que se está fermentando.

Este sistema incluye:

- Un intercambiador de placa y sus accesorios.
- Torre de enfriamiento de agua.
- Bombas.

Por la instalación de este sistema de enfriamiento se logrará obtener una mayor eficiencia en el área de fermentación ya que el control de la temperatura juega un papel fundamental en el funcionamiento de la levadura. Al lograr una mayor eficiencia de fermentación, se alcanzarán mayores volúmenes de producción. Se ubicarán 1 bomba por 5 fermentadores y 1 para el bombeo de agua de la torre de enfriamiento.

Con la segunda alternativa, si se logra aumentar la eficiencia de la fermentación a un 80% se logrará un 6% de bioetanol/día, logrando así un volumen mayor de producción de bioetanol y disminuyendo el índice de miel física, ya que la cantidad de azúcares fermentables que salen del proceso como residual, disminuirá. Considerando el costo de bioetanol que se plantea a continuación,

Se puede generar con el aumento de producción de aproximadamente 2 000 hL/mes unos 838 320 CUC/año con un valor neto de 5 847 485 CUC en la vida útil del equipo.

Este valor se estimó asumiendo el 6% de bioetanol/día, determinando así el bioetanol ponderado. Obtenido este valor, se procede a realizar una destilación con una eficiencia de 95% ya que los resultados estadísticos de los datos históricos referidos a la eficiencia de la destilación, nos permiten utilizar este valor con un

99% de confianza.

Se estimó el costo de inversión que asciende a \$ 173909,60.

Otro de los problemas detectado fue el consumo de agua en el proceso fermentativo. Para su solución se propone la siguiente alternativa.

Alternativa 3: Implementación de un sistema de automatización en la etapa de Mezclado.

Como se hace difícil la medición del flujo de la miel por su alta densidad, se sugiere un sistema de medición para el flujo de agua, para poder controlar el brix de proceso y controlar el consumo de miel, evitando así gastos innecesarios de agua y de miel sabiendo que el factor de dilución en los biorreactores (fermentadores en este caso) afecta el rendimiento de los mismos. Se sugiere el empleo de un rotámetro después de haber determinado el flujo de la miel por el llenado de un recipiente graduado.

Analizando para el factor estandarizado de dilución de la miel con el agua, se ahorraría aproximadamente 33 120 m³ de agua anualmente, disminuyendo así el volumen de residual generado por la planta en un 10%. Esto provocaría también un ahorro económico de 2 649,60 CUC/año. Se estimó el costo de inversión que asciende a \$ 7 111,74.

4.4. Conclusiones

Se evaluaron tres alternativas para la obtención de tecnologías más limpias en la producción de etanol generadas a partir de modificaciones al proceso tecnológico y de reciclaje externo de residuales del proceso considerando criterios múltiples: técnicos, económicos y ambientales, como un sistema integral, lo cual le permite a la empresa contar con un plan de mejoras y poder tomar decisiones acertadas en la gestión empresarial.

4.5. Bibliografía

1. Blank, L. T, Tarquin A. J., Ingeniería Económica. Tercera Edición. McGraw-Hill. México, 1993.
2. Cordovés, M., "Alternativas de la industria cañera y la protección

- del ambiente” en Conferencia Magistral en el Evento Internacional “Diversificación 2000”. Dirección de Promoción Industrial GEPLACEA, 2000.
3. Catá S. (2006 f). *Consideración de la incertidumbre en la integración de procesos en la industria de la caña de azúcar y sus derivados*. Unpublished Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Santa Clara.
 4. Cripps, H. (2000). Process integration in the pulp and paper industry.
 5. Dunn, R., & Bush, G. E. (2000). Using process integration technology for cleaner production. *Journal of cleaner production*. 8, 1-23.
 6. Edgar, T. F., “Process Information : Achieving a Unified View”. *Chemical Engineering Progress*, Enero, 51-57, 2000.
 7. Gálvez, L.O. y col., Folleto Diversificación, Seminario impartido en las provincias sobre este tema, julio 1999.
 8. Gálvez, L. O., “Hacia una Agroindustria Diversificada y con esquemas flexibles de producción”, *Revista Cuba Azúcar*, Diciembre, 5-11, 1999.
 9. González Cortés, M. (2004). *Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular*. Unpublished Tesis presentada en opción al grado científico en Doctor en Ciencias Técnicas Universidad Central de las Villas "Martha Abreu" Villa Clara.
 10. Keller, G. E., Bryan, P. F. “Process Engineering: Moving in New Directions”, *Chemical Engineering Progress*, Enero, 2000.
 11. Mascone, C. F. “Engineering the Next Millennium”, *Chemical Engineering Progress*, Octubre, 1999.
 12. Oquendo F., Consideración de la incertidumbre de la demanda y la disponibilidad de las materias primas en la determinación de las nuevas capacidades de producción de derivados de la caña de azúcar. Tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), 2002.
 13. Rosa, E., “Análisis de alternativas de inversión en la industria química considerando la fiabilidad de los equipos”, Tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas,

1996.

14. Sáenz, T., “Redimensionamiento empresarial: generalidades y experiencia en el MINAZ”, Revista Cuba Azúcar, (Julio-septiembre), 14-17, 1999.
15. Blank, L. T, Tarquin A. J., Ingeniería Económica. Tercera Edición. McGraw-Hill. México, 1993.

CAPÍTULO V

LA MODELACION Y SIMULACION DE PROCESOS Y SUS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Erenio González Suárez
Pío Aguirre
Juan Esteban Miño Valdés

5.1. Posibilidades y necesidad de aplicación de los métodos cibernéticos en la industria de la caña de azúcar

En la actual etapa del desarrollo de la ciencia y la técnica, la producción impone tareas con muchos años de anticipación a la ciencia y la técnica. La revolución científico técnica moderna consiste en que se inicia la era de la revolución automatizada, de manera que las ciencias se transforman en una fuerza productiva directa.

La complejidad del desarrollo técnico exige que para abordar las tareas técnicas contemporáneas, se considere que la ciencia se adelanta a la técnica y a la producción en su desarrollo, planteando cada vez de forma más aguda los problemas vinculados a la síntesis de los conocimientos, a la elaboración lógica de la información, siendo el carácter integral científico general el rasgo específico del desarrollo de las ciencias modernas, lo que es expresión de la dialéctica del objeto mismo, dando vida a los diversos métodos de síntesis de los conocimientos relativos a diferentes ciencias; a la par y por ello en las ciencias modernas el estudio de los sistemas poseedores de propiedades comunes, se ha difundido grandemente, planteando el problema de la elaboración de la metodología de las investigaciones sistemáticas.

Esta necesidad del desarrollo ha sido satisfecha con los métodos cibernéticos, que con la simulación de los fenómenos se interesan por una de las cualidades del pensamiento

humano, a previsión, el pronóstico; por lo que la cibernética imprime un carácter cualitativamente distinto al progreso técnico.

Con el desarrollo de la cibernética fueron ampliándose sus aplicaciones, y se concretó una definición general más apropiada como la dada por KLAUS /1/ como " la teoría de las relaciones de posibles sistemas dinámicos auto regulados con las partes que lo componen" o una más general y menos comprometedora sería: "La cibernética es la ciencia de los sistemas cibernéticos".

El método científico de investigación aplicable a todas las esferas de las ciencias y la técnica, es la teoría de los sistemas, pues la teoría de los sistemas es un método general de investigación científica que transforma los distintos principios de la metodología de investigación de tal forma que estos adquieren significado heurístico en el conocimiento científico especializado/2/.

La teoría de los sistemas surge como una necesidad de la cibernética al estudiar los sistemas. Así, esta comprende la teoría que se ocupa de las relaciones entre la estructura y la función del sistema y las interacciones entre las partes y el todo del sistema. Para KAFAROV /3/ la cibernética de los procesos de la industria química "se ocupa de las relaciones entre los equipos de los procesos continuos(relaciones entre elementos del sistema), así como las uniones entre los equipos y sus partes y además, del comportamiento del sistema dependiendo de la influencia del ambiente (relaciones entre estructura y función)".

El desarrollo y aplicación de la cibernética deviene en un problema cardinal de las ciencias, pues ante esta se plantea tanto desde el punto de vista de las demandas de la práctica, de las necesidades, como desde el punto de vista de la lógica interna del desarrollo de la propia ciencia. En la teoría de los

sistemas, el análisis de los mismos es la metódica para la obtención de los resultados en el estudio activo, es decir, la acción y dirección de un sistema, para ello se requieren, métodos de modelación que sean capaces de representar los aspectos y rasgos que se desean estudiar en el comportamiento de los sistemas.

La Teoría de los Sistemas, que junto con la teoría de la información, la teoría de la regulación, la teoría de los juegos y la teoría de los algoritmos, conforman la cibernética, tiene como concepto central el de "sistema".

Aunque una definición general de sistema se hace difícil, en la literatura especializada se registra entre otras las siguientes definiciones BETALANFI/4/: "Sistema es un complejo de componentes interactivos".

RAPOPORT/5/: "Sistema, desde el punto de vista matemático es una parte del mundo que en cualquier instante puede ser descrita, atribuyéndole valores concretos a un conjunto de Variables".

AKOF/6/: " Podemos definir como sistema cualquier esencia conceptual o física que consta de partes interdependientes".

PAVELZING /7/: "Todo sistema consta de elementos organizados de manera determinada".

KLAUS/1/: "Un sistema es una totalidad de objetos entre los cuales existen determinadas relaciones".

KAFAROV /3/: "La totalidad de los procesos químicos físicos que se desarrollan, así como los medios técnicos que lo posibilitan".

Desde el punto de vista de la cibernética son los sistemas dinámicos los que se estudian como parte de ella. Las propiedades generales que estos poseen son las siguientes:

01. Integridad.

02. Complicación.

03. Estabilidad dinámica multidimensional.

- 04. Controlabilidad.
- 05. Transición en el tiempo.
- 06. Procesamiento y almacenamiento de la información,
- 07. Estructura jerárquica.
- 08. Independencia relativa de las partes del sistema.
- 09. Diferenciabilidad cualitativa de los elementos.

5.2. Aplicación del Análisis de Procesos con ayuda de modelos matemáticos.

La aplicación del Análisis Complejo de Procesos con ayuda de modelos matemáticos puede lograrse según las condiciones existentes y el grado de exactitud requerida a través de la aplicación de los llamados:

- Modelos fenomenológicos o basados en fenómenos de transporte.
- Modelos estadísticos o estadísticos-híbridos.

Como modelo matemático se define como es sabido un sistema de ecuaciones matemáticas que describen formalizada y cuantitativamente los efectos de las influencias externas sobre el comportamiento de un objeto.

Los modelos matemáticos más simples son los modelos estadísticos nombrados modelos de regresión. En ellos solo se tiene en cuenta la influencia recuperable con las técnicas de medición así como los efectos que se cuantifican a la salida del objeto. Sobre los procesos parciales que ocurren dentro del objeto no se elaborara ninguna suposición ni se emitirá juicio alguno. (También conocido como método de la "Caja Negra").

Tales modelos pueden servir para determinar los estados de funcionamiento óptimo del objeto del margen analizado; los traspasos a otras instalaciones y dimensiones o por encima de los límites de análisis conducen en su mayoría a juicios falsos.

Los modelos matemáticos fundamentados fenomenológicamente tienen en cuenta los procesos

individuales de naturaleza científica que se ejecutan verdaderamente. Aquí las ecuaciones que describen el modelo se corresponden con las leyes naturales en que se fundamenta el proceso tecnológico las cuales pueden transformarse a otras magnitudes de aparatos tipos de construcción de equipos y condiciones extremas de funcionamiento. Los parámetros modelados no dependen de las particularidades constructivas y otras del objeto sino que son constantes del proceso.

La mayoría de los modelos aplicados en la práctica son modelos combinados quiere decir que ellos no son fundamentados perfectamente desde el punto de vista fenomenológico ni son modelos puramente estadísticos así su seguridad de pronóstico es mayor que la de los modelos de regresión y más pequeña que la de los modelos fenomenológicos.

Independientemente de la elección de los modelos matemáticos para la solución del problema han de determinarse experimentalmente los parámetros requeridos y ha de comprobarse la adecuación de los mismos sea en la medida que refleja satisfactoriamente la realidad mediante los modelos, así también como las simplificaciones de estas cuando las estructuras son muy complicadas.

Por otra parte los experimentos de los modelos persiguen el objetivo de detectar puntos débiles y analizarlos así como de encontrarlas propuestas de solución mediante operaciones formales en el modelo matemático. Acerca de las operaciones individuales han de tenerse en cuenta las indicaciones siguientes:

1. Para la ejecución de los cálculos requeridos han de aplicarse preferentemente los métodos de la simulación del esquema de flujo y en situaciones dadas las de simulación orientada a la ecuación. Ha de

tenerse en cuenta que para tareas apropiadas pueden emplearse también métodos análogos e híbridos.

2. El objetivo de estudio de parámetros consiste en presentar vías para la eliminación de los puntos débiles. En ellos son apropiados los métodos presentados en 1.
3. En la elaboración de propuestas de solución ha de tenerse en cuenta la ejecución por pasos de la tarea de racionalización. En ello deben considerarse los principios siguientes:
 - Debe fijarse el estado "ideal" el cual sirve de escala para la evaluación de las propuestas de soluciones reales y para la optimización de la búsqueda de las soluciones.
 - Debe intentarse siempre lograr el objetivo con gastos mínimos para las modificaciones técnico constructivas y del equipamiento. Han de formularse y evaluarse alternativas.
4. Una modificación del objetivo o de las condiciones marginales puede verse como razonable cuando se presentan variantes económicamente efectivas que arrojen a un lado los planteamientos de objetivos y condiciones marginales.

En el Análisis Complejo de Procesos la función clave para la intensificación es la optimización.

Los métodos matemáticos de optimización por su propia naturaleza no pueden ser aplicados de forma directa a la realidad analizada, sino a modelos matemáticos de determinado conjunto de manifestaciones del fenómeno estudiado, los que al ser investigados solo presentan un interés práctico si los mismos reflejan de un modo suficientemente adecuado las situaciones reales y satisfacen determinado grado de exactitud.

Los modelos de optimización constituyen un importante medio auxiliar en la solución de problemas concernientes a las ciencias pues los métodos cibernéticos posibilitan ya no solo la búsqueda de los procesos óptimos sino también la dirección de estos con vista a mantenerlos siempre en los regímenes óptimos y las rutas deseadas" /13/ lo cual tiene especial trascendencia ya que en la sociedad moderna la eficiencia mayor del trabajo social y la rentabilidad máxima de la producción son efectos de soluciones científicas de nuevo tipo.

En los problemas de optimización la función objetivo es la relación existente entre lo que deseamos hacer óptimo y las variables que influyen sobre el lo que pueden ser varias o una.

En la teoría de los sistemas automatizados se ha demostrado que no se puede plantear el problema de alcanzar simultáneamente el extremo para dos o más funciones de una o más variables por ello antes de que un óptimo pueda estimarse debe seleccionarse un criterio de optimización. En base a este criterio se desarrolla la función objetivo la cual relación el criterio de optimización con las variables del proceso. Entre las más típicas de las funciones objetivos tenemos: el costo o la producción total por unidad de tiempo, el costo por unidad de producción, la ganancia, la conversión, los índices de calidad de los productos entre otros.

Esta función puede ser lineal o no lineal restringida o no restringida. Como objetivo general de la optimización podemos señalar al encontrar los valores de las variables independientes sujetas a restricciones las cuales producen la respuesta óptima para el problema que se examina.

Según BEVERIDGE y SCHECHTER/8/ un procedimiento general para la optimización de un sistema puede ser:

01. Definir el objetivo del problema que se estudia.

02. Examinar las restricciones impuestas al problema por factores externos.
03. Seleccionar un sistema o sistemas para estudios.
04. Examinar la estructura de cada sistema y las interrelaciones de los elementos del sistema y sus componentes.
05. Construir un modelo para el sistema. Aquí el objetivo debe ser definido en términos de variables del sistema.
06. Examinar y definir las restricciones internas de las variables del sistema.
07. Simular el problema mediante modelos del sistema considerando las variables.
08. Analizar el problema y reducirlo a sus rasgos esenciales
09. Verificar que los parámetros del modelo estén representados en el sistema que es estudiado.
10. Determinar la solución óptima para el sistema y discutir su naturaleza.
11. Utilizar la información obtenida y repetir el procedimiento hasta que se encuentre un resultado satisfactorio.

5.3. Clasificación de los Sistemas

La clasificación de los sistemas dinámicos complejos puede efectuarse desde diferentes principios. A los fines de nuestros propósitos tomaremos la siguiente:

Sistemas Cerrados: son aquellos en que existen solamente elementos internos o sea, todas las salidas de sus elementos son al mismo tiempo entrada de otros elementos.

Sistemas Abiertos: son aquellos en los cuales por lo menos un elemento no tiene entrada o salida a otro elemento.

Sistemas lineales: entre las salidas y las entradas del sistema existen relaciones lineales,

Sistemas no lineales: no existen relaciones lineales entre las salidas y las entradas del sistema, estos sistemas bajo determinadas consideraciones pueden llegar a linealizarse.

Sistemas determinísticos: son aquellos en los cuales las variables que los describen cambian de acuerdo con regularidades fijadas exactamente, así como que sus valores estén fijos determinan claramente el estado del sistema.

Sistemas estadísticos: las variables del sistema son variables casuales, cuya distribución es desconocida pero que pueden conseguir por medio de la información de muestras.

Sistemas estocásticos: Son aquellos sistemas estadísticos donde las variables que lo describen dependen de otro parámetro (en general el tiempo), o sea que está en presencia de variables casuales con variación con respecto al tiempo.

Sistemas discretos: aquellos en los cuales cada variable del sistema puede tomar una serie de valores C_i ($i= 1, 2, 3...$) y para ello los C_i permanecen aislados, o sea que para cada C_i , existe un ambiente, en el cual no puede existir otro C_j ($j = i$) de dicha variable C .

Sistemas Continuos: son aquellos en los cuales cada variable del sistema puede tomar todos los valores posibles en un intervalo determinado.

De acuerdo a su carácter se pueden diferenciar subsistemas cualitativos del sistema global como sigue:

- Sistemas de masas (materiales)
- Sistemas de energía.
- Sistemas de información.

Para la necesaria formalización entre los sistemas de masas y energía estrechamente acoplados de un proceso, el sistema de información es una parte inseparable, ya que contiene datos sobre el estado de la masa y la energía, así como aquella necesaria para el control y dirección del proceso.

En lo adelante por **proceso** comprenderemos la totalidad de secuencias del estado del sistema en el tiempo. Por proceso de producción se entiende el cambio con el tiempo del estado complejo total de instalaciones del sistema, así como las correspondientes corrientes de masa, energía e información que llevan a la obtención de un producto deseado.

Elementos desde el punto de vista cibernético son el último componente de un sistema cibernético, el cual con respecto a ese sistema no se puede ni se debe subdividir.

Los **acoples** son los canales de unión entre los elementos y entre el sistema y los alrededores. Son las entradas y salidas de los elementos y pueden ser energéticos, de materia o información.

La estructura está ligada a la organización del sistema y comprende la cantidad de relaciones o uniones entre los elementos de dicho sistema, así como también las formas de dichas relaciones. Las estructuras pueden ser fijas o flexibles y juegan un papel fundamental en el análisis y síntesis de sistemas.

Partiendo de las definiciones anteriormente dadas, puede concluirse las siguientes ideas básicas:

Los sistemas de procesos tienen la función de realizar transformaciones industriales de masa y energía.

Los elementos que componen el sistema de procesos se agrupan, en procesos de transformación de energía y masa para el transporte y almacenamiento de ellas.

Las relaciones se componen de las corrientes de masa y energía que crean los acoples entre los elementos del sistema.

Los planos de consideración de los sistemas de procesos son:

- Grupos de unidades,
- Etapas de Procesos,
- Procesos completos,

- Fabricas de transformación de materiales,
- Sistemas combinados de transformación de materiales,
- Sistemas combinados de transformación de materiales,

Por otro lado, los elementos de un sistema pueden clasificarse de acuerdo a:

- Él número de unidades de entrada y salida.
- De acuerdo al comportamiento en el tiempo,
- Según las variables de decisión,
- Según la función técnica del proceso,

Los sistemas de procesos pueden clasificarse según la función y según la estructura:

Según la función en:

- Sistema para la transformación de materiales,
- Sistemas para el suministro de materiales auxiliares
- Sistemas para el suministro de energía
- Sistemas de información.

Según la estructura en:

- Acople en serie.
- Acople en cascada,
- Acople en paralelo. ,
- Acople de desviación,
- Acople de recirculación,

5.4. Análisis de Sistemas.

En la Teoría de los Sistemas el análisis de los mismos es la metódica para la obtención de los resultados, en el estudio activo de un sistema, es decir, su acción y dirección, por lo que se requieren métodos que sean capaces de representar los aspectos y rasgos que se necesitan estudiar el comportamiento de los sistemas.

En la Ciencia Moderna se han desarrollado las ideas de los métodos de análisis y síntesis, siendo el carácter sistemático el principio metodológico más importante del saber científico.

El Análisis de Sistemas puede reflejarse en tres etapas que recogen diferentes facetas del Análisis de Sistemas y se nombran respectivamente:

- Análisis de sistemas.
- Optimización de sistemas.
- Síntesis de sistemas.

En el Análisis de sistemas pueden considerarse 3 tareas fundamentales a saber:

- Análisis de la estructura.
- Análisis de la función.
- Análisis del comportamiento.

5.5. Tareas y fines de la modelación

La modelación y los modelos juegan un papel decisivo para la solución de los problemas planteados en el análisis de procesos, por ello es que el desarrollo y utilización de los modelos es una de las tareas más importantes a realizar en la actualidad.

Los modelos y los métodos de modelación pasan así a ser herramientas importantes de trabajo, cuya efectividad en la solución de problemas industriales aumenta y se perfecciona cada día. El mundo moderno exige a los dirigentes industriales el empleo de ideas nuevas para incrementar al máximo la eficiencia de la utilización de los recursos, así, el empleo de modelos matemáticos como herramientas para reducir los gastos en la producción e incrementar la calidad de los productos, reduciendo los plazos de introducción de nuevas tecnologías es una dirección principal de la ciencia y la técnica.

Por lo anterior, al examinar los aspectos concernientes a la modelación matemática de los procesos continuos debe fijarse siempre la atención en el propósito fundamental para el cual se desarrollan los modelos, el lugar de dejarnos influir

demasiado por la posible excelencia teórica de la presentación matemática de determinado modelo, por el hecho de que sea elegante, esto implica que debe realizarse un balance entre la realidad del fenómeno y el modelo con el cual es conveniente estudiarlo; una consigna importante en la modelación resaltada por RUDD Y WATSON /9/ es "no utilizar una compleja técnica para resolver problemas que pueden ser resueltos por un análisis simple".

Los modelos tienen 2 propósitos básicos, con formas fundamentales de acuerdo con estos propósitos:

a). Modelos dinámicos, tipo de ecuaciones generalmente diferenciales, para los estudios de control automático y afines.

b). Modelos estáticos, tipos de ecuaciones generalmente algebraicas, para estudios de diseño técnico y optimización técnica económica.

La forma y uso de los modelos también determinan indirectamente los límites de su tamaño físico en términos de número de variables que se estimen y la cantidad de ecuaciones implicada, así como el tamaño y la complejidad de los medios físicos que se consideren.

Debido a la complejidad de los procesos reales y las limitaciones de las matemáticas, cualquier modelo que sea desarrollado, está sujeto a ser idealizado y generalmente solo representa fielmente alguna de las propiedades del proceso, con el objetivo de salvar esta limitante en lo posible, se ha trabajado en 3 líneas paralelas de desarrollo, a saber:

1. Métodos de mejorar las respuestas de modelos simples.
2. Mejorar y completar la caracterización de los parámetros no lineales de los sistemas de procesos.

3. El desarrollo y uso de más rápidos y capaces sistemas de computadoras para la simulación de sistemas de procesos.

La descripción cuantitativa de los sistemas de procesos, es una de las tareas de mas interés en la actualidad, para lograr este objetivo, una de las condiciones previas, es que la cantidad de información disponible permita describir, las relaciones entre los elementos y dentro de los elementos, de manera que con el modelo obtenido de un sistema real, se pueda en determinada etapa del proceso del conocimiento.

Sustituir al sistema real, y por medio de su investigación y estudio obtener la información deseada sobre el sistema real, con la requerida calidad; la calidad de un modelo matemático está determinada por la precisión con que coincidan los procesos en el sistema real, con los procesos obtenidos mediante el modelo por ello debe existir:

1. Concordancia objetiva con el propio sistema;
2. Posibilidad de sustituir el sistema en el proceso del conocimiento;
3. Propiedad de suministrar información práctica sobre el sistema;
4. Determinadas reglas mediante las cuales la información del modelo pueda transformarse en información del sistema.

5.6. Concepto y Propiedades de los modelos

El concepto de modelo matemático ha sido abordado por varios autores pudiendo señalarse entre otras las siguientes:

KAPLICK LORENZ/10/: "Un modelo matemático es una representación matemática necesaria para las tareas de las facetas esenciales de un objeto en un rango limitado, con una

exactitud determinada, con una forma apropiada para su representación".

BUSLENKO/11/: "Modelo matemático es la descripción abstracta y formal del objeto cuyo estudio, es posible por medios matemáticos".

KOENING/12/: "Modelo matemático es un sistema de ecuaciones que relacionan las variables del proceso y lo describen".

KAFAROV/3/: "se debe entender como modelo, un sistema tal que en determinadas direcciones refleje partes limitantes del proceso".

Resumiendo las definiciones anteriores podemos aceptar la dada por MOISIEYEV/13/ que señala que "como modelo matemático se entiende una verdad relativa que refleja determinadas características de los fenómenos estudiados, siendo el estudio de los modelos de los sistemas, el método fundamental del conocimiento que debe servir para conocer las correlaciones cuantitativas propias de los fenómenos y con ello mejorar el sistema de dirección del proceso en el aspecto que se estudia, de modo que por modelación entendemos un método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual ser estudiado el sistema, pero no como tal sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el cual desde el punto de vista de los intereses planteados concuerda con el sistema real que se estudia".

Dicho sistema tendrá las propiedades de que en determinadas etapas del proceso del conocimiento ser capaz de sustituir al real y por medio de su investigación y estudio, suministrar la información deseada sobre el sistema real.

Entre las propiedades generales de los modelos se encuentran:

01. Los modelos son representaciones conscientemente desarrolladas y simplificadas de una circunstancia. la

construcción de modelos es una forma particular de la capacidad de abstracción del hombre.

02. Los modelos contienen las facetas esenciales y decisivas del proceso en dependencia del fin del estudio.
03. Los modelos en general brindan nuevos conocimientos.
04. Los modelos se comprueban mediante la comparación de sus salidas con los resultados de los procesos reales. ,
05. Los modelos son sistemas de sustitución ya que sustituyen un original complejo para aclarar el objeto de investigación.

En resumen puede plantearse que las tres propiedades fundamentales de los modelos son la habilidad de abstracción, de semejanza y de extrapolación de los resultados.

5.7. Clasificación de los modelos

Los modelos pueden clasificarse atendiendo a muchos factores, entre otras clasificaciones tenemos las siguientes:

De acuerdo a la teoría o técnica utilizada en su construcción, se clasifican en 3 tipos de modelos y sus combinaciones:

- a) Modelos de fenómenos de transporte. Basados en principios físico químicos.
- b) Modelos de Balances de Población. Aplicando los principios de Balances de Población.
- c) Modelos Empíricos. Su construcción se basa en técnicas de ajuste de datos empíricos.

Desde el punto de vista de la naturaleza de las ecuaciones se clasifican en pares opuestos como sigue:

- a) Modelos determinísticos o estocásticos.
- b) Modelos estacionarios o dinámicos.
- c) Modelos de parámetros combinados o de par metros distribuidos.

Otras clasificaciones de los modelos son dadas en la literatura, según los aspectos de los objetos que el modelo refleja, a saber, modelos de estructuras, funcionales, de comportamiento, combinados, etc.

5.8. Confección formulación y aplicación de modelos en la Industria azucarera

Consideraciones en la confección de modelos. Principios Lógicos y Heurísticos

El planteamiento de un modelo matemático de un proceso exige, por un lado el entendimiento del desarrollo del proceso y por otro, que la persona encargada del desarrollo del modelo posea capacidad de abstracción que le permita integrar por medio de formulación matemática todas las peculiaridades del objeto, debe además ser capaz de desprestigiar los factores no influyentes y de simplificar el modelo en todo lo que sea posible. Esta tarea por su complejidad y requerimientos hace que las exigencias en el modelo y su planteamiento sean elevados.

En el desarrollo de una tarea de tal magnitud juegan los programas heurísticos (deductivos) un papel fundamental ya que el fin de la confección de dichos programas es el obtener experiencias metódicas para la estructuración efectiva del trabajo creador del hombre.

Si analizamos este aspecto encontramos en la confección de un modelo matemático un movimiento de la contemplación, al pensamiento abstracto y de ahí a lo concreto pensado (que no es otra cosa que el modelo), como reflejo ideal del mundo real, lo que al comparar su adecuación completa se conoce como contemplación viva. La modelación como parte de la Teoría de los Sistemas, está relacionada con una serie de principios que son la base de los estudios posteriores de la modelación.

El análisis de como se satisfacen dichos principios por la modelación y los modelos de forma resumida se pueden presentar de la siguiente manera.

Principios Lógicos:

- Analizando el principio de Bellman se concluye que un modelo adecuado de un sistema exige modelos adecuados de los elementos.
- Según el principio de la continuidad, la solución de un problema de modelación requiere una adecuada intensidad y sistematización.
- El principio de la homogeneidad se aplica considerando que sobre los modelos de los elementos y el modelo del sistema deben separarse equitativamente las influencias cualitativas.
- La confección de modelos sobre la base de una secuencia lógica de pasos redundante en la calidad de la solución del problema (principio de confección de modelos).
- El principio de completamiento exterior analizado en la modelación plantea que el obtener las propiedades de un sistema exige la introducción sistemática de información exterior, en lo posible discriminada, en el modelo.

Principios Heurísticos:

- El principio de confección de metas parciales se aplica en la modelación considerando que el establecimiento de un modelo de un sistema, resulta de la consecuencia de modelos de los elementos.
- El principio de la cooperación, la confección y solución de un modelo o teoría de la modelación no es posible sin la utilización de otros métodos y procedimientos desarrollados en otros campos del saber.

- De acuerdo con el principio de la retroalimentación se hacen necesarios los resultados parciales de algunos elementos para la modelación de otros elementos o etapas.
- Según el principio de la interacción entre la calidad y la cantidad, la elevación cuantitativa de los parámetros de influencia trae como resultado una nueva calidad del método de solución del modelo en un paso determinado de la modelación.

Etapas Generales para el Desarrollo de modelos. (ver figura 5.1)

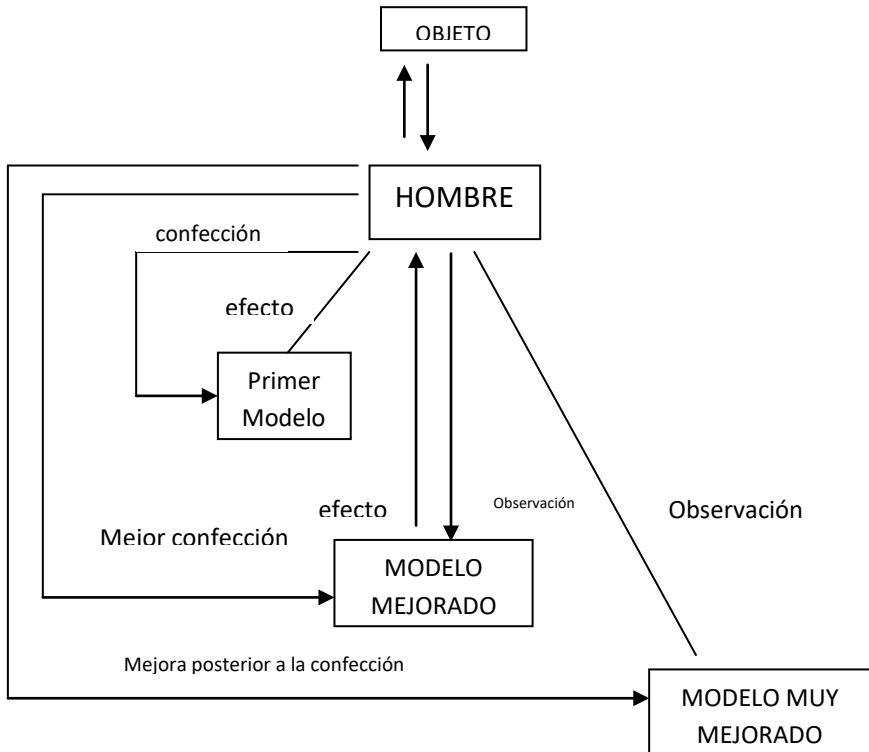


Fig. 5.1. Pasos para la elaboración de un modelo.

Los pasos generales que llevan a un modelo matemático global han sido relacionados por KAFAROV/3/ y una representación gráfica es la siguiente:

La elaboración de modelos matemáticos consta de 3 partes fundamentales:

1. Concepción del modelo.
2. Elaboración de un algoritmo que sea capaz de modelar el objeto.
3. Comprobación de la adecuación del modelo.

La estrategia general para la elaboración de modelos sigue una trayectoria definida y razonable, la que aunque no debe ser aplicada mecánicamente pues las peculiaridades de cada sistema dan lugar a divergencias en el desarrollo de los métodos, se resume en los siguientes pasos lógicos:

Estudio preliminar:

Todo trabajo de modelación tiene como premisa un estudio preliminar en el cual se definan los problemas fundamentales para el planteamiento del modelo. El primer aspecto es reflejar los objetivos que se persiguen con el modelo, es decir los fines específicos del modelo.

Objetivos de trabajo pueden ser por ejemplo: el desarrollo de un nuevo procedimiento, el proyecto de una instalación el mejoramiento u optimización de una forma de trabajo y también la combinación de las anteriores. Para la optimización deben decidirse los criterios deseados como parametros de optimización y además conocerse las relaciones fenomenológicas del proceso.

Es también necesario conocer sus limitaciones espaciales, constructivas y de procedimiento. Las limitaciones espaciales las fijan las instalaciones o equipos en los cuales el proceso se desarrolla y también las relaciones con los alrededores. Los constructivos están determinados por aspectos tales como:

tipo de construcción, elementos de construcción, dimensiones de los equipos etc.

En este paso, se incluye el análisis crítico de la literatura y de los modelos existentes para procesos análogos y debe terminar con una corroboración de los objetivos propuestos y un planteamiento de los modelos que pueden ser empleados en la solución de la tarea.

Elaboración del modelo matemático detallado:

El modelo matemático de un proceso tecnológico debe describir en forma de relaciones lógicas y/o matemáticas la totalidad de los procesos físico-químicos que ocurren en el sistema analizado, para ello el estudio preliminar servir como base y se podrán plantear las consideraciones de los procesos elementales esbozados en este.

En el análisis de este proceso elemental se combinan las consideraciones físicas y físico químicas con descripciones del tipo "Caja Negra".

En la elaboración de los modelos se comienza por los elementos y para ello pueden aprovecharse los modelos que en el estudio preliminar se hayan seleccionado o elaborado, después se acomete el estudio de la modelación del proceso completo.

El modelo del proceso global se logra a través de la integración lógica y articulada de los modelos de los elementos y hasta ese momento tendrá un carácter teórico ya que los parámetros en el incluidos aún no han sido evaluados. Los algoritmos y formulaciones elaboradas en esta etapa, ser sometidos en las etapas posteriores a una necesaria comprobación que puede tener como resultado que este paso tenga que repetirse.

Fijación de los valores de los parámetros empíricos:

En la modelación matemática de los procesos tecnológicos de la industria química es problemático la fijación de los parámetros empíricos debido a la complejidad de los procesos y los cambios en las corrientes másicas. Por otro lado en muchos casos los valores obtenidos a nivel de laboratorio y planta piloto no son extrapolables a escala industrial o solo lo son en un rango limitado.

La obtención de estos parámetros empíricos puede hacerse partiendo de valores establecidos, o determinándose a través de experimentos en equipos pilotos adecuados, o lo que es mucho mejor en la misma fábrica en dependencia de las posibilidades reales.

Los diseños de experimentos y los métodos estadísticos de procesamiento de la información experimental y de los datos del control operacional industrial son un valioso apoyo en la determinación de los parámetros empíricos. Es importante además, la selección de los instrumentos de medida, su exactitud y error relativo.

Confección y puesta a punto de los programas para la computadora:

Para el desarrollo de modelos matemáticos, se hace necesario la utilización de computadoras como herramienta para la realización de los cálculos. Esto se logra por medio de un sistema de programas que de una forma coordinada lleva a vías de hecho la tarea planteada.

En la generalidad de los casos, no es común la existencia de programas ya confeccionados, de aquí que el desarrollo de estos programas es función de la modelación matemática.

Sistema de trabajo en la computadora:

Toda instalación de cálculo se encuentra supeditada a un sistema de operación que trabaja sobre la base de multiprogramas. Este sistema controla el desarrollo del

trabajo en la computadora y comprueba, rige y coordina todas sus funciones incluyendo las periféricas de entrada, salida y memoria.

El sistema de operación está compuesto en general de tres partes, una para el inicio del trabajo, otra para la traducción del programa y los datos, y almacenamiento de la información. Cada uno de estos pasos se desarrolla por medio de una serie de mandatos que pueden ser considerados también como sub programas o subrutinas.

Desarrollo de los cálculos numéricos con el modelo:

En esta etapa el modelo pasa a ser el objetivo de estudio por medio del cual se investiga el comportamiento del proceso real sin necesidad de realizar costosas investigaciones en esta y obviando también la influencia casual de determinadas variables. Para ello es un requerimiento que el modelo empleado sea adecuado para la descripción del proceso tecnológico en los límites previamente establecidos.

Comprobación de la adecuación del modelo matemático y su adaptación al proceso real.

La verificación de la adecuación del modelo permite determinar la concordancia de los resultados de este con los reales del proceso. Para ello se comparan los resultados experimentales del proceso con aquellos obtenidos por el modelo partiendo de los mismos datos de entrada. Esto permite determinar el grado de concordancia de los resultados del modelo con los reales y si el modelo es capaz de reflejar adecuadamente el proceso para su estudio.

En la literatura se reflejan otras alternativas para la confección de modelos matemáticos entre ellas la de KAPLICK LORENZ /9/ relaciona los pasos siguientes:

- Definición del sistema;
- Consecución de la estructura a modelar;

- Obtención de las funciones matemáticas del modelo;
- Planeamiento y desarrollo de los experimentos;
- Determinación de parámetros partiendo de los experimentos;
- Comprobación y mejoramiento del modelo.

5.9. Modelación matemática de sistemas tecnológicos complejos de la industria azucarera.

La modelación Matemática en los últimos años ha alcanzado notables avances en la solución de problemas específicos de la industria del azúcar y sus derivados, debido a las posibilidades que ofrece de analizar el comportamiento de un sistema tecnológico complejo, en el sector industrial, los esfuerzos, se han encaminado a la optimización de los procesos tecnológicos y a la introducción de los procesos automatizados, reportándose, tan solo en Cuba, entre otros los siguientes trabajos:

- ABREU /14/ estudio la dinámica del tren de molinos;
- SEVILLA Y FRIEDMAN/15/ investigaron el trabajo de extracción de jugos en condiciones estables;
- HERNANDEZ CLAVIJO /16/ investigó el efecto de las propiedades de la caña en el rendimiento del azúcar;
- PEREZ DE ALEJO/17/, DE ARMAS/18/, GONZALEZ MARTIN/19/ Y CASTELLANOS/20/ han estudiado los problemas energéticos de una fábrica de azúcar;
- BOIZAN/21/ Y PEDRAZA/22/ se han propuesto el empleo de los modelos topológicos en esta industria;
- GONZALEZ RODRIGUEZ /23/ obtuvo un modelo lineal de todo el proceso global de producción de azúcar mediante matrices de coeficientes de transformación;
- GOMEZ GUTIERREZ/24/ empleó la modelación en la selección de esquemas de la etapa de purificación;

- GONZALEZ SUAREZ/25/ obtuvo el modelo de los procesos tecnológicos de una fábrica de azúcar mediante la agregación de los modelos de sus elementos con ayuda del programa MODEL, y ha propuesto el empleo de modelos matemáticos para la determinación del efecto de las diferentes variedades de caña en la eficiencia de los procesos tecnológicos/26/.

En el campo de la diversificación de la industria de la caña de azúcar han utilizado los modelos matemáticos para su estudio:

- OQUENDO FERRER /27/ para establecer la estrategia de diversificación de una instalación y
- DE LA CRUZ/28/ empleo los modelos matemáticos en la intensificación de una instalación industrial.

En el análisis general de la aplicación de la modelación matemática en los procesos industriales resaltan los de la escala y los de la complejidad, o los de ambas a la vez; pues si bien es factible para una unidad de cualquier grado de complejidad elaborar una serie de modelos teóricos de gran precisión. Es mucho más laboriosos y en ocasiones casi imposible detallar un proceso completo, pues para una unidad fabril de tamaño regular se obtiene un número abrumador de ecuaciones y una lista excesivamente larga de variables. Lo que se hace aun mayor cuando se trata de una fabrica verdaderamente grande.

Por todo lo anterior en la aplicación de la modelación matemática a la solución de aspectos específicos de una instalación de la industria química se requiere elaborar modelos lo suficientemente precisos para simular el comportamiento del sistema que queremos estudiar y lo suficientemente sencillo como para que pueda ser en un relativo corto tiempo desarrollados y fácilmente

implementados en una computadora para simular y estudiar el comportamiento del sistema real.

“En la industria azucarera encontramos multitud de variables que caracterizan el proceso por lo que se puede afirmar que el proceso tecnológico de producción de azúcar puede representarse por un sistema multivariable. No obstante no debemos olvidar que en la búsqueda de la solución óptima de la operación o diseño de un sistema, se requiere que el comportamiento de este, sea representado por estimación de un simple criterio escalar" / 23/.

En la producción de azúcar el problema a estudiar es encontrar un modelo del sistema que permita predecir de acuerdo con las calidades de las materias primas y las condiciones fundamentales de diseño y estado técnico de los equipos tecnológicos, el comportamiento del sistema considerado como variable en la descripción del proceso tecnológico: los parámetro de calidad del azúcar.

El agotamiento de las mieles, el volumen de producción y un indicador económico que manifieste el nivel de eficiencia integral del proceso tecnológico. Es decir que para la optimización del sistema se requiere por un lado modelos que describan la contribución de cada una de las variables a las propiedades finales del papel y por otro lado, su efecto en el costo u otro indicador de la eficiencia económica del sistema.

Para la solución de este problema 2 alternativas son posibles:

1. Considerar que en la región de operación normal de una fábrica de azúcar el comportamiento de los elementos del sistema pueden aproximarse a modelos lineales el conocimiento preciso de las funciones que caracterizan el comportamiento de esos procesos y al interpretación de las mismas mediante segmentos de líneas rectas, y entonces obtener el modelo global del sistema mediante la agregación de los modelos de los elemento y los balances de materiales y

energía. Obtener modelos aproximados también a lineales del indicador de la eficiencia económica del sistema que permitan aplicar en la búsqueda de las condiciones óptimas la Programación Lineal.

2. Elaborar modelos no lineales del comportamiento tecnológico de los elementos y con ayuda de estos modelos y de los balances de materiales y energía en cada elemento elaborar los modelos de los indicadores económicos y aplicar en la búsqueda de las condiciones optima el método de Programación Dinámica.

Por las características específicas de las tecnologías existentes para la producción de azúcar crudo o refino los modelos de los sistemas globales que se elaboren deberán considerar la existencia o no de etapas de con reciclo. Por lo que en cada caso tendrán una solución diferente.

Para la modelación estadística de sistemas tecnológicos de la industria azucarera o sus derivados se requiere:

1. La descomposición del proceso tecnológico global en elementos y etapas susceptibles de ser modeladas a partir de la información disponible en el control operacional del proceso, para la cual el conocimiento profundo del mismo y las reglas prácticas de descomposición resumida por RUDD y WATSON /9/ son de extrema utilidad.

En general las etapas incluidas en el proceso tecnológico de producción de azúcar crudo son las siguientes etapas de:

- extracción.
- purificación.
- evaporación.
- cristalización.
- centrifugación

2. La elaboración de los modelos tecnológicos de los elementos en los cuales se ha descompuesto el proceso.

Aquí se incluyen los resultados de los balances de materiales y energía, los estudios tecnológicos. Así como el procesamiento de los datos del control operativo del proceso.

Los elementos del sistema se analizan utilizando el concepto de "Caja Negra", mediante el cual se obtienen funciones de las variables de salida, en dependencia de las variables de la entrada y considerando o no un comportamiento lineal del sistema dentro de una región experimental.

Como se ha explicado antes según la naturaleza de los modelos que se elaboren se seguirá una u otra estrategia de modelación y optimización.

La alternativa más sencilla, es considerar que en una región limitada en el entorno de las condiciones de operación de la instalación industrial, los comportamientos no lineales pueden ajustarse como segmento de rectas que conforman la no linealidad real. Pero que en una pequeña región se pueden aproximar el comportamiento lineal.

Así las cosas, las funciones lineales elaboradas en cada elemento le corresponde un vector de entrada, una matriz y un vector respuesta. Aquellas condiciones de operación inherentes a un equipo (Presión, temperatura, vacío, etc) situado en el elemento intermedio del proceso y que por lo tanto no dependen de los elementos anteriores, se hacen llegar al elemento de interés empleando valores unitarios con los coeficientes correspondientes de las matrices de los elementos por los cuales pasa , sin sustituir ni ejercer ningún efecto.

Los modelos de los elementos que no se ajusten a un comportamiento lineal requerirán un tratamiento diferente en la elaboración del modelo del sistema global, así como la técnica de optimización que se aplique.

Para la obtención de los modelos tecnológicos de los elementos del proceso tecnológico se pueden emplear tanto

los diseños estadísticos de experimentos en etapas bien definidas mediante métodos bien conocidos como son los de PLACKETT- BURMAN/29/, BOX-WILSON/30/, BOX-HUNTER/31/ o mediante una combinación de ellos lo que han sido utilizados con éxito por GONZALEZ SUAREZ/32/ en la modelación de procesos tecnológicos.

Por otro lado, el procedimiento de los datos estadísticos del control operacional según demostró CARDOSO/33/ requiere:

- El estudio de la representatividad y variabilidad de los datos del proceso.
- La caracterización de los factores que inciden en el proceso.
- La determinación del tamaño de la muestra estadística en cada elemento.
- La elaboración del modelo tecnológico de los elementos del proceso, a través de la recuperación de datos estadísticos susceptibles de ser analizados, descartando (eliminando) los datos no confiables y respetando el tamaño de la muestra.

3. Construcción del modelo global del proceso tecnológico partiendo de los modelos de los elementos y asumida la estrategia de modelación elaborada para cada caso, Así tendremos:

Para los modelos lineales de los elementos, con ayuda del método del cálculo matricial, se puede representar el proceso tecnológico como el sistema:

$$[C1] [XC1].C2].....XCK).....XCN)]* + [B1] [U] = 0$$

$$YN = [C2] [XC1), XC2).....XCK)...XCN)] + [B2] [U]$$

Donde [U] es el vector columna de las variables al sistema. [XCK)] es el vector fila de las variables de entrada al elemento

K exceptuando las variables incluidas en el vector U, mientras que [C1], [C2], [B1], [B2] son las matrices de las ecuaciones restringidas.

Cuando los modelos no son lineales, las agregaciones del sistema se realiza en el proceso de optimización con aplicación de la Programación Dinámica.

4. Verificación de la calidad de los modelos globales mediante la comparación de los resultados del modelo con un grupo de corridas experimentales ejecutadas al efecto y las pruebas estadísticas correspondientes.

La determinación de las condiciones óptimas de operación o diseño de una instalación industrial requieren de la elaboración de una función objetivo, siendo lo más usual utilizar el modelo de un indicador económico, lo que permite optimizar este indicador (maximizar la ganancia, minimizar el costo, etc) teniendo como restricciones los para metros que definen la calidad de la producción del azúcar y sus derivados.

Los modelos de los indicadores económicos del proceso se elaboran en función de las variables que inciden en el modelo tecnológico y con ayuda de los balances de materiales y de energía, los estudios cinéticos e incluyendo variables externas del proceso que como la calidad de las materias primas y los parámetros que caracterizan el estado técnico de los equipos, inciden de forma esencial en la eficiencia económica de los procesos tecnológicos.

La obtención de modelos de los indicadores económicos del sistema en función de las mismas variables que inciden en los parámetros de calidad y nivel de producción de azúcar y sus derivados permitan además de los estudios de optimización operacional, determinen el efecto que sobre el proceso tiene el incremento de la calidad de las materias prima.

5.10. Bibliografía

/1/Klaus, G. : "Systeme, Informationen, Strategien". V:E:B.Verlag Technik, Berlin, 1974,142.

/2/ORUZHEV, Z. M. : "La dialéctica como sistema". Editorial de Ciencias Sociales, Ciudad de La Habana, 1974, p.42.

/3/KAFAROV, V. : "Cybernetic Methods in Chemistry and Chemical Engineering" MIR, Moscow 1976, 464-470.

/4/Citado por Oruzhev.

/5/Citado por Oruzhev.

/6/Citado por Oruzhev.

/7/PAVELZING, G. : "Dialekti der Entwiekhnngk Objektiver Systema".Berlin,1970,19.

/8/BEVERIDGE, G. S. G. ; R.S., SCHECHETER, : "Optimization: theory and Practic", New York, McGRAW HILL, 1970, 14 .

/9/RUDD, D.F.: C.C. WATSON: "Strategy of Process Engineering". E.R., La Habana, 1980, 269- 273

/10/KAPLIK, K. ; LORENZ, G. : "Experimentelle Verfahren zur Prozeaanalyse" VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973 .

/11/Buslenko,N.P. : "Modellierung Kompliziertter Systeme",.Verlag Die Wirtschaft, Beerlin, 1972,12.

/12/KOENING, H.F. et al : "Analysis of discrete Physical Systems". McGraw Hill, N.Y.1966, 66

/13/MOISIEYEV, N. : "Los modelos matemáticos en las Ciencias Económicas". Ciencias Sociales. Ciudad de la Habana,1978.13.

/14/Abreu, J. et al : "Modelación dinámica del Tren de Molinos de un Central Azucarero". Centro Azucar., V (1),1978,19-27.

/15/Sevilla, E. P. Friedma: "Modelos matemáticos para predecir la extracción de un tren de molinos". CubaAzúcar, Julio –Septiembre, 1976.

/16/Hernández Clavijo, L. : "Modelo Estadístico para el rendimiento de la caña". Cuba Azúcar,Abril- Junio, La Habana , 1977, 3-10.

/17/Perez de Alejo, H. et al: "Empleo de la simulación digital en el análisis de procesos azucareros". Cuba Azúcar, Enero-Marzo,1978,25-36.

/18/De Armas, C. et al: "Empleo de un modelo de programación Lineal en el balance de materiales de un esquema de fabricación de azúcar" .Investigación de Operaciones (2), mayo- Agosto,1974,Cuba.

/19/González, M.: "Modelación Matemática y Simulación de Esquemas de Calentamiento y evaporación en la industria azucarera". Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), Santa Clara, Cuba.1992.

/20/Castellanos J. : "Análisis de Alternativas del esquema de evaporación, calentamiento y cocción de un central azucarero que entregan energía al SEN y bagazo a una fábrica de papel". Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), Santa Clara, Cuba.1993.

/21/Boizan, M.: "Topología de un Central Azucarero". Editorial Oriente, Santiago de Cuba, 1986.

/22/Pedraza, J. et al. : "Análisis de alternativas de desarrollo de un central azucarero. Uso de la Modelación Topológica. Centro Azúcar, año 20(1), Enero–Abril, 1993, 20-25.

/23/González, V.: "Modelación matemática de un procesos industrial de fabricación de azúcar". Disertación,T.U. magdeburg.1976.

/24/Gómez, L. : "Método para la modelación matemática y optimización del proceso de purificación de Jugos de caña de azúcar". Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas(PhD), Santa Clara, Cuba.1984.

/25/González, E. et al.: "Modelación Matemática del Proceso Tecnológico en el CAI "Pepito Tey". Centro Azúcar. Año 20, (2), Mayo- Agosto, 1993.77-82.

/26/González, E.; Cardodos, G. : "Posibilidades de la Modelación Matemática en la estimación del efecto de las diferentes variedades de caña en el proceso tecnológico". Centro Azúcar. Año 21, (2), Mayo –Agosto, 1994.76-84.Autores. Erenio González, Gladys Cardoso.

/27/Oquendo, H. Alternativas de desarrollo prospectivo de los derivados de la caña de azúcar" . Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas(PhD), Santa Clara, Cuba 2002

/28/De la Cruz, R. Aplicación del análisis de Procesos en la intensificación de la integración del CAI - Destilaría en Melanio Hernández de Sancti Spiritus .Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas(PhD), Santa Clara, Cuba,2003.

/29/PLAKETT, R. L. ; J. P. BURMAN : "The design of optimum Multifactorial Experiments" . Biometrika (33) : 305-325, 1946 .

/30/BOX, G. E. P. ; K. B. WILSON, : "On the Experimental Design Attainment of optimum Condition" Journal Rev. Stat. Soc. (1951) 13 .

/31/BOX, G. E. P. ; T. S. HUNTER, : "The 2^{k-p} Factorial Designs" . Technometric (8): 311- 352, 1961.

/32/González, E. "Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartoncillo". Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), Santa Clara, Cuba,1982.

/33/Cardoso, G. : "Contribución a la modelación estadística de procesos de la industria química". Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas (PhD), Santa Clara, Cuba,1993.

CAPITULO VI

FUNDAMENTACIÓN Y AVANCES DE LA ESTRATEGIA INVESTIGATIVA PARA EL ESCALADO INDUSTRIAL DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE ETANOL CON BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

De Armas Martínez Ana Celia
González Morales Víctor Manuel
González Suárez Erenio
Mesa Garriga Layanis
Gómez Carlos René

6.1. Resumen

En el trabajo se conceptualizan los aspectos claves y se presenta la propuesta de un procedimiento para el escalado a nivel industrial, con ayuda de una Planta Piloto, de una tecnología para la obtención de etanol y coproductos en el concepto de biorefinería de bagazo de caña de azúcar.

Acorde con el procedimiento propuesto se determinan mediante la vigilancia tecnológica los requerimientos para el escalado industrial de una nueva tecnología para la obtención de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar y se ejecutan y validan los pasos del procedimiento de escalado, de una nueva tecnología de lignocelulósicos, que anteceden y preparan los estudios a nivel de Planta Piloto de una tecnología de producción de etanol de bagazo caña de azúcar.

6.2. Desarrollo

La planta continua a escala laboratorio (miniplanta) se diseña, se establece y se pone a funcionar. Su concepción es una planta pequeña pero completa con todos los reciclados, interrelaciones y maneja cantidades entre 100 g/h, contiene la reacción de síntesis y todo lo demás.

Confirmado el concepto de proceso en la miniplanta de laboratorio, el próximo paso es diseñar y establecer una planta de ensayo de mayor capacidad, su tamaño se enmarca entre escala de laboratorio y escala industrial. La capacidad de operación de esta planta piloto (unas pocas ton/año) hace posible completar y verificar la información de datos obtenidos a escala Laboratorio. El factor de escalado de una etapa a la otra está siempre limitada por el principio de mínimo o sea: la etapa de proceso o el equipo de menor factor de escala determinan la capacidad máxima de la próxima instalación y cuyas condiciones de performance puedan ser calculadas. Es aquí donde el ingeniero de procesos puede ahorrar dinero y tiempo.

La tarea más importante es encontrar los puntos débiles y someterlos a un análisis específico para ser mejorados y así con el proceso completo tantas veces como se requiera. El problema es que muchas decisiones pueden ser tomadas de forma incompleta por su conocimiento, pero esto es inevitable. Un desarrollo sin incertidumbre es tan errado como comenzar una planta industrial solo con los resultados del laboratorio.

Se deben valorar tantas posibilidades como sea posible en una etapa preliminar, de forma tal, que un gran número de ellas queden restringidas al laboratorio. Investigaciones de variantes a nivel de planta de ensayo deben evitarse por costo y tiempo.

Se cometen algunos errores al principio, pero eliminarlos es barato y rápido en una variante. Estos errores no deben ser ya en escalas mayores pues serían costosos y difíciles de eliminar. Una planta piloto puede ser necesaria por el riesgo de escalado para llevar directo de una miniplanta a otra de escala industrial. Esto puede ser debido a:

- El proceso presenta diversas etapas críticas que no pueden describirse por modelos físicos.
- Se está desarrollando una nueva tecnología, por su dificultad y por que sea completa.

Tareas a ejecutar en las plantas pilotos son:

1. Chequeo de cálculos de diseño.
2. Solución de problemas de escalado.

3. Chequeo de resultados experimentales obtenidos en la miniplanta.
4. Medida de los perfiles de temperatura en el reactor y en las columnas bajo condiciones adiabáticas.
5. Ganar el Know-How del proceso.
6. Producción de cantidades representativas de productos para muestras.
7. Entrenamiento de personal.
8. Precisión de fallos de acceso de pequeños flujos.
9. Mejoras de los estimados de vida de servicio.
10. Ensayo de materiales bajo condiciones reales.
11. Evaluar económicamente el proceso.

Construir y operar una planta piloto es una decisión muy costosa que puede representar el 10% del valor de la planta comercial. Además si se trabaja con sustancias tóxicas, generalmente se demora más en ponerla a funcionar.

De acuerdo con lo anterior se propone el siguiente diagrama heurístico para el escalado de los resultados desde la escala de Laboratorio hasta la escala de Planta Industrial considerando el uso de una instalación de tamaño intermedio llamada Planta Piloto, ver figura 6.1.

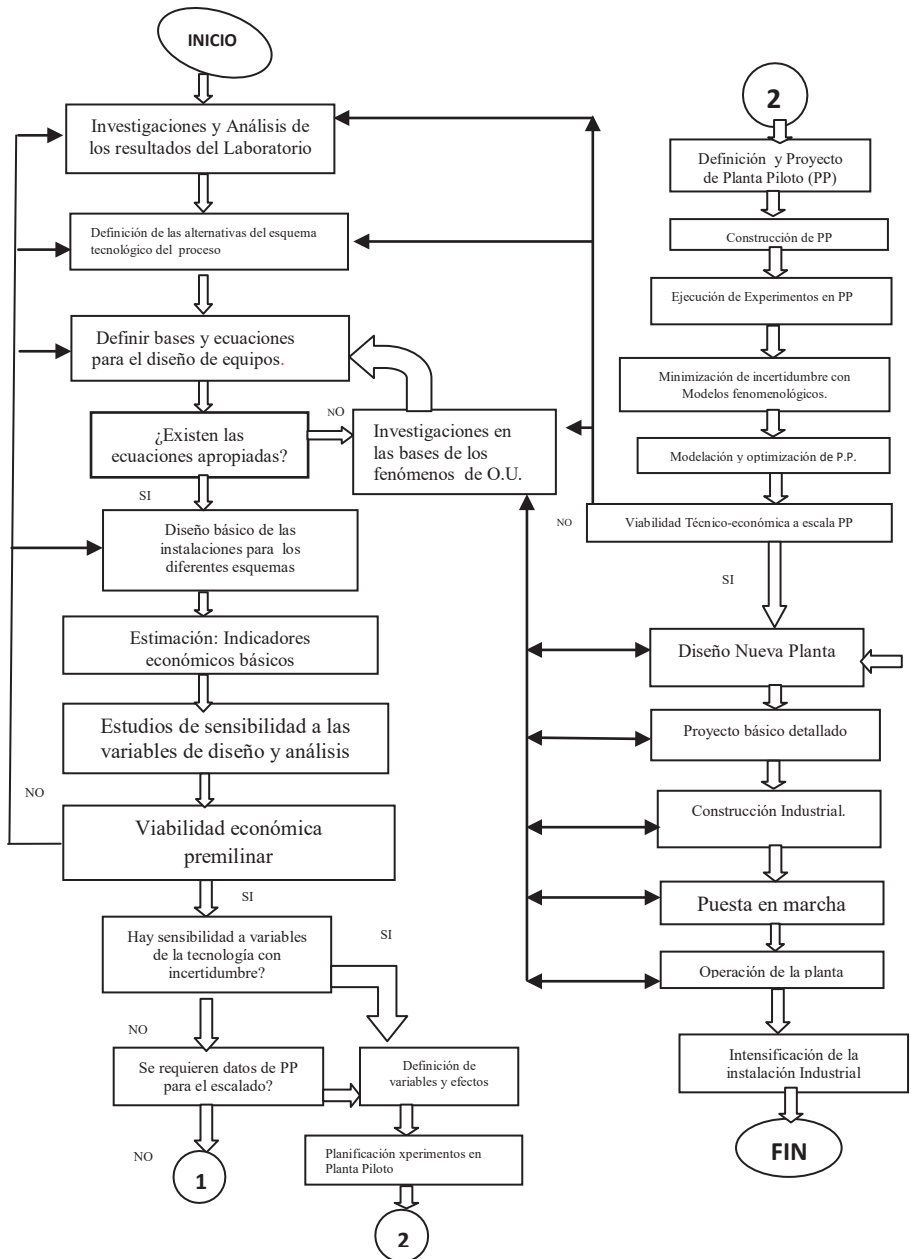


Figura 6.1. Diagrama heurístico para el escalado desde escala laboratorio hasta planta industrial. **Fuente:** elaboración propia (2018)

6.3. Definición del Esquema Tecnológico

Según las tecnologías existentes para la obtención de bioetanol, reportadas en la literatura, por diferentes autores y con los estudios anteriores reportados por Mesa et al., (2009) se llegó a definir un esquema tecnológico.

Este esquema de **pretratamiento** consta de dos etapas de fraccionamiento, ellas son:

- En **la primer etapa**, cuando se obtiene xilosa como producto para la obtención de etanol, la biomasa se somete a la acción de una solución de ácido sulfúrico al 1% v/v en presencia de vapor a 120°C y una relación sólido-líquido de 1:4 k:L. Cuando la primera etapa está dirigida a la obtención de furfural, la temperatura es 175°C, la concentración de ácido sulfúrico es 1% en masa en base a la fibra seca y la relación sólido-líquido es de 1:1 Kg:L. El tiempo de residencia de ambas alternativas es 40 minutos. Esta etapa presenta **6 variantes tecnológicas**, ellas son:
 - 1: Sacarificación y Fermentación Separadas a 120°C
 - 2: Presacarificación y Fermentación a 120°C
 - 3: Sacarificación y Fermentación Simultaneas a 120°C
 - 4: Sacarificación y fermentación Separadas a 175°C
 - 5: Presacarificación y Fermentación a 175°C
 - 6: Sacarificación y Fermentación Simultaneas con primera etapa a 175°C
- En **la segunda etapa**, el sólido resultante de cada alternativa se trata con una solución de hidróxido de sodio y etanol al 5% masa en base a fibra seca y 30 % v/v respectivamente, también con vapor a 185°C. La relación sólido-líquido es 1:7 Kg:L y el tiempo de residencia de la segunda etapa de pretratamiento es 60 minutos considerando tiempos de carga y descarga de 20 minutos para cada variante.
- Luego del pretratamiento en dos etapas, la biomasa se somete a la **acción de las celulasas** por 24 a 36 horas, se

obtiene una solución de azúcares listos para fermentar con levaduras *S. Cerevisiae*.

Esta operación se puede realizar de 3 formas diferentes:

1. Sacarificación y Fermentación separadas
2. Presacarificación y Fermentación
3. Sacarificación y Fermentación Simultáneas

- **Destilación:** derivado del proceso anterior se obtiene un fermento con el grado alcohólico necesario para ser destilado en una columna.

6.4. Definición de las bases y ecuaciones para el diseño de los equipos

De acuerdo a las características peculiares de cada etapa básica, la producción de bioetanol y sus coproductos, se llevaron a cabo en una planta en proceso semicontinuo.

La **Capacidad de producción** fue de 100 L etanol/día, operando 8 h/día, durante 5 días/semana, durante 300 días/año.

Para cada una de las 6 variantes tecnológicas se calcularon los balances de materiales y energía y se seleccionó el equipamiento adecuado según lo reportado por Mesa et al., (2009).

Los principales equipos se muestran a continuación:

1. Sistema de manipulación de bagazo de alimentación.
2. Bomba de dosificación de ácido sulfúrico.
3. Digestores (reactores) para la reacción ácida de separación de los pentosanos, con inyección de vapor.
4. Sistema de recuperación y condensación de los componentes de interés económico de los vapores de la primera etapa (al menos etanol).
5. Conductor de residuo lignocelulósico de primera etapa y prensa de tipo tornillo de separación y conducción hasta segunda etapa.
6. Bomba de dosificación de hidróxido de sodio.
7. Bomba de alimentación de agua para ajuste de hidromódulo y sistema de lavado de sólidos pretratados.
8. Bomba de alimentación de agua de enfriamiento.

9. Bomba de alimentación de agua para recirculación de corrientes acuosas en el proceso.
10. Digestores (reactores) para la reacción básica de separación de la lignina con inyección de vapor.
11. Sistema de recuperación y condensación de los componentes de interés económico de los vapores de la segunda etapa (al menos etanol).
12. Conductor de residuo lignocelulósico de segunda etapa y prensa de tipo tornillo de separación y conducción hasta etapa de hidrolizado.
13. Tanque de almacenamiento de aguas de lavado de la segunda etapa.
14. Equipos de la etapa de hidrólisis enzimática.
15. Sistema de manipulación de sólidos de desecho de la hidrólisis enzimática;
16. Tanque de almacenamiento de jarabe producto de la sacarificación.
17. Equipos de evaporación y concentración de los jarabes;
18. Sistema de condensado de los vapores de la etapa de concentración de los jarabes.
19. Etapa de fermentación alcohólica.
20. Etapa de destilación.

Resultados del Balance de masa para la 1er etapa del pretratamiento, ver la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Pretratamiento 1 y 2: balance de masa para la 1ra variante tecnológica

Materiales	PRETRATAMIENTO 1					PRETRATAMIENTO 2				
	B I	Acido	Agua	L P1	M C1	Etanol	NaOH	Agua	L P2	M C2
Glucosa	164,1			10,5	153,6				14,2	139,3
Xilosa	103,8			80,3	23,5				8,9	14,6
Lignina	64,8			0,6	64,2				20,3	43,9
Agua	17,3		1400	854,2	563,1			609,7		
Acido		3,5								
Etanol						642,1				
NaOH							12,1			
Total	350,0	3,5	1400	945,6	804,4	642,1	12,1	609,7	43,4	197,9

Kg/día	H E		EVAPOR, GLU		FERM GLU		FERM PENT		DESTILACION			
	Lic Az	Des S	Ag Ev	Licor	CO2	Licor	CO2	Licor	F	Vapor	D	W
Glucosa	101,8	37,6		101,8								
Xilosa	10,9	3,7		10,9								
Lignina	0,0	43,9										
Agua	2088,9	85,9	1353,5	735,5		756,6		608,3	1364,9		4,1	1878,4
Vapor										517,6		
Etanol						46,7		31,0	77,7		77,6	0,0
CO2					44,9		29,7					
Total	2201,6	171,1	1353,5	848,2	44,9	803,3	29,7	639,2	1442,5	517,6	81,7	1878,4

Fuente: elaboración propia (2018)

La diferencia entre las variantes restantes está dada fundamentalmente por el rendimiento de etanol por Kg de bagazo, calculado previamente en el laboratorio y reportados por Mesa et al., (2009).

El dimensionamiento de los equipos se realizó tomando como base las ecuaciones de diseño de cada uno de ellos, ver tabla 6.2.

Tabla 6.2. Etapas, materiales y métodos de cálculo

ETAPAS	MATERIALES	MÉTODOS de CALCULO
PRETRATAMIENTO 1	REACTOR 1	Ecuaciones de volumen de un cilindro con fondo cónico. Considerando tiempo de residencia. (Levenspiel, 1974)
	CONDENSADOR de los vapores Reactor 1	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)
	PRENSA lavadora	Ecuaciones de diseño mecánico.
PRETRATAMIENTO 2	REACTOR 2	Ecuaciones de volumen de un cilindro con fondo cónico. Considerando tiempo de residencia. (Levenspiel, 1974)
	CONDENSADOR de los vapores Reactor 2	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)
	Prensa Lavadora	Ecuaciones de diseño

		mecánico.
HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA	REACTOR hidrólisis enzimática	Ecuaciones de volumen de un cilindro horizontal. Considerando tiempo de residencia.
EVAPORACIÓN	EVAPORADOR de doble efecto	Metodología de cálculo para evaporadores de doble efecto. (Kern, 1999), (Kasatkin, 1971), (McCabe, 1991)
FERMENTACIÓN	FERMENTADORES	Ecuaciones de volumen de un cilindro. Considerando tiempo de residencia. García A, Rico I
DESTILACIÓN	COLUMNA empacadas con anillos Raching	Metodología de Mc Thiele para las etapas teóricas. (Treybal, 1986), (McCabe, 1991), (Pavlov, 1980)
	CONDENSADOR de etanol	Metodología de cálculo de condensadores de tubos y coraza. (Kern, 1999)

Fuente: elaboración propia (2018)

Con los estimados de costo reportados por Peters and Timmerhaus, (1991) y los resultados del diseño y del balance de materiales se calcularon los costos inversionistas y los costos totales de producción. Los principales resultados se muestran en la siguiente tabla 6.3.

Tabla 6.3. Estimados de los indicadores económicos básicos

	Bagazo Kg/día	Furfural Kg/día	Capital Invertido, \$ 10 ⁶	CTP, \$/año	Costo Enzima, \$/año	Costo Bagazo, \$/año	Costo Vapor, \$/año	Costo etanol \$/L	Costo etanol \$/kg
1	350,00	no	1,531	269299,2	3982,66	2205,00	4823,2	8,98	14,41
2	284,00	no	1,103	191873,5	3231,65	1789,20	1667,3	6,40	12,35
3	382,00	no	1,319	230771,5	4346,79	2406,60	1889,1	7,69	14,76
4	538,00	62,09	1,849	331406,3	6405,90	3389,40	5488,1	11,05	7,94
5	560,00	95,86	1,479	264576,1	6667,85	3528,00	1292,3	8,82	6,82
6	589,00	100,82	1,521	272582,2	7013,15	3710,70	1307,0	9,09	6,81

A pesar de que los resultados en los indicadores económicos son desfavorables por estar evaluando la tecnología a escala Piloto, este tipo de análisis nos indica cual de las 6 alternativas presenta mejores resultados y así poder discriminar posibles análisis futuros.

6.5. Análisis de sensibilidad

La tabla 6.1 y 6.2 nos permite observar la sensibilidad a los cambios de precio e insumo de varios factores: al precio de las enzimas, al precio del bagazo, al precio del vapor, al precio del furfural, tiempo de reacción en el pretratamiento 1, tiempo de reacción en el pretratamiento 2, el tiempo de reacción en la hidrólisis enzimática y la densidad en la hidrólisis enzimática.

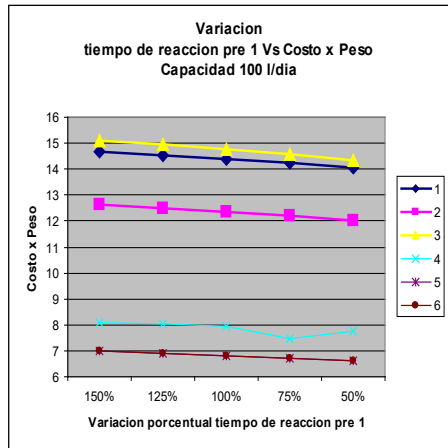
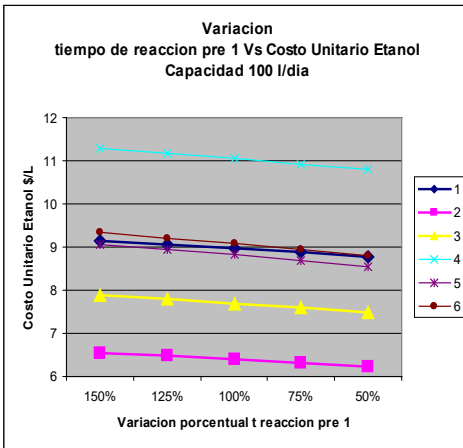


Gráfico 6.1. Variación tiempo de pretratamiento 1 vs. costos \$/L y \$/kg, para 100 L/día

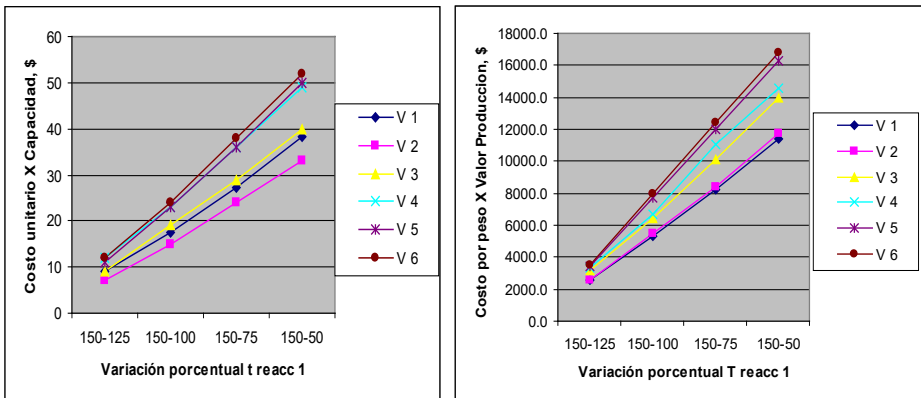


Gráfico 6.2. Costos unitario/capacidad y Costo/producción vs. Variación tiempo de reacción

En el gráfico 6.1. la variación del tiempo de reacción en la etapa de fraccionamiento 1, en valores de tiempo desde 50 % hasta 150 % su valor original, origina variaciones del costo unitario de etanol entre 0,5 y 1 \$/litros aproximadamente, lo que se pudiera interpretar como que este es un factor poco sensible a los indicadores económicos. Es por ello que se hizo necesario otro tipo de análisis que pudiera mostrar la variación real de cada una de las variables estudiadas.

El gráfico 6.2. nos muestra que la variación del tiempo de reacción (fraccionam.1) entre 50 y 150 % puede reportar variaciones en el valor de la producción de etanol entre 20 y 40 \$/dia y que la variación del tiempo de reacción en el fraccionamiento 1 entre 50 y 150 % puede reportar variaciones en el valor de la producción total entre 10 000 y 14 000 \$/año.

En la siguiente tabla 6.4. se muestran los resultados del análisis de sensibilidad para el resto de las variables analizadas.

Tabla 6.4. Resultados del análisis de sensibilidad para el resto de las variables

VARIABLES	VARIACIÓN			
	Costo \$/litro	Costo \$/peso	Etanol Producción \$/día	Etanol Producción \$/año
Tiempo de reacción fraccionamiento1	0,5-1	0,5-1	20-40	10 000-14 000
Tiempo de reacción fraccionamiento2	1,2-1,5	1,3- 1,5	80- 110	30 000-40 000
Tiempo de reacción hidrólisis enzimática	1,1- 2,1	1-2	60-130	20 000-40 000
Densidad del hidrolizado	3,5- 6,5	2-5	250-500	30 000-70 000
Precio de las enzimas	no varia		15-35	3 000-7 000
Precio del bagazo	no varia	no varia	10-16	200-500
Precio de venta del Furfural	-	5- 6	-	120 000-130 000
Precio de venta de la lignina	-	0,1- 0,5	-	3 000-7 000
Precio de venta del sólido residual	-	0,6 -1,8	-	20 000-27 000

Fuente: elaboración propia (2018)

Lo que se puede inferir que bajo las condiciones y consideraciones tomadas en este estudio, las variables que mayor incidencia tienen sobre los indicadores económicos son: el precio de venta del furfural, densidad del hidrolizado, el tiempo de reacción en el fraccionamiento 2, tiempo de reacción de la hidrólisis enzimática y el tiempo de reacción del fraccionamiento 1.

6.6. Cálculo de las condiciones óptimas

Como se ha dicho por Pedraza y González (2005), los estudios de sensibilidad brindan una visión incompleta del efecto de la incertidumbre en la evaluación de una alternativa de inversión, por ello se consideró la evaluación del efecto una combinación de las variables a las cuales existe sensibilidad en la mejor variante (PRESAC) y se determinaron las condiciones óptimas.

Combinaciones derivadas del diseño 3^2 para la alternativa que incluye la obtención de etanol a partir de la xilosa se muestran en la siguiente tabla 6.5.

Tabla 6.5. Combinaciones derivadas del diseño 3^2 para la alternativa que incluye la obtención de etanol a partir de la xilosa

Nº	Tiempo total del proceso (X1)	Carga enzimática UPF/g sustrato (X2)	COSTO unitario \$/L	COSTO unitario \$/peso	PRD año	GANANCIA 10^6 USD/año
1	30	10	0.50	0.55	8	6.78
2	30	20	0.47	0.53	7	7.36
3	30	30	0.44	0.52	6.5	7.95
4	32	10	0.49	0.54	7.7	6.97
5	32	20	0.46	0.53	7	7.55
6	32	30	0.43	0.51	6.5	8.13
7	34	10	0.48	0.54	7.6	7.15
8	34	20	0.45	0.52	7	7.74
9	34	30	0.43	0.51	6.4	8.32

Fuente: elaboración propia (2018)

$$\text{CostoUnitario, } \$/L = 0.449 - 0.0083X_1 - 0.028X_2 + 0.00167X_1^2 + 0.0025X_1X_2 + 0.00167X_2^2$$

$$\text{PRD, años} = 6.489 - 0.0833X_1 - 0.65X_2 + 0.016667X_1^2 + 0.075X_1X_2 + 0.1166X_2^2$$

$$\text{Ganacia, \$} = 7.55 + 0.1867X_1 + 0.5833X_2$$

Según las ecuaciones obtenidas es adecuado determinar los valores óptimos de los costos de 1 L de etanol, donde se obtiene un mínimo para: **tiempo = 1.34196 (34.68 horas) y E = 1.51357 (35.13 UPF/g sustrato)**, los que son valores fuera de la región experimental estudiada, pero cercanos a ella y que permitirían hipotéticamente un **costo mínimo de 0.4067**, inferior en 0.013 (3.196 %) al mínimo que se alcanza en los extremos de la región experimental con los estimados del modelo que serían de 0.4180 para valores de $X_1=1$ y $X_2=1$.

Un análisis similar se realizó pero incluyendo la obtención de furfural a partir de la fracción de xilosa los resultados se muestran en la siguiente tabla 6.6.

Tabla 6.6. Combinaciones derivadas del diseño 3^2 para la alternativa que incluye la obtención de etanol a partir de la xilosa

Nº	Tiempo total de proceso (X1)	Carga enzimática UPF/g de sustrato (X2)	COSTO unitario \$/L	COSTO unitario \$/Peso	PRD año	GANANCIA 10^6 USD/año
1	30	10	0.50	0.55	8	6.78
2	30	20	0.47	0.53	7	7.36
3	30	30	0.44	0.52	6.5	7.95
4	32	10	0.49	0.54	7.7	6.97
5	32	20	0.46	0.53	7	7.55
6	32	30	0.43	0.51	6.5	8.13
7	34	10	0.48	0.54	7.6	7.15
8	34	20	0.45	0.52	7	7.74
9	34	30	0.43	0.51	6.4	8.32

se incluyó la obtención de furfural a partir de la fracción de xilosa

$$\text{CostoUnitario, } \$/\text{litro} = 0.75889 - 0.03167X_1 - 0.08833X_2 + 0.001667X_1^2 + 0.0075X_1X_2 + 0.01167X_2^2$$

$$\text{PRD, años} = 2.544 + 0.0333X_1 - 0.1667X_2 + 0.03333X_1^2 + 0.025X_1X_2 + 0.0333X_2^2$$

$$\text{Ganacia, \$} = 15.44 + 0.25X_1 + 0.8X_2 - 0.0033X_1^2 + 0.0033X_2^2$$

Según las ecuaciones obtenidas es adecuado determinar los valores óptimos del Periodo de Recuperación de la Inversión (PRD), donde se obtiene un mínimo para: **tiempo = - 1.675686 (28.66 horas)** y **E=3.13203 (51.3 UPF/g sustrato)**, los que son valores fuera de la región experimental, y relativamente lejanos a ella, sobre todo en lo referente a la carga enzimática que aunque permitirían hipotéticamente un PRD mínimo de **2.2511** inferior al también estimado por el modelo como mejor dentro de la región experimental de 2.3816 en 0.1305 (5.48 %) requeriría una costosa verificación por el alto consumo de enzimas. De acuerdo con estos resultados se podrían alcanzar mejoras en el PRD y ganancia a partir de verificar fuera de la región experimental el comportamiento de los

modelos, pero sin que esto implique grandes saltos en la ganancia, ni seguras mejoras en el PRD, que ya con el valor alcanzado justifican las inversiones estimadas.

6.7. Conclusiones

1. Los estudios experimentales a nivel de laboratorio son la base fundamental para el estudio y desarrollo de las propuestas tecnológicas y su escalado a nivel de Planta Piloto.
2. De las variantes tecnológicas propuestas la de mejores resultados técnico- económicas resultó ser la PreSac, bajo las condiciones estudiadas.
3. Se pueden determinar las variables de mayor incidencia en los indicadores económicos estudiados con los resultados obtenidos en el laboratorio, el uso sistemático de la simulación a través del Excel y una adecuada selección y diseño de los equipos,
4. La factibilidad económica en la producción de etanol de residuos lignocelulósicos solo es posible mediante la obtención de coproductos de alto valor agregado.
5. El procedimiento propuesto permite guiar la investigación científica de escalado de forma constante y decidir las mejores alternativas para lograr un diseño de una instalación industrial.
6. Los datos de propiedades de los fluidos que requieren su evaluación a nivel de Planta Piloto no están disponibles en la literatura.

6.8. Bibliografía

1. KASATKIN, A. G. (1971) Operaciones Básicas y Aparatos en la tecnología química.
2. KERN, D. Q. (1999) Procesos de transferencia de calor.
3. LEVENSPIEL, O. (1974) Ingeniería de las reacciones químicas. 359-381, 395-441.
4. MCCABE, W. (1991) Operaciones unitarias en ingeniería química. IN MCGRAW-HILL (Ed.) Cuarta edición ed.
5. MESA, L., GONZÁLEZ, E., ZAMORA, M. M., GALIANO, E. C., CARA, C. & KAFAROV, V. (2009) Economic Evaluation of pretreatment

alternatives for ethanol production from sugar cane bagasse. 17th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets. Hamburgo, Alemania.

6. PAVLOV, K. F. (1980) Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química.
7. PEDRAZA, J. & GONZÁLEZ, E. (2005) Consideración de la incertidumbre en los parámetros de diseño de los equipos.), en: González, E. (Editor).:Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica.
8. PETERS, M. S. & TIMMERHAUS, K. D. (1991) Plant design and economics for chemical engineers. IN MCGRAW-HILL, I. (Ed.) Fourth Edition ed.
9. TREYBAL, R. E. (1986) Operaciones con transferencia de masa.

Nuestro aporte está en el contenido de este libro:

Estrategia para minimizar el impacto ambiental a través del análisis y la integración de procesos. El riesgo y la incertidumbre en la evaluación de inversiones en plantas de la ruta alcohólica integrada a un complejo agroindustrial azucarero. El análisis de procesos en la solución de los problemas ambientales en la producción de bioetanol. La modelación y simulación de procesos y sus aplicaciones en la industria azucarera. Fundamentación y avances de la estrategia investigativa para el escalado industrial de una nueva tecnología de obtención de etanol con bagazo de caña de azúcar.

