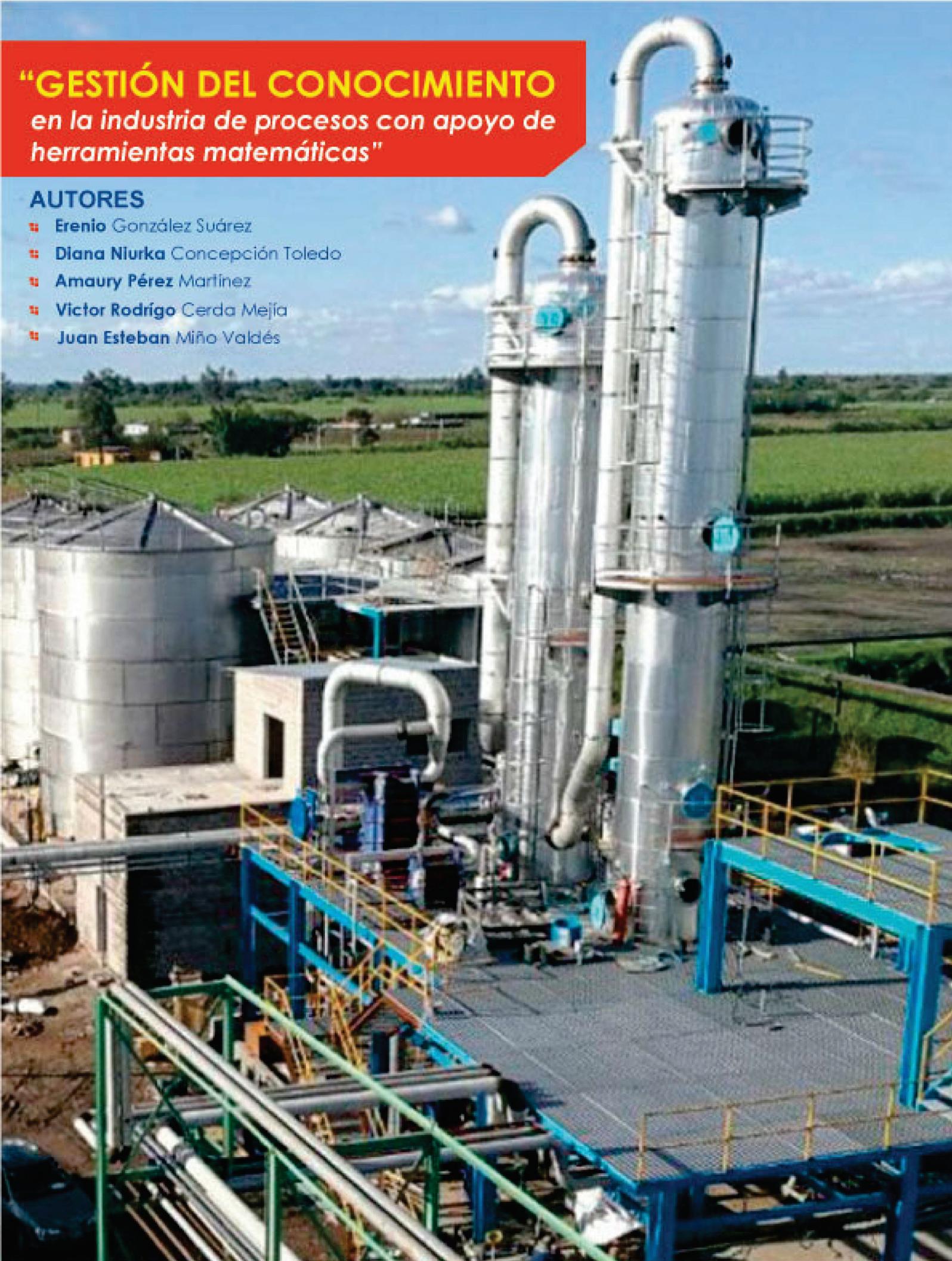


# **"GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO** *en la industria de procesos con apoyo de herramientas matemáticas"*

## **AUTORES**

- **Erenio** González Suárez
- **Diana** Nlurka Concepción Toledo
- **Amaury** Pérez Martínez
- **Victor** Rodrigo Cerda Mejía
- **Juan** Esteban Miño Valdés



**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

Primera edición impresa: Febrero 2021 en Ecuador

González Suárez Erenio, Pérez Martínez Amaury, Concepción Toledo Diana Niurka  
Cerdeña Mejía Víctor Rodrigo, Miño Valdés Juan Esteban  
Gestión del conocimiento en la industria de procesos con apoyo de herramientas  
matemáticas. - 1a edición especial - Registrada en Sta. Clara 2020, Cuba.  
140 p. ; 29,7 x 21 cm.

ISBN 978-959-312-437-9

1. Industria Química.

Libro revisado a ciegas y aprobado por:

Dr Ing Jorge Manuel Ríos Obregón, Universidad Regional Amazónica (IKIAM), Ecuador

Dr Ing Walter Francisco Quezada Moreno, Universidad de Guayaquil, Ecuador

Edición impresa en febrero 2021

Imprenta **CREAIMAGEN Comunicación Visual**

Guayaquil 0325 y Sucre, Ambato Ecuador

Email: creaimagen@gmail.com

Tel.: 00593 32828656, Cel.: 00593 99880372

**ISBN 978-959-312-437-9**

Editorial Samuel Feijóo, diagramación y diseño

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas

CP 54830, Carretera a Camajuaní km 5,5

Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

**Gestión del conocimiento en la industria de  
procesos  
con apoyo de herramientas matemáticas**

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA  
UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS - CUBA



## ACERCA DE LOS AUTORES

**Concepción Toledo Diana Niurka**, (dianac@uclv.edu.cu)

Licenciada en Educación

MSc. en Gerencia de Ciencia e Innovación

Dra. en Ciencias de la Educación

Profesora Auxiliar e Investigadora del Dpto. de Filosofía Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba.

**González Suárez Erenio**, (erenio@uclv.edu.cu)

Ingeniero Químico

Dr. en Ciencias Técnicas y Dr. en Ciencias

PosDr. en Gestión Ambiental y Seguridad Industrial

Profesor Titular e Investigador del Dpto. de Ingeniería Química

Facultad de Química y Farmacia

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Profesor Emérito de la UCLV

Miembro de Mérito de la Academia de Ciencias de Cuba

Premio Nacional de Ingeniería Química 2013 de la Asociación de Química de Cuba

**Pérez Martínez Amaury**, (amperez@uea.edu.ec) y (aperezmartinez2009@gmail.com)

Ingeniero Químico

Doctor en Ciencias Técnicas

Máster en Análisis de Procesos

Profesor Titular e Investigador agregado Nivel 3, en la Carrera de Ingeniería Agroindustrial,

Facultad de Ciencias de la Tierra en la Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.

Profesor Titular e Investigador en el Dpto de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Aplicadas, en la Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Camagüey. Cuba.

**Cerda Mejía Víctor Rodrigo**, (vcerda@uea.edu.ec) y (rodrigo.cerda0@gmail.com)

Ingeniero en Alimentos

MSc. en Docencia Matemática

Aspirante a Doctor en Ciencias Técnicas en la especialidad de Ingeniería Química de la Universidad Central "Marta Abreu" De Las Villas, Santa Clara - Cuba.

Profesor Titular de la Carrera Agroindustria de la Facultad de Ciencias de la Tierra en la Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.

**Miño Valdés Juan Esteban** (minio@fio.unam.edu.ar)

Ingeniero Químico y Laboratorista Químico Industrial

Especialista en Gestión de Producción y Ambiente

MSc. en Tecnología de los Alimentos

Master's degree in Chemical Engineering

Dr. en Ciencias Técnicas y 5 Pasantías PostDr. en desarrollo de la Industria Química

Profesor Titular Regular e Investigador Categoría II

Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Argentina

Jefe Editor de la Revista Científica +INGENIO de la FI – UNaM, Argentina.



## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN LA PROYECCIÓN CIENTÍFICA DE LA INDUSTRIA QUÍMICA Y FERMENTATIVA .....	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Los problemas de incertidumbre en la innovación tecnológica en la industria química y fermentativa. ....	5
1.3. El Análisis y Desarrollo de procesos y con ello los métodos matemáticos en el progreso de la Industria Química y fermentativa. ....	8
1.4. Conclusiones. ....	12
1.5. Referencias bibliográficas .....	13
CAPÍTULO II.....	15
PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS Y FERMENTATIVOS EN LA GESTIÓN DE CONOCIMIENTOS .....	15
2.1. Introducción.....	15
2.2. Conceptos básicos:.....	16
2.3. Selección del modelo. ....	21
2.4. Experimento Factorial .....	24
2.5. Métodos de cálculo y ajuste de los modelos. ....	36
2.6. Diseño factorial fraccionado. ....	40
2.8. Diseños Factoriales parciales saturados.....	46
2.9. Decisiones a partir del modelo obtenido. ....	51
2.10. Movimiento a lo largo de la superficie de respuesta mediante el paso ascendente .....	53
2.11. Decisiones después del desarrollo del acercamiento a la región de las condiciones óptimas con ayuda de los métodos de asenso acelerado .....	54
2.12. Diseños multiniveles (niveles > 2) .....	55
2.13. Combinación de ensayos experimentales.....	58
2.14. Diseños Experimentales de Mezclas. ....	63
2.15. Referencias bibliográficas .....	79
CAPÍTULO III.....	83
MODELACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS AGROINDUSTRIALES EN LA GESTIÓN DE CONOCIMIENTOS. .....	83
3.1. Introducción.....	83
3.2. Tareas y fines de la modelación. ....	83
3.3. Aplicación de modelos en la Industria de procesos químicos y fermentativos.....	84
3.4. Aplicaciones de la modelación matemática de procesos globales y etapas de la industria azucarera. ....	88
3.5 Aplicación de métodos matemáticos que desde el diseño de procesos garanticen la calidad en industrias de procesos.....	125
3.6 Referencias Bibliográficas .....	133



## **Introducción**

Los procesos de la industria química y fermentativa tienen como objetivo fundamental lograr productos de alto valor agregado. Con este propósito se utilizan materias primas fundamentales, productos químicos auxiliares, recursos energéticos, fuerza de trabajo e instalaciones de procesos industriales que han requerido un costo de adquisición y gastos de inversión, de manera que los recursos financieros, son requisito indispensable para lograr los objetivos primarios de estas industrias. Además, como se conoce ampliamente, este sector es fuente de residuos de agresividad al medio ambiente y la minimización de este efecto debe considerarse.

El mundo moderno exige de los dirigentes industriales, el empleo de ideas nuevas para incrementar al máximo la eficiencia en la utilización de los recursos. Se comprende que cualquier alternativa que tienda a reducir gastos en la industria es hoy una fuerza que actúa positivamente sobre la eficiencia económica.

En la actualidad, la economía representa un sistema extraordinariamente complejo, formado por una multitud de eslabones, que ejercen funciones diferentes, influyen directa e indirectamente unos en los otros, y con ello, en la dirección de toda la economía y de sus eslabones individuales. Se hace cada vez más difícil, dada la variedad de posibles decisiones de producción que se toman en los diferentes niveles, en esta era de internacionalización del conocimiento, y ya desde el pasado siglo, la mayor eficiencia del trabajo y la rentabilidad máxima de la producción son consecuencia de soluciones científicas de nuevo tipo, adquiriendo particular importancia las cuestiones de la búsqueda científica de decisiones óptimas para diferentes situaciones económicas.

Cualquier idea novedosa requiere de un proceso de experimentación, para determinar las tendencias reales de comportamiento en la práctica tecnológica. Desde la concepción de la idea hasta su introducción y adaptación a las condiciones del mundo productivo real, se requiere transitar diversos pasos que incluyen el escalado de las tecnologías hasta el nivel industrial, lo que implica varias etapas y la obtención de información de variables químico físicas requeridas para el diseño industrial.

Estos procesos requieren gastos por concepto de recursos materiales, financieros de equipamiento y de tiempo, esta última es quizás la menos considerada, pero la más importante, pues como se ha dicho, el tiempo es el único recurso que no se recupera y constituye lo más preciado de que disponen aquellos que solo tienen su talento como recurso.

Para impulsar las economías nacionales en los momentos que corren, no solo se dispone de mucho tiempo, sino que también no podemos perderlo, por lo que se impone viabilizar las rutas requeridas para alcanzar las decisiones óptimas en las nuevas decisiones tecnológicas, que se transfieran a los sectores económicos de cada país como demanda concreta de la industria química y fermentativa.

Solo con esta impronta la ciencia se podrá convertir en una fuerza productiva más para incentivar el desarrollo científico y tecnológico. La idea de cómo alcanzar este propósito, descansa en concebir el núcleo básico de la metodología de investigación, las herramientas disponibles y su combinación para alcanzar en el menor tiempo posible, propuestas viables en el contexto de la industria de procesos químicos y fermentativos, pues sin respuestas rápidas y seguras no existirá una transferencia de conocimientos efectiva desde los centros donde se genera hasta su aplicación, resaltando en este sentido el necesario vínculo entre la universidad y el sector empresarial.

Hacia estos objetivos debemos encaminar nuestros esfuerzos que parten desde la formación de los educandos y ¿por qué no?, de nosotros mismos. Contribuir a ello, es la razón de este libro.

Los autores

## CAPÍTULO I

### La gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química y fermentativa

#### 1.1. Introducción.

Los procesos tecnológicos asociados a la industria química tienen como característica un impacto al medio ambiente, lo que en muchos casos ha sido un factor que ha frenado el desarrollo de estas y con ello las demandas de conocimientos científicos inmediatos, por lo que se le exige cada vez más al sector de generación de conocimientos una verdadera proyección en la búsqueda de tecnologías compatibles con el medio.

Como parte de las estrategias para la actividad científica y tecnológica en estas industrias, es importante tener en cuenta que todo el sistema de investigación, aplicación y difusión de los resultados que en ellas se obtengan, constituyen un proceso social en el que inciden no solo los aspectos técnicos, económicos y financieros sino que en igual medida, se toman en consideración las demandas y necesidades y los posibles impactos de la aplicación de cada uno de los resultados que se derivan de esta práctica científica.

Este aspecto se evidencia durante la etapa de desarrollo tecnológico, la que puede definirse como el proceso que, al tomar como base los trabajos de investigación, desarrollo e ingeniería, al interactuar con ellos y tener en consideración la necesidad social, así como las demandas actuales y potenciales de mercado, sirven de base para mostrar las posibilidades de aplicación práctica y económica de estos conocimientos, que facilitan la información requerida para los proyectos y diseños de ingeniería.

Los resultados del trabajo de desarrollo tecnológico para ser llevados a escala industrial deben tomar en consideración e igualmente ser avalados por las etapas de ingeniería de proyectos y de diseño del producto.

Aquí se combinan el trabajo de investigación aplicada y el de ingeniería. En el primero, el objetivo es la búsqueda de nuevos conocimientos siguiendo métodos científicos de observación y experimentación; en el trabajo de ingeniería como tal no persigue investigar, buscar nuevos conocimientos, sino utilizar los ya establecidos e integrarlos en la búsqueda de soluciones técnicas y económicas a problemas planteados por la sociedad.

Aunque en el proceso de nuevas tecnologías, investigadores e ingenieros interactúan estrechamente, sus misiones están muy bien definidas y diferenciadas. La creatividad está presente en ambos; unos en la búsqueda de nuevos conocimientos; otros en la integración novedosa de conocimientos establecidos.

En la literatura se reconoce que el principal acicate para la innovación es la apropiación de conocimientos tecnológicos. El cambio tecnológico involucra un proceso complicado y costoso (González-Suárez y Valdés Miño, 2015).

La ciencia actual es simultáneamente un sistema de conocimientos en desarrollo, en forma de actividad social además de institución social específica. Sus funciones dependerán de las necesidades que ella satisfaga respondiendo así a dos objetivos fundamentales: por una parte, el referido al efecto multiplicador del saber científico y de otra, la valoración de las vías para su incorporación a la práctica social.

La primera de esta función es dada por su carácter cognoscitivo, responde a la evolución del saber, teniendo como punto de partida, las demandas que se manifiestan en la sociedad y la convierten en problemas científicos a resolver a lo que se le adiciona revelar los resultados

obtenidos para hacerlo extensivo a quienes lo requieran, en lo que deriva el aspecto práctico, radica en su incorporación a la tecnología, en la que se integran armónicamente la ciencia y la tecnología para su empleo en fines específicos.

Tanto es así que, en la orientación hacia objetivos prácticos, en aras de fomentar el desarrollo tecnológico y avanzar en la innovación, se distingue como rasgo esencial de la ciencia la interdependencia de la actividad práctica y el conocimiento científico, donde cada vez más se diluyen los límites entre la ciencia y la tecnología.

Es por ello, que en el desarrollo de nuevas tecnologías se manifiesta con fuerza la problemática de convertir en términos económicos de producción y comercialización los conocimientos adquiridos en las etapas de investigación y desarrollo, enlazados con los conocimientos ya establecidos universalmente, que dan la posibilidad de generar una nueva tecnología.

La asimilación de una nueva tecnología requiere la evaluación de la tecnología en el menor tiempo posible. Una tarea de tal magnitud requiere de criterios y métodos de evaluación. A la hora de evaluar tecnologías los inversionistas se plantean preguntas que favorecen el proceso de selección de la mejor tecnología, que no siempre pueden ser respondidas con la información técnica disponible, y en algunos casos ni por acciones de la Vigilancia Tecnológica.

En el caso del análisis económico se utilizan estimaciones del futuro para ayudar a tomar decisiones. Estas estimaciones pueden ser incorrectas y en consecuencia se presentan, en algún grado los errores en los análisis económicos. El efecto de la variación en el estimado utilizado en los análisis económicos, pueden determinarse realizando los análisis de sensibilidad, estos constituyen estudios para ver de qué manera se alterará la decisión económica si varían ciertos factores. En estos estudios los métodos matemáticos están presentes (Lauchy, 2009).

Por otro lado, como se conoce, en los últimos años se incrementó el nivel de incertidumbre y complejidad de la vida social y de la transformación económica, política, científica y tecnológica en un mundo cada vez más interdependiente, además y desafortunadamente, desde el momento en que se concibe un proceso industrial hasta su realización y maduración transcurre un período más o menos largo de tiempo. A todo lo anterior expuesto, se le incorpora la incertidumbre en algunos de los datos para el diseño de los equipos de una planta industrial y muchas veces en el proceso de construcción y montaje de una instalación se introducen cambios que modifican el diseño del autor del Proyecto. Esto trae como consecuencia que las condiciones reales a las que opera un sistema industrial difieran de las que se consideraron en su proyección, por lo que en la proyección del desarrollo competitivo de las instalaciones de la industria química y fermentativa deben considerarse los diferentes niveles de incertidumbre lo que permitirá disminuir los plazos de una inversión y con ello de introducir los adelantos de la ciencia y la técnica recibiendo sus beneficios.

Es necesario considerar aquí que, en la industria química y fermentativa, como en otros sectores industriales la mejor decisión es aquella que presenta ventajas tangibles para la competitividad empresarial y ello requiere la cuantificación de los resultados estimados de cada alternativa con el mínimo nivel de incertidumbre.

En este propósito, debemos considerar que:

1. En las condiciones actuales e inmediatamente futuras se avizora una demanda creciente de la información científica técnica necesaria para la asimilación y desarrollo de nuevas tecnologías.

2. Es necesario incrementar aceleradamente la capacidad de obtención y procesamiento de información incorporando todo el respaldo de laboratorios y todo el potencial de personal capacitado trabajando en la obtención de esa información.
3. La aplicación de los modernos métodos matemáticos son una vía adecuada para la obtención procesamiento acelerado de información, para la propuesta de decisiones para el desarrollo de la industria química y fermentativa.
4. Es necesario incorporar a la práctica diaria de la investigación y docencia los modernos métodos matemáticos de análisis y síntesis de los sistemas, así como de obtención de información científico tecnológica.
5. La formación en la utilización practica y sistemática de las herramientas matemáticas es un rasgo distintivo de la época en lo referente a la formación de pregrado y postgrado del Ingeniero Químico.
6. En la época actual, para acelerar los resultados y enfoques multilaterales de las investigaciones, los modernos métodos matemáticos se han convertido en un poderoso arsenal metodológico para la solución actuales y prospectivos y posibilitan ya, no solo el desarrollo de los procesos óptimos, sino también la dirección de estos con vista a mantenerlos siempre en los regímenes óptimos y las rutas deseadas.
7. Afortunadamente en el plano científico internacional han aparecido propuestas metodológicas y resultados en el campo de la industria química y fermentativa que permiten estudiar soluciones para el desarrollo competitivo y ambientalmente compatible de este sector industrial.

### **1.2. Los problemas de incertidumbre en la innovación tecnológica en la industria química y fermentativa.**

En el caso específico de la industria de procesos químicos la introducción de las innovaciones tecnológicas, de acuerdo al criterio está vinculada al desarrollo de las operaciones unitarias y la ingeniería de las reacciones químicas, pues como se conoce, las etapas claves de todo proceso de la industria química son las de separación y transformación de las materias primas.

En la medida en que en ella se logre incorporar un mayor número de innovaciones podrá ampliar cada vez más sus posibilidades en el mercado, satisfacer las demandas internas y externas, alcanzar un posicionamiento competitivo, presentar productos diferenciados e innovadores a los consumidores y encontrar mejoras en las condiciones de vida de las personas que conviven en las áreas circunscriptas a ella, por el impacto que tiene, desde el punto de vista cultural y social y para el desarrollo local.

La incorporación de la ciencia y la tecnología de forma intensiva a los procesos de producción, innovación, adaptación y cambio en los procesos productivos que en ella se desarrollan, constituyen un elemento que puede contribuir a su desarrollo exitoso.

El empleo del conocimiento con una visión estratégica en el contexto de esta industria es la misión fundamental de la comunidad científica. Para conseguir este fin, es importante lograr un compromiso e identificación con las necesidades y aspiraciones de esta industria, así como el reconocimiento y la debida atención a esta prioridad por parte de los gobiernos.

Gran relevancia posee el acercamiento de esta industria a los centros de generación de conocimientos y muy especialmente considerar el conocimiento que se produce en la universidad a través del desarrollo de sus procesos sustantivos: docencia, investigación y

extensión universitaria, que le permite situarse en el estado actual de evolución de las ciencias, el avance tecnológico y las demandas de la sociedad.

Para la Universidad, también esta vinculación resulta ventajosa y juega un papel muy importante, no solo por el tema de la formación de los recursos humanos sino también buscando una mayor integración entre los centros de educación superior y el sector productivo, que es digamos lo más difícil de lograr. Es indiscutible que la formación universitaria en medio de un contexto investigativo con estrechos vínculos con el sector productivo es mucho más integrador e interdisciplinario que aquel que se desarrolla en un contexto puramente académico.

No obstante, para lograr el desarrollo a partir de la incorporación intensiva del conocimiento a la ciencia y la tecnología en la industria química, no solo será posible a partir de lo que sea capaz de producir sino también de lo que sea capaz de asimilar. Para esto se requieren desarrollar alianzas tecnológicas, estrategias innovadoras para concebir nuevos productos y la ejecución de proyectos de innovación integrados a la demanda de esta industria con una mentalidad abierta para la cooperación, para dar y recibir.

Funciones como la vigilancia tecnológica y la prospectiva tecnológica servirán para prevenir las amenazas tecnológicas y preparar a esta industria para anticiparse a los cambios tecnológicos que se produzcan. Una buena gestión de los laboratorios de I+D o de las relaciones con universidades o centros públicos de investigación le permitirán a generar o asimilar tecnologías de una forma eficiente.

El reconocimiento de la imposibilidad actual de ser tecnológicamente autosuficiente obliga a la industria química a conocer los procesos por los que se rigen la transferencia y la protección de la tecnología a nivel internacional, así como las formas más comunes en las que, tanto la transferencia como la protección, se materializan.

De cualquier modo, los desarrollos competitivos de las empresas de la industria química tendrán que desarrollar con un nivel de riesgo y anticipación que podrán disminuirse en la medida que se despeje la incertidumbre en cualquiera de sus manifestaciones.

En la práctica de ingeniería muchos problemas de incertidumbre en los datos de diseño se resuelven a través de los estudios a escala de Planta Piloto o tomando valores industriales de instalaciones similares ya existentes.

Cuando se desarrollan nuevos procesos industriales, partiendo de procedimientos de laboratorio, se acrecientan las dudas para el diseño de la instalación industrial, toda vez que operaciones de manipulación de fluidos, calentamiento o separación por solo citar algunos se ejecutan en muchas ocasiones en el laboratorio por procedimientos impracticables industrialmente, por lo que deben proyectarse soluciones de ingeniería en el escalado industrial de estos procesos tecnológicos que necesariamente tendrán una gran incidencia en la factibilidad y viabilidad técnica, económica y comercial del proceso estudiado.

Por todo lo anterior, considerar la incertidumbre en el diseño y escalado de los procesos de la industria química y fermentativa se hace un problema cardinal de la ingeniería de procesos, como se comprende es una necesidad y además existen bases científicas para enfrentar este reto.

Los problemas de incertidumbre en la ingeniería de procesos, así como los principios metodológicos para su consideración en el diseño de nuevas instalaciones fueron ordenados (Rudd y Watson, 1968) en cuatro direcciones, a saber:

- Los aspectos relacionados con la determinación del mejor ajuste del diseño un proceso a los cambios futuros;
- Los aspectos concernientes a la incertidumbre de los datos de diseño de los equipos;
- Los aspectos relacionados con la consideración de las fallas operacionales de los equipos componentes del proceso tecnológico el diseño de instalaciones completas;
- Los aspectos relacionados con el efecto de los cambios en el entorno en el diseño y operación de instalaciones de procesos químicos.

Lo que justifica en muchos casos que antes de diseñar la instalación para un proceso industrial se invierta en estudios encaminados a minimizar los puntos neurálgicos en la incertidumbre de los nuevos procesos industriales.

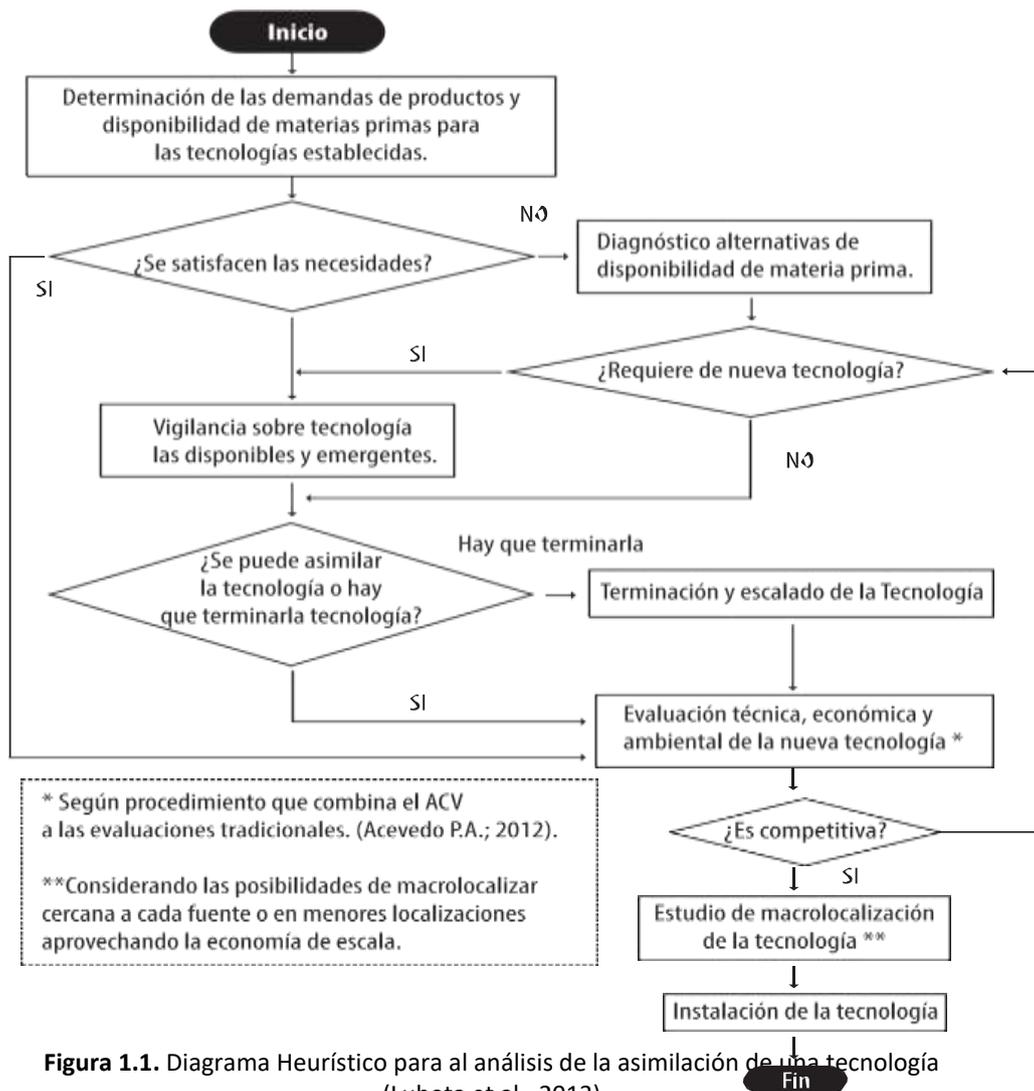
El efecto de la variación en el estimado utilizado, en los análisis económicos, pueden determinarse realizando los análisis de sensibilidad, estos constituyen estudios para ver de qué manera se alterará la decisión económica si varían ciertos factores. Entre los indicadores más recomendados para la realización de los mismos se encuentran el VAN, la TIR y el PRD (González-Suárez y Castro, 2012).

Para una completa evaluación que incluya los aspectos ambientales, se ha recomendado para la selección de alternativas tecnológica, la combinación de los métodos tradicionales y la Evaluación de Ciclo de Vida (Acevedo, 2012).

La ejecución de estas tareas se refleja en el Diagrama Heurístico de la figura 1.1

En el desarrollo de tecnologías se manifiesta la problemática de convertir en términos económicos, de producción y comercialización, los conocimientos adquiridos en las etapas de investigación y desarrollo, enlazados con los conocimientos ya establecidos. Este proceso de interacción de diferentes disciplinas es la ingeniería, y consiste en garantizar, que desde el laboratorio se tome la ruta adecuada hasta la realización de la nueva tecnología mediante un enfoque técnico económico, y en ello, “es necesario el estudio en Planta Piloto de las etapas fundamentales o auxiliares, para evaluar los factores críticos de la tecnología (Oliva Conyedo et al., 2010).

De autores latinoamericanos resaltan entre otros, los esfuerzos de en la consideración de la incertidumbre en la estrategia de procesos sobre el análisis de alternativas para la ampliación y reconstrucción de instalaciones industriales (Gallardo, 1982), la consideración de la incertidumbre en el diseño de instalaciones de productos derivados de la caña de azúcar (Rosa; 1996), de la consideración de la incertidumbre en los datos de diseño de equipos de obtención de productos químicos de minerales disponibles (Fuentes Mora, 1997; Pedraza Garciga, 1997) y en particular en la diversificación de la industria de la caña de azúcar (Catá Salgado, 2006; de la Cruz Aragonés, 2010; Lauchy, 2009; Mesa Garriga, 2010; Morales Zamora, 2012; Nápoles García, 2004), la búsqueda de tecnologías más limpias (Galindo Llanes, 2008; González-Suárez, 2008; González Cortés, 2004), lo que sin duda es una de las tareas científicas necesarias para la aplicación de los métodos del Análisis Complejo de Procesos en las condiciones de un país en vías de desarrollo y específicamente en los estudios vinculados al desarrollo de la industria de procesos químicos y fermentativos, lo que por otra parte es un aspecto que tiene gran influencia en la política científica de los centros de generación de conocimientos (González-Herrera et al., 2016)



**Figura 1.1.** Diagrama Heurístico para al análisis de la asimilación de una tecnología (Lubota et al., 2013)

Por otro lado, incremento explosivo de las investigaciones y la disminución en el tiempo de los plazos de la aplicación práctica de los resultados científicos, va convirtiendo cada vez más a la ciencia en un instrumento fundamental para el desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad y el perfeccionamiento de la vida social en su conjunto.

En los trabajos realizados estudiando procesos en condiciones de incertidumbre resalta entre otros los aspectos siguientes:

- La disminución de la incertidumbre puede generar ahorros considerables, por lo que altamente estimulante reducir la incertidumbre e incluir sistemas de control.
- La incertidumbre se disminuye a través de métodos matemáticos aplicados a cada caso

### 1.3. El Análisis y Desarrollo de procesos y con ello los métodos matemáticos en el progreso de la Industria Química y fermentativa.

En consecuencia, para el desarrollo e intensificación de la industria química y fermentativa se requiere la aplicación de la Estrategia de Procesos utilizando el Análisis de Procesos, que es uno de los campos de la ingeniería química cuyo estado del arte repercute de manera rápida, se logra hoy día casi de forma inmediata, en la solución de problemas industriales que van

adoptando los sucesivos avances del tema en general, ilustrados con ejemplos de aplicación a casos particulares para los que también se involucran los avances más recientes.

En la intensificación y desarrollo de Procesos la función clave es la optimización y como se sabe para ello se requiere de acuerdo a un procedimiento general:

1. Definir el objetivo del problema que se estudia.
2. Examinar las restricciones impuestas al problema por factores externos.
3. Seleccionar un sistema o sistemas para estudios.
4. Examinar la estructura de cada sistema y las interrelaciones de los elementos del sistema y sus componentes.
5. Construir un modelo para el sistema. Aquí el objetivo debe ser definido en términos de variables del sistema.
6. Examinar y definir las restricciones internas de las variables del sistema.
7. Simular el problema mediante modelos del sistema, considerando las variables
8. Analizar el problema y reducirlo a sus rasgos esenciales.
9. 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.

Como se comprende, en ello están presentes los métodos matemáticos, tanto en la elaboración de los modelos del proceso estudiando, sino también en los pronósticos que con ellos se puedan elaborar en la región experimental estudiada y, también los interesantes pasos que se puedan dar fuera de la región experimentan, susceptibles de ser corroborados y lo más importante en la optimización de las propuestas de decisiones.

Precisamente, en la aplicación del Análisis de Procesos, a ejemplos prácticos se presentan, casi siempre, junto con resultados económicos concretos, un intento de generalizar las experiencias metódicas. Esto ha contribuido a ganar consenso sobre la posibilidad de utilizar de formas sistemáticas y controlados métodos teóricamente fundamentados. En la literatura se presentan métodos generales, estrategias y modelos para la optimización con vistas a la elaboración y evaluación de nuevos objetivos parciales, siendo un estímulo fundamental para la realización de los Análisis de Procesos, los trabajos que reflejan una amplia investigación sobre el comportamiento fiable de los procesos tecnológicos. Por otro lado, debe tenerse en cuenta el hecho de que, con el conocimiento sobre la gran información necesaria para los Análisis de Procesos y su significación en la seguridad de los resultados, ha aumentado en los últimos años la necesidad de la vinculación con el problema de la indeterminación de la información y el desarrollo de métodos de decisión en los procesos en condiciones de incertidumbre, así como otros relacionados con la aplicación de la computación al Análisis de Procesos. Esto significa una vía efectiva de gestión de conocimientos en la industria química y fermentativa.

El Análisis de Procesos, como vía para lograr la intensificación de los procesos tecnológicos de la industria química consiste en un amplio análisis científico técnico y técnico económico de un proceso existente o concebido, en lo referente a las posibilidades de realización óptima de los objetivos previstos, por ello constituye un elemento importante para tomar decisiones más científicas y responsables.

Se hace evidente que con la ayuda del Análisis Complejo de Proceso se alcanza tanto una intensificación de las viejas plantas, como también puede prepararse y lograrse la intensificación de modernas instalaciones, altamente productivas estando las direcciones principales de acción

del Análisis Complejo de Procesos en la elevación de la disponibilidad de la capacidad de las plantas y con ello en el ahorro de plazas de trabajo, así como en la reducción del consumo material, energía y productos auxiliares. Para lo que se requiere la determinación de los puntos débiles del proceso, de manera que podamos establecer que:

1. El Análisis Complejo de Procesos es un método para la intensificación de procesos de producción.
2. Cada Análisis Complejo de Procesos tiene que estar planificado y ser calculable, no limitándose a una aglomeración casual de actividades analíticas separadas del proceso y ejecutadas esporádicamente.
3. El Análisis Complejo de Procesos excluye una restricción arbitraria a aspectos individuales seleccionados.
4. Paralelamente al Análisis Complejo de Procesos, se ejecutan en otras áreas especializadas análisis de procesos, los cuales tienen importancia propia y métodos especiales.

Cada Análisis de Procesos tiene que partir de las particularidades específicas del proceso estudiado, de los materiales utilizados, la situación real de los equipos, por lo que en cada caso deben derivarse medidas y propuestas particulares, de manera que se aplique de forma creativa a cada situación concreta; sin embargo, debe encontrar expresiones cualitativas y cuantitativas de las reservas del proceso, por lo que la complejidad del análisis, comienza con un dominio completo del proceso estudiado, de modo que no se excluye que se encuentren generalizaciones específicas para el Análisis Complejo de Procesos.

La variedad de relaciones dialécticas entre el Método de Análisis Complejo de Procesos y otros métodos para la intensificación y desarrollo de procesos, hacen necesario una valoración y aplicación práctica diferenciada en cada caso, donde están vinculadas al Análisis Complejo de Procesos, las tareas de investigación y desarrollo como premisas fundamentales para el tránsito hacia el logro de la intensificación.

Que tendrá que descansar necesariamente en un análisis multilateral y pormenorizado de los factores y cambios tecnológicos de la empresa, para lo cual debería cumplirse una Previsión global, cualitativa y múltiple que cumpla el requisito de ser instrumento para la acción.

Coincidente con esta necesidad práctica, el Análisis Complejo de Procesos a través de su complejidad ha venido abordando con éxito la consideración de la incertidumbre tanto de la disponibilidad del equipamiento como de los parámetros de operación de equipos e instalaciones industriales o para determinar la necesidad de la profundización científica a través de investigaciones previas basadas en los trabajos de los clásicos.

Por lo que no es posible realizar un estudio de Prospectiva Tecnológica sin considerar los modernos métodos de Análisis Complejo de Procesos.

Desde el punto de vista técnico ingenieril, el Análisis de Procesos considera las tecnologías disponibles con énfasis en las posibles rutas alternativas de obtención de productos, las alternativas de materias primas, requerimientos de energía, entre otros aspectos y cada combinación de posibilidades y de variables de proceso es sometida a balances de masa y energía que son tenidos en cuenta para la evaluación con criterios técnicos.

Aunque el estado del arte del Análisis de Procesos tiene muy numerosas frentes de avance se destacan, por la relación con los propósitos de la problemática abordada ahora los instrumentos y enfoques de la integración másica y energética (Damiano et al., 2010; Giugliano et al., 2011; Palacios-Bereche et al., 2011; Romeo et al., 2011), los modos de proceder ante situaciones de incertidumbre (Hajipour y Satyro, 2011; Papadokostantakis et al., 2008), las herramientas de

simulación y estrategias de modelación (Hernández Enríquez et al., 2011; Lee et al., 2011), y sobre todo de cada vez más operaciones unitarias o tipos de equipos que se pueden incluir en el proceso en análisis (Dominguez, 1996; Hingu et al., 2010; Ko et al., 2012), como producto de actividades de investigación y desarrollo tecnológico. Es claro que el estado del arte del Análisis de Procesos es de turbulenta y creciente movilidad (Acevedo, 2012).

### **Necesidad del respaldo experimental**

Cualquier idea de nuevo tipo requiere de un proceso de experimentación para conocer las tendencias reales de comportamiento en la práctica tecnológica, así desde la concepción de la idea hasta su introducción y adaptación, a las condiciones del mundo productivo real se requieren varios pasos que incluyen el escalado de las tecnologías hasta nivel industrial, lo que implica también varias etapas y la obtención de información de variables químico física requeridas para el diseño industrial.

Todo esto implica gastos de recursos materiales, financieros de equipamiento y de tiempo, está es quizás la menos considerada, pero la más importante, pues como se ha dicho el tiempo es el único recurso que no se recupera y los máspreciado de que disponen aquellos que solo tiene a su talento como recurso.

En las condiciones actuales, para reactivar la economía nacional, no solo no tenemos mucho tiempo, sino que también no podemos perderlo, por lo que se impone viabilizar las rutas requeridas para alcanzar las decisiones óptimas en las nuevas decisiones tecnológicas que se transfieran al sector de la economía nacional como demanda concreta de la industria química.

Solo con esa impronta nuestra ciencia se podrá convertir en una fuerza productiva más. La idea sobre cómo alcanzar este propósito, descansa en concebir el núcleo básico de la metodología de investigación, las herramientas disponibles y su combinación para alcanzar rápidamente propuestas viables en el contexto de sector de la industria de procesos químicos y fermentativos, pues sin respuestas rápidas y seguras no habrá transferencia de conocimientos del sector de su generación hacia el de su aplicación en un adecuado vinculo universidad empresa.

### **Los métodos experimentales en la industria química.**

El desarrollo de la industria de procesos químicos se ha fundamentado en el uso intensivo de métodos experimentales, descansando en una concepción insigne de cómo percibir los fenómenos de transporte basado en las tradicionalmente utilizadas analogías entre las transferencias de impulso, de calor y de masa.

No obstante, lo avanzado, los nuevos desarrollo industriales, utilizando diferentes tipos y calidades de materias primas, reclaman, sobre todo en las condiciones del reto de la asimilación y adecuación de las nuevas tecnología a las condiciones específicas de Cuba, que los centros de generación de conocimientos garanticen información en sus laboratorios que sirvan de respaldo a las decisiones inversionistas, no solo para tecnologías propias, sino también para las tecnologías foráneas que se nos propongan.

Una simple observación experimental en un laboratorio, en una instalación a escala piloto o a nivel industrial puede costar decenas o cientos de pesos y no debemos olvidar que también cuesta tiempo del capital humano disponible.

No obstante, lo anterior, como se ha dicho, el experimento ha sido siempre una gran herramienta en la solución de problemas prácticos y la verificación de hipótesis en la industria de procesos químicos.

Los métodos tradicionales de experimentación implican un considerable esfuerzo, tiempo y recursos para su ejecución elevando los costos de los resultados investigativos, sobre todo sin ser necesario realizarlos a nivel de planta piloto o industrial. Siendo el objetivo de la investigación obtener información sobre el fenómeno estudiado, para después actuar sobre el mismo, puede definirse la eficiencia de la investigación como la cantidad de información útil obtenida por unidad de costo, por consiguiente, es extremadamente importante para la investigación utilizar métodos experimentales que le brinden la máxima cantidad de información con el menor costo y esfuerzo.

Para lograr los propósitos de estos estudios de gestión de conocimiento en una alianza Universidad – Empresa es necesario considerar el valor intangible de la planificación experimental en las consultorías para asimilar tecnologías.

#### **1.4. Conclusiones.**

Es posible desarrollar una estrategia para el desarrollo competitivo de la industria química y fermentativa sobre bases científicamente fundamentadas, mediante la combinación de los estudios de Prospectiva Tecnológica y de Análisis complejo de Procesos.

Los necesarios riesgos que implica el desarrollo competitivo de la industria química y fermentativa pueden minimizarse mediante el estudio de las diferentes manifestaciones de la incertidumbre en la industria de procesos químicos y fermentativos.

Los estudios prospectivos con apoyo del Análisis de Procesos permiten estudiar propuestas de cambios tecnológicos que minimicen el impacto negativo por el efecto contaminante de la inclusión de productos químicos y fermentativos.

Los resultados de proyectos de estas características son de interés inmediato de la industria química y fermentativa latinoamericana, pues por un lado brinda una alternativa de productos que ofertar en el mercado nacional e internacional y por otro lado busca una solución al efecto contaminante que ya tienen las instalaciones industriales latinoamericanas y que tienen posibilidades de ampliaciones de mercado en nuestras fronteras y allende los mares.

Los estudios de estas características brindan una perspectiva de solución energética, económica y ambiental para las producciones existentes de la industria química y fermentativa a través de una reconversión de las instalaciones existentes de forma además ambientalmente compatible.

Es necesario buscar formas de trabajo, en alianza con el sector empresarial, que viabilicen con mejor eficacia lo que actualmente se hace, en la transferencia de resultados del sector de generación de conocimientos a las empresas de la industria química y fermentativa de la economía nacional.

La investigación científica en las universidades como respuestas a las demandas del desarrollo sostenible local, convierten a las universidades en un valioso recurso intangible para las empresas en su desarrollo prospectivo.

Es factible proponer esquemas de trabajo colaborativo entre los centros de generación de conocimientos y las empresas que posibiliten el desarrollo prospectivo de las instituciones de los dos sectores a través de un sistema de consultorías de innovación que involucren la aplicación del conocimiento técnico especializado.

Las actividades de posgrado amparadas en las demandas reales prospectivas del desarrollo sostenible empresarial refuerzan el valor intangible de las universidades para su entorno y preferentemente deben expandirse y desarrollar más en los entornos empresariales que en las

propias universidades pues refuerza la vinculación de los docentes con las instalaciones industriales.

### 1.5. Referencias bibliográficas

- Acevedo, P., 2012. Herramienta de Análisis de Alternativas de Producción, Incorporando el ACV “Cuna a Cuna” a los Métodos Tradicionales. Comparación de Biodiesel de Palma e Higuera. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Catá Salgado, Y., 2006. Metodología para la consideración de la incertidumbre en la integración de procesos. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Damiano, A., Gatto, G., Marongiu, I., 2010. Decision support system for biomass energy exploitation in smart grid planning, in: SPEEDAM 2010. IEEE, pp. 1183–1188. doi:10.1109/SPEEDAM.2010.5542256
- de la Cruz Aragonés, M.L., 2010. Estrategia de modificación de las facilidades auxiliares para la reconversión de la industria química. Universidad de Camagüey, Cuba.
- Dominguez, E.R., 1996. Análisis de alternativas de Inversión en la industria química considerando la fiabilidad de los equipos. UCLV.
- Fuentes Mora, M., 1997. Determinación de la incertidumbre en el escalado y diseño de un combinado para la producción de aditivos oxigenados. UCLV.
- Galindo Llanes, P. A., 2008. Análisis de procesos en la búsqueda de tecnologías más limpias. UCLV.
- Gallardo, I., 1982. Análisis de alternativas para la ampliación y reconstrucción de fábricas en la industria del papel. UCLV.
- Giugliano, M., Cernuschi, S., Grosso, M., Rigamonti, L., 2011. Material y energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. Waste Manag. doi:10.1016/j.wasman.2011.02.029
- González-Herrera, I.Y., Rabasa-Olazábal, G., Pérez-Martínez, A., González-Suarez, E., Castro-Galiano, E., 2016. Herramienta para apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de biorrefinerías. Rev. Mex. Ing. Química 15, 943–951.
- González-Suárez, E., 2005. Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria química, fermentativa y farmacéutica. Editorial Científico Técnica.
- González-Suárez, E., Castro, E., 2012. Aspectos técnico económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de caña de azúcar en el concepto de biorefinería. Editorial Cooperación Iberoamérica y Espacio Mediterráneo. Jaén, España.
- González-Suárez, E., Valdés Miño, J.E., 2015. Acciones para la correcta terminación y valoración de resultados en la industria química y fermentativa. Editorial Universitaria Universidad de Misiones, Posadas.
- González-Suárez, N., 2008. Estrategia de reconversión de una instalación de la industria química. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- González Cortés, M., 2004. Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular. UCLV.
- Hajipour, S., Satyro, M.A., 2011. Uncertainty analysis applied to thermodynamic models y process design - 1. Pure components. Fluid Phase Equilib. doi:10.1016/j.fluid.2011.05.014
- Hernández Enríquez, A., Tanco, M., Kim, J.K., 2011. Simulation-based process design y integration for the sustainable retrofit of chemical processes. Ind. Eng. Chem. Res. doi:10.1021/ie200722z
- Hingu, S.M., Gogate, P.R., Rathod, V.K., 2010. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. Ultrason. Sonochem. doi:10.1016/j.ultsonch.2010.02.010
- Ko, M.J., Park, H.J., Hong, S.Y., Yoo, Y.J., 2012. Continuous biodiesel production using in situ glycerol separation by membrane bioreactor system, in: Bioprocess y Biosystems Engineering. doi:10.1007/s00449-011-0604-1
- Lauchy, A., 2009. Diseño y aplicación de un procedimiento estratégico para la diversificación de la industria de los derivados de la caña de azúcar en Cuba. UCLV.

- Lee, I., Carleer, B.D., Haage, S., 2011. High fidelity springback simulation y compensation with robust forming process design, in: AIP Conference Proceedings. doi:10.1063/1.3623726
- Lubota, M., Concepción Toledo, D.N., Hernández Pérez, G., Mesa Garriga, L., Díaz Curbelo, A., Rosario, J.B.F., Gonzalez-Herrera, I., 2013. Colaboración de la comunidad científica sur - sur para usar la biomasa como fuente de productos químicos y energía., in: Tecnogest. La Habana. Cuba.
- Mesa Garriga, L., 2010. Estrategia investigativa para la tecnología de obtención de etanol y coproductos del bagazo de la caña de azúcar. UCLV.
- Morales Zamora, M., 2012. Estrategia para la reconversión de una industria integrada de azucarera y derivados para la producción de etanol y coproductos a partir de bagazo". UCLV.
- Nápoles García, M.F., 2004. Análisis del impacto de la incertidumbre de los balances de masa y energía de las fábricas de azúcar en los estudios previos inversionistas. Universidad de Camagüey.
- Oliva Conyedo, Y., Mesa Garriga, L., González-Suárez, E., González Morales, V., 2010. Estrategia investigativa para el escalado industrial de una nueva tecnología de obtención de etanol de bagazo de caña de azúcar. Cent. Azúcar 37, 92–100,.
- Palacios-Bereche, R., Ensinas, A., Nebra, S.A., 2011. Energy consumption in ethanol production by enzymatic hydrolysis - The integration with the conventional process using pinch analysis. Chem. Eng. Trans. 24, 1189–1194. doi:10.3303/CET1124199
- Papadokonstantakis, S., Siddharta, A., Sugiyama, H., Hungerbuler, K., 2008. Uncertainty patterns y sensitivity analysis of an indicator based on process design framework, in: 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18. pp. 145–150.
- Pedraza Garciga, J., 1997. Estrategia para el diseño de una planta para la producción de ácido fosfórico en condiciones de incertidumbre.
- Romeo, L.M., Catalina, D., Lisbona, P., Lara, Y., Martínez, A., 2011. Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, y CO2 capture systems. Greenh. Gases Sci. Technol. 1, 72–82.
- Rudd, D.F., Watson, C.C., 1968. Strategy of process engineering. Wiley.

## Capítulo II

### Planificación experimental en la investigación científica para la industria de procesos químicos y fermentativos en la gestión de conocimientos

#### 2.1. Introducción

Una simple observación experimental en un laboratorio, en una instalación a escala piloto o a nivel industrial puede costar decenas o cientos de pesos. No obstante, lo anterior, como se ha dicho, el experimento ha sido siempre una gran herramienta en la solución de problemas prácticos y la verificación de hipótesis en la industria de procesos químicos.

Los métodos tradicionales de experimentación implican un considerable esfuerzo, tiempo y recursos para su ejecución elevando los costos de los resultados investigativos, sobre todo si son necesarios realizarlos a nivel de planta piloto o industrial. Siendo el objetivo de la investigación obtener información sobre el fenómeno estudiado, para después actuar sobre el mismo, puede definirse la eficiencia de la investigación como la cantidad de información útil obtenida por unidad de costo, por consiguiente, es extremadamente importante para la investigación utilizar métodos experimentales que le brinden la máxima cantidad de información con el menor costo y esfuerzo.

El uso del diseño estadístico de experimento facilita un incremento apreciable en la productividad de los investigadores, así como la confiabilidad de los resultados obtenidos, siendo estos métodos por su naturaleza universal aplicables en la mayoría de los campos de investigación y que significa una gran contribución a la optimización de la experimentación.

No es necesaria una preparación especial en estadísticas o matemáticas para utilizar estos métodos, la experiencia ha demostrado que los ingenieros comprenden y aplican con éxito sus fundamentos.

La idea que un experimento se puede diseñar, es de tiempos antiguos, sin embargo, sólo a principios del presente siglo, se introdujeron los métodos estadísticos de diseño de experimentos. En la década de los años cincuenta se inició una nueva etapa en los trabajos de Diseño de Experimentos encaminando los esfuerzos a encontrar las condiciones óptimas (Box y Wilson, 1951b).

El uso del Diseño de Experimento facilita un incremento apreciable de la productividad de los investigadores y de la confiabilidad de los resultados obtenidos, en general se puede afirmar que si los experimentos se planifican inteligentemente, incorporando diseños estadísticos factoriales o diseños factoriales parciales (Box y Hunter, 1961). La información obtenida es confiable y tiende a minimizar el número de experimentos necesarios; sin embargo, si el planteamiento de las experiencias se hace deficientemente, sin tener en cuenta los aspectos sofisticados del análisis, generalmente no se podrá reunir mucha información útil. Esto se debe a que de los experimentos planificados deficientemente no se obtienen la información principal.

En muchas investigaciones se plantean las interrogantes siguientes:

1. Qué variable(s) afecta(n) la(s) respuesta(s)?
2. De qué forma se afecta(n) la(s) respuesta(s)?

Se ha demostrado en la experiencia investigativa que experimentos desarrollados de forma simple pueden dar respuesta a ambas preguntas.

Existen dos grandes campos de Diseños de Experimentos:

a.- En las Ciencias Biológicas y Agrícolas se aplican esencialmente diseños Completamente al azar, Bloque al azar y Cuadrados Latinos.

b.- En las Ciencias Técnicas y Naturales, en las cuales por la posibilidad de controlar un número finito de variables se emplean frecuentemente los diseños factoriales.

El propósito de este documento es exponer ordenadamente los temas de la planificación experimental para los estudios de desarrollo e intensificación de las industrias de procesos químicos y fermentativos, ejemplificados con la experiencia acumulada y posibilitando que el lector adquiera habilidades en la aplicación práctica del diseño de experimentos en ese campo de la economía industrial. Para la presentación inicial se ha seguido la idea de estructura utilizada por (Adler, Markova, y Granovskii, 1975).

## **2.2. Conceptos básicos:**

### **2.2.1. Generalidades del diseño experimental.**

El desarrollo de los temas que se abordan en el estudio de la planificación experimental de la investigación científica para la intensificación y desarrollo de la industria química y fermentativa, requiere de un conjunto de definiciones básicas que a continuación se exponen.

Entre tales definiciones y como precedente a los planteamientos, que a lo largo del texto se realizan, es conveniente definir que entendemos por experimento a un conjunto de acciones a las cuales tenemos que acudir para conocer la esencia de la cuestión que nos interesan y estudian.

Este conjunto de acciones puede ser muy complicado, pero frecuentemente se pueden resolver mediante elementos o unidades separadas que se denominan ensayos. Como ensayo se entiende entonces a la corrida experimental que se hace en condiciones estrictamente controladas.

Es conveniente, además, considerar que los experimentos se pueden realizar directamente en el objeto real en estudio o con ayuda de modelos del fenómeno o problema estudiado, con el único requerimiento de que el modelo describa con suficiente precisión al problema o fenómeno en estudio.

Se conoce como Diseño de Experimento, al procedimiento de seleccionar un número de ensayos y las condiciones para la realización de estos; necesarios y suficientes para resolver el problema para el cual han sido fijados, con la máxima información de la forma más rápida, económica, simple y precisa posible, siendo el Diseño de un Experimento Límite (Extremo), el método de selección del menor número de ensayos y las condiciones para su realización para encontrar las respuestas necesarias en óptimas condiciones de experimentación.

El propósito de muchas de las investigaciones científicas en la industria de procesos químicos es la búsqueda de las condiciones óptimas de conducción de un proceso tecnológico de transformación o extracción de un producto químico, lo que se hace desde la etapa de laboratorio hasta la etapa de producción industrial. Precisamente, como optimizar entendemos, “no lo mejor, sino lo mejor en las condiciones vigentes”.

Encontrar las condiciones de comportamiento óptimo es un problema de optimización y por definición son aquellos donde se buscan las mejores condiciones (el óptimo) del objeto de estudio, como son el costo, los parámetros de calidad, producción, etc. Por ello, es esencial formular claramente, en qué sentido las condiciones deben ser óptimas.

Para determinar las condiciones óptimas de cualquier proceso industrial se requiere definir el parámetro de optimización, que define la mejor solución. A veces son varios y hay que establecer un compromiso.

Los **parámetros de optimización** deben cumplir los siguientes requisitos:

- Ser medibles (en todos los estados del fenómeno).
- Alguno debe asociarse a un indicador económico.
- Ser universales (adaptados a todas las situaciones).
- Tener reproducibilidad estadística.

**Factores:** son las variables cuantitativas o cualitativas que influyen. Estos deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Ser controlables.
- Sus niveles deben responder a deseos del investigador.

Al analizar un complejo de factores, se exigen los siguientes requerimientos:

- Todas las combinaciones deben ser realizables y seguras.
- Deben ser independientes.

**Niveles:** son los valores que puede tomar un Factor, cada factor es capaz de tomar un número definido de niveles discretos.

Por otro lado, es conveniente para describir el objeto de investigación utilizar la idea de Caja Negra que estudie las relaciones entre las variables de entrada y los parámetros de salida sin estudiar los fenómenos intermedio.

Siendo entonces la definición de **Caja negra**: un concepto de ignorancia de lo que pasa dentro del problema a investigar (Figura 2.1).

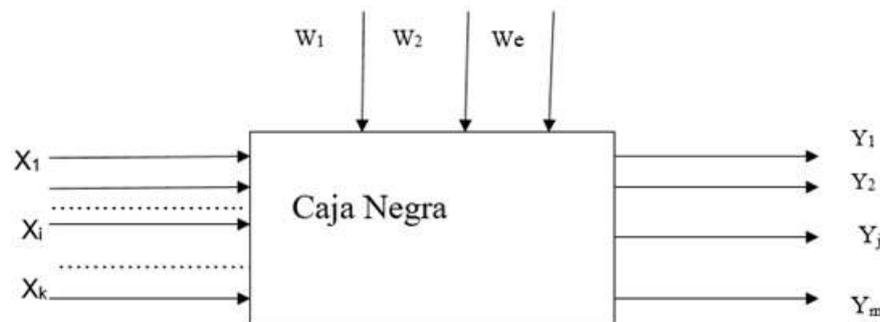


Figura 2.1 Diagrama de Caja Negra

Los valores de ( $X_1$  hasta  $X_k$ ), son los **factores que influyen**; mientras que los de ( $Y_1$  hasta  $Y_m$ ), son los **parámetros de optimización**.

Las variables  $W_1, W_2, \dots, W_e$  se denomina **variables no controladas** y se denominan **aleatorios (ruidos)**.

Algunos autores, han designado también las variables ( $X_1, X_2, \dots, X_i$ ) como variables inherentes a los condiciones de operación del equipamiento de una etapa, como pueden ser determinado desgaste, presión de operación, etc. (González Suárez, 1982) y las incluyen entre los factores no aleatorios.

Realmente la división de las variables en aleatorias y básicas es arbitraria. Se pueden clasificar como aleatoria cualquier variable no incluida en las básicas. Dependiendo del objetivo buscado o de la capacidad experimental disponible, algunas variables medibles pueden incluirse como

aleatorias (ruidos) del proceso o de la planta. Desde luego que esto perjudicará la precisión del modelo matemático.

La relación matemática entre ellos tiene la forma general:

$Y = \phi (X_1, X_2, \dots, X_k)$ , donde tal función es la llamada: función respuesta.

Cada factor puede tomar uno o varios valores en una prueba, pero generalmente se asume que cada factor posee un número discreto de niveles. Un conjunto de estos niveles para un factor determina uno de los posibles estados de la caja negra, este ser simultáneamente el número de ensayos del experimento.

Para hallar la complejidad de una Caja Negra, es suficiente elevar el número de niveles “p” de los factores a una potencia igual al número de factores “k”, es decir, la complejidad de la Caja Negra =  $p^k$ .

### **2.2.2. Parámetro de optimización.**

El parámetro es la respuesta de la acción de los factores determinado el comportamiento del sistema que es estudiado. Dependiendo del objeto y la meta de una investigación, los parámetros de optimización pueden ser muy diversos. Estos pueden estar relacionados con los aspectos económicos, técnico económico, tecnológico, constructivo, ambientales etc. En los problemas reales, muchas veces se requiere que varios parámetros de optimización sean considerados simultáneamente; en estos casos usualmente se realiza el movimiento hacia el óptimo, seleccionando un único parámetro de optimización y manteniendo el resto de los parámetros como restricciones al problema. En los casos que esto no sea lo idóneo, se pueden aplicar métodos de optimización para sistemas de múltiples respuestas.

Un parámetro de optimización debe ser:

- Efectivo desde el punto de vista de alcanzar una meta,
- De una naturaleza universal,
- Cuantitativo y expresado por un número simple,
- Efectivo estadísticamente
- Con una medición física simple y fácil de calcular,
- Existente para todos los estados discernibles.

Entre los parámetros de optimización económicos se consideran entre otros:

- Ganancia
- Costos
- Incremento de Ganancia
- Desembolso para experimentos

Entre los parámetros de optimización Técnico económicos se consideran entre otros:

- Producción
- Fiabilidad
- Estabilidad
- Eficiencia
- Vida útil de la instalación
- Incremento de ganancia

Entre los parámetros de optimización Técnico –tecnológicos se encuentran:

- Rendimiento del producto
- Características físicas del producto

- Características químicas del producto
- Características mecánicas del producto
- Características médicas y biológicas del producto

Los parámetros de optimización vinculados al medio ambiente se han considerado recientemente y entre ellos se reportan consideraciones sobre:

- Ciclo de vida
- Índices de emisión de gases de efecto invernadero
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno

En ocasiones, es imposible determinar de forma cuantitativa el parámetro de optimización, en esos casos, se acude a un procedimiento llamado Ranking (acercamiento aproximado de valores). Así, de acuerdo al rango de operación preseleccionado de una escala, son asignados valores al parámetro de optimización, la escala puede ser de dos puntos, de cinco puntos, valoraciones cualitativas (bueno, regular y malo), etc. Los factores por otra parte pueden tener una región de determinación continua o discreta. No obstante, en los problemas del diseño experimental, se consideran no siempre regiones discretas, así para factores de regiones continuas de determinación como la temperatura, presión, etc., siempre son seleccionados ajustes de los niveles discretos.

Parámetro "categorizado": Tiene una región continua limitada de determinación. En el caso más simple la región tiene dos valores (si, no; bueno, malo).

Cuando aparecen dificultades en la estimación del Parámetro de Optimización es útil y necesaria la utilización del Rango de Aproximación.

Región de determinación: Se le llama a la multitud de valores que el parámetro y los factores pueden tener.

Entre los ejemplos de parámetros de optimización utilizados en investigaciones realizadas con el objetivo de intensificar instalaciones productivas o desarrollar nuevos procesos tecnológicos se encuentran:

- Propiedades físicas en el cartón para ondular,
- Propiedades físicas en el papel blanco de escribir,
- La Ganancia obtenida en un proceso global de producción de cartón para ondular
- Eficiencia electrolítica en la producción de cloro y sosa caustica por vía electrolítica,
- Dureza de la banda de rodamiento de un neumático recauchado
- Costos de blanqueo de telas, etc.
- Rendimiento alcohólico en la fermentación,
- Rendimiento de glucosa en el pretratamiento del bagazo para la producción de etanol.

### **2.2.3. Factores**

Como se ha dicho, los factores son las variables cuantitativas o cualitativas que influyen en el comportamiento de un sistema en estudio.

Después que el objetivo de una investigación ha sido definido, y el Parámetro de Optimización seleccionado, deben incluirse en el estudio del fenómeno todos los factores que pueden influir apreciablemente en su comportamiento. Si un factor que tenga influencia apreciable es excluido, esto puede tener consecuencias funestas. Si un factor significativo fluctúa libremente, se incrementa de forma notable el error del "experimento". En adición, cuando un factor es

mantenido a un nivel fijo, una falsa idea de las condiciones óptimas se obtiene, pues no se garantiza que el valor óptimo del parámetro de optimización se alcance con ese nivel fijo de un factor que tenga una incidencia real en la respuesta del sistema.

Clases de factores: los factores se clasifican de acuerdo a que puedan ser clasificados o no, es decir medidos, pesados, graduados, dosificados, etc. Ciertas variables se caracterizan por sus propiedades cualitativas, por ejemplo, la forma de controlar el pH, el lavado o no de una pulpa papelerá antes de ser refinada, el tipo de recorte utilizado en una mezcla para producir papeles para ondular.

Ejemplo de factores.

1. En el estudio de la cocción del bagazo para obtener pulpa semiquímica de alto rendimiento según la tecnología discontinua de Damují (González Suárez, 1982), se consideraron los siguientes factores:

- X<sub>1</sub>: Sosa caustica utilizada, %;
- X<sub>2</sub>: Tiempo de impregnación, min;
- X<sub>3</sub>: Tiempo de Cocción, min;
- X<sub>4</sub>: Presión de cocción, kg/cm<sup>2</sup>;
- X<sub>5</sub>: Relación peso fibra /meollo en el bagazo.

2. En el estudio de los factores que inciden en la adhesión durante la vulcanización en el reencauche de neumáticos recuperados (E. González-Suárez, 1991), se consideraron los factores siguientes:

- X<sub>1</sub>: Temperatura de Vulcanización, °C;
- X<sub>2</sub>: Presión en el interno, kg/cm<sup>2</sup>;
- X<sub>3</sub>: Tiempo de Vulcanización por espesor, min/mm; X<sub>4</sub>: Relación profundidad de diseño/espesor de *Camelback*

3. En el estudio de productividad de un refinador de simple disco (González Suárez, 1982) se consideraron los siguientes factores:

- X<sub>1</sub>: Desgaste de los discos, mm;
- X<sub>2</sub>: Presión en la Caja del disco, kg/cm<sup>2</sup>;
- X<sub>3</sub>: Número de Kappa de la pulpa refinada. Kappa;
- X<sub>4</sub>: Lavado o no de la pulpa a refinar;
- X<sub>5</sub>: Consistencia de la pulpa a la entrada al refinador.

4. En los estudios de la eficiencia electrolítica de una instalación de producción de Cloro y sosa Caustica (N. González-Suárez, 2008) se consideraron los factores siguientes:

- X<sub>1</sub>: Contenido de Mg en la salmuera, mg/L;
- X<sub>2</sub>: Contenido de Fe en la salmuera, mg/L;
- X<sub>3</sub>: Densidad de corriente en las celdas electrolíticas, KA/m<sup>2</sup>;
- X<sub>4</sub>: Contenido de Ca en la salmuera, mg/L

5. En los estudios de la hidrólisis enzimática del bagazo pre tratado para la fabricación de etanol (Mesa, González, Cara, et al., 2010) se consideraron los factores siguientes:

- X<sub>1</sub>: Carga de sólidos, %;
- X<sub>2</sub>: Carga de enzimas celulíticas, %;
- X<sub>3</sub>: Uso de xilanasas; cualitativa;
- X<sub>4</sub>: Uso de tenso activo; cualitativa

6. En los estudios de la etapa de hidrolisis acida del pretratamiento organosolv del bagazo para la fabricación de etanol (Mesa, González, Ruiz, et al., 2010) se consideraron los factores:

- X<sub>1</sub>: tiempo, min;
- X<sub>2</sub>: % alcohólico, % etanol, v/v;
- X<sub>3</sub>: Relación sólido/líquido.

7. En los estudios de costo de blanqueo de telas (Berberena, 1991) se consideraron los siguientes factores:

- X<sub>1</sub>: tiempo de tratamiento con vapor, min;
- X<sub>2</sub>: concentración del humectante, %;
- X<sub>3</sub>: Temperatura del vapor (°C)

8. En los estudios de la cinética de la etapa de pretratamiento básico y organosolv, del residuo lignocelulósico resultado del pretratamiento ácido del bagazo de caña de azúcar para su posterior sacarificación (Albernas-Carvajal, Yaillet Corsano, Morales-Zamora, González-Cortés, Santos-Herrero, y González-Suárez, 2014) se consideraron los siguientes factores:

- X<sub>1</sub>: Temperatura, K;
- X<sub>2</sub>: Etanol, %;
- X<sub>3</sub>: Sosa Cáustica; %

### 2.3. Selección del modelo.

La selección del modelo que caracterice la etapa estudiada no es un aspecto simple, pues está vinculado a pasos posteriores de la investigación y está vinculado a situaciones concretas y consideraciones.

**Modelación matemática:** Es la representación mediante ecuaciones de un problema concreto. Mediante Modelos Matemáticos es posible realizar un experimento, si el modelo describe con suficiente precisión el fenómeno estudiado.

Seleccionar un modelo significa definir la forma de la función y escribir a la vez la ecuación. Esto se requiere en el diseño de experimentos para definir los valores de los niveles a estudiar (cuantos niveles) y determinar la forma de estimación de los coeficientes de la ecuación.

¿Cómo debe seleccionarse el modelo?,

Un modelo describe la función respuesta del tipo:  $Y = \phi (X_1, X_2, \dots, X_k)$ ,

Seleccionar un modelo significa describir la forma de esta función y mostrar su ecuación. Hay muchos modelos diferentes, para seleccionar uno de ellos, es necesario conocer que nosotros queremos de un modelo, cuáles son nuestros requerimientos.

Si el objetivo que nos trazamos es encontrar las condiciones óptimas de nuestro objeto de estudio, es completamente obvio que el principal requerimiento que un modelo debe satisfacer es la capacidad de predecir la dirección de ensayos futuros y hacer esto con la precisión requerida.

Cumplir con la precisión requerida significa que, en una cierta subregión, que incluye las coordenadas de los ensayos realizados, el valor de la respuesta anticipada con ayuda del modelo, no debe diferir del valor real en más de cierta cantidad pre establecido. Un modelo que cumpla tales requerimientos se dice que es un modelo adecuado. Se han desarrollado métodos estadísticos especiales para la verificación de la adecuación de un modelo.

Si varios modelos diferentes cumplen con los requerimientos establecidos, debemos seleccionar el más simple.

¿Cómo debe seleccionarse el modelo?,

Hay muchos modelos diferentes, para seleccionar uno de ellos, es necesario conocer ¿Para qué se quiere el modelo? ¿Cuáles son nuestros requerimientos?

Si el objetivo que nos trazamos es encontrar las condiciones óptimas del objeto de estudio, es completamente obvio, que el principal requerimiento que un modelo debe satisfacer, es la capacidad de predecir la dirección de ensayos futuros y hacer esto con la precisión requerida.

Cumplir con la precisión requerida, significa que, en una cierta subregión, que también incluye las coordenadas de los ensayos realizados, el valor de la respuesta anticipada con la ayuda del modelo, no debe diferir del valor real en más de una cierta cantidad preestablecida. Un modelo que cumpla tales requerimientos se dice que es un modelo adecuado. Se han desarrollado métodos estadísticos especiales para verificar la adecuación de un modelo. Si varios modelos diferentes cumplen con los requerimientos establecidos, debemos seleccionar el modelo.

En la Figura 2.2, se muestra una curva que sobre cierta región ( $X_{2\text{mín}}$ ,  $X_{2\text{max}}$ ) satisface dos ecuaciones con la precisión requerida, a saber:

$$Y = \log_b(X) \tag{Ec. 2.1}$$

$$Y = b(X) \tag{Ec. 2.2}$$

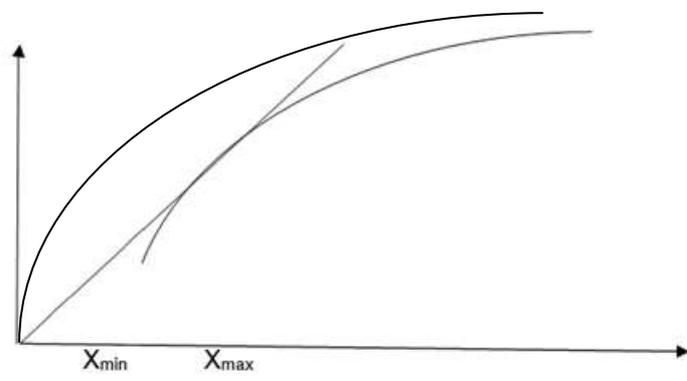


Figura 2.2 Análisis de los posibles modelos en una región.

En la Ec. 2.1, la cantidad  $b$  es un coeficiente que puede ser evaluado, de acuerdo a los resultados de un experimento.

Aquí la pregunta a realizarse es ¿Cuál es el modelo a seleccionar? La respuesta está vinculada a que objetivo tendrá el modelo. La cuestión es definir ¿Cuál es la más simple?

Aquí el criterio de simplicidad debe establecerse, pues en este ejemplo si poseemos una tabla de logaritmos de base  $b$ , la ecuación más simple sería la Ec. 2.1, pero si no la tenemos, la más simple sería la Ec. 2.2. En lo adelante consideraremos como la más simple las series de potencias o porciones de series de potencias.

Modelos de Polinomios: en lo adelante se representan las funciones respuestas desconocidas usando polinomios. En la operación de reemplazar una función con otra equivalente aproximaremos funciones desconocidas con polinomios.

Existen polinomios de diferentes grados, por ejemplo, para un proceso que es afectado por dos factores, son posibles entre otros los siguientes polinomios:

$y = b_0$	Grado cero	Ec. 2.3
$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$	1er.grado y 2 variables	Ec. 2.4

$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2$	1er.grado y 3 variables	Ec. 2.5
$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$	2do.grado y 2 variables	Ec. 2.6
$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{112}X_1^2X_2 + b_{12}X_1X_2^2 + b_{111}X_1^3 + b_{222}X_2^3$	3er.grado	Ec. 2.7

Para optimizar, es bueno seleccionar un modelo correspondiente a un polinomio lineal (Algo parecido a la expresión de la determinación del carbono equivalente).

Calculando los coeficientes, entonces queda claro el grado de influencia de los factores. Mientras mayor sea el número de coeficientes, mayores son la cantidad de experimentos necesarios por lo tanto se prefieren los polinomios más sencillos.

Debemos seleccionar el polinomio que utilizaremos en la primera etapa de una investigación, para ello debemos ver los objetivos del experimento.

En los polinomios arriba relacionados, se aprecia que el de grado cero es el de menor número de coeficientes. ¿Es el polinomio de Grado Cero el que se debe seleccionar? Realmente, el polinomio de Grado Cero, no satisface los requerimientos de un modelo. Independientemente de los valores que tengan los factores, la respuesta es siempre la misma; esto es una limitante para la adecuación del modelo, y además no permite apreciar como los factores afectan el proceso estudiado.

Se requiere un modelo sencillo, con buena predicción de la dirección más rápida para el perfeccionamiento del parámetro de optimización. Estos requisitos los cumple el modelo del polinomio de primer grado. Es por lo tanto este el que se debe utilizar como primera aproximación; por otra parte, si no se persigue optimizar un proceso, sino obtener un modelo de interpretación, es factible partir de un modelo lineal (Primer Grado) y verificar su adecuación incrementando el grado del polinomio utilizado, si no se satisfacen los requerimientos de adecuaciones necesario pasar a un experimento de orden superior.

En general el objetivo del primer modelo que de un problema estudiado se obtiene debe tener como premisa ser un primer paso para conocer la dirección de los experimentos. Esto se puede resumir en que un primer modelo se necesita para conocer la dirección del gradiente de cada una de las variables, es decir la dirección en la cual el parámetro de optimización mejora y si lo hace debido a un factor más rápido que con las variaciones de otro.

Tales modelos permiten considerar todos los posibles comportamientos del sistema y reducir el número de ensayos. Para ello tienen especial potencialidad los modelos lineales, siempre que se demuestre que describen adecuadamente el fenómeno estudiado en la región experimental.

La idea fundamental es realizar un número reducido de ensayos, tan reducidos como sea posible, construir un modelo matemático partiendo de esos resultados experimentales, utilizar el modelo para evaluar el gradiente de los factores sobre el parámetro de respuesta y realizar nuevos ensayos solamente en esa dirección. Este proceso, recurrente, solo termina cuando se alcanza la región del óptimo valor del parámetro de optimización. En general este proceso "ascendente" hacia la región del óptimo se puede lograr con un modelo lineal que sea adecuado.

## **2.4. Experimento Factorial**

### **2.4.1. Pasos de una investigación experimental**

El primer paso al comenzar una investigación es identificar el problema a resolver: (Que sea real). Luego plantearse que hay de conocimiento sobre este problema. Hay que conocer el problema, hay que buscar todo lo que se conozca, leer información científica, revisar artículos bibliográficos. Concretando se debe consultar lo existente al respecto, después trazar un objetivo de trabajo tratando siempre de alcanzar las condiciones para las cuales un parámetro de optimización es óptimo.

Los datos estadísticos experimentales necesarios para la obtención de un modelo de un proceso determinado de la industria química (elemento, etapa, equipos) se garantizan por la realización de un experimento directamente sobre el proceso o la planta de interés, este puede ser un experimento pasivo o activo. Durante el experimento pasivo, se realiza una larga serie de mediciones, en los valores de los factores (variables independientes), alterando una u otra medición por turno. Este procedimiento puede también realizarse en el curso del servicio normal del proceso o planta y sobre el perfeccionamiento del tratamiento de la información se han reportado trabajo de alto rigor científico (Cardoso Romero, 1993). Los datos así obtenidos son procesados por los métodos tradicionales de regresión o correlación (Ahnazarova, Kafarov, y Rep'ev, 1982). Un experimento activo es conducido por un plan predeterminado o diseño de experimento. En un diseño activo, plan o diseño experimental, todas las variables independientes (factores) son variadas a la misma vez de tal manera que las interacciones son evaluadas inmediatamente y la cantidad de experimentos puede acortarse sustancialmente.

Las selecciones de un diseño de experimentos dependen de la información precedente disponible y de los objetivos del experimento. El uso de los diseños de experimentos se extendió por efecto de la presentación de los trabajos de Box y Wilson (Box y Wilson, 1951a).

La estrategia en la elaboración de diseño de experimentos en las investigaciones de la industria de procesos químicos es el acto de definir que hacer constantemente y de forma conveniente. Se debe seguir los siguientes requisitos:

- Minimizar el número de experimentos y ensayos, eligiendo un diseño de experimento adecuado según la cantidad de factores y la etapa del trabajo. Por ejemplo, una primera etapa puede ser moverse hacia una región cercana al óptimo y una segunda etapa es la determinación del mismo.
- Realizar una correcta modelación matemática del problema.
- Trabajar por etapas definidas que permitan llegar a decisiones al terminar cada una.

Para saber que el factor afecta hay que experimentar. En esta etapa se debe garantizar:

- Control de los fenómenos que se estudian en el experimento.
- Reproducibilidad de los resultados.
- Que las muestras se tomen al azar.

### **2.4.2. Diseños Factoriales. Generalidades**

El proceso completo de diseñar una investigación, puede considerarse como la investigación misma, constituido de una secuencia de etapas, parte de las cuales están completamente normalizadas y requieren decisiones "intuitivas". Gracias al desarrollo de la teoría las etapas formalizadas son una gran parte del proceso, pero no desplazan completamente las etapas no normalizadas, por lo cual el diseño experimental requiere de meditación y estudio en cada una de ellas.

Selección de la región de un experimento.

Para el establecimiento de las regiones de un experimento se deben tener las siguientes consideraciones. Así, se deben fijar los límites de las regiones de definición de los factores que deben ser evaluados. Aquí deben ser consideradas restricciones de varios tipos, como son:

- a. Restricción de principios: Los valores de los factores no pueden ser violados bajo ninguna circunstancia. Por ejemplo, si un factor es la temperatura, el límite más bajo posible es el cero absoluto.
- b. Restricción técnico económica: Por ejemplo, el costo de la materia prima, el poco suministro de componentes separados.
- c. Condiciones posibles para lograr en el proceso: Por ejemplo: la existencia de aparatos, tecnología u organización. En un reactor hecho de determinado material, la temperatura de trabajo no puede ser mayor que el punto de fusión del material, o más alta que la temperatura de trabajo del catalizador utilizado, o de vida de un microorganismo.

La construcción de un diseño de experimento consiste en la selección de los puntos experimentales que son simétricos con relación al nivel cero. La selección de la región experimental del espacio de un factor está conectada con un análisis detallado de la información primaria. Es necesario encontrar la subregión local para diseñar un experimento en la región de determinación. El procedimiento para la determinación de esta subregión incluye dos pasos: la selección del nivel básico y determinación del intervalo de variación.

La selección del nivel básico puede considerarse como el punto inicial para la construcción de un diseño de experimento y ser el punto cero. En este los niveles de los factores corresponden a las mejores condiciones determinadas del análisis de la información primaria. El mismo debe cumplir los siguientes requisitos (ver Figura 2.3):

- a. En este punto los valores del parámetro de optimización deben ser los mejores de todos los valores conocidos.
- b. Las coordenadas del nivel cero deben estar dentro de la región de determinación, a una cierta distancia de un extremo.

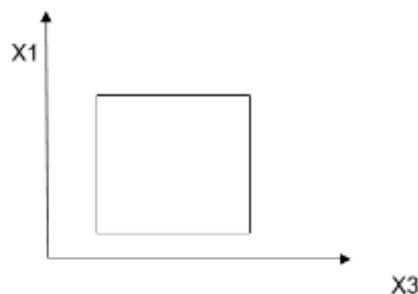


Figura 2.3 Región de determinación de dos factores

Si estos requerimientos no se contradicen uno con relación al otro la selección es clara, en caso contrario, es decir hay contradicción entre los requerimientos se está obligado a olvidar el primero de ellos, puesto que no podemos construir un diseño más allá de los límites de la región de determinación.

La fórmula de determinación de este es:

$$X_{j_0} = \frac{X_{j_{max}} + X_{j_{min}}}{2}$$

Ec. 2.8

El intervalo de variaciones un número que cuando se suma o resta al nivel básico, da los valores máximo y mínimo del rango o sea para su determinación, se toman dos puntos simétricos con referencia al nivel básico, de tal forma que uno es el nivel superior y el segundo el nivel inferior. Las restricciones naturales están superpuestas por encima y por debajo de la selección de los intervalos de variación. Un intervalo de variación no puede ser tan pequeño como el error con el cual se fijan en un experimento los factores. Por otro lado, el nivel superior y el inferior deben ser inconfundibles, el intervalo no puede ser tan grande que el nivel inferior o superior está más allá del límite de la región de determinación.

### 2.4.3. Codificación de los valores de las variables

Para hacer más fácil el trabajo con los valores del intervalo y el procesamiento de los datos experimentales, las escalas a lo largo de la coordenada son también seleccionadas para el nivel superior correspondiente a (+1), para el nivel inferior (-1) y para el básico a cero.

Esto se conoce como codificación de variables y permite sustituir los valores reales de los factores por equivalentes más sencillos; lográndose la conversión de valores codificados a reales o viceversa mediante la ecuación de transformación siguiente:

$$X_j = (X_j - X_{j_0}) / J_j \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

$X_j$  = valor codificado del factor;

$X_j$  = valor natural del factor;

$X_{j_0}$  = valor natural del nivel básico;

$J_j$  = intervalo de variación; J = número del factor.

Para los factores cualitativos para los dos niveles, un nivel se denomina +1 y el otro -1.

El orden de los niveles no es significativo.

En la determinación de los intervalos de variación es aconsejable tener en consideración algunos aspectos generales entre los que se encuentran los siguientes:

Las restricciones naturales están superpuestas por encima y por debajo en la selección de los intervalos de variación. Un intervalo de variación no puede ser tan pequeño como el error por el cual se fijan en un experimento el nivel de los factores. Por otro lado, el intervalo de variación no puede ser tan grande como el nivel inferior o superior, porque estarían más allá del límite de la región de determinación.

La información preliminar disponible al iniciar un experimento puede ser aproximada, pero es la única base para el diseño de un experimento. El investigador mediante una adecuada revisión de la literatura científica debe profundizar todo lo posible en esa información preliminar, buscando información sobre aspectos tales, como los mejores resultados, los factores que inciden en los parámetros de optimización, los diferentes parámetros de optimización que se han empleado en investigaciones anteriores. Los resultados aparentemente contradictorios que se hayan obtenido por otros investigadores. El efecto de los factores sobre la curvatura del parámetro de optimización y el rango de variación del parámetro de optimización, entre otros aspectos de interés.

#### 2.4.4. Matrices experimentales en los Diseños factoriales de experimento para la búsqueda de modelos de los procesos de la industria química.

El primer paso en el diseño de un experimento con vista a obtener un modelo que contribuya a la búsqueda de las condiciones óptimas se fundamenta en el análisis de las variaciones de los factores en dos niveles.

Mientras que en los diseños tradicionales se estudia la influencia en el parámetro de optimización de un factor cada vez y el análisis de cada resultado se realiza en forma independiente de los otros, en los diseños experimentales se aplica una lógica experimental más natural y provechosa. La forma tradicional de cambio en los valores de un factor cada vez, no es la más adecuada de estudiar la influencia de dichos factores, ya que en la mayoría de los sistemas reales las variaciones se producen en forma simultánea y es necesario verificar la presencia de interacciones.

Si se conocen número de factores, es posible encontrar el número de ensayos requeridos para la realización de todas las posibles combinaciones de sus niveles.

La fórmula utilizada es  $N = p^k$  donde N es el número de ensayos, k el número de factores y p el número de niveles. Cuando, en el experimento, se realizan la N posibles combinaciones, estaremos en presencia de un diseño factorial. Siendo lo acostumbrado comenzar todo diseño experimental por un diseño de dos niveles, se muestra en la Tabla 2.1 el número de ensayos requeridos en diferentes experimentos a dos niveles, según los valores de k.

Tabla 2.1 Cantidad de ensayos requeridos para diseños factoriales según el número de variables, k

K	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Una vez seleccionado el diseño experimental, debe proseguirse a la elaboración de su matriz característica; que consiste en escribir las condiciones de un experimento en forma de una tabla, donde las filas corresponden a los diferentes ensayos y las columnas a los valores codificados de los factores. A estas se les llama matrices de diseño y permiten establecer todas las probabilidades de un experimento.

Cada columna en las matrices de diseño es llamado vector columna y cada fila, vector fila.

Las matrices en el caso de 2 y 3 factores son factibles de ser dibujadas geoméricamente, donde las condiciones de los ensayos corresponden a los vértices de un cuadrado o de un cubo respectivamente, siendo el centro el nivel básico, mientras que cada lado es paralelo a una de las coordenadas y es igual a dos intervalos de variación. El número de vértices del cuadrado o del cubo se corresponden con el número de ensayos de la matriz de diseño.

Por ejemplo:

Para un diseño experimental de 2 variables en el cual  $N = 4$  tendremos como matriz de diseño la presentada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Matriz de diseño experimental de un plan factorial completo  $2^2$

N	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
1	+	+	Y <sub>1</sub>
2	+	-	Y <sub>2</sub>
3	-	+	Y <sub>3</sub>
4	-	-	Y <sub>4</sub>

Los factores se codifican a valores de +1 (+) y de -1(-). Aquí las filas corresponden a los diferentes ensayos y las columnas son los vectores de los factores.

La representación gráfica se ofrece en la Figura 2.4.

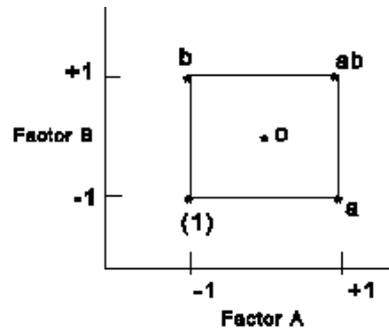


Figura 2.4 Representación geométrica de la matriz del diseño factorial  $2^2$

Para el caso de un diseño experimental de 3 variables en el cual  $N=8$  tendremos como matriz la presentada en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Matriz de diseño experimental de un diseño factorial completo  $2^3$

N	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	+	+	+	Y <sub>1</sub>
2	+	+	-	Y <sub>2</sub>
3	+	-	+	Y <sub>3</sub>
4	+	-	-	Y <sub>4</sub>
5	-	+	+	Y <sub>5</sub>
6	-	+	-	Y <sub>6</sub>
7	-	-	+	Y <sub>7</sub>
8	-	-	-	Y <sub>8</sub>

Para estos diseños experimentales, el área del cuadrado o volumen del cubo se llaman "región del experimento" (Figura 2.5).

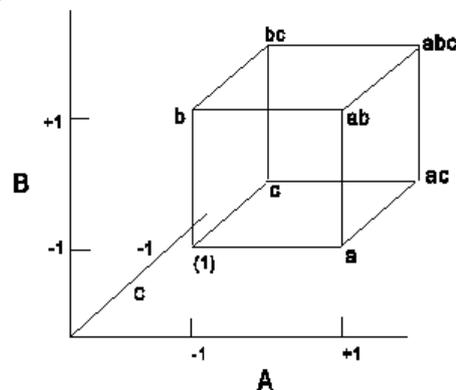


Figura 2.5 Representación geométrica de la matriz del diseño factorial  $2^3$

Cuando el número de factores es superior a dos, la complejidad de la matriz se incrementa, por lo que es necesaria la utilización de cierto procedimiento para su construcción. Usualmente se pueden usar alternativamente los siguientes procedimientos:

- a. Construcción de la matriz inicial; basado en la transformación de matrices de pequeñas dimensiones a unas de mayores dimensiones: Por ejemplo, cuando un nuevo factor es añadido, cada combinación de los niveles del diseño original se utiliza dos veces en combinación con el nivel superior e inferior del nuevo factor o sea que se repite el diseño inicial para uno y otro nivel.
- b. Alternación de los signos: en la primera columna,  $X_1$  el signo cambia en la fila adyacente, en la segunda  $X_2$ , alterna después de dos filas, en la tercera,  $X_3$  después de cuatro filas, en la cuarta,  $X_4$  después de ocho filas, etc., de acuerdo con los valores  $2^{k-1}$ , donde k es el número de la columna.
- c. Multiplicación de la matriz columna: Cuando dos columnas de una matriz son multiplicadas por filas su producto para el mismo signo es (+1) y para diferentes signos (-1). Obtendremos una nueva columna cuyo vector columna es la multiplicación de los vectores columnas  $X_1 X_2$ . Se utiliza este procedimiento para la primera parte de los ensayos y se repite con signo invertido para la segunda parte de los ensayos. Esto se ve a continuación en una matriz de tres factores, donde se ha considerado la influencia de las interacciones:

Las matrices para este tipo de planes experimentales, tienen las siguientes propiedades:

- a. La suma algebraica de los elementos de un vector columna de cada factor es igual a cero, o  $\sum_{i=1}^N -1 n X_{ji} = 0$ , donde: i es el número del factor, N es el número de ensayo,  $j = 1,2,3...k$  y  $i = 1,2,3,...N$ .
- b. Condición de normalización: La suma de los cuadrados de los elementos de cada columna es igual al número de ensayos. Es el resultado del hecho de que los valores (+1) y (-1) son asignados a los factores en la matriz.
- c. Condición de ortogonalidad: La suma de los productos de los términos por términos de cualquiera de dos factores columnas de una matriz es igual a cero:  

$$\sum_{i=1}^N -1 n X_{ji} . X_{ui} = 0$$
Ec. 2.10
- d. Condición de rotatibilidad: Los puntos de una matriz de diseño son seleccionados de forma que la precisión de predicción de los valores del parámetro de optimización, es la misma a iguales distancias desde el centro del experimento y no depende de su dirección.

#### 2.4.5. Experimentos factoriales y modelación matemática

Un objetivo básico para poder utilizar los modelos matemáticos de forma de polinomios es encontrar los coeficientes correspondientes al modelo como resultado del experimento realizado y verificar que el modelo obtenido predice con determinada exactitud el comportamiento del fenómeno modelado. Esta capacidad de predicción requiere verificar la adecuación del modelo. Para ello se realiza el procesamiento estadístico de los resultados experimentales, utilizando métodos matemáticos reconocidos y normalizados.

Para comenzar los cálculos se trabaja con un modelo lineal, por su simplicidad y que responde a la ecuación:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k$$
Ec. 2.11

Las letras griegas son utilizadas para denotar el valor "verdadero" de los desconocidos coeficientes generales. De un experimento realizado con un finito y reducido número de ensayos permite obtener solamente un modelo con coeficientes estimados del tipo:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_k X_k$$

La precisión y fiabilidad del modelo depende de las propiedades de la muestra experimental y requiere de pruebas estadísticas.

El cálculo de la estimación de los coeficientes del modelo se realiza mediante la expresión:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} * Y_i}{N * r} \quad \text{Ec. 2.12}$$

$j= 0,1,2.... k$

Siendo  $r$ , la cantidad de réplicas (usualmente 1)

Para este cálculo el valor que se toma de los factores es el codificado lo que simplifica los cálculos a simple operación aritmética.

Para el cálculo de  $b_0$  se utiliza la expresión:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{N} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Ya que  $b_0$  es la media de los resultados del parámetro de optimización. Para realizar este procedimiento en concordancia con la fórmula de calcular los coeficientes es necesario introducir dentro de la matriz de diseño un vector columna de una variable ficticia la cual en todos los ensayos tiene un valor +1. Obsérvese que en los cálculos de los coeficientes se tiene en cuenta las réplicas, ya que es una manera de no desperdiciar información.

Los coeficientes de las variables independientes (factores) muestran la magnitud de la influencia o significación de los factores. A mayor valor numérico de un coeficiente, mayor es la influencia de un factor, si el coeficiente tiene un signo positivo entonces con el incremento del valor del factor del parámetro, aumenta y viceversa. El valor del coeficiente corresponde a la contribución del factor dado al valor del parámetro de optimización cuando el factor pasa desde el nivel cero al nivel inferior o al nivel superior.

A veces es conveniente tasar la contribución de un factor cuando pasa del nivel inferior al superior. Esta contribución se llama efecto de un factor y es numéricamente igual al doble del valor del coeficiente.

En la primera etapa de un diseño de experimentos se fija un modelo lineal, sin embargo, no tenemos garantías de que, dentro del intervalo de variación seleccionado, el proceso sea descrito por tal modelo. Existen métodos para verificar la confiabilidad de un modelo lineal (test de adecuación).

Un modelo no es lineal entre otras cosas, debido a la interacción de los factores. Mediante un experimento factorial es posible el cálculo cuantitativo de los efectos de las interacciones: Para este propósito es necesario usar la regla de la multiplicación de las columnas, obteniéndose una columna del producto de dos factores. El nuevo vector columna puede ser tratado de la misma forma que un factor. Por ejemplo: Matriz de diseño de un experimento factorial  $2^2$  considerando el efecto de las interacciones se resume en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Matriz de diseño experimental de un diseño factorial completo  $2^2$  considerando las interacciones

N	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y
1	+	+	+	Y <sub>1</sub>
2	+	-	-	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	Y <sub>3</sub>
4	-	-	+	Y <sub>4</sub>

Es muy importante que todas las propiedades de las matrices de diseño consideradas anteriormente se mantengan cuando las columnas de los efectos de las interacciones se adicionan.

La ecuación del modelo lineal estimado se representa:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 \quad \text{Ec. 2.14}$$

En optimización se procura hacer los efectos de las inacciones tan pequeños como sea posible. Pero en el caso de que las interpolaciones por el contrario su determinación es altamente importante e interesante.

Con un incremento del número de factores, el número posible de interacciones rápidamente se acrecienta.

El número total de posibles efectos, incluidos  $b_0$ , los efectos lineales y las interacciones es igual al número de ensayos de un experimento factorial.

La naturaleza ortogonal de la matriz de diseño permite obtener coeficientes estimados que son independientes uno de otro. Es decir que el valor de un coeficiente no depende del valor de otro.

La afirmación anterior es solo valedera cuando se incluyen en el modelo los efectos lineales y las interacciones, en el caso de los efectos cuadrático, cúbicos, etc., las interacciones también pueden ser apreciables, así para modelo cuadrático, de dos factores, el modelo puede ser escrito como sigue:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 \quad \text{Ec. 2.15}$$

#### **2.4.6. Premisas para realizar un experimento.**

Es necesario ser muy cuidadoso al preparar la realización de un experimento, montar la instalación experimental, chequear y calibrar los instrumentos, etc. Es también importante establecer el método y el diseño experimental especificando la secuencia de ejecución y los procedimientos.

Es muy importante en la realización de un experimento, ejecutar cada corrida en un orden aleatorio, con el fin de que los errores experimentales no estén agrupados en una sección de la matriz.

Se define el número de réplicas como la cantidad de veces que se monta y desmonta la instalación experimental para realizar una sola corrida.

Nuestro objetivo al elaborar un Plan Experimental, es encontrar los coeficientes desconocidos del modelo de acuerdo a los resultados de un experimento, para lo que es necesario hacer un número de observaciones que verifiquen la adecuación del modelo.

Sin embargo, muchos experimentos contienen un elemento de indeterminación debido a la naturaleza ilimitada del material experimental.

Aunque se realicen varias réplicas de un ensayo o corrida experimental, nunca se obtendrán valores similares de la variable respuesta ya que está presente el error de reproductividad.

El error de un ensayo es la suma cuantitativa de muchos errores en las mediciones de los factores, del parámetro de optimización, etc. Estos pueden ser divididos en sus constituyentes; sin embargo, la cuestión de la clasificación de los errores es muy complicada por lo que es aceptado dividirlos en "errores sistemáticos y errores aleatorios".

Los primeros son debidos a razones que actúan regularmente en una dirección definida, mas no siempre pueden ser estudiados y determinados cuantitativamente. Estos se ven durante la calibración de instrumentos de medición (ejemplo termopares) y otros.

Los segundos son los que aparecen irregularmente, cuyas causas se desconocen y es imposible tenerla en consideración de antemano.

#### 2.4.7. Determinación de los errores en los experimentos

Para determinar este error se comienza por determinar las varianzas experimentales en cada ensayo,  $S_i^2$ , para lo cual se utiliza las expresiones:

Siendo,  $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ , los resultados del parámetro de optimización para los diferentes ensayos en las mismas condiciones de combinación de los factores, y n el número de repeticiones de los ensayos, entonces:

$$Y = (y_1 + y_2 + y_3 \dots + y_n) / n \quad \text{Ec. 2.16}$$

$$S^2 = \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{Y})^2 / n - 1 \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde n-1, es el número de grados de libertad,  $f_i$

La raíz cuadrada de la varianza experimental del ensayo es conocido como error estándar.

En adición, se calcula la varianza en cada ensayo de la matriz de diseño que consiste en una serie de ensayos y la varianza de todo el experimento es determinada encontrando un promedio de las varianzas de todos los ensayos. De acuerdo con la terminología utilizada en el diseño de experimentos estamos detallando en el cálculo de la varianza del parámetro de optimización o lo que es lo mismo, de la varianza de reproductibilidad del experimento  $S^2_{rep}$ .

La varianza de reproductividad del experimento se calcula de la expresión:

$S^2\{y\}^2 = \sum^N \sum^n (y_q - \bar{Y})^2 / N(n - 1)$	Ec. 2.17
---	----------

La Ec. 2.17 solo puede ser utilizada si las varianzas son homogéneas, lo que ratifica la importancia de la determinación del comportamiento de la varianza (si es homogénea o no).

#### 2.4.8. Determinación de la homogeneidad en las varianzas experimentales

Para saber sobre el comportamiento de la varianza, se emplean varios criterios estadísticos; entre ellos los Test de *Fisher*, de *Cochran* y de *Barlett* (Spiridonov, 1973)

**Test de Fisher:** se divide la mayor de las varianzas obtenidas en un ensayo entre la menor de las varianzas obtenidas en un ensayo, es decir:

$F_{f_1;f_2} = (S_i^2 \text{ max}) / (S_i^2 \text{ min})$  ese test de *Fisher* calculado se compara con el test de Fisher tabulado y si es menor las varianzas se consideran homogéneas, en caso contrario las varianzas no son homogéneas.

Ejemplo. supongamos  $S_1^2 = 5,14$  con  $n_1 = 7$  y  $f_1 = 6$ , y  $S_2^2 = 0,324$  con  $n_2 = 6$  y  $f_1 = 5$

Entonces  $F_{cal} = 5,14/0,324 = 15,9$ , siendo los grados de libertad  $f_1 = 6$  y  $f_2 = 7$  encontramos que la  $F_{tab} = 5$  (Perry y Chilton, 1973).

Por lo que ser la  $F_{cal} > F_{tab}$  Las varianzas difieren significativamente.

Cuando las varianzas comparadas difieren significativamente se pueden verificar otras pruebas como son el Criterio de Cochran.

a. **Test de Cochran:** Este se emplea si el número de varianzas que están siendo comparadas es mayor a dos y una de ellas es considerablemente mayor que las otras; siendo igual el número de réplicas para todos los ensayos. Según este, existe un comportamiento homogéneo si se cumple la condición que expresa una división de la varianza máxima entre la suma de todas las varianzas, a saber:

$$G = S_{2\max} / \sum S_2 \quad \text{Ec. 2.18}$$

Los valores de G se determinan para (n-1), N, donde n es el número de repeticiones y N el número de ensayos (Spiridonov, 1973)

La hipótesis de la homogeneidad de las varianzas se confirma si el valor experimental de G no excede el valor de  $G_{\text{tabulado}}$ .

Entonces es posible determinar un promedio de las varianzas utilizando la fórmula:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{iq} - y_i)^2 S^2[y] = N(n - 1) \quad \text{Ec. 2.19}$$

Los valores de G para experimentos con dos y tres repeticiones, se reportan en la Tabla 2.5

Tabla 2.5 Valores de G para ensayos con n igual a dos, tres, cuatro y cinco replicas.

N	n-1			
	1	2	3	4
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7467
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287
5	0,8412	0,7679	0,5981	0,5441
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307
8	0,6708	0,5157	0,4377	0,3910
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2820
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921
24	0,3434	0,2354	0,2758	0,2419
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082
60	0,1737	0,1131	0,0895	0,0765
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419
Infinitas	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

b. Si se considera que la heterogeneidad de las varianzas está presente un esfuerzo para probarlo se puede hacer mediante el Test de Barlett. (Adler et al., 1975)

En primer lugar, se determina la varianza de reproductividad mediante la conocida expresión:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_i^N S^2(i) f_i}{\sum_i^N f_i} \quad \text{Ec.2.20}$$

Encontramos, entonces la cantidad:

$$\frac{1}{c} (f * \log S^2(y) - \sum_1^n f_i * \log S^2(i))$$

Ec.2.21

Donde:  $c = 0.4343\{1 + (1/(3N - 3))[\sum_i^N(1/f_i) - 1/f]\}$

Aquí el número de grados de libertad es N-1, donde N es el número de varianzas que están siendo comparadas. En un diseño factorial de  $2^k$  experimentos esta cantidad es igual a los ensayos de la matriz.

*Barlett* demostró que la cantidad

$\frac{1}{c} (f * \log S^2(y) - \sum_1^n f_i * \log S^2(i))$  obedece a la distribución de *Chi* cuadrado ( $X^2$ ) con (N-1) grados de libertad. El criterio de *Barlett* está basado en la distribución normal por lo que si existe una desviación de ella se puede cometer un error en la prueba de heterogeneidad de las varianzas.

#### 2.4.9. Determinación de la necesidad de repetir y excluir ensayos experimentales.

Mediante la determinación de la homogeneidad o no de las varianzas se tiene una medida del error experimental y su distribución en todo el experimento. La varianza y el error estándar, son medidas de la dispersión y variabilidad. A medida que ellos aumenten, mayores serán las dispersiones de los valores respecto al valor medio.

Es muy importante excluir las observaciones deficientes o extenderse en la repetición de los ensayos, cuando esto ocurra, para evitar grandes errores, pero como es natural nunca se permite hacer correcciones arbitrarias, por lo que existen reglas especiales para descontar las observaciones erróneas; por ejemplo:

- a. Aplicando la "t de *Student*". Las observaciones defectuosas se pueden determinar con esta herramienta conociendo el error estándar, mediante la expresión:

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{N * n}}$$

Ec. 2.22

Aquí, si el valor absoluto calculado es mayor que el valor tabulado de la t de *Student* para los grados de libertad equivalente al número de repeticiones, el valor seleccionado tiene un error mayor que el homogéneo de la muestra y debe ser rechazado.

- b. Un análisis similar puede hacerse mediante la prueba de Fisher, repitiendo ensayo en aquellos en que se encuentre que la varianza no es homogénea, Se incorporan las réplicas que mejoren la homogeneidad de las varianzas y se rechazan aquellas que lo perjudica. Este último procedimiento tiene gran valor para minimizar la repetición de ensayos y con ello el trabajo experimental total, si se procede a solo hacer dos replicas iniciales de cada fila de la matriz experimental y se procede a solo repetir aquellas filas que muestren varianzas no homogéneas.

#### 2.4.10. Aleatoriedad de los ensayos

Para excluir la influencia de los errores sistemáticos para las condiciones externas (variaciones en temperatura, materias primas, diferentes ayudantes de laboratorio, etc.), es recomendable utilizar una secuencia aleatoria en la ejecución de la planificación de los ensayos en la matriz del diseño experimental.

Ejemplo de aleatorización de los ensayos

La Tabla 2.6 muestra la matriz de diseño obtenida para un diseño  $2^3$  obtenida de la forma convencional, es decir el diseño  $2^2$  ha sido repetido dos veces, en los primeros cuatro ensayos  $X_3$  está fijado en el nivel alto, y en los últimos 4 a se fijó en el nivel bajo.

Tabla 2.6 Matriz no aleatoria de un diseño  $2^3$

N	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y	N	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y
1	+	+	+	$y_1$	5	+	+	-	$y_5$
2	-	-	+	$y_2$	6	-	-	-	$y_6$
3	+	-	+	$y_3$	7	+	-	-	$y_7$
4	-	+	+	$y_4$	8	-	+	-	$y_8$

Supongamos que, debido a la capacidad de experimentación diaria, se podrán hacer cuatro ensayos en cada día. Aquí está el problema, pues no sabemos si se pueden garantizar idénticas condiciones para realizar los ensayos cada día. Por otro lado, con un nivel mínimo de réplicas, es decir dos réplicas por cada condición experimental en la matriz de diseño, serán necesario 16 ensayos, lo que implica cuatro días de experimentación en los cuales la probabilidad del efecto de los errores externos será mayor.

En el análisis para la aleatoriedad de la realización de los ensayos experimentales se considera que las repeticiones de los ensayos se producen de la siguiente forma: siendo los 8 ensayos de la matriz del diseño los números 1, 2 hasta 8, sus réplicas serán respectivamente 9, 10 hasta 16. Así en el ensayo número 1 tendrá como réplica el ensayo número 9. Por lo anterior deben distribuirse aleatoriamente la ejecución de los 16 ensayos, para lo cual es necesario auxiliarse de una Tabla de números aleatorios que se reportan en la literatura científica especializada (Kendall y Stuart, 1946)(Adler et al., 1975).

El procedimiento consiste en escribir en orden de aparición los números del 1 al 16 (al ser 16 la cantidad de ensayos que se están ordenando aleatoriamente), descartando los mayores de 16 y anotando el número menos de 16 que aparezca inmediatamente debajo de cada uno y así sucesivamente. De acuerdo con este procedimiento, el orden en que los ensayos debe ejecutarse es como sigue: 2, 15, 9, 5, 12, 14, 8, 13, 16, 1, 3, 7, 4, 6, 11, 10.

Eso implica que el ensayo número 2 es el primero a realizarse, y el segundo es 15 (que no es más que una réplica del 7), etc.

Se recomienda no violar la selección de secuencia de aleatoriedad de los ensayos.

#### 2.4.11. División de las matrices de diseño en bloques.

Si se tiene información disponible sobre posibles cambios en el medio ambiente, las materias primas, equipos, una buena práctica que el efecto de las variaciones de las condiciones externas se mezcle (confunda) con una interacción definida que no signifique pérdida de información. Así, por ejemplo, si sabemos que trabajaremos con dos diferentes lotes de materias primas, una matriz de diseño  $2^3$  puede dividirse en dos bloques en los cuales los efectos de las variaciones en las materias primas puedan evaluarse en los resultados de la triple interacción. De esta manera la influencia de la heterogeneidad de la materia prima será claramente evaluado en las interacciones entre todos los factores (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 División de la matriz  $2^3$  en dos bloques

Bloque	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y
1	+	-	-	+	+	-	-	+	Y <sub>1</sub> + ε
	+	+	-	-	-	-	+	+	Y <sub>2</sub> + ε
	+	-	+	-	-	+	-	+	Y <sub>3</sub> + ε
	+	+	+	+	+	+	+	+	Y <sub>4</sub> + ε
2	+	-	-	-	+	+	+	-	Y <sub>5</sub>
	+	+	-	+	-	+	-	-	Y <sub>6</sub>
	+	-	+	+	-	-	+	-	Y <sub>7</sub>
	+	+	+	-	+	-	-	-	Y <sub>8</sub>

En la matriz de diseño de la Tabla 2.7, la característica de un lote de materias primas es definido como la interacción  $X_1X_2X_3 = +1$  y las del otro lote como  $X_1X_2X_3 = -1$ . La diferencia entre materias primas se puede considerar como un nuevo factor  $X_4$  con un contraste definido de  $1 = X_1X_2X_3X_4$ . Debido al error "ε" (diferencia) entre los lotes de materias primas y del patrón de confusión del nuevo diseño, se puede determinar que:

$$\beta_{123} = b_{123} + \varepsilon/2 \quad \text{Ec. 2.23}$$

## 2.5. Métodos de cálculo y ajuste de los modelos.

### 2.5.1. Ajuste de los modelos.

Estadísticamente se han desarrollado gran cantidad de métodos para el procesamiento de los resultados de un experimento, sin embargo, el más utilizado de ellos por su extensa aplicación es el método de los mínimos cuadrados que fue desarrollado por el esfuerzo de Legendre y Gauss hace más de 150 años (Adler et al., 1975). El método descansa en el concepto de minimizar los valores del cuadrado de la suma de los ajuste de los valores experimentales a los estimados por el modelo encontrado de manera que:

$$U = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \text{Min} \quad \text{Ec. 2.24}$$

El método de los mínimos cuadrados en su aplicación se transforma en un análisis de regresión que como cualquier método estadístico se puede aplicar con ciertas consideraciones y postulados.

**Primer postulado:** el parámetro de optimización  $Y$ , es una cantidad aleatoria con una ley de distribución normal. La varianza de reproductibilidad es una de las características de su ley de distribución.

**Segundo postulado:** la varianza de "Y" no depende de su valor absoluto. El cumplimiento de este postulado se ratifica con ayuda de la verificación de la homogeneidad de las varianzas. La violación de este postulado no es permisible.

**Tercer postulado:** los valores de los factores no son cantidades aleatorias. La variación de este postulado dificulta la realización de la matriz de diseño, por esa razón usualmente es fácil de detectar por un experimentador.

**Cuarto postulado:** no puede existir correlación entre los valores de los factores. Esto se determina automáticamente debido a la necesaria ortogonalidad de la matriz de diseño.

Gracias a la codificación de los factores las ecuaciones de cálculo para un experimento lineal se han simplificado a las ecuaciones que se fueron presentados anteriormente, en donde para un modelo del tipo polinomio:

El término independiente se determina por la expresión:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{N} \quad \text{Ec. 2.25}$$

El cálculo de la estimación de los coeficientes del modelo se realiza mediante la expresión:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} * Y_i}{N * r} \quad \text{Ec. 2.26}$$

$j = 0, 1, 2, \dots, k$

Siendo  $r$ , la cantidad de réplicas (usualmente 1)

Procedimiento utilizado tanto para los diseños factoriales, como para los diseños factoriales fraccionados.

### 2.5.2. Verificación de la adecuación del modelo.

La primera cuestión que es de interés después de calculados los coeficientes del modelo es probar su confiabilidad. Esto se puede probar mediante la determinación de la prueba de adecuación (ajuste) del modelo.

Se requiere que para que un modelo sea adecuado para la predicción de los valores de comportamiento del fenómeno que describe, que la precisión del modelo sea compatible con la precisión del experimento.

La suma residual de cuadrados divididos por el número de grados de libertad es denominada varianza residual o la varianza de adecuación (ajuste):

$$S^2_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f = N - (k + 1)} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Recordemos que:

$N$ : número de ensayos;  $K$ : cantidad de factores

Esta adecuación del modelo se realiza con ayuda de la llamada varianza de ajuste (adecuación) y la varianza de reproductibilidad

Mediante la prueba de Fisher se puede verificar el criterio de que la precisión del modelo sea compatible con la precisión del experimento, si hacemos el cálculo de  $F$  cuando:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} \quad \text{Ec. 2.28}$$

Un modelo tendrá un buen ajuste es decir será adecuado a los propósitos de pronosticar el comportamiento del fenómeno cuando varían los factores siempre que el valor de la prueba de *Fisher* calculado, sea menor que el valor de la prueba de *Fisher* tabulado.

Los valores de la prueba (test) de *Fisher* se encuentran en diversas publicaciones científicas de temas de estadísticas y de ingeniería o ciencias naturales.

### 2.5.3 Verificación de la significación de los coeficientes

Existen dos vías para determinar si un coeficiente es significativo las cuales se exponen a continuación:

- a. Mediante el cálculo del intervalo de confianza, o
- b. Mediante la determinación del valor de la prueba de  $t$  de *Student*,

Cuando un diseño factorial completo o un diseño factorial fraccionado se utiliza, los intervalos de confianza para todos los coeficientes (incluyendo las interacciones) son iguales unos a otros. El paso fundamental es entonces encontrar la varianza de los coeficientes de regresión  $S\{b_j\}^2$  que puede ser determinado por la formula (Williams, 1959):

$$S\{b_j\}^2 = S^2\{y\} / N \quad \text{Ec. 2.29}$$

$$s\{b_j\} = \frac{\pm\sqrt{S^2\{y\}}}{N} \quad \text{Ec. 2.30}$$

Un análisis de esta fórmula muestra que la varianza de todos los coeficientes es igual, ya que ello depende solamente de la varianza de reproductibilidad del experimento y del número de ensayos.

El intervalo de confianza ( $\Delta b_j$ ) se puede construir por la expresión:

$$\Delta b_j = \pm t S b_j \quad \text{Ec. 2.31}$$

Donde  $t$  es el valor tabulado de la prueba de Student para el número de grados de libertad para el cual fue determinada la varianza de reproductividad  $S^2\{y\}$  al nivel de significación seleccionado (usualmente 0.05).

Un coeficiente será significativo si su valor absoluto es mayor que el intervalo de confianza.

El intervalo de confianza fija los límites inferior y superior del coeficiente entre:

$$b_j - \Delta b_j, \quad y b_j + \Delta b_j \quad \text{Ec. 2.31}$$

El valor de  $t$  puede ser encontrado en las tablas de la literatura científica, donde  $t$  son los grados de libertad.

Si se prefiere la prueba de la  $t$  de *Student* al intervalo de confianza para la determinación de la significación de los coeficientes se utiliza la fórmula:

$$t = b_j / S\{b_j\} \quad \text{Ec. 2.32}$$

Aquí el valor calculado de la prueba de *Student* es comparada con la tabulada para el nivel de significación seleccionado y los grados de libertad correspondientes, debiendo ser el calculado mayor que el tabulado para que haya significación de un coeficiente.

#### 2.5.4. Ejemplo de uso de un diseño factorial (Completo).

El proceso de intensificación de una instalación industrial productora de neumáticos recauchados demostró tener como etapa limitante al incremento de las capacidades productivas de toda la instalación el proceso de vulcanización, no sólo determinante para la capacidad de una planta de recuperación de neumático recauchado, sino también decisivo en la calidad del neumático recauchado y en los consumos de portadores energéticos, por lo que se realizó una investigación para determinar el efecto de cada una de las variables que pueden decidir tecnológicamente en esa etapa, mediante un diseño experimental  $2^4$  (E. González-Suárez y Otero, 1983) que incluyó como variables de entrada:

- Temperatura,  $X_1$ .
- Tiempo de espesor de *Camelback*,  $X_2$ .
- Presión en el interior del neumático en la prensa,  $X_3$ .

- Relación entre la profundidad de diseño de la matriz del molde y el espesor de *Camelback* empleado,  $X_4$

Siendo la función objetivo, (respuesta) la Dureza de la banda de rodamiento del neumático reencauchado.

El plan y los resultados experimentales obtenidos industrialmente se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Plan experimental para el estudio del efecto de las variables de vulcanización en la dureza de la capa de reencauche,  $N=16$ ,  $\sum Si^2=7,69$ ,  $I=n$

Nº	X1	X2	X3	X4	Yi	Si2
1	-	-	-	-	51,7	0,1
2	-	+	+	-	53,2	0,5
3	+	-	-	-	54,7	0,2
4	+	-	+	+	53,0	0,8
5	+	+	+	-	55,1	0,7
6	+	+	-	+	54,1	0,2
7	-	+	-	+	54,8	1,4
8	-	+	-	+	54,7	0,2
9	-	+	-	-	55,3	0,5
10	-	-	+	-	52,8	0,5
11	+	+	+	+	55,6	0,5
12	+	-	-	+	54,3	0,0
13	-	-	-	+	55,6	0,0
14	+	-	+	-	53,4	0,1
15	+	+	-	-	53,4	1,4
16	-	+	+	+	54,7	0,5

Para determinar la Varianza de Reproductividad,  $S(Y)^2$ , se requiere saber si las varianzas son homogéneas; para ello se toman las varianzas máximas y mínimas y se calcula la prueba (test) de Fisher experimental, si estas no difieren entre sí, es obvio que las otras varianzas tampoco diferirán.

Luego  $F_{exp1,1} = 1.44/0.0 = \text{Infinito}$

Siendo  $F_{tab1,1} = 161$  de (Perry, Green, y Maloney, 2001) por lo que las varianzas aparentan no ser homogéneas y se requiere aplicar el criterio de Cochran (Spiridonov, 1973) de donde:

$Gp1,1exp = Si^2Max / \sum Si^2 = 1,44/7,69 = 0,1873$ , lo que es menor que  $Gp1,1tab = 0,6798$  (Spiridonov, 1973).

Por lo que se puede determinar  $S(Y)^2$  como

$$\sum Si^2 / N = 0,4806$$

Ec. 2.34

Los coeficientes determinados como:

b 0	b 1	b 2	b 3	b 4	b12	b13	b14	b23	b24	b34
54,045	0,32125	0,33375	0,15125	0,155	-0,36375	-0,11125	-0,42875	-0,01625	-0,01625	0,09625

Para determinar la significación de los coeficientes se calcula entonces el intervalo de confianza de  $\Delta b_j = \pm t_f * S^2(b_j)$ , donde

$$S^2(b_j) = \frac{S(Y)^2}{N} \text{ y } S(b_j) = \pm \sqrt{\frac{S(Y)^2}{N}} = \pm \sqrt{S(Y)^2/16} = 0,174648 \quad \text{Ec. 2.35}$$

tf, siendo f = 16 es 1,746 para P 95% (Perry et al., 2001)

Entonces  $\Delta b_j = \pm 0,30497$ , por lo que los coeficientes significativos son:  $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{14}$

El modelo obtenido para la dureza después de probada la significación de los coeficientes es el siguiente:

$$y = 54,0045 + 0,32125 X_1 + 0,33375 X_2 - 0,36375 X_1 X_2 - 0,142875 X_1 X_4 \quad \text{Ec.2.36}$$

#### *Determinación de la adecuación del modelo*

La adecuación del modelo se determina mediante la relación de la Varianza de adecuación,  $S(ad)^2$  con la varianza de reproductibilidad  $S(Y^2)$ , es decir:

Un modelo es adecuado si la Prueba de Fischer calculada  $f_1, f_2 = S(ad)^2 / S(Y^2)$  es menor que Prueba de Fischer tabulada, siendo  $f_1 = N - (K+1) = 16 - (4+1) = 11$

$N=16$

La varianza de adecuación será entonces;

$$S(ad)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_{exp} - Y_{mod})^2 / f_1 = 1,13245 \quad \text{Ec. 2.37}$$

y  $F_{cal_{11,16}} = 1,325/0,488125 = 2,32$  que es menor que  $F_{tab_{11,16}} = 2,46$  por lo que el modelo es adecuado.

## **2.6. Diseño factorial fraccionado.**

### **2.6.1. Minimizando el número de ensayos**

El número de ensayos en un diseño experimental factorial es mucho mayor que el número de coeficientes del modelo lineal que es determinado.

En otras palabras, el diseño experimental factorial tiene gran número de ensayos extras para los propósitos de un primer experimento que tiene como objetivo conocer el gradiente del efecto de los factores sobre el parámetro de optimización. Los problemas prácticos usualmente dependen de muchas variables, esto incrementa el número de ensayos que deben realizarse, no obstante, es posible reducirlos utilizando los diseños factoriales parciales, los que se comportan de acuerdo a los mismos principios generales expuestos hasta aquí, siendo su forma indicada  $2^k - p$ , diseños de *Box - Hunter* (Box y Hunter, 1961).

El uso de los diseños factoriales parciales se ha incrementado en los últimos años, así se ha reportado en la literatura científica (Prvan y Street, 2002) el uso de este tipo de diseño en 140 artículos científicos publicados entre 1997 y el 2002.

Para estos diseños se emplean en las últimas variables las combinaciones de los principales productos de las primeras.

Así, por ejemplo, un diseño  $2^4$  tiene 16 ensayos, puede reducirse a uno de  $2^{4-1}$  de 8 de la siguiente forma:

Definiendo un contraste  $X_4 = X_1 X_2 X_3$ , la matriz de diseño será el bloque experimental que se presenta en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Matriz de diseño experimental de un diseño factorial fraccionado  $2^{4-1}$ , con contraste definido  $X_4=X_1X_2X_3$

N	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4(X_1X_2X_3)$
1	+	+	+	+
2	+	-	+	-
3	-	+	+	-
4	-	-	+	+
5	+	+	-	-
6	+	-	-	+
7	-	+	-	+
8	-	-	-	-

Aquí se genera una relación entre las variables que origina un mezclado de los efectos de los factores y las interacciones cuando estas son determinadas.

Los coeficientes se calculan mediante los mismos procedimientos que en el diseño factorial, pero no debe olvidarse que la disminución de los ensayos implica un sacrificio de información por lo que al calcular los coeficientes deben considerarse el mezclado de los efectos.

Siendo, en este caso, el contraste definido  $X_4 = X_1X_2X_3$ , entonces  $X_1X_4 = X_1X_1X_2X_3$ , pero como los cuadrados de +1 y -1, será siempre igual a la unidad, la ecuación anterior se simplifica y quedará la expresión:  $X_1X_4 = X_2X_3$  que se conoce como "relación generada", de donde al calcular el término de las interacciones  $b_{14}$ , tendremos realmente:  $b_{14} = \beta_{14} + \beta_{23}$ , apareciendo mezcladas las interacciones  $X_1$  con  $X_4$  y la interacción de  $X_2$  con  $X_3$ .

De acuerdo con el contraste definido se generan nuevas relaciones para cada una de las variables y se alcanza la siguiente mezcla de los efectos:

$$X_1X_4 = X_2X_3, \text{ de donde } b_{14} = \beta_{14} + \beta_{23} \quad \text{Ec. 2.38}$$

$$X_2X_4 = X_1X_3, \text{ de donde } b_{13} = \beta_{13} + \beta_{24} \quad \text{Ec. 2.39}$$

$$X_3X_4 = X_1X_2, \text{ de donde } b_{12} = \beta_{12} + \beta_{34} \quad \text{Ec. 2.40}$$

$$1 = X_1X_2X_3X_4, \text{ de donde } b_0 = \beta_0 + \beta_{1234} \quad \text{Ec. 2.41}$$

$$X_1 = X_2X_3X_4, \text{ de donde } b_1 = \beta_1 + \beta_{234} \quad \text{Ec. 2.42}$$

$$X_2 = X_1X_3X_4, \text{ de donde } b_2 = \beta_2 + \beta_{134} \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$X_3 = X_1X_2X_4, \text{ de donde } b_3 = \beta_3 + \beta_{124} \quad \text{Ec. 2.44}$$

$$X_4 = X_1X_2X_3, \text{ de donde } b_4 = \beta_4 + \beta_{123} \quad \text{Ec. 2.45}$$

De acuerdo a este mezclado de los efectos, solo se podrán calcular 8 coeficientes para el modelo y realmente serán coeficientes que tiene el mezclado de los efectos de las variables y las interacciones, lo que se explica por la pérdida de información al disminuir el número de ensayos, como se comprende, según sea el contraste definido así será el mezclado de los efectos de las variables reales y por ello solo un buen conocedor del fenómeno que se quiere estudiar, podrá elegir el contraste definido más adecuado.

El modelo obtenido de acuerdo a la selección de coeficientes representativos seleccionados será de la forma:

$$Y = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_{12} + b_{13} + b_{14} \quad \text{Ec. 2.46}$$

u otra alternativa de modelo acorde con la apreciación del experto que diseña el experimento. Una vez valorada la calidad del modelo y la utilidad para el destino hacia el cual está dirigido, podrá evaluarse el paso posterior que en caso requerido puede incluir completar el diseño factorial de 4 variables, pues el primer bloque de ensayos realizados son la mitad del diseño factorial completo que es entonces necesario realizar para evitar pérdida de información. De acuerdo con los repliegues parciales que se utilicen se podrá disminuir, o no, la cantidad de ensayos a realizar y con ello la información disponible para ser obtenida en el procesamiento de los resultados, los repliegues pueden ser de diversas medidas, a continuación, en la Tabla 2.10 se brinda un análisis comparativo entre diversos repliegues parciales y el correspondiente diseño factorial completo (Adler et al., 1975).

Tabla 2.10 Análisis comparativo de ensayos necesarios entre diseños factoriales y fraccionados para distintos números de variables independientes.

Número de factores	Número de ensayos			
	Repliegue fraccional	Símbolo	Diseño parcial	Diseño factorial
3	1/2 repliegue de $2^3$	$2^{3-1}$	4	8
4	1/2 repliegue de $2^4$	$2^{4-1}$	8	16
5	1/4 repliegue de $2^5$	$2^{5-2}$	8	32
6	1/8 repliegue de $2^6$	$2^{6-3}$	8	64
7	1/16 repliegue de $2^7$	$2^{7-4}$	8	128
5	1/2 repliegue de $2^5$	$2^{5-1}$	16	32
6	1/4 repliegue de $2^6$	$2^{6-2}$	16	64
7	1/8 repliegue de $2^7$	$2^{7-3}$	16	128
8	1/16 repliegue de $2^8$	$2^{8-4}$	16	256
9	1/32 repliegue de $2^9$	$2^{9-5}$	16	512
10	1/64 repliegue de $2^{10}$	$2^{10-6}$	16	1024
11	1/128 repliegue de $2^{11}$	$2^{11-7}$	16	2048
12	1/256 repliegue de $2^{12}$	$2^{12-8}$	16	4096
13	1/512 repliegue de $2^{13}$	$2^{13-9}$	16	8192
14	1/1024 repliegue de $2^{14}$	$2^{14-10}$	16	16384
15	1/2048 repliegue de $2^{15}$	$2^{15-10}$	16	32768

La selección de uno u otro contraste definido, está en dependencia de los resultados esperados del experimento y de la necesidad de no mezclar determinados efectos de interacciones con los efectos directos de las variables o de determinadas interacciones. En muchos casos los efectos directos (lineales) se calculan mezclándolos con los efectos de las interacciones de segundo orden (entre tres variables) lo que posibilita una buena estimación de los valores reales de los

efectos lineales, pues como se conoce, los efectos de las interacciones de mayor orden son menos probables.

En caso de que se tenga dudas sobre las posibilidades de despreciar y por lo tanto no influyan en los valores de los efectos, la influencia de las interacciones o de alguna de ellas, ya sean de primer, segundo, tercer o cuarto orden y se quiere mejorar la precisión del modelo, es entonces necesario realizar una segunda serie de ensayos, seleccionando de la misma forma otro repliegue parcial que complementa la información obtenida.

Para el segundo repliegue se puede utilizar el método de “superposición”, consistente en que el segundo repliegue se obtiene desde el primero por la simple inversión de los signos de la matriz. Este método es particularmente útil cuando el experimento inicial ha sido un repliegue 1/4, 1/8 o aún más pequeño.

### 2.6.2. Ejemplos de uso de diseños factoriales fraccionados.

#### Ejemplo 1

En el estudio del proceso de cocción de bagazo almacenado (González Suárez, 1982) en una empresa productora de papel para ondular se encontró de investigaciones anteriores y de la literatura científica que cuatro factores incidían en los parámetros de optimización:

$Y_k$ : Número de Kappa (medida de la calidad de la pulpa) y  $Y_m$ : Materia orgánica (medida del impacto ambiental negativo del proceso de cocción).

Estas variables independientes fueron:

$X_1$ : por ciento de sosa caustica añadida;  $X_2$ : Relación fibra no fibra en el bagazo;  $X_3$ : Tiempo de almacenamiento;  $X_4$ : Hidromódulo

La matriz de diseño organizado para un experimento  $2^{4-1}$  se refleja en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Plan experimental del estudio de la cocción de bagazo almacenado

N	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4=X_1X_2X_3$	$Y_k$	$Y_m$
1	+	+	+	+	89,0	46464,7
2	+	+	-	-	93,0	45995,9
3	+	-	+	-	80,0	46048,7
4	+	-	-	+	98,9	46586,7
5	-	+	+	-	92,8	46476,5
6	-	+	-	+	97,3	46000,5
7	-	-	+	+	89,5	46079,6
8	-	-	-	-	107,6	46610,5

$$\text{Contraste definido: } X_4 = X_1X_2X_3 \quad \text{Ec. 2.47}$$

$$\text{Relación generada: } \mathbf{1} = X_1X_2X_3X_4 \quad \text{Ec. 2.48}$$

Patrón de confusión de los factores:

$$b_1 = \beta_1 + \beta_{234} \quad \text{Ec. 2.49}$$

$$b_2 = \beta_2 + \beta_{134} \quad \text{Ec. 2.50}$$

$$b_3 = \beta_3 + \beta_{124} \quad \text{Ec. 2.51}$$

$$b_4 = \beta_4 + \beta_{123} \quad \text{Ec. 2.52}$$

$$b_{12} = \beta_{12} + \beta_{34} \quad \text{Ec. 2.53}$$

$$b_{13} = \beta_{13} + \beta_{24} \quad \text{Ec. 2.54}$$

$$b_{14} = \beta_{14} + \beta_{23} \quad \text{Ec. 2.55}$$

Los coeficientes calculados entonces:

Para  $Y_k$ , número de Kappa

$b_0$ : 93,5125;  $b_1$ : -3,2875;  $b_2$ : -0,4875;  $b_3$ : -5,6875;  $b_4$ : 0,1625;  $b_{12}$ : 1,2625;  $b_{13}$ : -0,0375;  $b_{14}$ : 3,5625

Donde siendo  $t_{95,8} = 1,86$  (Perry et al., 2001), para el modelo de Kappa  $\Delta b_j$ :  $\pm 1,9892$  siendo significativos  $b_1$ ,  $b_3$  y  $b_{14}$  y desde luego  $b_0$ .

Para  $Y_m$ , Materia orgánica

$b_0$ : 46282,8875;  $b_1$ : -8,8875;  $b_2$ : -48,4875;  $b_3$ : -15,5125;  $b_4$ : -0,0125;  $b_{12}$ : 4,7875;  $b_{13}$ : -1,7875;  $b_{14}$ : 251,7125

Donde siendo  $t_{95,8} = 1.86$  (Perry et al, 1999), para el modelo de Materia Orgánica  $\Delta b_j$ :  $\pm 178.58$  no siendo significativos ningún coeficiente y desde luego si  $b_0$ .

La adecuación de los modelos se verificó igualmente a través de la prueba de Fisher:

Para  $Y_k$ , número de Kappa

$$Y_k = 93,66 - 3,2316X_1 - 0,536X_2 + 5,525X_3 + 1,114X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_3 \quad \text{Ec. 2.56}$$

Para  $Y_m$ , Materia orgánica

$$Y_m = 46284,5 - 9,048X_1 - 48,4X_2 + 15,47X_3 + 3,12X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_3 \quad \text{Ec. 2.57}$$

La adecuación de los modelos se verifico mediante la prueba de Fisher, como sigue:

Para Número de Kappa:  $F_{3,8} = 166666,7/73746,3 : 2,26$  menor que 4,07 valor tabulado

Para Materia orgánica:  $F_{3,8} = 32,67/9,074 : 3,6$  menor que 4,07 valor tabulado

### Ejemplo 2

La evaluación de configuraciones de la etapa de hidrolisis enzimática y fermentación alcohólica del bagazo pre tratado en dos etapas incluyó (Mesa Garriga, 2010) 5 variables independientes, como factores que inciden en los parámetros de optimización:

$Y_1$ : concentración de glucosa, g/L;  $Y_2$ : Rendimiento de glucosa por 100 gramos de materia prima;

$Y_3$ : Rendimiento de azúcares (glucosa y xilosa) por 100 g de materia prima;

$Y_4$ : Rendimiento de azúcares glucosa por 100 gramos de materia prima;

La matriz de diseño se refleja en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Variables y niveles del diseño  $2^{5-2}$

Variables	Niveles	
	Inferior	Superior
X1: UsodeXilanasa(UL/gdesustrato)	0	400
X2: Tensoactivo comerca(% en base a fibra)	2,5	4
X3: Tipodepretratamiento con respecto a la primera etapa	175°C(furfural)	120°C(xilosa)
X4: Concentración de sólidos(%m/v)	10	16
X5: Carga enzimática(UPF/g de sustrato pretratado)	10	30

De acuerdo a las variables analizadas, se ejecuta un plan experimental con 5 variables independientes a dos niveles, correspondiendo a un diseño factorial saturado de  $2^{5-2}$ , se realizan las réplicas en el punto central.

En la Tabla 2.13 se presenta la matriz experimental y los resultados de acuerdo con el diseño  $2^{5-2}$  empleando réplicas en el punto central para la variable cualitativa ( $X_3$ : Tipo de Pretratamiento de la primera etapa).

Tabla 2.13 Plan experimental y resultados en el diseño  $2^{5-2}$

Exp	Variables					Respuestas			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Y_1(\text{g/L})$	$Y_2(\%)$	$Y_3(\text{g}/100\text{g})$	$Y_4(\text{g}/100\text{g})$
1	+	-	+	-	+	52,65	73,04	33,93	38,82
2	+	-	-	-	-	35,23	49,56	23,95	25,51
3	-	+	+	-	-	38,13	48,21	24,57	26,61
4	-	-	+	+	-	54,35	66,38	21,89	25,10
5	+	+	-	+	-	58,10	56,55	24,69	27,14
6	+	+	+	+	+	72,33	65,91	29,13	32,95
7	-	+	-	-	+	45,87	61,95	31,19	34,74
8	-	-	-	+	+	64,92	52,85	27,59	29,84
9	0	0	+	0	0	61,52	75,89	30,49	34,53
10	0	0	+	0	0	55,68	59,10	27,60	30,84
11	0	0	-	0	0	54,23	59,31	28,67	31,23
12	0	0	-	0	0	53,01	54,10	27,72	29,96

Contrastes definidos:	
$X_4: X_1X_2$	Ec. 2.58
$X_5: X_1X_3$	Ec. 2.59
Con las relaciones generadas:	
$1 = X_1X_2X_4$	Ec. 2.60
$1 = X_1X_3X_5$	Ec. 2.61
Y los patrones de confusión de los factores:	
$b_1 = \beta_1 + \beta_{24} + \beta_{35}$	Ec. 2.62
$b_2 = \beta_2 + \beta_{14} + \beta_{1235}$	Ec. 2.63
$b_3 = \beta_3 + \beta_{15} + \beta_{1234}$	Ec. 2.64
$b_4 = \beta_4 + \beta_{12}\beta_{1245}$	Ec. 2.65
$b_5 = \beta_5 + \beta_{13} + \beta_{145}$	Ec. 2.66

La determinación de la significación de los coeficientes se realiza con el método tradicional resultado como se resume en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Significación de los coeficientes en cada ecuación

Y	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	
Y <sub>1</sub>	53,835000	1,253333	0,606667	1,941667	6,485000	4,163333	
Y <sub>2</sub>	60,237500	1,305833	-0,767500	4,517500	0,744167	2,754167	60,237500
Y <sub>3</sub>	27,618330	0,538333	0,185000	4,431667	-0,861670	6,343333	27,618330
Y <sub>4</sub>	30,605830	0,677500	0,180833	0,869167	-0,887500	2,665833	30,605830

Como se observa en la tabla 2.14, la carga de celulasa resultó significativa ( $p < 0,05$ ) en todas las variables respuestas.

Es importante señalar que la concentración de sólidos resultó significativa en el parámetro respuesta concentración de glucosa. Este resultado coincide con lo reportado en otros trabajos (Mesa, González, Cara, et al., 2010)(Peñuela-Vásquez, Nascimento C. da Silva, Bezerra de Souza, y Pereira, 2007). Las otras variables independientes analizadas (el uso de la xilanas, la incorporación de un tensoactivo comercial y el tipo de pretratamiento en la primera etapa) no resultaron estadísticamente significativas sobre los parámetros respuestas, pero si mostraron una influencia positiva sobre las respuestas, según los coeficientes de las variables en los modelos correspondientes a cada uno de los parámetros respuestas (ecuaciones 2.67, 2.68, 2.69 y 2.70). (García Aparicio, 2007), comprobó que la adición de xilanas en el medio de hidrólisis de la paja de cebada pretratada logra un incremento en los porcentajes de conversión de celulosa a glucosa principalmente para concentraciones de sustrato bajas, a partir de un 10%(w/v) la influencia de la xilanas disminuyó. No obstante, la adición de xilanas contribuye a mejorar la eficacia de la hidrólisis del bagazo pretratado.

$$Y_1, \text{g/L} = 52,07 + 2,51X_1 + 0,28X_2 + 1,75X_3 + 10,36X_4 + 6,88X_5 - 0,72X_1X_5 - 0,68X_2X_3 - 0,12X_2X_5 \quad \text{Ec. 2.67}$$

$$Y_2, \% = 58,47 + 2,94X_1 - 0,37X_2 + 2,19X_3 - 1,95X_4 + 8,30X_5 - 0,56X_1X_5 - 2,67X_2X_3 - 0,44X_2X_5 \quad \text{Ec. 2.68}$$

$$Y_3 = 26,51 + 1,23X_1 - 0,14X_2 + 0,26X_3 - 0,88X_4 + 3,73X_5 - 0,21X_1X_5 - 1,21X_2X_3 - 0,18X_2X_5 \quad \text{Ec. 2.69}$$

$$Y_4 = 29,41 + 1,58X_1 - 0,28X_2 + 0,87X_3 - 0,87X_4 + 4,32X_5 - 0,17X_1X_5 - 1,69X_2X_3 - 0,23X_2X_5 \quad \text{Ec. 2.70}$$

El uso del tenso activo, aunque en el rango analizado no resultó significativo, en el efecto a las variables respuestas correspondientes al rendimiento de glucosa en la hidrólisis enzimática ( $Y_2$ ) y los rendimientos de glucosa y azúcares ( $Y_3$  y  $Y_4$ , respectivamente), resulta beneficioso utilizarla a la menor concentración estudiada.

## 2.8. Diseños Factoriales parciales saturados.

### 2.8.1. Introducción

Cuando se utiliza un diseño factorial parcial en el cual  $(n-1)$  variables pueden investigarse realizando  $N$  experimentos, estamos en presencia del caso especial de diseño factorial saturado (Plackett y Burman, 1946).

El propósito fundamental en la aplicación del diseño factorial altamente fraccionado es su capacidad de estudiar todas las variables posibles que afecten el sistema.

En general el desarrollo de un plan experimental de *Plackett-Bürman* es considerado como un buen programa para iniciar el estudio del comportamiento de sistemas con más de 5 variables de entrada, con la característica de que los ensayos de este plan inicial pueden ser después aprovechados en otras etapas del trabajo experimental.

El primer paso en este método es relacionar las variables que el estudio preliminar del proceso ha permitido determinar cómo independientes y dependientes.

Las variables independientes se estudian a dos niveles: un nivel bajo designado (-1) o (-) y un nivel alto (+1) o (+), aquí también es importante que la selección de los niveles permita lograr cambios significativos en las variables independientes.

El segundo punto es seleccionar el mejor plan experimental para estudiar el efecto de las variables independientes, considerando su número.

En la tabla 2.15 se muestra el rango de uso más eficiente de los diseños factoriales (Isaacson, 1970).

Tabla 2.15 Rango de uso de los tipos de diseño experimental según la cantidad de factores

Diseño experimental	Variables independientes para ser investigadas										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11....	n
Modelos gráficos	■	■	■	■							
Factorial completo	■	■	■	■	■						
Factorial parcial				■	■	■	■	■	■	■	
Factorial parcial saturado					■	■	■	■	■	■	■

### 2.8.2. Método de Plackett- Bürman

El método de Plackett-Bürman es precisamente un caso de diseño factorial parcial saturado que son de los casos en que se estudias muchas variables.

En general en un diseño factorial parcial (fraccionado) saturado se pueden estudiar (N-1) variables independientes con n experimentos, no obstante, es recomendable que se incluyan dos o tres experimentos adicionales para estimar el error estándar y la varianza de los errores experimentales y de las interacciones, por ello lo más aconsejable es estudiar (N-3) o (n-4) variables independientes con N experimentos. Se pueden utilizar diseños de 8, 12,16, 20, 24 y hasta 100 experimentos.

El tercer paso es desarrollar la matriz del plan experimental, lo que puede lograrse conociendo la primera fila de cada plan según el número de variables independientes, (Ahnazarova et al., 1982) lo que se resume en la Tabla 2.16.

Para 24 y más experimentos la primera fila de la matriz de diseño se encuentra en el trabajo original (Plackett y Burman, 1946).

El método para generar la matriz de diseño, conociendo la primera fila consiste en partir de la primera fila, correr cíclicamente un lugar a la izquierda (N-2) veces, y se añade una última fila de valores negativos.

Tabla 2.16 Datos de la primera fila de la matriz de Planificación experimental: diseño de Plackett-Bürman

N	Primera fila de la matriz de diseño.																		
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	+	+	+	-	+	-	-												
12	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-								
16	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-				
20	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-

Una vez obtenida la matriz de diseño se realiza el trabajo experimental, el cual se ejecuta sin requerir repeticiones de los ensayos como ocurre en otros diseños factoriales.

Los experimentos se realizan solo con (N-2) o (N-3) variables, por lo que las (N-1) que permite considerar el diseño, dos o tres según el caso, serán falsas variables, es decir, que no toma valores reales en los experimentos y se incluyen tan solo en el proceso de cálculo.

Cuando se utiliza un diseño factorial saturado del tipo del diseño de *Plackett-Bürman*, es factible introducir en el diseño un número de falsas que no tiene variación y ajuste real en el proceso de experimentación, pero que si son utilizadas en el momento del procesamiento de los resultados experimentales. En la tabla 2.17 se ejemplifica un plan experimental de *Plackett-Bürman* para estudiar 7 variables con 8 experimentos. De la primera fila de la tabla 2.16 se selecciona la primera fila de la matriz y se genera las otras filas con una octava fila de signos negativos en los factores.

Tabla 2.17 Planificación experimental de un diseño de Plackett-Bürman de 8 ensayos y 7 variables

N	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
1	+	+	+	-	+	-	-
2	+	+	-	+	-	-	+
3	+	-	+	-	-	+	+
4	-	+	-	-	+	+	+
5	+	-	-	+	+	+	-
6	-	-	+	+	+	-	+
7	-	+	+	+	-	+	-
8	-	-	-	-	-	-	-

En esta matriz de diseño se pueden seleccionar varias falsas variables, así supongamos que son 5 variables reales (factores), lo que nos da la posibilidad de 2 falsas variables.

Entonces la matriz del diseño experimental se refleja en la Tabla 2.18, donde las falsas variables se han colocado al azar en las columnas cuatro y seis del plan experimental.

Así durante la experimentación solo se ajustarán simultáneamente las variables reales, de acuerdo con los valores indicados en las columnas uno, dos, tres cinco y siete correspondientes a los valores de las variables independientes (factores) X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>.

Tabla 2.18 Planificación experimental: diseño de Plackett-Bürman 8 ensayos, 5 variables reales y 2 falsas

N	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>f</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>f</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>i</sub>
1	+	+	+	-	+	-	-	
2	+	+	-	+	-	-	+	
3	+	-	+	-	-	+	+	
4	-	+	-	-	+	+	+	
5	+	-	-	+	+	+	-	
6	-	-	+	+	+	-	+	
7	-	+	+	+	-	+	-	
8	-	-	-	-	-	-	-	

### 2.8.3. Método de cálculo de un diseño de Plackett-Bürman

Los valores de los coeficientes se determinan de acuerdo con los resultados experimentales como:

Siendo el modelo que representa al sistema:

$$Y_i = Y_a + 1/2[E_1X_1 + E_2X_2 + E_fX_3 + \dots E_vX_v] \quad \text{Ec. 2.71}$$

Donde se excluyen los términos de las falsas variables seleccionadas, siendo:

$$Y_a = \Sigma y_i / N \quad \text{Ec. 2.72}$$

$$E_i = \Sigma \text{Resp (+)} / \text{Nro valores (+)} - \Sigma \text{Resp. (-)} / \text{Nro. valores (-)} \quad \text{Ec. 2.73}$$

Donde los E<sub>f</sub> son los valores correspondientes a la columna i de las falsas variables.

El error estándar SE, se obtiene de calcular el efecto de las falsas variables, estimadas de idéntica forma que el resto de las variables, así:

$$SE = \sqrt{\sum (E_f)^2 / \text{Nro. de falsas variables}} \quad \text{Ec. 2.74}$$

La identificación de la significación de cada variable se hace mediante la comparación del valor tabulado de la t Student a los grados de libertad f (Igual al número de falsas variables) y del cálculo de la expresión:

$$tp = E(i) / S.E \quad \text{Ec. 2.75}$$

De manera que, si el valor calculado es mayor que el valor tabulado, la variable en el rango del experimento realizado, tendrá un efecto significativo en la variación del parámetro de respuesta., y esto no se debe a errores experimentales, lo que tendrá diferentes niveles de significación según sea P= 80, 85, 90 y 95 %.

En el caso de que alguna de las falsas variables sea significativa se aconseja pasar a un diseño cuadrático.

### 2.8.4. Ejemplo de Diseño factorial saturado (método de *Plackett –Bürman*)

#### Ejemplo 3.

En el proceso de producción de papel para corrugar (cartoncillo, ondulado, etc.), se utiliza como producto intermedio, pulpa de Bagazo semiquímica fabricada a través del pulpeado con sosa caustica de bagazo de caña de azúcar en un reactor conocido como digestor.

El esquema tecnológico de la Planta de Pulpa se muestra en la figura 2.6.

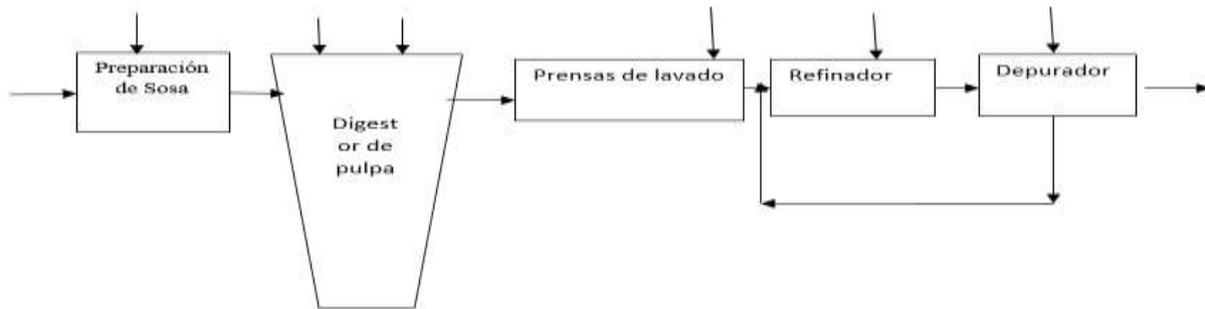


Figura 2.6 Esquema tecnológico de la planta de pulpa semiquímica de una industria del Papel (E. González-Suárez, 1982)

El proceso incluye además del digestor, las prensas de lavado un refinador de discos simples y un clasificador depurador de fibra.

Un estudio de las etapas de tratamiento mecánico, pues la refinación de las pulpas componentes, que siempre implica gastos, influye en la calidad de las pastas y otros costos de fabricación (Sánchez Taberner, 1984), por lo que se cuantificó la eficiencia energética del refinador de discos simple (E. González-Suárez, Ribot, y Vega, 1979a), estudiando su comportamiento a escala industrial con ayuda del método de *Plackett-Bürman*, las variables que afectan las propiedades físico-mecánicas de la pulpa refinada (E. González-Suárez, Ribot, y Vega, 1979b), lo que sirvió de base para mediante un diseño factorial  $2^{5-2}$  obtener los modelos estadísticos de la producción de pulpa refinada, consumo de potencia y costo de operación (E. González-Suárez, Ribot, y Vega, 1980) (Tabla 2.19).

Tabla 2.19 Plan experimental del método de Plackett-Bürman para  $Y_b$ ,  $Y_w$  y  $Y_{bc}$

Ensayos.	Orden										
Núm	Real.	$X_b$	$X_d$	$X_9$	$X_f$	$X_{10}$	$X_m$	$X_f$	$Y_b$	$Y_w$	$Y_{bc}$
1	1	+	+	+	-	+	-	-	1,8	1260	3,1
2	2	+	+	-	+	-	-	+	2,7	1188	1,9
3	5	+	-	+	-	-	+	+	1,9	1152	2,6
4	3	-	+	-	-	+	+	+	3,1	738	1,6
5	7	+	-	-	+	+	+	-	3,3	1066	1,4
6	8	-	-	+	+	+	-	+	2,3	1044	2,0
7	4	-	+	+	+	-	+	-	1,9	1170	2,7
8	6	-	-	-	-	-	-	-	3,8	972	1,1

Siendo las  $X_f$  falsas variables.

El procesamiento de los resultados permitió obtener, a partir de convertir el diseño de *Plackett-Bürman* a un diseño factorial  $2^{4-1}$  los siguientes modelos del elemento expresado en matriz:

$Y_b$	3,211	-0,009	-0,0236	-22,99	0,915	1	$X_k$	Ec. 2.75
$Y_w=$	171,52	8,64	15,186	2499,5	0	$X_9$	$X_d$	
$Y_{bc}$	2,06	0,201	0,271	53,57	0		$X_{10}$	

Igualmente, de acuerdo con estos resultados experimentales se calcularon los coeficientes de las variables independientes, a saber:

$E_0$ : 42,99;  $E_1$ : 2,71;  $E_2$ : 4,20;  $E_3$ : 5,1;  $E_4$ : -4,3;  $E_{5f}$ : 5,3;  $E_6$ : 6,0;  $E_{7f}$ : 1,8

Determinado el Valor del Error Estándar a partir de las falsas variables consideradas:

$$SE = \sqrt{\sum (Ef)^2 / \text{Nro. de falsas variables}}$$

Ec.2.77

## 2.9. Decisiones a partir del modelo obtenido.

### 2.9.1. Interpretación de los resultados

En la interpretación de los resultados del experimento inicial de la investigación es necesario valorar si tenemos a nuestra disposición un modelo lineal adecuado, el cual tiene la forma de un polinomio de primer grado. Entonces los coeficientes del polinomio son las derivadas parciales de la función respuesta (parámetro de optimización) con respecto a las variables correspondientes. Su significado geométrico es que ellos son las pendientes (tangentes de los ángulos de inclinación) de los hiperplanos de las coordenadas correspondientes.

Los mayores coeficientes en valor absoluto corresponden a las mayores pendientes y consecuentemente a las variaciones más apreciables en el parámetro de optimización, seleccionado, con las variaciones de un determinado factor.

Al trasladar un modelo al lenguaje de experimentado, estamos interpretando el modelo. El problema de la interpretación de un modelo es muy complicado y debe ser resuelto en varias etapas.

Lo primero es establecer en que magnitud cada factor afecta al parámetro de optimización. Como se conoce los coeficientes del modelo es una medición cuantitativa de esta influencia. Con un mayor valor del coeficiente una mayor influencia del factor en el parámetro de optimización.

La naturaleza de la influencia del factor se muestra en el signo del coeficiente. El signo positivo indica que al incrementarse el factor se incrementa el valor del parámetro de optimización y viceversa.

La incidencia de los signos en la optimización depende de si estamos buscando un valor máximo o mínimo del parámetro de optimización. Esto está condicionado por la naturaleza de los parámetros de optimización. Por ejemplo, mientras que la Ganancia de un proceso tecnológico se maximiza, los costos de producción se minimizan.

El segundo paso es averiguar cómo fijar el conjunto de factores considerando la fortaleza de su influencia en el parámetro de optimización. Los factores cuyo efecto se determinó no significativo, no requieren ningún tipo de análisis.

Es factible transformar el modelo codificado a un modelo con los valores reales de los factores mediante la descodificación de los factores codificados. El peligro está, entonces, que los valores y signos de los coeficientes cambian y la posibilidad de interpretar el fenómeno de acuerdo con ellos desaparece.

### **2.9.2. Interpretación de la influencia de los resultados cuando el modelo es adecuado**

En la interpretación de la influencia de los coeficientes de los factores codificados en el parámetro de optimización, se plantean tres posibilidades para elaborar decisiones, a saber:

- a. Todos los coeficientes de regresión tienen significativos impactos en la variación del parámetro de optimización.
- b. Parte de los coeficientes de regresión tienen significativos impactos en la variación del parámetro de optimización.
- c. Ninguno de los coeficientes de regresión tiene significativos impactos en la variación del parámetro de optimización.

En particular las recomendaciones para cada caso son las que se explican a continuación:

Si todos los coeficientes de regresión tienen significativos impactos en la variación del parámetro de optimización, tres soluciones son posibles:

- Terminación de la investigación, cuando se está dentro o en el entorno de la región de las condiciones óptimas,
- También, cuando se está dentro o en el entorno de la región de las condiciones óptimas, se puede pasar a la transición a un diseño de segundo orden, buscando la posibilidad de obtener un modelo de segundo orden que describa la región experimental y permita buscar un extremo que indique las condiciones óptimas.
- El movimiento a lo largo de las regiones experimentales es utilizado cuando el error experimental es pequeño, debido a que con grandes errores experimentales es difícil establecer el crecimiento en el parámetro de optimización. Esto se hace tanto cuando se está cerca o alejado de la región de las condiciones óptimas.

Para la segunda alternativa, en la cual parte de los coeficientes de regresión tienen significativos impactos en la variación del parámetro de optimización, existen tres opciones. Estas son:

- Repetir ensayos, ampliar los rangos de los factores para buscar mayor significación, o incluso repliegues experimentales con el método de la superposición para disminuir el error experimental y con ello la significación de los efectos de los factores y además eliminar mezclado de los efectos de las interacciones con los efectos lineales de las variables. También se puede completar el experimento con un diseño de segundo orden.
- Mover la región experimental considerando solamente el gradiente de los efectos significativos.
- Mover la región experimental considerando además del gradiente de los efectos significativos, también el gradiente de efectos no significativos en lo que la fundamentación teórica del fenómeno modelado es un aspecto importante en las consideraciones de los factores a incluir.

### **2.9.3 Construcción una fórmula de interpolación cuando el modelo no es adecuado**

Lo primero que es necesario hacer cuando un modelo no es adecuado, es incluir el efecto de las interacciones en el modelo. Esto es factible si fue utilizado un diseño factorial fraccionado no saturado. Todos los métodos a emplear requieren de esfuerzos experimentales adicionales. Se incluye la posibilidad de incrementar los intervalos de variación para lograr mayor significación en los coeficientes. Un diagrama para la ejecución de estos esfuerzos se refleja en la Figura 2.7 el cual ha sido propuesto en la literatura científica (Adler et al., 1975).

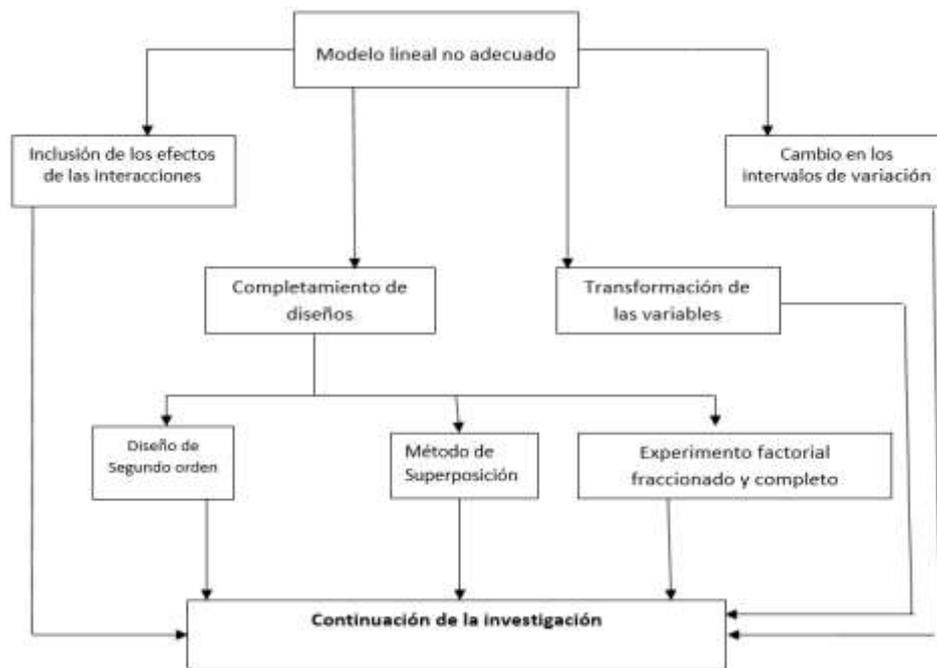


Figura 2.7 Diagrama para construir una fórmula de interpolación cuando el modelo no es adecuado.  
Tomado de (Adler et al., 1975)

### 2.10. Movimiento a lo largo de la superficie de respuesta mediante el paso ascendente

El propósito de mover los estudios experimentales hacia la región del óptimo comportamiento del proceso de la industria química y fermentativa estudiado puede lograrse a través de los métodos de optimización de Programación No lineal, entre los cuales resaltan los métodos de Hooke - Jeeves y de Box -Wilson (E. González-Suárez, Quezada Moreno, Peralta-Suárez, y Concepción Toledo, 2016).

El método de *Hooke - Jeeves* se fundamenta en buscar las condiciones óptimas sobre la base de un ascenso en direcciones paralelas a los ejes de sus coordenadas y no se regresa al punto básico para analizar la dirección de las otras variables.

#### **Método de Hooke y Jeeves.**

Este método también conocido como métodos de búsqueda por patrón, se basa en determinar una dirección hacia el óptimo a partir de las perturbaciones de cada variable. Para ello, los pasos para la aplicación del método de Hooke y Jeeves son los siguientes:

- 1) Se parte de un punto dentro del intervalo de incertidumbre (puede y debe estar fundamentado en los estudios de Vigilancia Tecnológica) que se define como  $(X_{10}; X_{20})$ , en el cual se halla el valor correspondiente, en ese punto, del Parámetro de Optimización, siendo esta la primera base permanente, es decir  $Y_o = b_{i0}$ .
- 2) Se toma el punto de la primera base permanente,  $X_b$ , o inicial y se incrementa en un valor fijo una de las variables, manteniendo las demás constantes.
- 3) Si la función disminuye en el punto hallado se parte de éste aplicando un incremento fijo en la variable siguiente y así se prosigue con las demás variables. En el caso que la función objetivo aumente se aplica un decremento en la variable siguiente. Estos puntos constituyen una fase exploratoria y el vector que une el punto inicial  $X_o$  con el punto final  $X_f$  de esta fase define una dirección probable hacia el óptimo.
- 4) Con la definición de la dirección probable hacia el óptimo se aplica a partir del punto final con la expresión:

$$X_b^{i+11} = X_f^i + (X_f^i - X_b^{i-11}) = 2X_f^i - X_b^{i-11}X_f^{-1} = X_b^0$$

Estos pasos se repiten realizando movimientos exploratorios y búsqueda por patrón hasta que en la fase exploratoria no se logre un avance y entonces se disminuye el tamaño de los pasos exploratorios.

Se decide terminar la búsqueda del óptimo cuando los incrementos a aplicar en la fase exploratoria sean tan pequeños como los valores que se hayan fijado inicialmente para la comprobación de la convergencia

En la figura 2.8 se representa el movimiento de los experimentos hacia la región del óptimo para una investigación experimental que tiene dos variables independientes (factores).

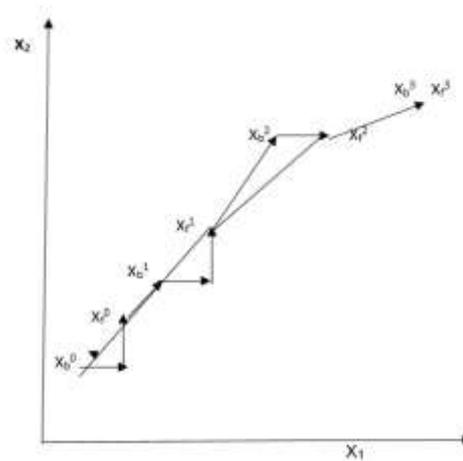


Figura 2.8 Representación del movimiento hacia la región del óptimo

### 2.11. Decisiones después del desarrollo del acercamiento a la región de las condiciones óptimas con ayuda de los métodos de ascenso acelerado

Las decisiones a considerar después del acercamiento a la región de las condiciones óptimas después del resultado del movimiento a través de los métodos del paso ascendente están vinculadas a que la aplicación del método del paso ascendente sea o no efectivo.

Si el paso ascendente es efectivo: aunque es posible que se alcance o no la región de las condiciones óptimas, en cualquiera de los dos casos, debe tenerse presente la concepción de (Box y Wilson, 1951a) en relación a que un problema de optimización debe resolverse en varias etapas, a saber:

- La primera, la determinación del efecto de las variables independientes en el parámetro de optimización,
- La segunda es el movimiento a lo largo del paso ascendente hacia la región de las condiciones óptimas, para encontrar el óptimo tan rápido como sea posible,
- En una tercera etapa pasar a un diseño de segundo orden que permita la determinación de las condiciones óptimas en la región del óptimo.

Para estimar los coeficientes de regresión de un modelo de segundo orden, cada variable  $X_i$  debe tomar al menos tres niveles diferentes.

Esto sugiere emplear diseños factoriales del tipo  $3^k$ . Si los tres niveles de  $X_i$  son codificados como -1, 0, y +1 es fácil de encontrar la superficie de segundo orden de los resultados de un experimento factorial  $3^k$ .

### 2.12. Diseños multiniveles (niveles > 2)

Los diseños factoriales y factoriales fraccionados a dos niveles, han sido los "caballitos de batalla" de las investigaciones empíricas modernas (E. González-Suárez, 2003).

Sin embargo, su eficiencia es dudosa si consideramos que, para ser eficiente, una experimentación debe brindar la **mayor cantidad** de información al **menor costo posible**.

Con estos tipos de diseños, se obtiene el efecto de las interacciones, lo cual es sumamente importante, pero no se puede saber si existe una relación no lineal entre los factores y la respuesta que se mide.

Es indudable el beneficio que se obtiene al trabajar con diseños de superficie de respuesta, en vez de factoriales multiniveles, entre otros que, al obtener información sobre 2 puntos, solo se puede determinar una recta entre ellos, asumiendo una relación lineal.

Sin embargo, la variación de la respuesta puede ser cuadrática y no puede saberse estudiando solamente dos niveles. En este caso, la información que se obtiene es errónea.

Lo que suele hacerse, es utilizar los diseños de tipo factorial para efectuar los llamados "ensayos preliminares", en lo que como se ha demostrado antes el diseño de *Plackett-Bürman* juega un papel esencial a la hora de seleccionar variables.

Si todo indica que un factor debiera influir sobre una respuesta, y esta influencia no aparece con un diseño factorial, entonces debo continuar estudiando el caso con un diseño de otro tipo.

Esta es una de las razones por la que surgió la "**regla del 25%**", que establece que para los "ensayos preliminares" (primera parte de la experimentación) debe invertirse solamente el 25% de los recursos totales disponibles. De esta forma se asegura que se dispondrá de suficiente tiempo y dinero para completar el trabajo (E. González-Suárez, 2003).

Un diseño a tres niveles permite encontrar una curvatura en la respuesta, mediante una relación polinomial cuadrática (el orden del polinomio será siempre un número inferior al número de niveles).

La ecuación a obtener será entonces:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 \quad \text{Ec. 2.78}$$

La notación de un diseño a 3 niveles para 2 factores es  $3^2$ . El número de experiencias será, (calculando como antes) = 9.

En principio, 1 grado de libertad se invierte en el cálculo de la media total, con lo cual restan 8.

Los diseños a tres niveles permiten obtener mucha información de los trabajos experimentales, pero para experimentos de más de tres factores los diseños experimentales incluyen gran cantidad de ensayos al responder a la estimación de  $3^k$ , desde luego que estas dificultades pueden reducirse utilizando repliegues parciales, pero entonces los coeficientes no lineales se estiman con un gran patrón de confusión y con ello errores de estimación.

En la búsqueda de la solución de estos problemas se desarrollaron los llamados diseños compuestos que parten de un diseño  $2^2$  inicial.

Los diseños a varios niveles han sido tipificado en un primer paso, cercano a la región experimental previa, a través de los diseños rotatorios centrales cuyos diseños se reportan en la literatura (Ahnazarova et al., 1982) y utilizan  $(2k + 1)$  combinaciones adicionales, es decir un total de  $(2^k + 2k + 1)$ :

$(0, 0, \dots, \dots, \dots)$ ,  $(-\alpha, 0, \dots, \dots, 0)$ ,  $(\alpha, 0, \dots, \dots, 0)$

$(0, -\alpha, \dots, 0), (0, \alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, -\alpha), (0, 0, \dots, 0, \alpha)$

Donde el valor de  $\alpha$  debe ser fijado y normalmente es para factoriales completos igual a  $2^{k/4}$  y para diseño factoriales parciales  $2^{(k-p)/4}$ .

En la Tabla 2.20 se muestra una comparación entre los experimentos factoriales  $3^k$  y los compuestos centrales.

Tabla 2.20 Comparación entre la cantidad de ensayos los experimentos factoriales  $3^k$  y los compuestos centrales (Ahnazarova et al., 1982)

K	Factorial $3^k$	Diseño compuesto central
2	9	9
3	27	15
4	81	25
5	243	43
6	729	77
7	2187	143

Así por ejemplo para dos variables independientes (factores) tendremos en la Tabla 2.21 un diseño central compuesto:

Tabla 2.21 Diseño compuesto central para dos factores

	A	B		A	B
(1)	-1	-1	$-\alpha b$	0	-1,41
A	+1	-1	$+\alpha b$	0	+1,41
B	-1	+1	0	0	0
ab	+1	+1	0	0	0
$-\alpha a$	-1,41	0	0	0	0
$+\alpha a$	+1,41	0			

La ecuación que se obtiene considerando una curva de respuesta de  $2^2$  orden es del tipo:

$$Y^{\wedge} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_{12} + b_{22} X_2 \quad \text{Ec.2.79}$$

Las ecuaciones de cálculo de los coeficientes para este tipo de diseño son las siguientes:

$$b_0 = 0.2 (0Y) - 0.2 \sum(iiY), \text{ done } \sum(iiY) = 11Y \quad \text{Ec. 2.80}$$

$$b_i = 0,125 (iY) \quad \text{Ec. 2.81}$$

$$b_{ii} = 0.125 (iiY) + 0.01875 \sum(iiY) - 0.1(0Y) \quad \text{Ec. 2.82}$$

$$b_{ij} = 0.25 (ijY) \quad \text{Ec. 2.83}$$

YSE, serán para  $b_i = 0,354$  s, para  $b_{ii} = 0,379$  s y para  $b_{ij} = 0,5$  s

En la Tabla 2.22 se presenta el diseño compuesto central para tres variables

Tabla 2.22 Diseño rotatorio (compuesto) central de tres factores

	A	B	C		A	B	C
(1)	-1	-1	-1	$-\alpha a$	-1,682	0	0
a	+1	-1	-1	$+\alpha a$	+1,682	0	0
b	-1	+1	-1	$-\alpha b$	0	-1,682	0
ab	+1	-1	-1	$+\alpha b$	0	+1,682	0
c	-1	-1	+1	$-\alpha c$	0	0	-1,682
ac	+1	-1	+1	$+\alpha c$	0	0	+1,682
bc	-1	+1	+1	0	0	0	0
abc	+1	+1	+1				

Este diseño se representa gráficamente en la Figura 2.9

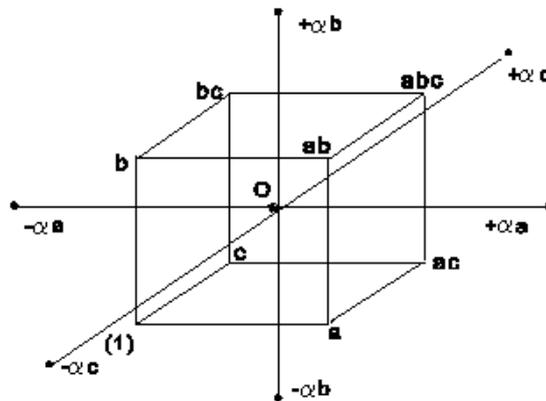


Figura 2.9 Diseño Factorial compuesto central con tres factores

Las ecuaciones de cálculo de los coeficientes para este tipo de diseño son las siguientes:

$$b_0 = 0.166338 (0Y) - 0.056791 \sum(iiY) \quad \text{Ec. 2.84}$$

$$b_i = 0.073224 (iY) \quad \text{Ec. 2.85}$$

$$b_{ii} = 0.0625(iiY) + 0.006889 \sum(iiY) - 0.056791(0Y) \quad \text{Ec. 2.86}$$

$$b_{ij} = 0.125(ijY) \quad \text{Ec. 2.87}$$

y SE para  $b_i = 0,274$  s, para  $b_{ii} = 0,275$  s y para  $b_{ij} = 0,354$  s

Para un Diseño Factorial compuesto central con cuatro factores

$$b_0 = 0.142857 (0Y) - 0.035714 \sum(iiY) \quad \text{Ec. 2.88}$$

$$b_i = 0.041667 (iY) \quad \text{Ec. 2.89}$$

$$b_{ii} = 0.03125(iiY) + 0.00372 \sum(iiY) - 0.035714(0Y) \quad \text{Ec. 2.90}$$

$$b_{ij} = 0,0625(ijY) \quad \text{Ec. 2.91}$$

y SE para  $b_i = 0,204$  s, para  $b_{ii} = 0,185$  s y para  $b_{ij} = 0,250$  s

Para un Diseño Factorial compuesto central con cinco factores (con  $2^{5-1}$ )

$$b_0 = 0,159091(0Y) - 0,034091\sum(iiY) \quad \text{Ec.2.92}$$

$$b_i = 0,041667 (iY) \quad \text{Ec.2.93}$$

$$b_{ii} = 0,03125(iiY) + 0,002841\sum(iiY) - 0,034091(0Y) \quad \text{Ec.2.94}$$

$$b_{ij} = 0,0625(ijY) \quad \text{Ec.2.95}$$

y SE para  $b_i = 0,206$  s, para  $b_{ii} = 0,185$  s y para  $b_{ij} = 0,250$  s

Para un Diseño Factorial compuesto central con seis factores (con  $2^{6-2}$ )

$$b_0 = 0,110749(0Y) - 0,018738\sum(iiY) \quad \text{Ec.2.96}$$

$$b_i = 0,023087 (iY) \quad \text{Ec.2.97}$$

$$b_{ii} = 0,015625(iiY) + 0,001217\sum(iiY) - 0,018738(0Y) \quad \text{Ec.2.98}$$

$$b_{ij} = 0,031125(ijY) \quad \text{Ec.2.99}$$

y SE para  $b_i = 0,152$  s, para  $b_{ii} = 0,130$  s y para  $b_{ij} = 0,177$  s

Debe tenerse en cuenta que los valores de los coeficientes de la ecuación indicarán, en signo y magnitud, la variación debida a la variable en cuestión, pero transformada.

Otros tipos de diseño y sus formas de determinación de los coeficientes se reportan en la literatura (Ahnazarova et al., 1982).

### 2.13. Combinación de ensayos experimentales

#### Ejemplo 4

#### Estudio del encolado de cartulina.

En un diseño para el estudio de los factores que inciden en el encolado de papeles con mezclas de bagazo y recorte de desperdicios se consideraron las siguientes variables (E. González-Suárez, Ramos, Ribot, y Peralta-Suárez, 1986): Relación bagazo/recorte, pH, Relación resina/recorte, Tiempo de retención, % sólidos en resina

Al analizar el experimento teóricamente y por experiencias anteriores se llega a las siguientes conclusiones parciales:

Es dudoso que el por ciento de resina en el rango que se aplica sea suficientemente significativo

Las interacciones principales y realmente importantes si las hay, debe ser: relación bagazo/recorte, resina/recorte y pH.

Con estas dos suposiciones se diseñó un experimento con ayuda de la matriz de Plackett- Búrman que previendo la no significación del por ciento de sólidos de la resina, ofrezca la mejor combinación para calcular el efecto de las interacciones planteadas, Es por ello que se propone la matriz para 7 variables (dos de ellas falsas variables) y 8 puntos experimentales, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

X<sub>1</sub>: falsa variable; X<sub>2</sub>: Relación bagazo/recorte; X<sub>3</sub>: pH; X<sub>4</sub>: Relación resina/recorte; X<sub>5</sub>: falsa variable; X<sub>6</sub>: Tiempo de retención; X<sub>7</sub>: % sólidos en resina

La matriz experimental y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.23

Tabla 2.23 Matriz experimental y resultados del diseño de Plackett-Bürman

Ensayo	Orden	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5f</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7f</sub>	Y <sub>cobb</sub>
1	8	+	+	+	-	+	-	-	45,2
2	2	+	+	-	+	-	-	+	39,7
3	4	+	-	+	-	-	+	+	52,8
5	7	-	+	-	-	+	+	+	36,2
6	1	+	-	-	+	+	+	-	35,4
7	3	-	-	+	+	+	-	+	41,9
8	6	-	-	-	-	-	-	-	40,9

De acuerdo con estos resultados experimentales se calcularon los coeficientes de las variables independientes, a saber:

E<sub>0</sub> : 42,99; E<sub>1</sub>: 2,71; E<sub>2</sub>: 4,20; E<sub>3</sub>: 5,1; E<sub>4</sub>: -4,3; E<sub>5f</sub>: 5,3; E<sub>6</sub>: 6,0; E<sub>7f</sub>: 1,8

Determinado el Valor del Error Estándar:

$$SE = \sqrt{\sum(Ef)^2/Nro.de falsas variables} = \sqrt{((5.3)^2 + (1.8)^2)/2} = 5,597$$

Luego se puede determinar el significativo como aquel que es mayor que: tp\*S.E.

En este caso serán para las diferentes probabilidades con los dos grados de libertad

**Para p: 80, Para p: 90 y Para P: 95**

Aquí se encontró que el efecto de la falsa variable X<sub>5f</sub> es muy significativo, por lo que existía la posibilidad de que los efectos de las interacciones tuvieran que ser considerados, además como se había supuesto la variación en el por ciento de sólidos no tenía significación en las variaciones del parámetro de respuesta.

Eliminando las columnas X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub> y X<sub>7</sub> queda una matriz de (Box y Hunter, 1961) correspondiente a un diseño 2<sup>4-1</sup> a lo que se añaden tres corridas en el centro para hallar la varianza experimental.

En la Tabla 2.24 se presenta la matriz con sus resultados experimentales.

Tabla 2.24 Matriz y resultados experimentales del diseño de Box – Hunter 24-1 empleando los resultados iniciales del *Plackett-Bürmann*

Ensayo	Orden	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	Y <sub>cobb</sub>
1	8	+	+	-	-	45,2
2	2	+	-	+	-	39,7
3	4	-	+	-	+	52,8
4	5	+	-	-	+	46,2
5	7	-	-	+	+	36,2
6	1	-	+	+	-	35,4
7	3	+	+	+	+	41,9
8	6	-	-	-	-	40,9
9	11	0	0	0	0	47,7
10	9	0	0	0	0	38,0
11	10	0	0	0	0	42,3

Si se analiza el mezclado de los efectos de las variables tendremos que:

$$X_3 = X_2 X_4 X_{61}$$

Donde el contraste definido es:  $1 = X_2X_3X_4X_6$

Siendo el mezclado de los efectos:

$$b_2 = \beta_2 + \beta_{346}, b_3 = \beta_3 + \beta_{246}, b_4 = \beta_4 + \beta_{236}, b_5 = \beta_5 + \beta_{246}$$

determinando los efectos de las interacciones  $b_{24}$  y  $b_{34}$  siendo los efectos de las interacciones  $b_{36}$  y  $b_{26}$  despreciables. Siendo la ecuación obtenida:

$$Y_{Cobb} = 42,29 + 2,1X_2 + 2,56X_3 - 2,1X_4 + 3,0X_6 + 2,61X_2X_4 - 1,3X_3X_4 \quad \text{Ec. 2.100}$$

Mediante la prueba, t de Student de los coeficientes, se encuentra que la interacción  $X_3X_4$ , (resina recorte con pH) no es significativa, por lo que el modelo será:

$$Y_{Cobb} = 42,29 + 2,1X_2 + 2,56X_3 - 2,1X_4 + 3,0X_6 + 2,61X_2X_4 \quad \text{Ec. 2.101}$$

Posteriormente probando la adecuación del modelo con la prueba de Fisher se encuentra que para los objetivos previstos no se logra precisión en el pronóstico del modelo, por lo que se propone pasar a un modelo completo o uno cuadrático.

Para este fin la matriz de diseño se completa para obtener un diseño compuesto central aprovechando los datos ya obtenidos, lo que se representa en la Tabla 2.25.

Siendo  $\alpha = 2^{(4-1)/4}$

Donde los coeficientes vienen dados por las ecuaciones:

$$b_0 = 0,1851844 (0Y) - 0,052784765 \sum (iiY) \quad \text{Ec. 2.102}$$

$$b_i = 0,062499 (iY) \quad \text{Ec. 2.103}$$

$$b_{ii} = 0,062499 (iiY) + 0,00462935 \sum (iiY) - 0,062786 (0Y) \quad \text{Ec. 2.104}$$

$$b_{ij} = 0,125 (ijY) \quad \text{Ec. 2.105}$$

El cálculo de los coeficientes si no se encuentran en la literatura especializada (Ahnazarova et al., 1982), pueden hacerse por los métodos de regresión múltiple, siendo:

$b_0: 40,8; b_2: 2,1; b_3: 2,56; b_4: -2,1; b_6: 3,0; b_{33}: 2,8; b_{24}: 2,61$

Tabla 2.25 Matriz de diseño para el Plan Compuesto Central

Ensayo	Orden	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	Y <sub>cobb</sub>
1	8	+	+	-	-	45,2
2	2	+	-	+	-	39,7
3	4	-	+	-	+	52,8
4	5	+	-	-	+	46,2
5	7	-	-	+	+	36,2
6	1	-	+	+	-	35,4
7	3	+	+	+	+	41,9
8	6	-	-	-	-	40,9
9	11	0	0	0	0	47,7
10	9	0	0	0	0	38,0
11	10	0	0	0	0	42,3
12	14	$\alpha$	0	0	0	45,0
13	20	$-\alpha$	0	0	0	37,2
14	16	0	$\alpha$	0	0	55,8
15	15	0	$-\alpha$	0	0	26,5

16	18	0	0	$\alpha$	0	44,3
17	21	0	0	$-\alpha$	0	38,1
18	19	0	0	0	$\alpha$	48,2
19	13	0	0	0	$-\alpha$	32,9
20	12	0	0	0	0	41,3
21	17	0	0	0	0	38,9

Luego el modelo sería:

$$Y_{cobb} = 42,29 + 2,1X_2 + 2,56X_3 - 2,1X_4 + 3,0X_6 + 2,61X_2X_4 + 2,8X_3^2$$

En el caso de que  $X_7$  hubiese dado significativo, la matriz de diseño del Box – Hunter sería como aparece en la Tabla 2.26

Tabla 2.26 Matriz de diseño para el Box –Hunter con 5 variables un  $2^{5-2}$

Ensayo	Orden	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_6$	$X_7$	$Y_{cobb}$
1	8	+	+	-	-	-	45,2
2	2	+	-	+	-	+	39,7
3	4	-	+	-	+	+	52,8
4	5	+	-	-	+	+	46,2
5	7	-	-	+	+	-	36,2
6	1	-	+	+	-	+	35,4
7	3	+	+	+	+	-	41,9
8	6	-	-	-	-	-	40,9
9	11	0	0	0	0	0	47,7
10	9	0	0	0	0	0	38,0
11	10	0	0	0	0	0	42,3

Siendo los dos contrastes definidos y la relación generada como sigue:

$$X_2 = X_3X_4X_6 \text{ y } X_7 = -X_4X_6$$

$$1 = X_2X_3X_4X_6$$

$$1 = -X_4X_6X_7$$

$$1 = -X_2X_3X_7$$

Por lo que el mezclado de los efectos será:

$$B_2 = \beta_2 + \beta_{346} - \beta_{2467} - \beta_{37}$$

$$B_3 = \beta_3 + \beta_{246} - \beta_{2467} - \beta_{27}$$

$$B_4 = \beta_4 + \beta_{236} - \beta_{67} - \beta_{2347}$$

$$B_6 = \beta_6 + \beta_{234} - \beta_{47} - \beta_{2367}$$

$$B_7 = \beta_7 + \beta_{23467} - \beta_{46} - \beta_{23}$$

Por lo que los efectos de las interacciones  $b_{24}$  y  $b_{34}$  no están mezclados (confundidos) y pueden ser calculadas.

En caso de no resultar adecuado el modelo, se puede completar el diseño hasta un  $2^{5-1}$  o para un modelo cuadrático con un diseño central rotatorio en la forma que aparece en la Tabla 2.27.

Tabla 2.27 Matriz de diseño para un plan experimental cuadrático rotatorio central con base a un diseño  $2^{5-1}$

Ensayo	Orden	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
1	8	+	+	-	-	-
2	2	+	-	+	-	+
3	4	-	+	-	+	+
4	5	+	-	-	+	+
5	7	-	-	+	+	-
6	1	-	+	+	-	+
7	3	+	+	+	+	-
8	6	-	-	-	-	-
9	11	0	0	0	0	0
10	9	0	0	0	0	0
11	10	0	0	0	0	0
12	14	-	-	+	+	+
13	16	-	+	-	+	+
14	18	+	-	+	-	-
15	19	-	+	+	-	-
16	13	+	+	-	-	+
17	12	+	-	-	+	-
18	15	-	-	-	-	+
19	17	+	+	+	+	+
20	29	$\alpha$	0	0	0	0
21	28	$-\alpha$	0	0	0	0
22	25	0	$\alpha$	0	0	0
23	32	0	$-\alpha$	0	0	0
24	23	0	0	$\alpha$	0	0
25	21	0	0	$-\alpha$	0	0
26	22	0	0	0	$\alpha$	0
27	26	0	0	0	$-\alpha$	0
28	31	0	0	0	0	$\alpha$
29	27	0	0	0	0	$-\alpha$
30	24	0	0	0	0	0
31	30	0	0	0	0	0
32	20	0	0	0	0	0

Donde los coeficientes vienen dados por:

$$b_0 = 0,159091 (OY - 0,034091 \sum(iiY))$$

Ec. 2.106

$$b_i = 0,041667 (iY)$$

Ec. 2.107

$$b_{ii} = 0,03125 (iiY) + 0,002841 \sum (iiY) - 0,034091 (OY)$$

Ec. 2.108

$$b_{ij} = 0,0625 (ijY)$$

Ec. 2.109

Y el error estándar de los coeficientes serán:

$b_i = 0,02045$ ,  $b_{ii} = 0,18585$ ,  $b_{ij} = 0,2505$

## **2.14. Diseños Experimentales de Mezclas.**

### **2.14.1 Introducción:**

Existe un gran número de factores que influyen en las producciones industriales, tales como una gran cantidad y diversidad de equipos, así como, de materiales de que se dispone como materia prima que poseen sus propias características físico-químicas y morfológicas y por lo tanto un comportamiento particular en el proceso tecnológico. La calidad final de los productos dependerá además de algunos tratamientos complementarios que influyen positivamente en el mejoramiento de las propiedades de las materias primas y también de los efectos de mezclado de diferentes materiales, aspecto muy importante a tener en cuenta no sólo por la calidad del producto, sino también por la economía del proceso que esto pudiera representar en relación con el tipo de producto a obtener.

Así por ejemplo, en la producción de papeles industriales de alto gramaje tales como cartulinas, *linner*, cartoncillo y otros se emplean pastas constituidas por dos o más materiales fibrosos, por lo que las investigaciones se han encaminado a delimitar la mejor composición de la pasta y el grado de tratamiento mecánico necesario para alcanzar las mejores propiedades de las pulpas individuales y la pasta resultante del mezclado, cuyas propiedades finales no pueden siempre considerarse propiedades aditivas de las pulpas integrantes (Laflamme, 1969)(Rodríguez, 1988). Por otra parte, los estudios de este tipo llevados a cabo industrialmente consumen gran cantidad de recursos materiales, humanos y de tiempo, que conspiran desfavorablemente con su ejecución, por lo que el desarrollo de métodos y técnicas adecuadas que permitan determinar a escala de laboratorio las mejores mezclas y su implementación consecuente a escala industrial es de gran importancia para el desarrollo de una tecnología determinada, principalmente para los casos en que mezclas de más de dos componentes se empleen en la formulación.

También en la producción de etanol de mieles de la industria de la caña de azúcar se ha planteado la alternativa de mezclar los jarabes de mieles, la vinaza reciclada y los jugos pobres como una alternativa de minimizar los costos totales de producción de una fábrica de azúcar con destilería anexa (Cruz y González, 1999).

### **2.14.2. Los diseños de experimentos para mezclas en la industria de procesos químicos y fermentativos.**

Los aspectos fundamentales de los diseños experimentales de mezclas se encuentran descritos en (Ahnazarova et al., 1982). Su característica es que los componentes (variables) no son independientes como en los casos anteriores, sino que son componentes o ingredientes de una mezcla. Por lo tanto:

$$\sum X_i = 1$$

Ec. 2.110

Entonces, para una mezcla de dos componentes:

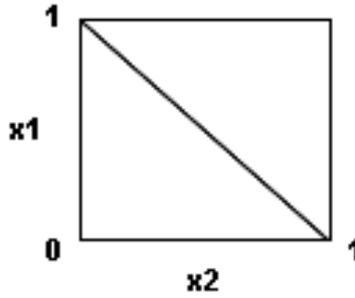


Figura 2.10 Mezclas para dos componentes

Los valores de los ingredientes de la mezcla se mueven sobre el segmento:

$$X_1 + X_2 = 1$$

Ec. 2.111

Y para una mezcla de tres componentes:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1$$

Ec. 2.112

Siendo su representación en la figura 2.11.

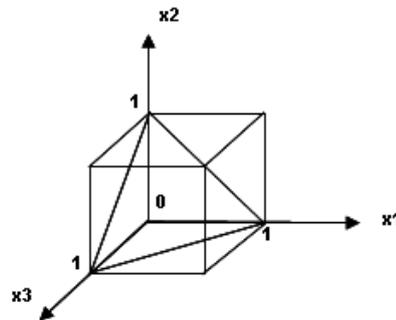


Figura 2.11 Mezcla de tres componentes

### 2.14.3. Método de Diseño Enrejado Simple para la formulación de mezclas de tres componentes

Este método ofrece grandes ventajas para el estudio a escala de laboratorio de la formulación de mezclas de tres o más componentes, ya que requiere de un plan experimental mínimo y brinda una información completa sobre el comportamiento de las propiedades de la mezcla a cualquier composición.

El método reconoce que la suma de las proporciones de cada componente en la mezcla debe ser la unidad y por tanto el factor espacio es un simple regular, siendo el mismo explorado para puntos de composición a un arreglo de ellos mismos.

En la actualidad los diseños experimentales de mezclas más comunes son los Diseño de Enrejado Simplex propuestos por (Scheffé, 1958).

El factor espacio es analizado en los puntos de composición que se ajustan a un orden conocido como enrejado, las respuestas que dependen sólo de las proporciones de los componentes pueden ser representadas por polinomios generales simplificados (Scheffé, 1958).

Los diseños resultantes abarcan todo el espacio de composición y por lo tanto son muy adecuados para la evaluación de un sistema multicomponente donde todas las áreas de operación deben ser examinadas.

Los puntos de los diseños  $\{q, n\}$  forman el enrejado del simplex, donde “q” es el número de componentes de la mezcla y “n” el grado del polinomio.

En la Tabla 2.28 se muestra el número mínimo de puntos experimentales requeridos para determinar los coeficientes de un polinomio de grado “n” con “q” variables (componentes de la mezcla):

Tabla 2.28 Cantidad mínimo de experimentos requeridos para obtener polinomios de varios grados en diseños de Enrejados Simplex. Tomado de (Ahnazarova et al., 1982)

Número de componentes	Grados			
	2	3 (incompleto)	3	4
3	6	7	10	15
4	10	14	20	35
5	15	25	35	70
6	21	41	56	126
8	36	92	120	330
10	55	175	220	715

Para el caso de mezclas de tres componentes que son de variadas y múltiples aplicaciones, las formulaciones son valores del triángulo, aplicado a la formulación de mezclas de tres componentes donde los extremos representan los valores de cada componente puro, acorde con el siguiente convenio:

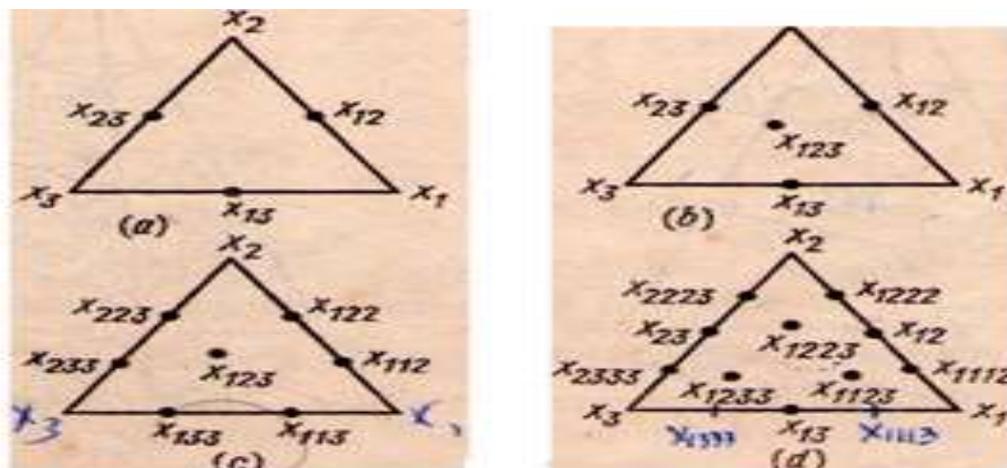


Figura 2.12a) Diseño enrejado  $\{3, n\}$  para un polinomio de segundo, b) Diseño enrejado  $\{3, n\}$  para un polinomio incompleto de tercer grado, c). Diseño enrejado  $\{3, n\}$  para un polinomio de tercer grado, d) Diseño enrejado  $\{3, n\}$  para un polinomio de cuarto grado (cuartico). Tomado de (Ahnazarova et al., 1982)

El uso de uno u otro plan experimental dependen por un lado de la exigencia de la investigación y por otro de las posibilidades de ir incrementando paulatinamente la precisión de los modelos, en la medida que sea útil y necesario, por ello se comienza siempre por diseño simples del tipo segundo orden. Para diseños de mezclas de cuatro componentes se utilizan las siguientes representaciones:

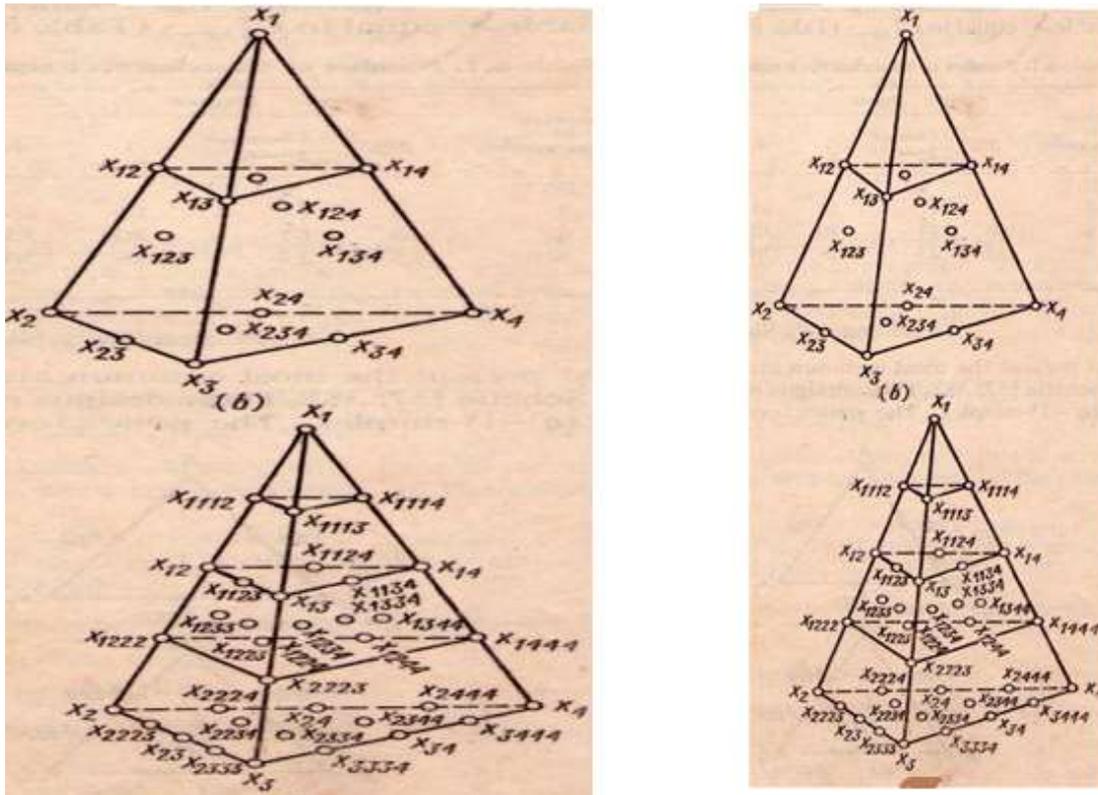


Figura 2.13a) Diseño enrejado  $(4,n)$  para un polinomio de segundo, b) Diseño enrejado  $(4,n)$  para un polinomio incompleto de tercer grado, c). Diseño enrejado  $(4,n)$  para un polinomio de tercer grado, d) Diseño enrejado  $(4,n)$  para un polinomio de cuarto grado (cuartico). Tomado de (Ahnazarova et al., 1982)

Considerando sistemas en los que generalmente el comportamiento de las propiedades de componentes de las mezclas puede no ser lineal, se selecciona un método cuartico que también puede ser construido paulatinamente pues si se observa con detenimiento los diseños de la Figura 2.13 en el modelo cuartico (2.13. d), están contenidos los otros diseños, por lo que la ejecución primero de los diseños a), b) y c) no adicionan trabajo y por el contrario su procesamiento arroja luz sobre el proceso y puede evitar realizar los diseños más complejos, al llegar a una respuesta adecuada para el objeto de la investigación.

En el caso de diseños para mezclas de tres componentes los requerimientos para el mismo son que las pruebas se efectúan a 15 puntos de composición del enrejado.

Para la mayoría de las propiedades una medida a cada punto del enrejado es suficiente, pero es importante que se realicen algunas replicas a un punto que se sitúa convenientemente en cualquier zona del enrejado, con el fin de lograr un cálculo del error experimental, o sea, el error al mezclar, al probar, etc., que es posible en cualquier parte del análisis.

Las respuestas medidas en los 15 puntos de composición del diseño cuartico de tres componentes, son representados por un polinomio general simplificado de 15 términos como aparece a continuación:

$$\begin{aligned}
Y = & \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \alpha_{13} X_1 X_3 + \alpha_{23} X_2 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 (X_2 - X_1) \\
& + \beta_{13} X_1 X_3 (X_3 - X_1) + \beta_{23} X_2 X_3 (X_3 - X_2) + \delta_{12} X_1 X_2 (X_1 - X_2)^2 \\
& + \delta_{13} X_1 X_3 (X_1 - X_3)^2 + \delta_{23} X_2 X_3 (X_2 - X_3)^2 + \beta_{1123} X_1^2 X_2 X_3 \\
& + \beta_{1223} X_1 X_2^2 X_3 + \beta_{1233} X_1 X_2 X_3^2
\end{aligned}$$

Ec. 2.113

A través de dicho polinomio se puede obtener la superficie de respuesta de cada propiedad en dependencia de la variación de la composición. De este diagrama obtenido se aprecia una zona de trabajo en la cual están los valores de composición que tienen magnitudes similares de propiedades según las restricciones del proceso.

Para el método de Diseño Enrejado Simplex, las mezclas deben ser preparadas acorde a un plan experimental reflejado por el método, en el cual se realizan mediciones experimentales en 16 puntos de enrejado. El punto central C nos permite obtener un cálculo del error experimental, es decir, el error al mezclar, al probar, etc. Las mezclas se preparan según las proporciones correspondientes a cada punto como aparecen reflejadas en la tabla 2.29.

Tabla 2.29 Nomenclatura de puntos del Diseño de Enrejado Simplex

Respuesta	Orden	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Y <sub>1</sub>	1	1	0	0
Y <sub>1112</sub>	2	3/4	1/4	0
Y <sub>1113</sub>	3	3/4	0	1/4
Y <sub>12</sub>	4	1/2	1/2	0
Y <sub>1123</sub>	5	1/2	1/4	1/4
Y <sub>13</sub>	6	1/2	0	1/2
Y <sub>1222</sub>	7	1/4	3/4	0
Y <sub>1223</sub>	8	1/4	1/2	1/4
Y <sub>1233</sub>	9	1/4	1/4	1/2
Y <sub>1333</sub>	10	1/4	0	3/4
Y <sub>2</sub>	11	0	1	0
Y <sub>2223</sub>	12	0	3/4	1/4
Y <sub>23</sub>	13	0	1/2	1/2
Y <sub>2333</sub>	14	0	1/4	3/4
Y <sub>3</sub>	15	0	0	1
Y <sub>123</sub>	C	1/3	1/3	1/3

Las respuestas medidas en los 15 puntos de composición del diseño cuartico de tres componentes se representan matemáticamente por el polinomio antes enunciado.

Sólo 15 coeficientes tienen que ser calculados en dicho polinomio simplificado, pues todos los términos del tipo  $b_0, b_{11} X_1^2$  y  $b_{111} X_1^3$ , que aparecen normalmente en polinomios generales se eliminan debido a la limitación de que la suma de las proporciones a añadirse es la unidad.

Los coeficientes del polinomio son funciones lineales de las respuestas calculadas en los puntos del enrejado y la solución para todos los coeficientes se determinan según recomiendan (Gorman y Hinman, 1962), como se expone en la Tabla 2.30.

Tabla 2.30 Ecuaciones para determinar los coeficientes del diseño enrejado simplex

Coeficientes del diseño enrejado simplex	
$b_1 = Y_1$	Ec.2.114
$b_2 = Y_2$	Ec.2.115
$b_3 = Y_3$	Ec.2.116
$b_{12} = 4 Y_{12} - 2 Y_1 - 2 Y_2$	Ec.2.117
$b_{13} = 4 Y_{13} - 2 Y_1 - 2 Y_3$	Ec.2.118
$b_{23} = 4 Y_{23} - 2 Y_2 - 2 Y_3$	Ec.2.119
$c_{12} = (8/3)(- Y_1 + 2 Y_{1112} - 2 Y_{1222} + Y_2)$	Ec.2.120
$c_{13} = (8/3)(- Y_1 + 2 Y_{1113} - 2 Y_{1333} + Y_3)$	Ec.2.121
$c_{23} = (8/3)(- Y_2 + 2 Y_{2223} - 2 Y_{2333} + Y_3)$	Ec.2.122
$d_{12} = (8/3)(- Y_1 + 4 Y_{1112} - 6 Y_{12} + 4 Y_{1222} - Y_2)$	Ec.2.123
$d_{13} = (8/3)(- Y_1 + 4 Y_{1113} - 6 Y_{13} + 4 Y_{1333} - Y_3)$	Ec.2.124
$d_{23} = (8/3)(- Y_2 + 4 Y_{2223} - 6 Y_{23} + 4 Y_{2333} - Y_3)$	Ec.2.125
$b_{1123} = 32 (3Y_{1123} - Y_{1223} - Y_{1233}) + (8/3)(6 Y_1 - Y_2 - Y_3) - 16(Y_{12} + Y_{13}) - (16/3)(5 Y_{1112} + 5 Y_{1113} - 3Y_{1222} - 3 Y_{1333} - Y_{2223} - Y_{2333})$	Ec.2.126
$b_{1223} = 32 (3 Y_{1223} - Y_{1123} - Y_{1233}) + (8/3)(6 Y_2 - Y_1 - Y_3) - 16(Y_{12} + Y_{23}) - (16/3)(5 Y_{1222} + 5Y_{2223} - 3 Y_{1112} - 3 Y_{2333} - Y_{1113} - Y_{1133})$	Ec.2.127
$b_{1233} = 32 (3 Y_{1233} - Y_{1123} - Y_{1223}) + (8/3)(6 Y_3 - Y_1 - Y_2) - 16(Y_{13} + Y_{23}) - (16/3)(5 Y_{1333} + 5Y_{2333} - 3 Y_{1113} - 3 Y_{2223} - Y_{1112} - Y_{1222})$	Ec.2.128

Una ecuación polinomial que tenga el mismo número de coeficientes que puntos en el enrejado, ajustaría al valor medio observado de cada punto de dicho enrejado exactamente y no mediría la bondad de ajuste obtenida, por lo que es necesario al menos, un punto adicional de chequeo para probar la adecuación del modelo.

Es ventajoso utilizar como punto de chequeo un punto central, que sí, resulta no ser adecuado al modelo, puede ser este punto incorporado como punto experimental de un modelo más complejo.

Para este diseño, como para otros del diseño de enrejado simplex, luego de haber calculado los coeficientes se determina la varianza de los valores pronosticados a partir del modelo para determinar el ajuste de la ecuación para predecir los resultados.

En un diseño enrejado simplex no hay grados de libertad debido a que los diseños son saturados. Así para verificar la adecuación de un modelo se realizan puntos experimentales adicionales llamados puntos de prueba. El número de puntos de control y sus coordenadas son condicionados por la formulación del problema y la naturaleza de los experimentos. La precisión de la predicción de la respuesta es diferente en cada punto del simplex, la varianza de predicción de la respuesta  $S\hat{y}^2$  se obtiene de la ley de acumulación del error.

Aquí se tienen en cuenta, si el número de observaciones (r) en cada punto del enrejado es el mismo o no.

Para el caso en que el número de observaciones "r" es igual en cada punto del diseño, la varianza se calcula como:

$$S\ddot{y}^2 = S_y^2 \xi/r$$

Ec.2.129

Donde:  $S_y^2$  = varianza de las repeticiones;  $r$  = número de observaciones de cada punto del enrejado;  $\xi$  = es un factor dependiente solo de la composición (Gorman y Hinman, 1962).

Los valores de  $\xi$  como se ha dicho dependen de la composición y han sido graficados para diferentes grados de polinomios para sistemas ternarios, como se muestra en la Figura 2.14 a, b, c y d.

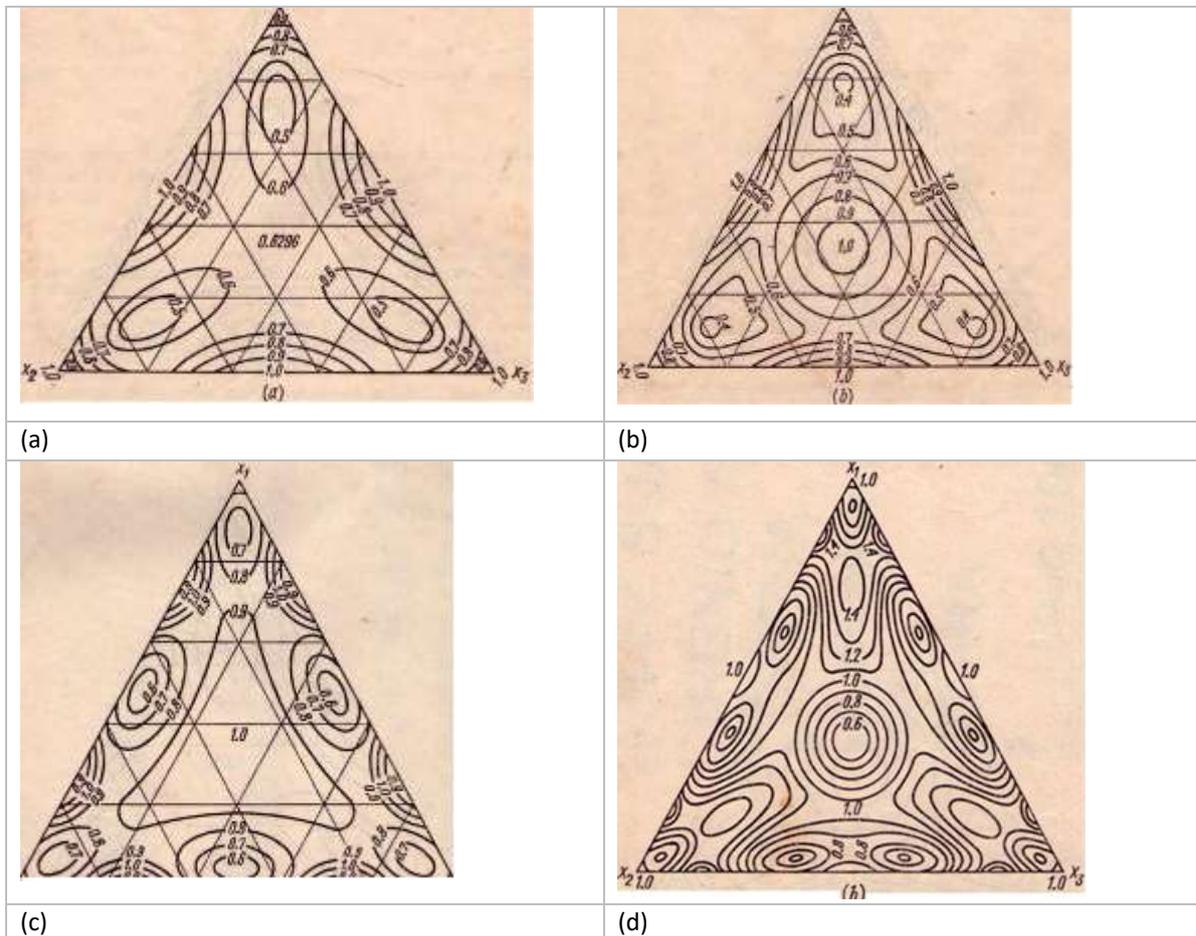


Figura 2.14 Isolinias de  $\xi$  para polinomios (a) segundo grado. Tomado de, (b)incompletos de tercer grado, (c) tercer grado. (d) cuarto grado (cuarticos). Tomado de (Ahnazarova et al., 1982)

Dada la varianza de las repeticiones y el número de observaciones paralelas "n" en cada punto del enrejado, el error para la predicción de valores de respuesta es rápidamente determinado para cualquier punto del diagrama de composición de propiedades utilizando un apropiado valor de  $\xi$  tomado de la curva.

Para ajustar el modelo se hace necesario mediante la prueba " t de student" (aquí la hipótesis nula es que hay falta de ajuste en el modelo, o sea, que es adecuado) y para el chequeo se puede usar la siguiente expresión:

$$t = \Delta Y \sqrt{\frac{r}{(S_y^2 \sqrt{1 + \xi})}}$$

Ec. 2.130

Donde:

$\Delta Y = | Y_{\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{calc}} |$  en el punto de prueba;  $S_y^2$  = varianza de las repeticiones;  $r$  = número de réplicas o mediciones para cada punto del enrejado;  $\xi$  = valor estimado del gráfico correspondiente de la Figura 2.14 a, b, c y d.  $t$  = valor de la T Student comparable con el tabulado a probabilidad “p” y “f” cantidad de grados de libertad  $f$  según el número de réplicas y que debe ser menor que este para que el modelo sea adecuado.

Cuando el número de mediciones no es el mismo en cada punto del enrejado se puede utilizar un punto de composición cualquiera para medir el ajuste.

Luego de haber comprobado la adecuación del modelo, a partir de la ecuación polinómica con sus coeficientes se puede calcular la respuesta para cualquier punto de la mezcla, lo que esencialmente es un proceso de interpolación, pudiendo predecirse la superficie completa de respuesta con cierto grado de precisión, trazando las curvas de contornos correspondientes por cada propiedad.

Finalmente se determina la precisión del estimado. El intervalo de confianza para los valores pronosticados se obtiene:

Para un intervalo de confianza se tiene:

$$\Delta = t_{p/r, f} (S_y (\xi/n)^{1/2})$$

Ec. 2.131

En el cual  $p$ ,  $r$  y  $f$  definen el valor de  $t$  tabulado

#### 2.14.4 Ejemplos de aplicación.

##### *Ejemplo 5*

Predicción de las propiedades del papel a partir de la información obtenida en el laboratorio (González-Cortés, Morales Pérez, Area Aguilar, y González-Suarez, 2003).

Para la predicción de las propiedades del papel a partir de la información obtenida en el laboratorio deben resolverse aún numerosas contradicciones relacionadas principalmente con los procedimientos que se emplean en uno u otro caso para llevar a cabo la formación de la hoja. Las principales diferencias son las siguientes (Berstrom, 1971).

1. La formulación de la hoja sobre la malla es ante todo un proceso de filtración que en el caso del laboratorio y la industria difieren apreciablemente por cuanto en el primero se efectúa un proceso estático y en el segundo un proceso dinámico.
2. La dilución de la suspensión fibrosa es mucho mayor en la hoja del laboratorio y por lo tanto existe mayor dispersión de la fibra y menos flóculos que en la caja cabecera de la máquina.
3. La suspensión fibrosa en el moldeo de la hoja en el laboratorio está quieta y las fibras se orientan al azar anterior al momento del drenaje mientras que en la máquina la suspensión llega a la malla con cierta turbulencia y las fibras son parcialmente orientadas en la dirección de la máquina.
4. La presión diferencial aplicada en el drenaje es continua y constante en el caso de la hoja moldeada en el laboratorio, mientras que en la máquina de papel el drenaje tiene lugar como resultado de una serie de pulsos de succión de corta duración.
5. La estructura de la hoja en el laboratorio es más densa que la obtenida en la máquina, producto de una diferencia de estructura entre ambos tipos de hojas, lo que conduce a diferencias en la mayoría de las propiedades de la hoja siendo normalmente más alto los valores de resistencia en las hojas de laboratorio.

Estas diferencias entre otras, han justificado los criterios de muchos investigadores que consideran impracticable la predicción por los métodos convencionales establecidos a escala de laboratorio y la no linealidad de las propiedades individuales de las pulpas componentes, por lo que la mezcla no puede considerarse linealmente aditiva. Sin embargo, otros si consideran posible al menos para mezclas de dos componentes considerar las propiedades como aditivas, así como que es posible establecer tendencias de las propiedades de las mezclas fibrosas en el laboratorio y extrapolar a nivel industrial si se conocen factores que permitan corregir los resultados y que serían válidos solamente en el sistema que se está trabajando. (Foster, 1969) afirma que las funciones que describen las propiedades de las mezclas no son lineales, pero que se pueden resolver mediante conocimientos precisos de estas funciones dividiéndolas en segmentos de líneas rectas factibles para aplicar procedimientos de programación lineal y condicionando los resultados a la seguridad y precisión de los datos que se emplean. Un estudio a nivel industrial de acuerdo a estos preceptos y con el objetivo de optimizar las condiciones de operación fue reportado (E. González-Suárez, 1982) para una instalación industrial que empleaba pulpa de bagazo semiquímica y papel recuperado para la producción de cartón para ondular y más tarde extendido (Morales Pérez, 1994) para una instalación de papeles industriales, todo ello generalizado entre los métodos de aplicación del análisis de procesos en la intensificación de instalaciones de la industria química en países en vías de desarrollo. (E. González-Suárez, 1988) y en la aplicación del análisis de proceso considerando la incertidumbre en la industria de pulpa y papel (E. González-Suárez, 2003).

Como se desprende de lo analizado, toda una serie de investigadores coinciden en la posibilidad de predecir las propiedades del papel del nivel de laboratorio al nivel industrial.

Se han planteado que es necesario obtener correlaciones que representen dicha relación para cada una de las propiedades, lo que hace necesario tener toda una serie de observaciones de laboratorio de propiedades de la pasta obtenida en la caja cabecera de la máquina de papel y el valor de las propiedades correspondientes a dichas observaciones en el papel industrial, con el fin de aplicar métodos estadísticos de correlación y obtener las expresiones correspondientes.

Pueden obtenerse expresiones simples que relacionan la propiedad, pero es importante señalar que en la formación del papel en la máquina intervienen una serie de parámetros y procesos que pueden ser cuantificados y medir su influencia en las propiedades del papel industrial, dando luego lugar a modelos estadísticos más complejos de mejor ajuste que pueden ser obtenidos por métodos matemáticos de correlación por regresión múltiple.

Se puede inferir que la problemática tiene gran complejidad si se tiene en cuenta que la inmensa mayoría de las propiedades individuales de las pulpas responden a comportamientos no lineales y aunque se han desarrollado trabajos como los reportados por (Foster, 1969) y otros investigadores (Molina, Jodzitski, y Ramirez, 1974) con resultados positivos los mismos presuponen comportamiento lineal de las propiedades de la pulpa en estrechos rangos de molienda aceptando la aditividad de las propiedades de la pasta a partir de las propiedades de sus componentes y la proporción de las mismas en la mezcla, todo lo cual se cumple (Breckt, 1963) en el caso de mezclas de dos componentes y siempre que la naturaleza de dichos componentes sean semejantes.

La formulación de pastas de mezclas de tres o más componentes se convierte, sin embargo, en un serio problema especialmente cuando se requiere conocer el efecto de la composición y el grado de molienda de cada componente sobre las propiedades de la mezcla.

El ejemplo aquí presentado, se enmarca dentro de la continuidad de un sostenido esfuerzo por incrementar la competitividad de las empresas productoras de papel para ondular, empleando para ello de forma parcial pulpas alternativas, entre las cuales se sitúa en un marco de interés; el uso de papel reciclado, así como las fibras obtenidas con el proceso *Organosolv* (etanol – agua) a partir de bagazo de caña (Turrado Saucedo, Pajón, González-Suárez, Saucedo, y Salvador Pérez, 2001).

En América Latina el empleo del etanol en el pulpeo cobra más fuerza porque este se produce localmente y su obtención es una de las industrias más progresista del continente. Este proceso es relativamente barato y el área geográfica tiene un potencial bastante grande como para establecer una seguridad de abastecimiento por mucho tiempo y con costos bajos, ya que se puede considerar que donde se genera bagazo de caña puede haber también etanol; ambas materias primas son básicas para la producción de pulpa mediante procesos con aplicación de alcohol. De aquí la idea de vincular aún más la industria de celulosa con la industria azucarera (Suárez, Rodríguez, Poblet, y Sanjuan, 2000).

La obtención de celulosa con alcohol es pues una idea vieja que, con un análisis económico actual, se puede establecer como una probabilidad que se irá convirtiendo en una realidad en el futuro.

En este contexto surgió el interés por el desarrollo de este trabajo con el objetivo de obtener pulpas de buena calidad para la producción de papeles industriales a través de un proceso con un mínimo impacto ambiental. Además, al aumentar la selectividad de la lignina existe la posibilidad de la utilización de la misma en productos de alto valor agregado contribuyendo positivamente a la eficiencia económica del proceso.

El reciclado de papel proporciona fibras largas y flexibles, las cuales no generan propiedades de respuesta que se exigen para el papel para ondular como son el CMT, si estas fibras se someten a un proceso de refinación más intenso pueden generar fibra recortada, pero con las características de flexibilidad de la fibra larga, por lo cual el papel onda no cumple con las propiedades que se exigen al papel para corrugar.

Aunque generalmente el comportamiento de las propiedades de las pulpas no es lineal, se seleccionó un método de enrejado *Simplex* para facilitar el trabajo experimental. Los requerimientos para el mismo son que las pruebas se efectúan a 6 puntos de composición del enrejado. Para la mayoría de las propiedades una medida a cada punto del enrejado es suficiente, pero es importante que se realicen algunas replicas aun punto que se sitúa convenientemente en cualquier zona del enrejado, con el fin de lograr un cálculo del error experimental, o sea, el error al mezclar, al probar, etc., que es posible en cualquier parte del análisis.

Las respuestas medidas en los 6 puntos de composición del diseño cuántico de tres componentes se representan por un polinomio general simplificado de 6 términos como aparece a continuación:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad \text{Ec. 2.132}$$

A través de dicho polinomio se puede obtener la superficie de respuesta de cada propiedad en dependencia de la variación de la composición. De este diagrama obtenido se aprecia una zona de trabajo, en la cual están los valores de composición que tienen magnitudes similares de propiedades según las restricciones de los procesos

## Resultados

De acuerdo con los resultados experimentales se desarrolló el siguiente análisis:

Para la formación de las hojas la pulpa fue refinada de acuerdo con la ISO 5264/III - 1979-e en un molino *Jokro* a diferente grado de refinación (*Schopper Riegler*) según el comportamiento de la curva de molienda de los diferentes componentes, así el papel recuperado y las pulpas semiquímica de bagazo se refinaron durante 6 minutos hasta 21 y 22 S.R. Las pulpas *Organosolv* tanto para la variante establecida en base a la experiencia de la Universidad de Guadalajara/México, como la experiencia de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas con 1,5 por ciento de sosa se refinó durante 15 minutos y 11 S. R. y para las variantes de 3 por ciento de sosa la refinación fue de 10 minutos para 13,5 SR con las pulpas obtenidas se hizo un diseño enrejado simple de 6 puntos y se formaron hojas de 135 g/m<sup>2</sup> de acuerdo a T 205 OM 88., las cuales se evaluaron de acuerdo a T 809 OM 88 para obtener el aplastamiento de la forma ondulada CMT en sus valores puros como vértices de un triángulo de estudio de mezclas ternarias y mezclas al 50 por ciento de:

- Recorte y bagazo semiquímica
- Recorte y *Organosolv* mexicana
- Recorte y *Organosolv* cubana

Esta concepción de diseño se repitió para el caso de pulpas al 1,5 y el 3 % de sosa obteniendo ecuaciones del tipo:

$$CMT = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad \text{Ec. 2.133}$$

Donde:

$b_1 = Y_1 =$  CMT del componente puro 1 (Pulpa *Organosolv*);  $b_2 = Y_2 =$  CMT del componente puro 2 (reciclado);  $b_3 = Y_3 =$  CMT del componente puro 3 (semiquímica de bagazo);  $b_{12} = 4Y_{12} - 2Y_1 - 2Y_2$ ;  $b_{13} = 4Y_{13} - 2Y_1 - 2Y_3$ ;  $b_{23} = 4Y_{23} - 2Y_2 - 2Y_3$ ;  $X_1 =$  Fracción del componente 1 puro;  $X_2 =$  Fracción del componente 2 puro;  $X_3 =$  Fracción del componente 3 puro;  $X_1 + X_2 + X_3 = 1$

Los resultados encontrados para los cuatro tipos de pulpa *organosolv* obtenidas y las diferentes composiciones de las mezclas con hojas formadas en el laboratorio son las siguientes:

Tabla 2.31 Para alta aplicación de sosa (alto por ciento de sosa)

Respuesta	PULPA MEXICANA	PULPA CUBANA	FORMULACIÓN
Y <sub>1</sub>	74,590	74,331	ORGANOSOLV
Y <sub>2</sub>	211,770	211,770	RECICLADO
Y <sub>3</sub>	178,130	178,130	SEMIQUÍMICA
Y <sub>12</sub>	103,769	115,120	ORGAN. -RECIC.
Y <sub>13</sub>	102,790	108,310	ORGAN. - SEMIQ.
Y <sub>23</sub>	140,580	140,580	RECIC- SEMIQ

De donde se obtiene los modelos correspondientes:

Para la variante mexicana de CMT: 140,58

$$140,58 = CMT = 74,59X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 157,644X_1X_2 - 94,28X_1X_3 - 226,48X_2X_3$$

Tabla 2.32 Para mínima aplicación de sosa (bajo por ciento de sosa)

Respuesta	PULPA MEXICANA	PULPA CUBANA	FORMULACIÓN
Y <sub>1</sub>	99,62	74,331	ORGANOSOLV
Y <sub>2</sub>	211,77	211,770	RECICLADO
Y <sub>3</sub>	178,13	178,130	SEMIQUÍMICA
Y <sub>12</sub>	137,43	120,440	ORGAN. -RECIC.
Y <sub>13</sub>	148,39	146,340	ORGAN. - SEMIQ.
Y <sub>23</sub>	140,58	140,580	RECIC- SEMIQ

Así para la para la determinación de las formulaciones necesarias para cada tipo de Pulpa Organosolv en mezclas con papel reciclado, se partió de la propiedad de los modelos de mezcla ternaria de ser reducidos a modelos de mezclas binarias haciendo cero el valor del tercer componente, así partiendo de la experiencia productiva se fijó como requerimiento de CMT de acuerdo con la Norma T 809 om 93 los valores de 50 % de pulpa Semiquímica y cantidad equivalente de papel reciclado para un entorno al óptimo, es decir 140,58, de ahí las ecuaciones se reducen para todos los casos a:

a) Alto por ciento de sosa cáustica.

Variante Mexicana.

$$\text{CMT} = 140,58$$

Luego entonces la formulación recomendada debe ajustarse a esos valores y siendo:

$$140,58 = \text{CMT} = 74,59X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 157,644X_1X_2 - 94,28X_1X_3 - 226,48X_2X_3$$

Tendremos para  $X_3 = \text{cero}$  que la ecuación se reduce a:

$$140,58 = \text{CMT} = 74,39X_1 + 211,77X_2 + 178,13(0) - 157,644X_1X_2 - 94,28X_1(0) - 226,48X_2(0)$$

Es decir:  $140,58 = 74,59X_1 + 211,77X_2 - 157,644X_1X_2$ ; Luego siendo para la mezcla binaria:

$1 = X_1 + X_2$  podemos sustituir;  $X_2 = 1 - X_1$  y queda la ecuación

$$140,58 = 74,59X_1 + 211,77(1 - X_1) - 157,644X_1(1 - X_1);$$

Resolviendo algebraicamente se obtiene la ecuación de segundo grado:

$$0 = 71,19 - 188,19 + 73,04X_1^2$$

De donde se puede determinar  $X_1$  resolviendo la ecuación de segundo grado, en la cual aparecerán dos soluciones de  $X_1$  una con signo positivo y otro negativo, desechamos esta por no ser real y obtenemos a  $X_1 = 0,6729$  es decir 67,29 %, lo que significa 32,71 %

El mismo procedimiento aplicado para las otras alternativas de Pulpa Organosolv arroja los siguientes resultados:

Para pulpa mexicana a un 3% de sosa:

$$\text{CMT} = 74,39X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 157,644X_1X_2 - 94,28X_1X_3 - 226,48X_2X_3$$

Para pulpa cubana aun 3 % de sosa:

$$\text{CMT} = 74,331X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 111,722X_1X_2 - 71,68X_1X_3 - 217,48X_2X_3$$

Para pulpa mexicana con 1,5 % de sosa:

$$\text{CMT} = 96,62X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 226,48X_1X_2 - 73,04X_1X_3 - 38,06X_2X_3$$

Para pulpa cubana a un 1,5 % de sosa

$$\text{CMT} = 92,655X_1 + 211,77X_2 + 178,13X_3 - 226,48X_1X_2 - 127,11X_1X_3 - 43,77X_2X_3$$

Determinación de las formulaciones necesarias para cada tipo de pulpa organosolv.

De acuerdo a los modelos obtenidos y fijando como requerimiento 140,58 de CMT "Concora Medium Test" de acuerdo a T 809 om 93, los valores que se obtienen con una formulación de 50 % de Recorte y Pulpa Semiquímica de Bagazo tal y como se emplea actualmente, se obtuvieron las siguientes relaciones:

1. Mezcla de 65 % Recorte y un 35 % de Pulpa Organosolv obtenida con 1,5 % de Sosa y de Bajo nivel de Etanol.
2. Mezcla de 33 % de Recorte y un 67 % de Pulpa Organosolv obtenida con 1,5 % de Sosa y Alto nivel de Etanol.
3. Mezcla de 85 % Recorte y un 15 % de Pulpa Organosolv obtenida con 3,0 % de Sosa y de Bajo nivel de Etanol.
4. Mezcla de 74 % de Recorte y un 26 % de Pulpa Organosolv obtenida con 3,0 % de Sosa y Alto nivel de Etanol.

#### *Ejemplo 6*

Como es conocido, el bagazo es un subproducto con elevadas potencialidades de desarrollo dado los volúmenes que se obtienen y a la composición de celulosa, hemicelulosa, lignina y otros componentes que generan productos de alto valor agregado (Gálvez, 2000)(Hernández, Mesa, González-Suárez, y Jover, 2005)(Banerjee y Pandey, 2002)(Lavarack, Griffin, y Rodman, 2002)(Martín, Galbe, Wahlbom, Hahn-Hägerdal, y Jönsson, 2002). Sus usos van destinados principalmente hacia la generación de energía térmica y eléctrica, y como materia prima para la producción de tableros, alimento animal, furfural, y más reciente hacia la producción de etanol de segunda generación.

Por otra parte, el pretratamiento del bagazo permite el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina), la reducción de la cristalinidad de la celulosa y el aumento del área superficial accesible (Mesa et al., 2009).

Como se ha venido estudiando en trabajos anteriores (Mesa et al., 2011) y en consecuencia con la estrategia investigativa de los pretratamientos del bagazo, según el esquema de la Figura 2.15, en la etapa de hidrolisis del bagazo para la obtención de xilosa y furfural, los resultados se han visto favorecidos a la utilización del sólido pre tratado y el sólido residual de la hidrolisis enzimática en la obtención de tableros de fibras, quedando por analizar la utilización del licor hidrolizado de la hidrólisis enzimática.

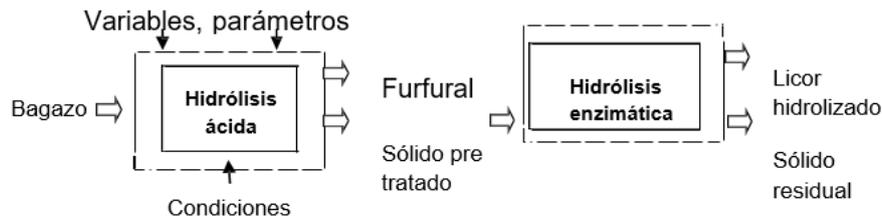


Figura 2.15 Esquema general de las etapas de pretratamiento del bagazo, (Morales-Zamora, González-Suárez, y Mesa-Garriga, 2016)

La búsqueda de nuevas formulaciones para la fermentación de etanol ha sido pertinente desde hace años, de ahí que se han obtenido resultados favorables en las formulaciones de mezclas de miel, jugo de los filtros y vinaza en la obtención de etanol incluso para minimizar la agresividad de las vinazas (Santos Herrero, Dominguez, Pedraza Garciga, y González-Suárez, 2003).

Precisamente, motivado por lo novedoso del tema en estudio, uno de los posibles usos del licor hidrolizado, puede ser en la formulación de mezclas azucaradas para la obtención de etanol, de ahí que explorar las posibilidades de estas formulaciones brindará un sustrato azucarado al proceso, lo cual favorecerá en un menor consumo de miel y agua, y una reducción de miel por concepto de compra en tiempo de no zafra.

Indudablemente un experimento de este tipo abre el verdadero camino a la producción de etanol de segunda generación y también con ello al desarrollo de la llamada producción de etanol de tercera generación y con ello al desarrollo de la industria de la caña de azúcar en el concepto de bio refinería.

#### **Diseño de experimentos de las mezclas de sustratos azucarados**

Para las fermentaciones alcohólicas a nivel de laboratorio, a partir de las diferentes mezclas de sustratos azucarados se fijaron las mismas condiciones de trabajo de una planta de etanol, partiendo del prefermento preparado en la fábrica. Las condiciones del inóculo obtenidas por el laboratorio de análisis, en el momento del estudio fueron de:

- Concentración=7,83 °Bx
- Temperatura=34 °C
- pH= 4,5
- Recuento celular:  $288 \times 10^6$  células/mL
- Gemación: 20 %; Viabilidad: 99 %
- Levadura: *Saccharomyces cerevisiae*

Se prepararon fermentaciones de 50 ml cada una, con un 10 % de inóculo y tres replicas para cada punto de mezcla, para un tiempo de fermentación de 24 horas.

Los nutrientes añadidos fueron:

- urea: 3 g/L;
- sulfato de amonio: 3 g/L
- fosfato de amonio: 3 g/L.

Los sustratos azucarados utilizados fueron: miel final (MIEL), jugo de los filtros (JF) e hidrolizado de bagazo (HID). Las condiciones experimentales tomadas en el momento del estudio para cada sustrato azucarado se muestran en la Tabla 2.33.

Tabla 2.33 Condiciones experimentales de cada sustrato azucarado

Características/Muestras	Miel	JF	HID
°Bx	81,20	13,00	5,00
pH	5,20	5,70	4,80
ART(g/L)	640,96	11,0	12,49

Para la preparación de las mezclas se fijaron las condiciones finales para una concentración de 120 g/L. (16°Bx, equivalente).

Para cada punto del diseño se determinaron los balances de masa para la adición de los sustratos azucarados con el objetivo de ahorrar miel y agua. El primer punto del diseño es con la mezcla tradicional de miel y agua. En los puntos restantes se utiliza para la dilución del jugo de los filtros y el licor hidrolizado, así como se ajusta el balance para la reducción de miel.

En el caso de los puntos de mezcla del licor hidrolizado de bagazo fue necesario la adición de miel para completar la base inicial de azúcares requeridos en la mezcla (HIDM).

Para el estudio de mezclas de sustratos azucarados se realiza un diseño de mezclas enrejado simplex con Centroide, con variable respuesta % alcohólico (ALC) alcoholenvolumenpor100. La determinación de la concentración de etanol g/L se realizó en una columna de HPLC LY9100.

La Tabla 2.34 se muestran los resultados. Como se puede observar, para todos los puntos de mezclas se obtienen resultados de porcentos alcohólicos, en el orden de los obtenidos para fermentaciones.

Tabla 2.34 Resultados del diseño de mezclas de sustratos azucarados

Puntos	MIEL X <sub>1</sub>	JF X <sub>2</sub>	HIDM X <sub>3</sub>	C (g/L)	%ALC Y <sub>1</sub>
	1,00	0,00	0,00	42,74	5,38
2	0,00	1,00	0,00	35,28	4,39
3	0,00	0,00	1,00	34,36	4,31
4	0,50	0,50	0,00	37,66	4,68
5	0,50	0,00	0,50	38,19	4,78
6	0,00	0,50	0,50	40,08	5,06
7	0,33	0,33	0,33	42,04	5,29

A continuación, en la Tabla 2.35, se muestran los modelos de ajuste que describen el comportamiento y la influencia de la variable dependiente %Alc (Y<sub>1</sub>) con las variables de mezclas de los diferentes sustratos.

Se obtienen mejores ajustes para un modelo cubico especial, para un R<sup>2</sup> de 99,90%, un R<sup>2</sup>ajustado de 99,83%, un error estándar estadístico en el orden de 0,0163 y un Durbin Watson estadístico de 1,913.

El modelo de ajuste es el siguiente:

$$Y_1 = 5,35333 * X_1 + 4,36 * X_2 + 4,30667 * X_3 - 0,813333 * X_1 * X_2 - 0,306667 * X_1 * X_3 + 2,82667 * X_2 * X_3 + 10,7202 * X_1 * X_2 * X_3$$

Tabla 2.35 Resultados del Modelo Completo

Modelo	ES	R-Cuadrado	R-Cuadrada Ajd.
Lineal	0,3485600	37,84	22,30
Cuadrático	0,1502300	90,62	85,57
Cúbico Especial	0,0163299	99,90	99,83

Partiendo del modelo cubico especial, se procede a la optimización del modelo, maximizando la variable de salida Y<sub>1</sub>. En la figura 2.19 se observan los diferentes contornos que realiza el software hasta llegar a la región del óptimo, identificando como el punto óptimo del diseño de mezcla, el cual responde a la mezcla de los tres componentes, con las siguientes composiciones: X<sub>1</sub>: 0,299, X<sub>2</sub>: 0,342y X<sub>3</sub>: 0,358, para un % alcohólico de 5,26. Es importante aclarar, que para los

efectos reales, la región del óptimo es considerada como la región de trabajo para una primera aproximación de los resultados obtenidos con estas formulaciones.

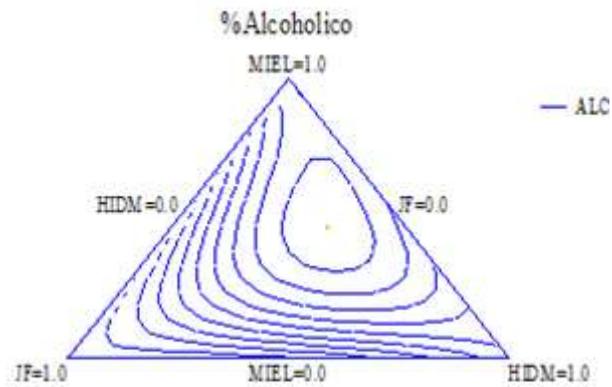


Figura 2.16. Contornos del óptimo de la mezcla

En la Figura 2.20 y 2.21 se muestra, la superficie de respuesta estimada, así como los contornos de la superficie de respuesta, respectivamente. En la práctica industrial se trabaja en la región cercana al óptimo.

Las mezclas dependerán de los balances de masa y de las variaciones de las concentraciones de los sustratos y los inóculos.

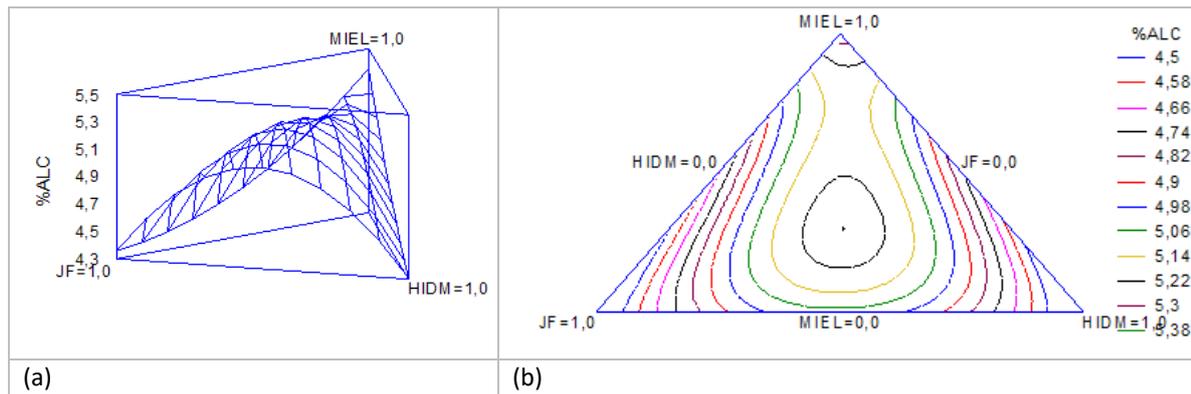


Figura 2.17 Superficie de respuesta. (a) estimada; (b) contorno

La utilización de las mezclas de diferentes sustratos favorece el proceso de fermentación, si se tiene en cuenta que se aprovechan los jugos de los filtros y el licor hidrolizado para la dilución de las mieles, además de aportar azúcares a la mezcla a fermentar. Al realizar los balances de masa en cada punto experimental, se obtiene el por ciento que representa en ahorro en miel y en agua para cada punto con respecto al punto origen de miel+agua, tal y como se representa en la Tabla 2.36 lo cual resulta interesante al lograr disminuciones de estas materias primas que inciden en los costos de producción del proceso.

El estudio preliminar de estas mezclas de sustratos resulta novedoso para la utilización del licor hidrolizado obtenido del fraccionamiento e hidrólisis enzimática del bagazo.

Es importante señalar, que el punto óptimo obtenido solo debe considerarse para una aproximación en el estudio hacia la región del óptimo y una valoración de las posibilidades y potencialidades de mezclas de estos sustratos.

Estos resultados les permitieron concluir a los autores (Morales-Zamora et al., 2016) que los estudios preliminares de utilización de licor hidrolizado de bagazo en la fermentación de

mezclas de sustratos azucarados, con mieles y jugos de los filtros, se obtienen resultados satisfactorios.

Tabla 2.36 Por ciento que representan en ahorro de miel y agua

No. Puntos	%Ahorro	Miel	%Ahorro
1	MIEL	-	-
2	JF	100,00	100,00
3	HIDM	26,74	92,19
4	MIEL+JF	77,68	78,91
5	JF+HIDM	26,74	92,19
6	MIEL+HIDM	50,00	49,30
7	MIEL+HIDM+JF	67,00	22,73

La incorporación del licor hidrolizado brindará un sustrato azucarado al proceso, lo cual favorecerá en un menor consumo de miel y agua, y una reducción de miel por concepto de compra en tiempo de no zafra. Las condiciones de estas mezclas deberán analizarse de manera independiente y dependerán, no solo de los resultados tecnológicos, sino también del análisis de factibilidad económica y su aplicación en cada instalación industrial.

## 2.15. Referencias bibliográficas

- Adler, I., Markova, E., y Granovskii, I. (1975). The design of experiments to find optimal conditions: a programmed introduction to the design of experiments.
- Ahnazarova, S. L., Kafarov, V. V, y Rep'ev, A. P. (1982). *Experiment optimization in chemistry y chemical engineering*. Mir Publishers.
- Albernas-Carvajal, Yaillet Corsano, G., Morales-Zamora, M., González-Cortés, M., Santos-Herrero, R., y González-Suárez, E. (2014). Optimal design for an ethanol plant combining first y second-generation technologies. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(5), 1658.
- Banerjee, R., y Pandey, A. (2002). Bio-industrial applications of sugarcane bagasse: A technological perspective. *Int. Sugar J.*, 104, 64–68.
- Berberena, V. (1991). *Intensificación de la planta de acabado de la industria textil Desembarco del Granma*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Berstrom, J. (1971). Diference between shetmaking on the paper machina y in the laboratory. In *EUCEPA Symposium on Pulp y Paper Characterization*.
- Box, G. E. ., y Hunter, W. (1961). *A useful method for model - building*. Madison.
- Box, G. E. ., y Wilson, K. (1951a). On ther Experimental Design Attaimat of optimum Condition. *Journal Rev. Stat. Soc.* 13.
- Box, G. E. ., y Wilson, K. . (1951b). On ther Experimental Design Attaimat of optimum Condition” *Journal Rev. Stat. Soc.* 13.
- Breckt, W. (1963). Das Mischen Verschiedenartig es Halbstoff in Siven Einploss anf die Physeralischen Eigensehaften der Papiere. *S Papper Etidning*, 66(5), 157–160.
- Cardoso Romero, G. (1993). *Contribución a la modelación estadística de procesos de la industria química*. UCLV, Santa Clara, Cuba.
- Cruz, R., y González, E. (1999). Alternativas para la combinación de sustratos en la fermentación alcohólica en la destilería anexa al CAI ‘Melanio Hernández.’ *Revista ICIDCA*, 33(1), 8–17.
- Foster, B. B. (1969). LINEAR PROGRAMMING-A METHOD OF DETERMINING LEAST COST BLENDS OR MIXES IN PAPERMAKING. *TAPPI PRESS TECH ASSN PULP y ....*
- Gálvez, L. O. (2000). Diversified production of the sugarcane agro-industry. In G. L. O. (Ed.), *Handbook of SugarCane Derivatives* (3rd ed., pp. 3–17). Havana, Cuba.: ICIDCA.

- García Aparicio, M. (2007). *Sacarificación enzimática de paja de cebada pretratado mediante explosión por vapor para la obtención de etanol combustible*. Universidad Alcalá de Henares.
- González-Cortés, M., Morales Pérez, M., Area Aguilar, M. C., y González-Suárez, E. (2003). Calidad del papel para ondular producido con pulpa de recorte y pulpa organosolv cocida a alta presión. *Centro Azúcar*, 30(3), 43–47.
- González-Suárez, E. (1982). *Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartón para ondular*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- González-Suárez, E. (1988). Vías y aplicaciones de la intensificación de los procesos tecnológicos de la industria química en un país en vías de desarrollo. In *Ponencia UPADI 88*. Habana: Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros.
- González-Suárez, E. (1991). *Aplicación en Análisis de procesos en la intensificación de distintas industrias de Cuba*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- González-Suárez, E. (2003). *Aplicación del análisis de procesos considerando la incertidumbre en la industria de pulpa y papel*. (E. González-Suárez, Ed.), CYTED. Argentina.
- González-Suárez, E., y Otero, J. (1983). Determinación del efecto del incremento de la temperatura en la disminución de los tiempos de cura durante el recape. *Tecnología Química*, 4(1-2-3-4), 139–157.
- González-Suárez, E., Quezada Moreno, W., Peralta-Suárez, L. M., y Concepción Toledo, D. (2016). *Modelación y optimización de procesos: Impacto científico en la Industria Química y Fermentativa* (Primera). Pujilí.
- González-Suárez, E., Ramos, F., Ribot, A., y Peralta-Suárez, L. M. (1986). Combinación de los métodos de diseño experimental en la minimización de los ensayos de una investigación. *Rev. Tecnología Química*, 7(1), 11–18.
- González-Suárez, E., Ribot, A., y Vega, I. (1979a). Eficiencia y distribución de energía consumida por un refinador de discos simples. *Centro Azúcar*, 6(2), 71–75.
- González-Suárez, E., Ribot, A., y Vega, I. (1979b). Estudio a escala industrial de las variables que afectan las propiedades físico-mecánicas de la pulpa refinada. *Centro Azúcar*, 6(1), 95–100.
- González-Suárez, E., Ribot, A., y Vega, I. (1980). Estudio preliminar del modelo matemático del refinador de discos simples para pulpa de bagazo semiquímica. *Centro Azúcar*, 7(1), 3–16.
- González-Suárez, N. (2008). *Estrategia de reconversión de una instalación de la industria química*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- González Suárez, E. (1982). *Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartón para ondular*. UCLV, Santa Clara, Cuba.
- Gorman, J. W., y Hinman, J. E. (1962). Simplex Lattice Designs for Multicomponent Systems. *Technometrics*, 4(4), 463–487. <https://doi.org/10.1080/00401706.1962.10490034>
- Hernández, M. ., Mesa, L., González-Suárez, E., y Jover, J. (2005). *Bioetanol: Combustibles Alternativos*. Cámara del libro de Argentina.
- Isaacson, W. (1970). Statistical analyses for multivariable systems. *Chemical Engineering*, 77(14), 69.
- Kendall, M. G., y Stuart, A. (1946). *The advanced theory of statistics. The advanced theory of statistics* (2nd Ed).
- Laflamme, J. N. (1969). Simplex lattice design, use in evaluation of a three-component wood system. *Pulp y Paper Magazine of Canada*, 73–76.
- Lavarack, B. P., Griffin, G. J., y Rodman, D. (2002). The acid hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose to produce xylose, arabinose, glucose y other products. *Biomass y Bioenergy*, 23(5), 367–380. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00066-1)
- Martín, C., Galbe, M., Wahlbom, C. F., Hahn-Hägerdal, B., y Jönsson, L. J. (2002). Ethanol production from enzymatic hydrolysates of sugarcane bagasse using recombinant xylose-utilising *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme y Microbial Technology*, 31(3), 274–282. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00112-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00112-6)
- Mesa Garriga, L. (2010). *Estrategia investigativa para la tecnología de obtención de etanol y coproductos*

*del bagazo de la caña de azúcar*. UCLV.

- Mesa, L., González, E., Albornas, Y., González, M., Díaz, M., y Castro, E. (2009). Economic Evaluation of pretreatment alternatives for ethanol production from sugar cane bagasse. In *17th European Biomass Conference y Exhibition from Research to Industry y Markets*. Hamburg, Germany.
- Mesa, L., González, E., Cara, C., González, M., Castro, E., y Mussatto, S. I. (2011). The effect of organosolv pretreatment variables on enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.003>
- Mesa, L., González, E., Cara, C., Ruiz, E., Castro, E., y Mussatto, S. I. (2010). An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugarcane bagasse based on organosolv pretreatment. *Journal of Chemical Technology y Biotechnology*. <https://doi.org/10.1002/jctb.2404>
- Mesa, L., González, E., Ruiz, E., Romero, I., Cara, C., Felissia, F., y Castro, E. (2010). Preliminary evaluation of organosolv pre-treatment of sugar cane bagasse for glucose production: application of 23 experimental design. *Applied Energy*, 87(1), 109–114.
- Molina, R., Jodzitski, Y., y Ramirez, R. (1974). Propiedades basicas de las mezclas de pulpas químicas blanqueadas de fibras larga y bagazo. *Sobre Los Derivados de La Cana de Azucar*.
- Morales-Zamora, M., González-Suárez, E., y Mesa-Garriga, L. (2016). Avances en la obtención de tableros de fibras a partir de mezclas de residuales lignocelulósicos de bagazo. *Afinidad*, 73(575), 205–209.
- Morales Pérez, M. (1994). *Determinación de las condiciones óptimas de operación y propuesta de alternativas de desarrollo del combinado de Papeles Blancos de Jatibónico*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Peñuela-Vásquez, M., Nascimento C. da Silva, J., Bezerra de Souza, M., y Pereira, N. (2007). Enzymatic Hydrolysis Optimization to Ethanol Production by Simultaneous Saccharification y Fermentation. In *Applied Biochemistry y Biotechnology* (pp. 141–153). Totowa, NJ: Humana Press. [https://doi.org/10.1007/978-1-60327-181-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-181-3_13)
- Perry, R. H., y Chilton, C. H. (1973). *Chemical Engineers Handbook* (5ta. edic). La Habana, Cuba: Edición Revolucionaria.
- Perry, R. H., Green, D. W., y Maloney, J. (2001). *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill.
- Plackett, R. L., y Burman, J. P. (1946). The Design of Optimum Multifactorial Experiments. *Biometrika*, 33(4), 305. <https://doi.org/10.2307/2332195>
- Prvan, T., y Street, D. J. (2002). An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial y related designs. *Journal of Statistical Planning y Inference*, 106(1–2), 245–269. [https://doi.org/10.1016/S0378-3758\(02\)00216-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3758(02)00216-1)
- Rodríguez, A. (1988). *Optimierung der Papierstoffzusammensetzung von papiernen Flächengebilden mit hohem Anteil an Bagasse und speziellen Sorten kubanischen Altpapiers*.
- Sánchez Tabernero, L. (1984). Aspectos técnicos y económicos del refinado en la fabricación de papel. *Ingeniería Química, ISSN 0210-2064, N°. 181, 1984, Págs. 65-69, Industria papelera(181), 65–69*.
- Santos Herrero, R., Dominguez, E. R., Pedraza Garciga, J., y González-Suárez, E. (2003). Impacto de las mezclas de sustratos azucarados en la agresividad de los residuales durante la producción de étanol y levadura torula. *Centro Azúcar*, 30(2), 62–65.
- Scheffé, H. (1958). Experiments With Mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 20(2), 344–360. <https://doi.org/10.2307/2983895>
- Spiridonov, V. P. (1973). *Tratamiento matemático de datos físico químicos*. Moscú: Mir Publishers.
- Suárez, E. G., Rodríguez, A. G., Poblet, M. P., y Sanjuan, R. (2000). EL PULPEO ORGANOSOLV PARA PAPEL ONDULADO COMO UNA VÍA DE INCREMENTAR LA INTEGRACIÓN FÁBRICA DE AZÚCAR-PAPELERA. In *Memorias de CIADYP 2000*.
- Turrado Saucedo, J. M., Pajón, P., González-Suárez, E., Saucedo, A. R., y Salvador Pérez, S. (2001). Medium Test value of Médium Paper Using Sugar Bagasse in the Furniture. *IPPTA Journal. India*, 12(2).
- Williams, E. J. (1959). *Regression analysis*. New York: John Wiley y Sons, Incorporated.



## Capítulo III

### Modelación y optimización de procesos agroindustriales en la gestión de conocimientos.

#### 3.1. Introducción

La industria moderna se distingue por el interés de los fabricantes en intensificar los procesos productivos con vistas a lograr artículos de primera calidad con menores costos de producción. Es parte de la práctica investigativa una serie de pasos para lograr gestionar el conocimiento necesario para lograr estos objetivos.

Con estos propósitos se han propuestos los siguientes pasos:

1. Formulación del problema y establecimiento de los objetivos y criterios de evaluación.
2. Inspección preliminar y clasificación del proceso para descomponerlo en elementos.
3. Determinación preliminar de las relaciones entre los elementos.
4. Análisis de las variables y sus relaciones.
5. Modelación matemática de las relaciones entre las variables y parámetros de los elementos.
6. Evaluación de en qué medida representa el proceso real, utilizando el razonamiento para integrar lo matemático y lo no matemático.
7. Aplicación del modelo, interpretación y comprensión de los resultados.

Estos pasos generales inducen a la elaboración y comprobación de los modelos, así como su aplicación.

#### 3.2. 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, en 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 (Rudd y Watson, 1968) es "no utilizar una compleja técnica para resolver problemas que pueden ser resueltos por un análisis simple".

Los modelos tienen dos 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 técnico-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, esto 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 tres líneas paralelas de desarrollo, a saber:

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

Entre las propiedades generales de los modelos se encuentran:

1. 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.
2. Los modelos contienen las facetas esenciales y decisivas del proceso en dependencia del fin del estudio.
3. Los modelos en general brindan nuevos conocimientos.
4. Los modelos se comprueban mediante la comparación de sus salidas con los resultados de los procesos reales.
5. 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.

### **3.3. Aplicación de modelos en la Industria de procesos químicos y fermentativos.**

#### **3.3.1. Etapas Generales para el Desarrollo de modelos.**

La elaboración de modelos matemáticos consta de tres partes fundamentales:

- Concepción del modelo.
- Elaboración de un algoritmo que capaz de modelar el objeto.
- 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 (González-Herrera et al., 2016).

Numerosos investigadores han desarrollado herramientas matemáticas para la modelación y simulación como apoyo a la toma de decisiones para biorrefinerías (González-Herrera et al., 2016).

### **3.3.2. Modelación matemática de sistemas tecnológicos complejos de la agroindustria.**

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 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 laborioso 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 fábrica 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 agroindustria (azucarera, panela, industrialización de la yuca, etc.) 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 un sistema sea representado por estimación de un simple criterio escalar" (González Rodríguez, 1978).

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 parámetros 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. Dos alternativas son posibles:

A)- Considerar que en la región de operación normal de una fábrica de azúcar el comportamiento de los elementos del sistema puede aproximarse a modelos lineales el conocimiento preciso de las funciones que caracterizan el comportamiento de esos procesos y a la interpretación de estas, mediante segmentos de líneas rectas, y entonces obtener el modelo global del sistema mediante la agregación de los modelos de los elementos 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.

b)- 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 óptimas 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 requieren:

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, 1968) son de extrema utilidad.

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

- a. Etapas de extracción.
- b. Etapas de purificación.
- c. Etapa de Evaporación.
- d. Etapa de cristalización.
- e. Etapas de centrifugación

1. 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 funciones lineales elaboradas en cada elemento le corresponden 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 o mediante una combinación de ellos lo que han sido utilizados con éxito por (González Suárez, 1982) en la modelación de procesos tecnológicos.

Por otro lado, el procedimiento de los datos estadísticos del control operacional según demostró (Cardoso Romero, 1993) 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 asumido la estrategia de modelación elaborado 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 (Kafarov, 1976):

$$[C_1] [XC_1].C_2] \dots XC_k) \dots XC_N) * +[b_1] [U] = 0 \quad \text{Ec.3.1}$$

$$Y_N = [C_2][XC_1).XC_2) \dots XC_k) \dots XC_N) + [B_2] [U] \quad \text{Ec.3.2}$$

Donde [U] es el vector columna de las variables al sistema. [XC<sub>k</sub>], es el vector fila de las variables de entrada al elemento K exceptuando las variables incluidas en el vector U, mientras que [C<sub>1</sub>], [C<sub>2</sub>], [B<sub>1</sub>] y [B<sub>2</sub>] [U]

Donde [U] es el vector columna de las variables al sistema. [XC<sub>k</sub>], es el vector fila de las variables de entrada al elemento K exceptuando las variables incluidas en el vector U, mientras que [C<sub>1</sub>], [C<sub>2</sub>], [B<sub>1</sub>], [B<sub>2</sub>] son las matrices de las ecuaciones restringidas.

Cuando los modelos no son lineales, las agregaciones del sistema se realizan 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.

### 3.4. Aplicaciones de la modelación matemática de procesos globales y etapas de la industria azucarera.

#### 3.4.1. Modelación y optimización de las condiciones de operación de una instalación de producción de azúcar crudo.

Con vistas a la optimización de las condiciones de operación del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo necesitamos una descripción matemática del efecto de todas las variables de operación en las corrientes de salida del proceso tecnológico, así como del efecto que las características de la materia prima tienen en esas corrientes de salida.

Con estos fines, el proceso tecnológico de producción de azúcar crudo a partir de los juegos de la caña de azúcar tal y como comúnmente se produce en cuba se representa en la Figura 3.1.

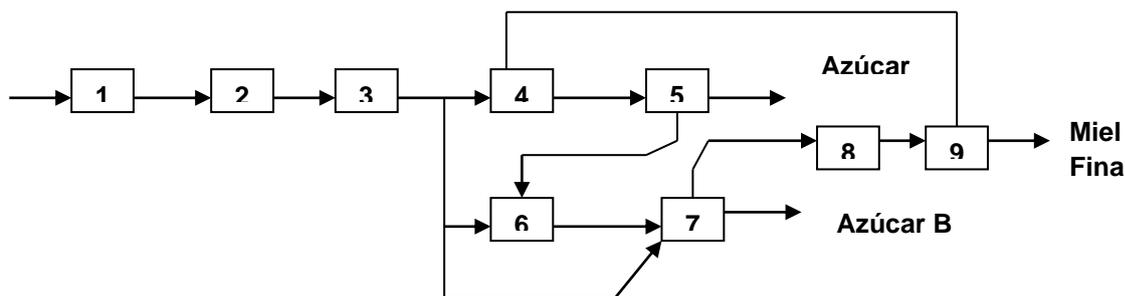


Fig. 3.1. Diagrama de bloque simplificado de la industria

En la Figura 3.1 se ofrece un diagrama sintetizado del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo en el cual el proceso se reduce a 9 etapas, a saber:

Etapas 1: Molinos; Etapas 2: Purificación; Etapa 3: Evaporación; Etapa 4: Cristalización A; Etapa 5: Centrifuga A; Etapa 6: Cristalización B; Etapa 7: Centrifuga B; Etapa 8: Cristalización C; Etapa 9: Centrifuga C

La modelación matemática del proceso global se realizó aquí mediante la agregación de los modelos de los elementos componentes (etapas) elaborados con ayuda del procedimiento estadístico de los datos del control operacional del proceso tecnológico de la fábrica estudiada ( realmente esto se realizó de manera similar en 3 combinados industriales y en la Planta Piloto de la UCLV) empleando el procedimiento desarrollado por (Cardoso Romero, 1993) y que se expone en el punto 2 de la metodología explicada anteriormente.

Las variables consideradas en cada etapa. Fueron las siguientes:

#### **Etapas 1- Molinos:**

Variables de entrada	Variable de salida
X <sub>1</sub> : Flujo de caña(T/d)	Y <sub>1</sub> : Cantidad (T/d)
X <sub>2</sub> : °Brix	Y <sub>2</sub> : Temperatura
X <sub>3</sub> : Pol	Y <sub>3</sub> : °Brix
X <sub>4</sub> : %Pureza	Y <sub>4</sub> : %Pol
X <sub>5</sub> : Fibra	Y <sub>5</sub> : % Pureza
X <sub>6</sub> : de caña Atrasada	Y <sub>6</sub> : Cantidad (t/d)
X <sub>7</sub> : Cantidad (t/d)	Y <sub>7</sub> : % Fibra
X <sub>8</sub> : Temperatura (c)	Y <sub>8</sub> : Pol.
X <sub>9</sub> : % de extracción	Y <sub>9</sub> : % Humedad
X <sub>1</sub> -X <sub>6</sub> : Caña al basculador	Y <sub>1</sub> -Y <sub>5</sub> : Jugo Mezclado.
X <sub>7</sub> -X <sub>8</sub> : Agua de inhibición	Y <sub>6</sub> -Y <sub>8</sub> : Bagazo.

## Etapa 2- Purificación.

Y<sub>1</sub>-Y<sub>5</sub>: Salen de la etapa 1

X<sub>10</sub>: Cantidad (t/d)                      Y<sub>10</sub>: Cantidad (t/d)

X<sub>11</sub>: °Brix                                      Y<sub>11</sub>: °Brix

X<sub>12</sub>: %Pol

X<sub>13</sub>: % Pureza                                Y<sub>13</sub>: % Pol

X<sub>14</sub>: pH                                        Y<sub>14</sub>: pH

X<sub>15</sub>: Cantidad (t/d)                      Y<sub>10</sub>-Y<sub>14</sub>

X<sub>16</sub>: Concentración (Baume)

X<sub>17</sub>: Agua a los filtros

X<sub>18</sub>: Temperatura del agua filtros

X<sub>19</sub>: Bagacillo (t/d)

X<sub>20</sub>: temperatura a la salida de los calentadores (°C)

X<sub>10</sub>-X<sub>14</sub>: jugo de los filtros

Etapa 3- Evaporación.

Y<sub>10</sub> -Y<sub>14</sub>: Salen de la etapa 2            Y<sub>18</sub>: Cantidad (t/d)

Y<sub>19</sub>: °Brix

Y<sub>20</sub>: %pol

Y<sub>21</sub>: Pureza

Y<sub>22</sub>: pH

Y<sub>23</sub>: Agua Evaporada

Y<sub>18</sub>-Y<sub>22</sub>: Meladura.

## Etapa 4. Cristalización A

Y<sub>19</sub>-Y<sub>22</sub>: Salen de la etapa 3.            Y<sub>24</sub>: °Brix

X<sub>21</sub>: °Brix                                      Y<sub>25</sub>: %Pol

X<sub>22</sub>: %Pureza                                Y<sub>26</sub>: %Pureza

X<sub>23</sub>: %Pureza                                Y<sub>24</sub> -Y<sub>26</sub>: Masa Caída A

X<sub>21</sub>-X<sub>23</sub>: Semilla.

Etapa 5: Centrifuga A

Y<sub>24</sub>-Y<sub>26</sub>: Salen de Etapa 4            Y<sub>27</sub>: %Pol

Y<sub>28</sub>: %Pureza

Y<sub>29</sub>: Humedad

Y<sub>30</sub>: Color

Y<sub>31</sub>: Tamaño de grano

Y<sub>32</sub>: Insolubles

Y<sub>33</sub>: °Brix

Y<sub>34</sub>: %Pol

Y<sub>35</sub>: % Pureza

Y<sub>27</sub>-Y<sub>32</sub>: Azúcar comercial

Y<sub>33</sub>-Y<sub>35</sub>: Miel A

## Etapa 6 Cristalización B

X<sub>21</sub>: °Brix                                      Y<sub>36</sub>: °Brix

X<sub>22</sub>: % Pol                                      Y<sub>37</sub>: % Pol

Y<sub>33</sub>-Y<sub>35</sub>: Salen de la etapa 5            Y<sub>38</sub>: % Pureza



Aquí se observa que en el vector de entrada al proceso  $X_i$  aparecen las variables que caracterizan la materia prima (jugo de caña de azúcar). Así como las variables inherentes a la operación de la instalación industrial. Por lo tanto, se tiene el modelo global de la fábrica.

La aplicación de la modelación y la optimización en la determinación de las condiciones óptimas de operación puede reducirse a la aplicación del método simple de Programación Lineal al modelo Global de proceso, teniendo como función objetivo de la ecuación del costo de producción en dependencia de las mismas variables que inciden en el modelo tecnológico del proceso. De manera para encontrar las condiciones óptimas de operación fijaremos dentro de las variables de entrada las referentes a la calidad de las materias primas que dependerán en cada momento de la realidad determinada por las características y calidad de las cañas que se estén moliendo en cada fábrica en un determinado momento.

Como restricciones de este proceso de optimización tendremos por un lado los valores que realmente pueden alcanzar las variables inherentes a la operación de la instalación en el vector  $X_i$  y por otro lado las restricciones de calidad que se le imponen a las corrientes de salida correspondientes a los azucareros y mieles del proceso. La presencia de reciclo en las correspondientes a las igualdades a cero característico de la ecuación 3.4.

### **Conclusiones**

Aquí el óptimo se determinó como las condiciones de operación de una instalación para un mínimo de costo de producción cumpliendo los parámetros de calidad del azúcar y la miel final.

#### **3.4.2. Aplicación de la Modelación Matemática a la determinación del efecto de nuevas variedades de caña de azúcar en los rendimientos industriales y energéticos de una fábrica de azúcar.**

Indudablemente la calidad de las variables de caña que se disponen para la fabricación de azúcar tiene un efecto decisivo en la eficiencia de esta industria, por ello mucho esfuerzo se ha realizado para mantener disponibles variedades resistentes a enfermedades y de alto rendimientos de azúcar y fibra. También mucho se ha discutido y hecho para evaluar las nuevas variedades. Contrario de reducir la evaluación de variedades a experiencias de laboratorio o planta piloto, hemos propuesto emplear los modelos matemáticos de las fábricas de azúcar para determinar el efecto específico de cada variedad sobre una instalación industrial (González Suárez y Cardoso Pardo, 1994).

Lo que sostenemos este criterio pensamos que por un lado los estudios de laboratorio no reflejan cabalmente como los cambios de calidad de una materia prima afectan las posibilidades de conducción exitosa de los procesos tecnológicos y energéticos de una instalación industrial y por otro lado el estudio a nivel de planta piloto solo indica esa afectación en la instalación piloto y no en la generalidad de las instalaciones azucareras.

El empleo de la Modelación matemática en el pronóstico del efecto de nuevas variedades en una instalación industrial específica permite analizar los aspectos de interés en la instalación concreta, para ello solo se requiere elaborar modelos detallados de cada instalación que reflejen los efectos que buscan, pero empleando siempre los mismos principios metodológicos y el mismo apoyo herramental para su ejecución.

La experiencia desarrollada por nosotros e indican con la modelación de fábricas de azúcar mediante matrices de transmisión (González Rodríguez, 1978) que se ha podido obtener en un

periodo de 6 a 8 meses trabajando en paralelo modelos equivalentes para una Planta Piloto y 4 instalaciones industriales de producción de azúcar.

El trabajo a que hacemos referencia se desarrolló de la siguiente forma:

- Se realizó una síntesis del proceso tecnológico de producción de azúcar similar al presentado en el ejemplo anterior detallado en cada etapa del proceso según intereses específicos de los productores, pero incluyendo siempre los parámetros básicos antes reflejados. Se incluyeron en el vector de entrada al primer elemento del proceso tecnológico de producción de azúcar todas las variables de caracterización de la calidad de la caña que podrían variar de una u otra variedad.
- Se procedió a la toma de datos industriales del Control Operacional de la zafra azucarera de la fábrica de azúcar estudiada complementándolo en cada caso con parámetros específicos requeridos por los empresarios de una u otra instalación.
- Se elaboraron los modelos de los balances de materiales y energía globales con ayuda de los modelos topológicos y otros programas de balances disponibles en la UCLV.
- Se elaboraron los modelos estadísticos de los elementos del sistema estudiado con ayuda de la metodología desarrollada por (Cardoso Romero, 1993).
- Se obtuvo el modelo global agregado del proceso tecnológico de cada fábrica de azúcar empleando para ello ecuaciones del tipo de la 3.3 y la 3.4, lográndose que quedaran incluidos dentro del vector de entrada  $X_1$  todas las variables que caracterizan las diferencias entre una y otra variedad de caña y en el vector respuesta del sistema  $Y$ , los parámetros de interés para medir el efecto de las diferencias entre variedades, como son los niveles y calidad del azúcar, el agotamiento de las mieles, los volúmenes y calidad del bagazo con vista a ser utilizado en la combustión o en productos derivados como son los papeles industriales, los papeles culturales o los tableros por sólo citar algunos.
- Considerando la variedades de caña más frecuentes en la región azucarera de cada fábrica de azúcar y partiendo del hecho práctico de que las variedades se muelen mezcladas en diferentes proporciones, se realizó un modelo de mezcla con las variables que caracterizan los diferentes tipos de variedades del tipo cúbico especial (Ahnazarova et al., 1982) que ha sido empleado con buenos resultados en estudios semejantes para otros tipos de procesos tecnológicos de los derivados de la caña de azúcar (Morales Pérez, 1994) y que permite obtener para el subconjunto de variables incluidos en el vector  $X_i$  que están determinados por las variedades una ecuación del tipo:

$$Y_i = bv_1Xv_1 + bv_2Xv_2 + \dots + bv_nXv_n + bv_{12}Xv_1Xv_2 + bv_{13}Xv_1Xv_3 + bv_{1n}Xv_1Xv_n \quad \text{Ec. 3.5}$$

A los efectos de la modelación, puede considerarse el basculador de la fábrica de azúcar como un elemento de mezclado de las variedades de caña y con ello ampliar el modelo y ponerlo en función de las fracciones de tipos de variedad que se utilicen ( $Xv_1, Xv_2, \dots, Xv_n$ ) y también de las características de cada variedad ( $bv_1, bv_2, \dots, bv_n$ ).

### Conclusiones

Se puede estudiar el efecto de la presencia de nuevas variedades en la mezcla de caña molida mediante un método de optimización a dos niveles que conviene en un primer nivel la determinación de las condiciones óptimas de operación para una mezcla fija de tipos de variedades de caña y a un segundo nivel ir variando las proporciones del tipo de variedades y

con ello determinar nuevas condiciones óptimas que permitan valorar si al incluir una nueva variedad se producen cambios en el óptimo alcanzable en el proceso tecnológico.

### 3.4.3. Aplicación de la modelación matemática del proceso de cocción con vista a su control automático.

La aplicación de un sistema de control en un proceso exige de su comportamiento cuando el sistema de control este ya aplicado. En este análisis juega un papel fundamental la posible descripción matemática que del proceso pueda realizarse, dependiendo esto de los objetivos a cumplir con el sistema de control y de la complejidad del proceso.

La descripción Matemática que del proceso pueda realizarse. Dependiendo esto de los objetivos a cumplir con el sistema de control y de la complejidad del proceso.

La descripción matemática del proceso de cocción se basa en lo fundamental de ecuaciones de balances de materiales y energía, saber (Herrera, 1982).

Balance de Materiales

$$\frac{dM_s}{dt} = C_s \cdot F_m - dt \quad \text{Ec.3.6}$$

$$\frac{dM_i}{dt} = C_i \cdot F_m \quad \text{Ec.3.7}$$

$$\frac{dM_c}{dt} = C_a \cdot F_m - J_v d \quad \text{Ec.3.8}$$

$$\frac{dM_c}{dc} \text{ Funcion CD, } dC/dt, N_c. e. S_s \quad \text{Ec.3.9}$$

Balance de Energía

$$dE/dt = h_m \cdot F_m + A_t \cdot U_t (T_v - T_m) + h_r \cdot (dM_c/dt) - h_v \cdot J_v - Q_p \quad \text{Ec.3.10}$$

Donde:

pe: Peso específico del cristal (N/m<sup>3</sup>); At: Área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>); Ca: Fracción del agua en Fm (Ca=1-Cs-Ci); Ci: Concentración de impurezas en Fm; Cn: Conductividad de la masa cocida (mS); Cs: Concentración de sacarosa en Fm; D: Diámetro promedio del cristal esférico (mm); E: Energía total de la masa cocida (J); Fm: Flujo de meladura de alimentación (kg/s); Hm: Entalpía de la meladura (J/kg); Jv: Razón de evaporización (kg/s); Ma: Masa de agua en licor madre (kg); Mc: Masa de cristales en la masa cocida (kg); Mi: Masa de impurezas disueltas en licor madre (kg); Ms: Masa de sacarosa disuelta en licor madre (kg); Nc: Número de cristales en la masa cocida; Ss: Sobre saturación del licor madre; Tm: Temperatura de la masa cocida (°C); Tv: Temperatura del vapor en la calandria (°C); Ut: Coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup> .K)

De estas expresiones el mayor grado de dificultad es introducido por la ecuación que representa la razón de crecimiento de los cristales. La solución de esta expresión determina la calidad del modelo en cuanto a su aproximación al comportamiento real del proceso.

Desde la década del 60 se han realizado varios intentos para describir matemáticamente el proceso de cocción en los tachos, no obstante, la mayoría de los modelos encontrados resultan poco efectivos para desarrollar a partir de ellos un método de síntesis de un sistema de

regulación. Entre estos modelos el presentado por (Wright, 1971) es uno de los más complejos aunque presenta la desventaja de considerar la razón de evaporación de la masa cocida como variable de la entrada, lo cual no es fácil de implementar desde el punto de vista práctico. Este modelo se basa en las ecuaciones de balance de materiales y en la variación del diámetro promedio del cristal con respecto al tiempo, así como el conjunto de expresiones que dependen del punto de operación y que en lo fundamental está relacionado con la saturación del licor madre. Sin embargo, no se toma en cuenta el balance calórico ya que la razón de evaporación se le asigna un valor fijo (13 180 kg/h), lo que constituye una importante limitación. Una expresión para calcular el flujo de agua evaporada en el tacho en función de la conductividad de la masa cocida y de la masa total es la siguiente:

$$J_v = a_1 \cdot C_n - a_z \cdot M_t - a_s \quad \text{Ec.3.11}$$

Por otro lado para la solución de la ecuación 3.9, (Wright, 1971) ha propuesto considerar las condiciones siguientes:

- el cristal de azúcar se considera esférico de igual volumen al real. El diámetro del mismo se considera con una distribución normal alrededor de un valor promedio.
- La sobre saturación está por debajo de su valor crítico.
- La temperatura de la masa cocida permanece constante.
- La masa cocida presenta una buena homogeneidad.

De lo anterior se propone como solución el conjunto siguiente de ecuaciones diferenciales:

$$dM_c/dt = Re \cdot (0,523) \cdot N_c \cdot (3z + 3p \cdot D) \cdot dD/dt \quad \text{Ec.3.12}$$

$$dz/dt = (2D + p) \cdot (dD/dt) \quad \text{Ec.3.13}$$

$$dD/dt = w \cdot (S_c - K_s) \cdot \exp C - k_6 \cdot m_i / M_a \quad \text{Ec.3.14}$$

### Conclusiones

Para este modelo considerado como el más exacto Herrera (1992). Ha propuesto la inclusión de un índice proporcional al área promedio del cristal, así como la consideración de que para una razón de crecimiento relativamente constante existe una dependencia lineal entre la distribución del tamaño del cristal alrededor de su valor promedio y este último valor, siendo el parámetro p incluido en la ecuación 3.12, la constante de proporcionalidad. Por lo que haciendo uso de:

$$C^2 = p \cdot D \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\mu z = d^2 + D^2 \quad \text{Ec. 3.16}$$

La ecuación 3.12 puede ser transformada como sigue:

$$dM_c/dt = Re \cdot (0.532) \cdot N_c \cdot (6 \cdot p \cdot d + 3 \cdot D^2) \cdot (dD/dt) \quad \text{Ec. 3.17}$$

En esta expresión el parámetro p es considerado prácticamente constante y con los valores entre 0,005 y 0,028 mm

### 3.4.4. Aplicación de la modelación matemática en la selección del equipamiento tecnológico en la etapa de purificación de jugo de caña.

Como se conoce, la tecnología más empleada en la purificación de jugo de caña consta de 5 elementos que son las siguientes:

- Remoción primaria
- Alcalización
- Calentamiento
- Clarificación
- Filtración

En cada uno de estos elementos existen varias alternativas de equipos que son en muchos casos utilizados o no en dependencia del conocimiento y divulgación que sobre ellos se tiene, y no en pocos casos debido a las preferencias históricas que no siempre están científicamente fundamentadas entre otras por carencia de ecuaciones de estado. Una breve incursión por esta problemática nos brinda las siguientes alternativas por etapas como las más empleadas:

- **Remoción primaria:** decantador simple, hidrociclones y coladores.
- **Alcalización:** en frío o en caliente
- **Calentamiento:** entre muchos podemos resumir analizar la alternativa entre el WEBRE y el HONOLU.
- **Clarificación:** un resumen de alternativas incluye al menos 8 tipos de equipos, saber: DOR, RAPIDOR, UC, ENVIRO CLEAR, DTC, IBAÑEZ, AUTRALIANO, DOR ATU
- **Filtración:** banda o tela metálica perforada.

De acuerdo con las alternativas planteadas el proceso de purificación puede esquematizarse como sigue (Figura 3.1):

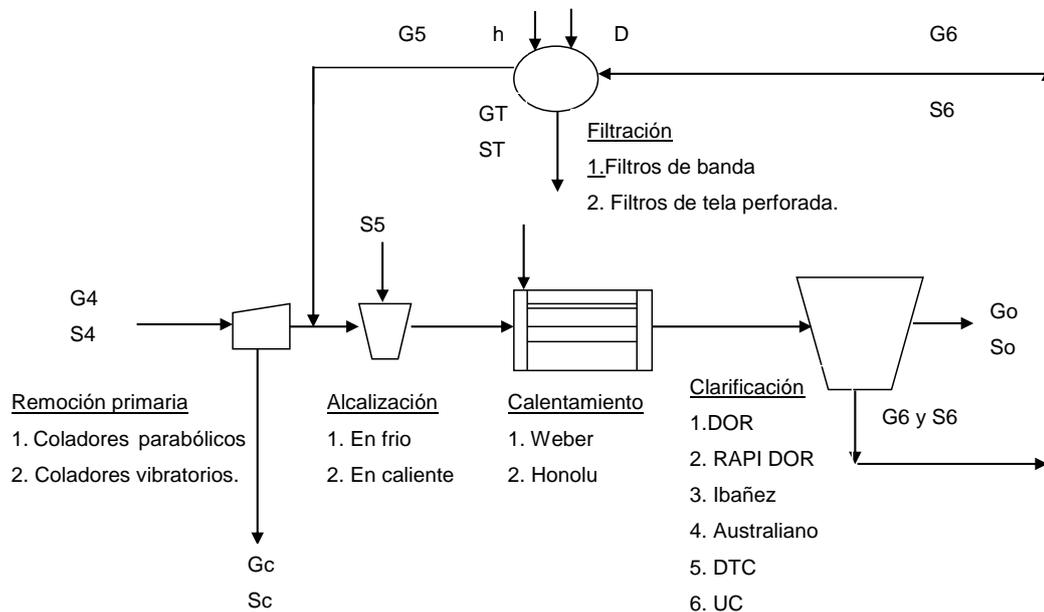


Figura 3.1. Esquema del proceso tecnológico de la etapa de purificación de jugo en la fabricación de azúcar de caña

Como se comprende el número de combinaciones posibles de equipos es grande y la decisión sobre la combinación óptima requiere de un complejo estudio de ingeniería, Gómez (1984) propuso resolver este problema con ayuda de la modelación y optimización de procesos de la siguiente forma:

Esquematizar para su estudio cada uno de los elementos componentes de la etapa con un esquema de caja negra como sigue:

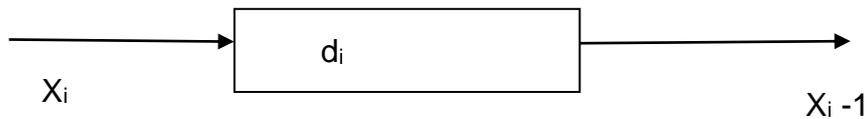


Figura 3.2. Esquema de los elementos de la etapa de |

De cada uno de estos elementos, mediante el estudio de los trabajos reportados en la literatura y con investigaciones adicionales se obtuvieron modelos del comportamiento tecnológico y con ayuda de estos, los índices de consumos y los balances de materiales y de energía, elaborando funciones de costo de producción de cada uno de estos elementos.

Las expresiones de los modelos de los elementos se encontraron de la forma siguiente:

Remoción Primaria:

$$S_3 = F(S_4) \text{ y } C_3 = F(S_4, C_4) \quad \text{Ec. 3.18}$$

Alcalización:

$$S_2 = F(S_3) \text{ y } C_2 = F(S_3, C_3) \quad \text{Ec. 3.19}$$

Calentamiento:

$$S_1 = F(S_2) \text{ y } C_2 = F(S_2, C_2) \quad \text{Ec. 3.20}$$

Filtración:

$$S_5 = F(S_6) \text{ y } C_2 = F(S_6, C_6) \quad \text{Ec. 3.21}$$

Clarificación:

$$S_0 = F(S_1) \text{ y } C_0 = F(S_1, C_1) \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$S_6 = F(S_1) \text{ y } C_1 = F(S_1, C_1) \quad \text{Ec. 3.23}$$

Con estas premisas, la optimización del esquema se logra a través de la aplicación de la Programación Dinámica que permite encontrar la variante más económica de esquema que garantice las condiciones de calidad del jugo claro.

### Conclusiones:

La decisión del esquema óptimo fue el siguiente:

- Remoción primaria: colador parabólico.
- Alcalización: en caliente\
- Calentamiento: WEBRE.
- Clarificación: ENVIRO CLEAR
- Filtración: rotatoria tela metálica perforada.

### 3.4.5. Determinación de la capacidad inicial de una destilería considerando la incertidumbre en la disponibilidad de las materias primas.

Uno de los problemas clásicos de incertidumbre en la estrategia de procesos es la determinación de las capacidades iniciales de una instalación industrial considerando los cambios en la demanda futura del producto (Rudd y Watson, 1968), por lo que cualquier estudio que se realice debe iniciarse por este paso, en adición, a este señalamiento clásico para la industria de

procesos, de acuerdo con lo demostrado por la práctica en los últimos lustros, se requiere también considerar la incertidumbre financiera (Lauchy et al., 2003).

Se realizó un análisis a partir de la proyección de la demanda mínima de Alcohol en el período 1998-2010, con las consideraciones de los clásicos, en cuanto a la incertidumbre en la demanda (Rudd y Watson, 1968) e incorporándosele en este caso la consideración en el modelo, de la incertidumbre financiera.

En el caso específico de la industria de la caña de azúcar, nos encontramos con un problema adicional al determinar las capacidades iniciales de las instalaciones industriales que es el concerniente a los cambios futuros en la disponibilidad de la materia prima (caña), lo que está actualmente acentuado, en Cuba, por el decrecimiento de la disponibilidad de este cultivo debido a las afectaciones que en los últimos años se han tenido, lo que hace de este un problema de interés práctico y metodológico que debe en el caso de este sector industrial y quizás de otros sectores agroindustriales estar incluido en los estudios inversionistas (Oquendo, 2002).

Se presenta a modo de ejemplo el procedimiento metodológico a seguir:

Se realiza la determinación de la capacidad óptima de la planta de etanol a partir de la proyección de caña, la cantidad de miel que se obtiene anualmente y lo que esto representa en hL/d de etanol.

Para estos datos se ajustó un modelo lineal, validado por las pruebas estadísticas correspondientes, esto es: Modelo Lineal:  $Y = 263.98 + 145X$ ,  $R^2$ : (%) 93.5, Error: 133.54

Se presentaron los resultados de las pruebas estadísticas utilizadas para validar el modelo: coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y las pruebas F y t de significación del modelo y los coeficientes respectivamente. En todos los casos se realizaron los análisis de residuos, que mostraron un comportamiento normal, validándose el modelo y las pruebas anteriores.

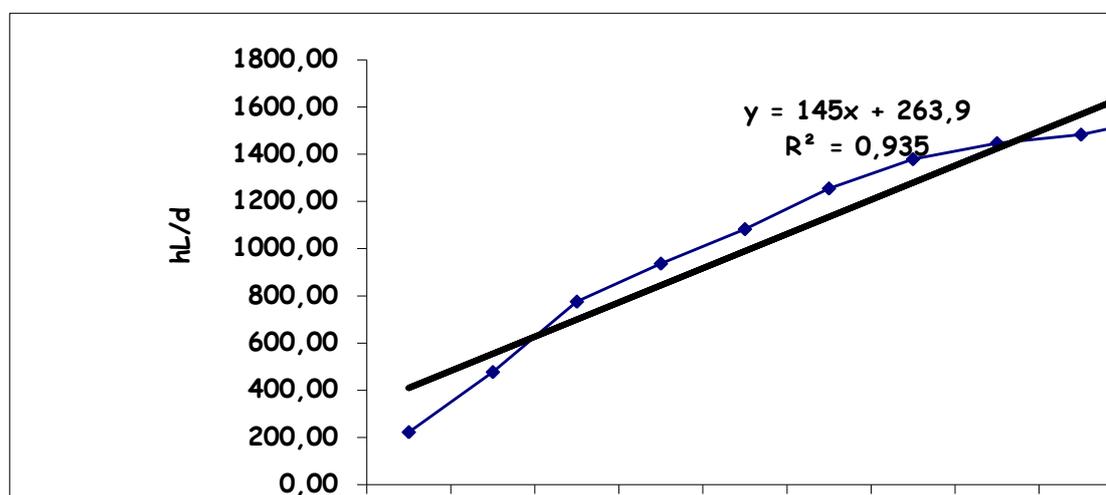


Figura.3.3. Comportamiento de la capacidad de producción a partir de la disponibilidad de caña.

Aquí es posible adaptar el procesamiento propuesto por Rudd y Watson (1968) a las condiciones de disponibilidad de la caña y entonces es posible determinar la capacidad inicial de la planta acorde con los resultados de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Determinación de la capacidad óptima a partir de la disponibilidad de caña.

	Demanda inicial no nula sin sobre diseño			Fórmulas
	0,12	0,15	0,18	Sin sobre diseño
Pendiente	145,00	145,00	145,00	
Capacidad Inicial (hL/d)	1472,31	1230,64	1069,53	$C_1=b_1/l+b_0$
Primera ampliación (años)	8,33	6,67	5,56	$T=(C_1-b_0)/b_1$
Capacidad de la ampliación (hL/d)	1208,33	966,66	805,55	$C_2=b_1/l$
Total	2680,63	2197,30	1875,08	$C_t = C_1+C_2$

Se calculó la capacidad óptima inicial cuando la demanda inicial no es nula y no se consideró sobre diseño, por cuanto las proyecciones se consideran están ya sobredimensionadas.

### Conclusiones

La capacidad de proyección de una planta de etanol puede estar en el rango de 1 875 a 2 680 hL/d.

Una alternativa para hacer más competitiva la inversión de una destilaría es macrolocalizarla en una región de más fácil acceso del producto terminado a su principal cliente, por ello considerando las proyecciones inversionistas se debe proceder a realizar este estudio en una zona.

Es aconsejable combinar en los estudios de determinación de capacidades industriales los pronósticos de demanda de los productos y de disponibilidad de la materia prima.

Y la inclusión de la variación de las tasas de interés tanto en los estudios de capacidad inicial instalada como de macrolocalización, permite una valoración más acertada del impacto de las inversiones encaminadas a la diversificación azucarera.

### 3.4.6. Impacto de las mezclas de sustratos azucarados en la agresividad de los residuales para la producción de etanol y levadura torula.

Ante la necesidad actual de hacer rentables las producciones de derivados, en un concepto de biorrefinería, entre ellas la de levadura forrajera torula, es imprescindible ir a la búsqueda de sustratos aportadores de azúcares más baratos que la miel final de caña, cuyos precios se mantienen relativamente altos en el mercado mundial (Santos Herrero et al., 2003).

Entre estas fuentes de azúcar, los más atractivos resultan los mostos o vinazas de destilería, por constituir un subproducto con alrededor de 10 g/l de azúcares reductores totales (ART) y que es un residual con una gran carga orgánica y de difícil tratamiento. De lograrse su reutilización en otras producciones, se eliminaría parte de la gran carga contaminante que en la actualidad es producida por esta industria. El jugo de los filtros también constituye un sustrato potencial con un contenido de ART de alrededor de 100 g/L, y su extracción del proceso de azúcar representa ventajas en el central azucarero.

Si bien se han realizado algunas pruebas, incluso a nivel industrial utilizando estos sustratos mezclados cada uno de ellos con miel final; y mezclados los tres sustratos a nivel de laboratorio,

es necesario aún definir las mezclas óptimas para cada rendimiento a obtener, así como los costos en que incurren por el aporte de estos productos en la formación del medio.

Lo anteriormente expuesto motivó a realizar el presente trabajo, fijándose como objetivos el estudio de la utilización de diferentes sustratos provenientes de la industria azucarera y derivados en la producción de levadura y obtener los porcentajes de mezclas óptimas de estos sustratos de acuerdo a sus costos.

### **Materiales experimental y resultados de los modelos.**

Con el objetivo de evaluar la utilización de diferentes sustratos y sus mezclas en la producción de biomasa, así como el impacto producida en los residuales de las producciones de alcohol y torula, se realizó el estudio del uso de vinazas de destilería, jugo de los filtros de cachaza clarificados y miel final.

Se realizó un diseño de experimento tipo enrejado simple, según lo propuesto por (Ahnazarova et al., 1982; Scheffe, 1958) el cual consta de 7 puntos experimentales.

Los experimentos se prepararon según el aporte de ART de cada sustrato a la mezcla que se sometería a fermentación, según la siguiente matriz de diseño mostrada en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados experimentales del Diseño

X <sub>1</sub> (MF)	X <sub>2</sub> (JF)	X <sub>3</sub> (VD)	RTO (%)	PROTEÍNA (%)	DQO (mg/l)
1,00	0,00	0,00	35,00	46,00	10 129,00
0,00	1,00	0,00	40,90	48,00	8 321,00
0,00	0,00	1,00	24,08	45,00	30 100,00
0,50	0,50	0,00	43,12	47,00	9 321,00
0,50	0,00	0,50	40,80	46,50	20 621,00
0,00	0,50	0,50	34,20	45,50	18 843,00
0,33	0,33	0,33	41,46	46,00	15 543,00
1,00	0,00	0,00	38,70	46,20	10 099,00
0,00	1,00	0,00	40,85	48,10	8 953,00
0,00	0,00	1,00	26,27	45,20	29 876,00
0,50	0,50	0,00	44,00	47,10	9 176,00
0,50	0,00	0,50	40,34	46,50	20 500,00
0,00	0,50	0,50	37,90	45,40	18 700,00
0,33	0,33	0,33	41,22	45,90	15 400,00

Donde:

#### **Variables independientes.**

X<sub>1</sub> - % de aporte de ART de la miel al medio; X<sub>2</sub> - % de aporte de ART del jugo de los filtros clarificado al medio; X<sub>3</sub> - % de aporte de ART del mosto de destilación al medio

#### **Variables dependientes o de respuestas.**

Y<sub>1</sub> - rendimiento en propagación; Y<sub>2</sub> - Proteína Bruta. %; Y<sub>3</sub> - Demanda química de oxígeno (DQO)

Los modelos que correlacionan las variables dependientes con las independientes se muestran a continuación:

$$Y_1 = 36,89x_1 + 40,92x_2 + 25,22x_3 + 17,92x_1x_2 + 37,36x_1x_3 + 11,23x_2x_3 \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$Y_2 = 47,31x_1 + 48,91x_2 + 42,15x_3 + 2,1x_1x_2 + 2,3x_2x_3 - 121x_1x_2x_3 \quad \text{Ec. 3.25}$$

$$DQO = 10114x_1 + 8637x_2 + 29988x_3 + 2038x_1x_3 - 2164x_2x_3 - 19018x_1x_2x_3. \quad \text{Ec. 3.26}$$

En la Tabla 3.3., se muestra el análisis estadístico del procesamiento de los resultados experimentales

Tabla 3.3. Resultados del procesamiento estadístico de los resultados del estudio de mezclas (Santos Herrero et al., 2003)

Variable	Para el modelo		Para el ajuste de los coeficientes	
	Valor P	R <sup>2</sup> Ajustado	R <sup>2</sup>	Valor P
Y <sub>1</sub> : Rendimiento	0,0002	94,07	96,35	0,0001
Y <sub>2</sub> : Proteína.	0,0038	99,07	99,50	0,0001
DQO	0,0099	99,17	99,55	0,0023

La representación gráfica para la variable DQO permite conocer las combinaciones de mezclas de mayor y menor impacto ambiental:

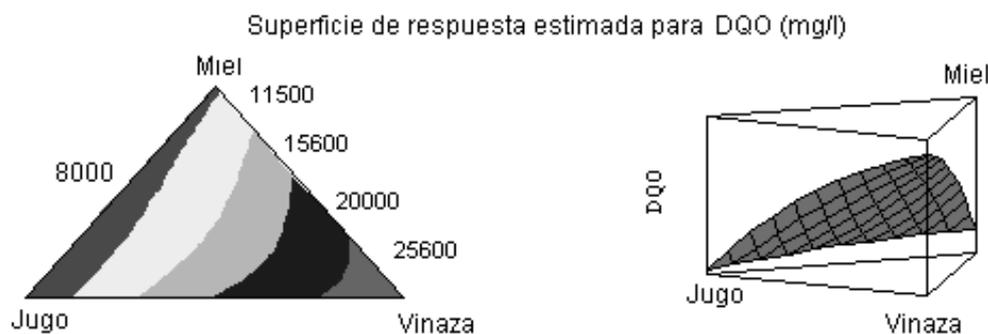


Figura 3.4. Superficie de respuesta estimada de DQO

### Conclusiones

La combinación de los tres sustratos favorece el ahorro de miel que puede alcanzar sustituciones entre 52 y 58 % para valores de rendimiento entre 42 y 43 tanto para MSC como MFC.

Al ser los JFC y la MD sustratos con menor contenido de ART que la miel final, produce un ahorro de agua en la formulación del medio de cultivo para la producción de levadura.

La vinaza producida en la planta de alcohol, al ser utilizada en la producción de levadura torula disminuye su carga orgánica en un valor aproximado del 50 % con respecto a cómo sale de la columna de destilación.

Se logra una disminución de la DQO a media que se trabaja con mayores % de miel y jugo de los filtros.

### 3.4.7. Determinación de la macrolocalización de una destilería de bioetanol en una región geográfica considerando la incertidumbre de la demanda y de las materias primas.

Se realizó un estudio para la determinación de la mejor alternativa de macro localización de una planta de bioetanol en una provincia y en la región central del país, para lo cual se propone plantear, en un inicio, el problema de transporte por el criterio de costo mínimo y posteriormente, después de analizar si existen inversiones aprovechables, plantear el problema,

utilizando criterios inversionistas. A diferencia del problema clásico de macro localización por el modelo de costo mínimo de transporte de materias primas y producto terminado, se le incorporó, en este caso, un análisis de la incertidumbre en la demanda del producto final, incertidumbre en la materia prima, incertidumbre en la capacidad de la planta, y la incertidumbre financiera. Luego se le incorporan criterios inversionistas, escogiéndose como modelo de optimización el de máximo VAN, en el que se consideran estos elementos de incertidumbre a que se ha hecho referencia anteriormente, y además se le incorporan análisis de incertidumbre en las inversiones, en los niveles tecnológicos alcanzar en la industria azucarera y en la tecnología de la planta de etanol. Estos son elementos novedosos que tradicionalmente no se utilizan en estos estudios.

El problema de macro localización utilizando el modelo de costo mínimo de transporte quedó planteado:

Variables Continuas:

$X_{ij}$ : Fuente de materia prima  $i$  hasta la planta de alcohol  $j$ .

Variables enteras:

$Y_j$  : Planta de Alcohol  $j$ ;  $W_i$ : Capacidad inicial y final propuesta teniendo en cuenta la incertidumbre en la materia prima;  $U_j$ : Capacidad inicial y final propuesta teniendo en cuenta la incertidumbre financiera;  $M_n$ : Proyección de caña 2001 o 2004;  $X_{ij}$ : Cantidad de miel final de los posibles Complejos Agroindustriales suministradores de materia prima;  $Y_j$ : Complejos con mayores posibilidades de ubicación de la destilería, atendiendo a su capacidad de molienda, estabilidad, estado técnico de las instalaciones y posibilidades energéticas, así como ventajas con el tratamiento de los residuales, etc.

Se programó  $W_i$  y  $U_j$  para las capacidades iniciales y finales, después de la ampliación, considerando los resultados de un estudio precedente para la determinación de capacidades iniciales óptimas y ampliaciones, a partir de la incertidumbre en la demanda, la materia prima y financiera.

Como restricciones se consideraron:

De capacidad de miel.

$$X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1j} \leq K_1 M_n \quad \text{Ec. 3.27}$$

$$X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2j} \leq K_2 M_n$$

$$X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{ij} \leq K_i M_n$$

Donde:

$K_i$ : es la capacidad de producción de miel de cada uno de los 12 posibles suministradores.

De demanda de miel.

$$X_{11} + X_{21} + \dots + X_{i1} = L_1 W_j U_j Y_j \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$X_{12} + X_{22} + \dots + X_{i2} = L_2 W_j U_j Y_j$$

$$X_{1j} + X_{2j} + \dots + X_{ij} = L_j W_j U_j Y_j$$

Donde:

$L_j$ : es la demanda de miel de la planta de etanol de acuerdo a su capacidad.

De distribución del producto terminado.

$$A_1 * Y_1 = R_1 \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$A_2 * Y_2 = R_1$$

$$A_j * Y_j = R_1$$

Donde:

$A_j * Y_j$ : es el alcohol producido por la planta j.

Como restricciones de números enteros se consideraron:

Para las plantas de Alcohol.

$$Y_1 + Y_2 + \dots + Y_j = 1$$

Ec. 3.30

Para la capacidad de miel para el 2004 - 2010.

$$M_1 + M_2 = 1$$

Ec. 3.31

Para la incertidumbre financiera.

$$W_1 + W_2 = 1$$

Ec. 3.32

Para la incertidumbre en la materia prima.

$$U_1 + U_{21} = 1$$

Ec. 3.33

La función objetivo:

$$C_{\text{mínimo}} = \sum(C_{ij} * Y_j + C_{jk} * Y_j)$$

Ec. 3.34

Donde:

$C_{ij}$ : Costo de transportación de la miel desde cualquiera de los posibles suministradores hasta cualquiera de las siete posibles ubicaciones de la planta de alcohol;  $C_{jk}$ : Costo de transportación del alcohol flema de cualquiera de las posibles ubicaciones de la planta de alcohol hasta la rectificadora.

Como resultado de la programación se pueden correr todas las variantes, para las posibles ubicaciones de la planta, para las capacidades para las tres tasas de interés y para el inicio y después de la ampliación que se corresponde con las proyecciones de caña del 2004 y 2010, obteniéndose la variante óptima y los costos de cada una de ellas.

En este momento se analizan si existen inversiones aprovechables de instalaciones, plantas de tratamiento de residuales existentes, etc. y se incorporan criterios inversionistas.

El problema queda formulado de la siguiente forma:

Como variables continuas se consideró la miel externa que hay que comprar en zafra y no zafra para que trabajen las plantas de derivados 300 d/a ( $X_i$ ), para i desde el 2003 hasta el 2010.

Como variables enteras:

$Y_j$ : 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:

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

Ec. 3.35

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):

$$Y_{TS} + Y_{TC} \leq 1 \quad \text{Ec. 3.36}$$

Para la planta de Levadura Saccharomyces (Seca o Crema):

$$Y_{SS} + Y_{SC} \leq 1 \quad \text{Ec. 3.37}$$

Para la capacidad de la planta de etanol ( $W_{fc}$ ): Tasa de interés financiero (0,12, 0,15, 0,18).

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad \text{Ec. 3.38}$$

Capacidad inicial y después de la ampliación de la planta de etanol.

$$c_1 + c_2 = 1 \quad \text{Ec. 3.39}$$

Para el índice de consumo según la tecnología del etanol ( $Z_k$ ):

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad \text{Ec. 3.40}$$

Para el índice de rendimiento en mieles del Complejo Agroindustrial ( $U_r$ ):

$$r_1 + r_2 + r_3 = 1 \quad \text{Ec. 3.41}$$

Se consideró como función objetivo:

$$VAN_{\text{máximo}} = \sum FC_i / (1 + r)^n \quad \text{Ec. 3.42}$$

A continuación, se presenta un diagrama que muestra los pasos necesarios a seguir para cumplimentar la metodología de trabajo propuesta y que es aplicable a diferentes condiciones, independientemente del Complejo Agroindustrial de que se trate. A partir de este diagrama se confeccionó el software que brinda soluciones de manera rápida y eficaz, con infinitas posibilidades de análisis.

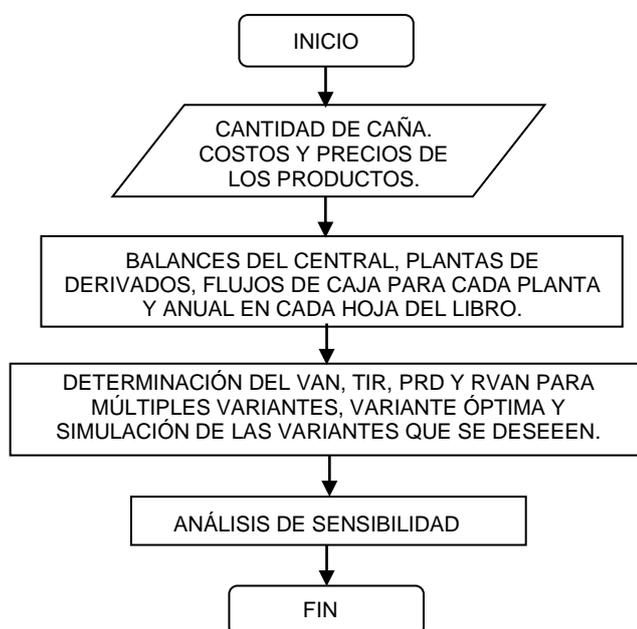


Figura 3.5. Diagrama heurístico para la determinación de la macrolocalización de una destilería en una zona geográfica o económica

Para darle solución al problema formulado se utilizó la Macro SOLVER del EXCEL, obteniéndose la mejor alternativa, entre las múltiples consideradas, obteniéndose la variante que hace

máximo el VAN. Se analizaron múltiples variantes de inversión, presentándose, a modo de ejemplo, los siguientes resultados:

Tabla 3.4. Indicadores económicos para varias alternativas de productos a obtener.

Planta	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (años)
Etanol	9 257 801,10	39,00	5,23
<i>Saccharomyces</i> Crema	7 485 845,99	32,00	5,67
Torula Seca 24t/d- <i>Saccharomyces</i> Seca	-10 684 041,08	-	8,15
Torula Seca 36t/d- <i>Saccharomyces</i> Crema	-17 402 590,46	-	8,96
Torula Crema- <i>Saccharomyces</i> Seca	-9 434 104,31	-	8,05
Torula Seca 24t/d- <i>Saccharomyces</i> Crema	-10 442 293,39	-	8,13
Torula Seca 36t/d- <i>Saccharomyces</i> Seca	-17 644 338,15	-	8,96
Torula Crema- <i>Saccharomyces</i> Crema	-9 192 356,62	-	8,04
<i>Saccharomyces</i> Seca	7 244 098,30	31,00	5,74

Esto demuestra que las inversiones tienen un gran peso en las decisiones económicas, posteriormente se analizará la sensibilidad del VAN a el valor de la inversión. Esto refuerza la idea que lo más conveniente es montar una destilería donde exista una planta de torula o viceversa, que las dos inversiones, en estos momentos, no es posible realizarlas, pues son dos inversiones grandes, además los niveles de caña propia del Complejo Agroindustrial son insuficientes para que la producción sea ventajosa al tener que comprarse mucha miel, lo cual es muy costoso, por la adquisición y transportación. Esto lo corroboran todos los estudios de diversificación realizados (Oquendo, 2002).

### Conclusiones

La utilización de la programación lineal mezclada con enteros permite perfeccionar los sistemas de macrolocalización de plantas industriales y selección de alternativas de producción y de inversiones.

Es factible incluir en los estudios de macrolocalización más de un producto y combinar mediante los indicadores dinámicos de eficiencia de las inversiones, las alternativas de capacidades de producción de diferentes productos.

El aprovechamiento de inversiones previas, la existencia de plantas de producción de derivados en los Complejos Agroindustriales azucareros, la capacidad de molienda de estos, la eficiencia industrial, la eficiencia en la recuperación cañera, todos son elementos muy importantes y que favorecen la macrolocalización de plantas en los lugares donde existen, lo que se debe al beneficio que esto tiene en los indicadores económicos.

Mediante el análisis multivariable de la sensibilidad del VAN a los cambios en las variables de diferentes tamaños de la planta de etanol, por tanto, diferentes costos de inversión, índice de rendimiento de mieles e índices de consumo de miel, según la tecnología de la planta de etanol, demostró que la más significativa es la de los tamaños de la planta, lo cual quiere decir que las decisiones inversionistas deben tomarse con mucho rigor pues provocan un efecto considerable en el VAN.

### **3.4.8. Evaluación de vías para incrementar la fuente de azúcares fermentables para el aprovechamiento de las capacidades instaladas en destilerías de etanol.**

Siendo, en el contexto mundial actual, el etanol un producto líder de amplia demanda como combustible, debemos considerar, que en la región objeto de este estudio la industria azucarera cuenta con varias instalaciones productoras de azúcar y etanol, que se pretenden operar totalmente en un futuro inmediato (García-Prado et al., 2015).

La capacidad instalada y planificada para operar anualmente para la producción de etanol en la región estudiada, ascenderá a 2 690 000 hL anuales, para lo que se requerirá, según lo reportado en la literatura, (Gálvez, 2000) y los resultados de estudios específicos con la calidad de los sustratos azucarados disponibles un total de 917 986,29 t de miel final anuales, si no se utilizan capacidades instaladas en una de sus destilerías la producción será de 1 993 500 hL al año, con un desaprovechamiento de 697 500 hL, además las producciones en 4 de las instalaciones solo se planifican por 155 días en el año lo que significa un desaprovechamiento adicional de 1 590 000 hL si se operaran esas capacidades 300 días en el año .

La capacidad de miel disponible en las instalaciones de la industria de azúcar de caña en la región estudiada asciende a 635 809,50 t de miel final, lo que representa con un déficit de 282 176,79 t, lo que implicará que no se podrán aprovechar capacidades de producción equivalentes a 890 999.34 hL en el año, incluyendo aquí, las ampliaciones de capacidad de unos 697 500 hL al año que requerirían un total de 237 939,66 t al año, que se prevén cubrir con mayores áreas y rendimientos de campos de caña de azúcar, pero que es realmente muy difícil de conseguir.

Considerando que existen capacidades ociosas que están instaladas pero que no se utilizan al planificarse la operación de algunas destilerías solo 155 días al año, y al no operarse otros 145 días implican capacidades no aprovechadas por un total de 1 479 000 hL, lo que demandaría otras 504 534,40 t de mieles finales, que sumadas a las 917 986.29 requeridas para la operación planificada se incrementa hasta 1 422 520,60 t, para un déficit de 808 482,90 t, lo que sobrepasa cualquier previsión de crecimiento de miel para la producción de etanol por la vía de incrementar los rendimientos y el área sembrada de caña.

La capacidad instalada no aprovechada, equivale a inversiones no explotadas del orden de más de 30 676 101 USD. Esto y la creciente demanda de producción de etanol como combustible líquido justificaron el análisis que a continuación se realiza encaminado a evitar las capacidades instaladas ociosas y con su aprovechamiento crecer en la producción de etanol.

En la literatura científica se reportan varios trabajos sobre las posibilidades de esquemas integrados en la producción de azúcar, etanol y otros derivados de la caña de azúcar (Cruz y González, 1999; González Suárez et al., 2006; Saura et al., 2005) siendo un enfoque de interés el análisis de las potencialidades de la caña de azúcar en su conjunto, es decir, como fuente de productos que darían lugar a complejos agroindustriales (Borrero et al., 2003) reportándose incluso como una vía encontrar soluciones al impacto ambiental de la producción de etanol, por lo que se consideró aconsejable estudiar aquí el efecto de extraer y mezclar jugos de los filtros, jugos secundarios y mieles en la producción de etanol, en un proceso de asimilación de tecnologías.

#### **Estrategia de análisis.**

La estrategia definida para el desarrollo de los derivados, y con ello los biocombustibles, tiene que ir más allá de la utilización de los sub-productos tradicionales de la agroindustria, y prevén el uso de productos intermedios de la producción azucarera los cuales, al tiempo que contribuyen a mejorar el proceso azucarero, amplían la posibilidad de disponer de nuevas materias primas.

Por tanto, las producciones de derivados no se pueden asumir como tradicionalmente se acepta, algo anexo a los centrales. Se trata de desarrollar su integración tecnológica y energética a las fábricas de azúcar aprovechando las ventajas del proceso relacionadas con la utilización de materias primas diversas.

La extracción de corrientes intermedias representa para una fábrica de azúcar un incremento en su capacidad de molienda, disponibilidad de energía y del equipamiento de las áreas de purificación y evaporación al dejar de procesar corrientes que representan un por ciento de la caña molida (jugo de los filtros, JF y el jugo del último molino). Adicionalmente, se evita la incorporación al proceso de un material con altos contenidos de no azúcares, coloides y microorganismos que en última instancia perjudican la calidad del azúcar y el agotamiento de las mieles.

Teniendo en cuenta la panorámica anterior se han trazado los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio de mezclas de jugos de los filtros y jugos secundarios principalmente para la fermentación alcohólica, analizando el impacto de la mezcla en el rendimiento y eficiencia alcohólica, utilizando el método de enrejado simple.
- Evaluar el impacto de la extracción del jugo de los filtros y los jugos secundarios en el balance material y energético de la fábrica de azúcar.
- Evaluar el potencial incremento de aprovechamiento de las capacidades instaladas de obtención de etanol y la factibilidad de disminuir los costos por peso de producción.

#### **Materias primas.**

En los experimentos, para los estudios de mezcla de sustratos azucarados, se utilizaron como materias primas o sustratos fermentativos, Miel Final, el Jugo de los Filtros y el Jugo Secundario de una fábrica de azúcar de la región geográfica estudiada. Los sustratos fermentativos a emplear fueron seleccionados previamente. Su caracterización fue basada en los siguientes parámetros: °Brix, azúcares reductores, pH, acidez y % Pol, con el objetivo de conocer las condiciones y la calidad de cada uno de ellos antes de ser utilizados en las etapas posteriores del experimento.

Para estudiar el efecto, de diferentes porcentajes de extracción del jugo de los filtros y de la extracción del jugo diluido del último molino, en los balances de material y energía, se realizaron los cálculos para una fábrica de azúcar con una molienda de 7 750 t/d de caña.

Para la realización de los balances de materiales y energía se tienen en cuenta los parámetros operacionales obtenidos directamente del proceso mediante corridas experimentales y se hace uso del software profesional (Gozá León et al., 2002; Goza León y Pérez de Alejo Victoria, 2003) con el objetivo de facilitar el análisis de alternativas,

#### **Diseño experimental y análisis estadístico.**

El Plan Experimental utilizado en el diseño de mezclas siguió el diseño enrejado simple (Scheffe, 1958) el cual explora siete puntos experimentales que corresponde a la preparación de siete medios de cultivos, tres como base y los restantes cuatro son combinaciones de ellos, según el orden de la Figura 3.6.

Con el diseño del experimento exploramos un número mayor de variantes a utilizar en la dinámica de fermentación, con un menor número de experiencias a partir de los sustratos seleccionados en el cual se tiene en cuenta la utilización hasta un 100% de cada ART de los sustratos. Las variables respuestas fueron: % alcohólico, rendimiento y eficiencia de la fermentación.

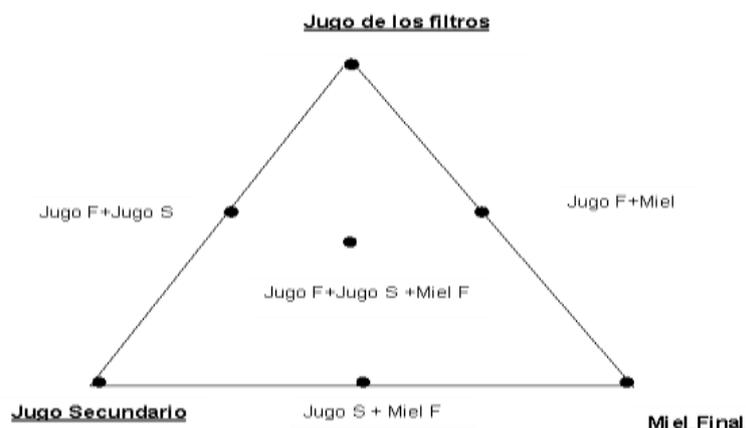


Figura 3.6.: Diagrama de enrejado simplex para el modelo de mezclas con vistas a la obtención de etanol.

Partiendo de este diseño experimental, se obtuvieron siete variantes de medio de cultivo, siendo la fuente de azúcares la variable de estudio.

Para el diseño de los puntos intermedios de las diagonales del triángulo cada uno de los sustratos me aporta el 50 % de los ART de la masa final y en el punto central del triángulo, se tomó el 33,3 % de los ART del aporte de cada sustrato. Todos los puntos se ajustaron a 120 g/L de azúcares reductores totales y para ello se completó con miel final. El cálculo de los volúmenes de sustratos a emplear en cada punto se realizó a través del balance de masa.

#### **Condiciones de Fermentación**

En la fermentación se utilizó la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (levadura panadera) seca deshidratada del tipo comercial. El inóculo fue preparado de acuerdo a lo reportado en la literatura (Fabelo Falcón et al., 1999) y se utilizó como sustrato la miel final.

La fermentación se realizó en frascos de 5 litros de capacidad, de forma anaerobia. Las mediciones fueron realizadas a las 24 horas de iniciado el proceso fermentativo.

Para el control del proceso se determinó el °Brix, en la propagación y prefermentación cada 1 hora y en la fermentación cada 2 horas, al igual que el conteo celular realizado en cámara de *Neubauer*.

#### **Métodos analíticos**

La concentración de azúcares reductores fue determinada por el método de *Eynon-Lane* y el grado alcohólico fue determinado por picnometría.

#### **Vías para asimilar una tecnología emergente.**

La posibilidad de tecnologías emergentes, es un proceso que no debe ser descartado, pues permite, si se participa en su desarrollo, lograr un rápido acceso a la competitividad de las empresas, y en ello se puede también concentrar la colaboración sur-sur, específicamente en el caso de hacer más competitiva la industria de la caña de azúcar y hacer factible el desarrollo de los biocombustibles como una oportunidad para este sector agroindustrial.

Siendo la Tecnología un conjunto de conocimientos científicos y empíricos, habilidades, experiencias y organización requeridos para producir, distribuir y utilizar bienes y servicios, se debe considerar que la Tecnología se nutre de tres fuentes distintas: del conocimiento científico, del propio quehacer tecnológico y de la práctica concreta.

La ejecución de estas tareas se refleja en el Diagrama Heurístico de la Figura 3.7.

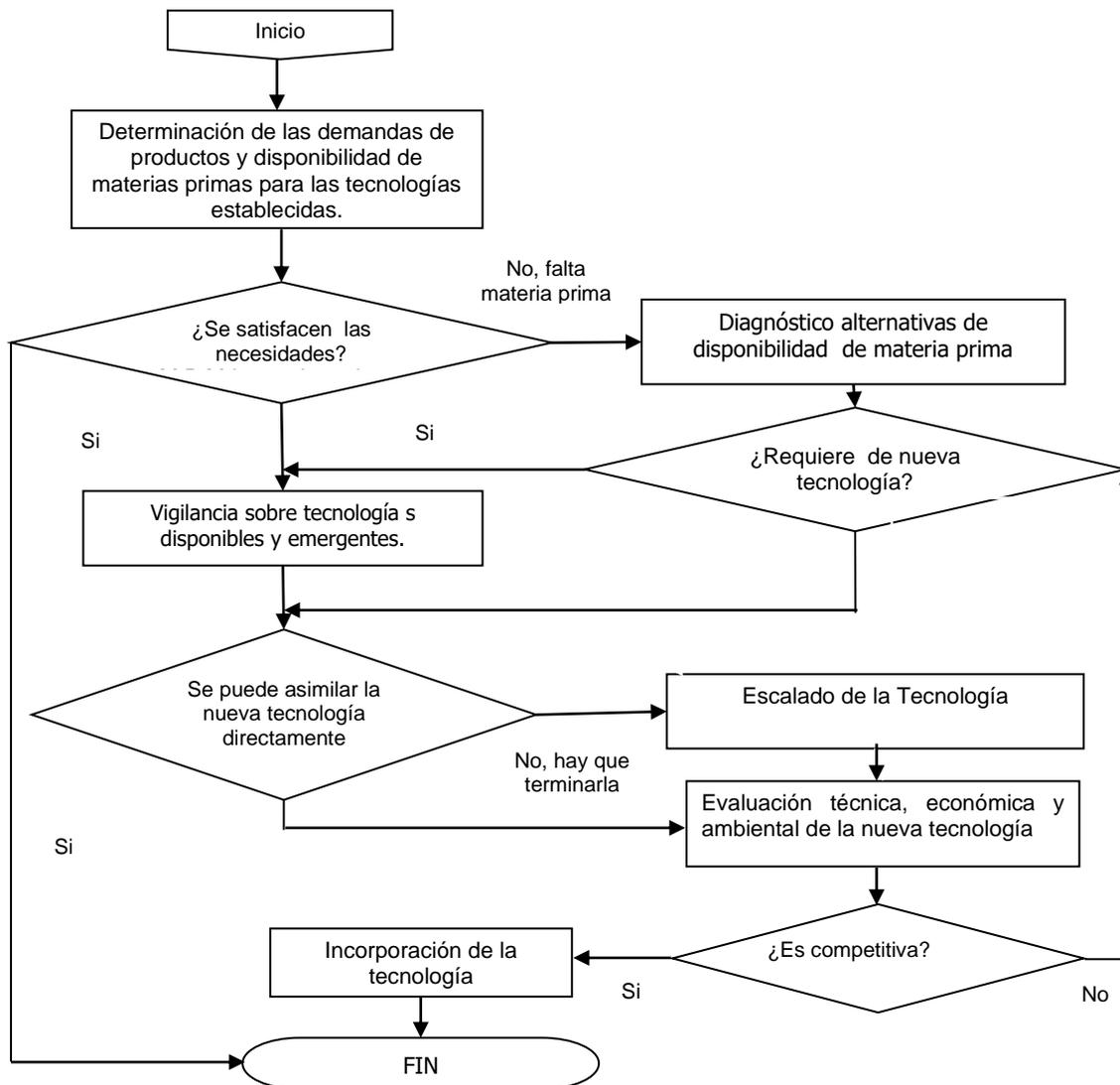


Figura 3.7. Diagrama Heurístico para el análisis de la asimilación de una tecnología.

Para ello se plantea un modelo donde el objetivo es minimizar el valor de la variable  $z$ :

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} \times x_{ij}$$

Ec. 3.43

Donde  $x_{ij}$  es la cantidad de bagazo que se transporta del ingenio  $i$  a la destilería  $j$  mientras  $c_{ij}$  es el costo de transportar una tonelada de miel teniendo en cuenta el costo del combustible ( $c_{ij} = 0.30 \times d_{ij}$ ).

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

Cada ingenio aporta todo el bagazo que tiene, moviéndola hacia alguna localización.

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = p_i \quad i = 1 \dots n$$

Ec. 3.44

Cada destilería recibe la cantidad de bagazo que demanda.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = d_j \quad j = 1 \dots m$$

Ec. 3.45

Adicionalmente:  $x_i \geq 0 \quad i = 1 \dots n$

Este modelo obliga que la demanda de bagazo sea igual a la oferta. En los dos casos que aparecen a continuación no se cumplen esta relación, para poder utilizar el modelo planteado basta introducir variables artificiales que representen o demandas adicionales u ofertas adicionales.

Si una nueva demanda es necesaria, entonces su valor será:

$$nd = \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{j=1}^m d_j$$

Ec. 3.46

Si se necesita una nueva oferta:

$$no = \sum_{j=1}^m d_j - \sum_{i=1}^n p_i$$

Ec. 3.47

Ambos modelos son optimizados utilizando el sistema GAMS con licencia académica. El método usado está basado en la programación lineal basada mezclada con ramas y cotas (Wolsey, 2000).

#### Estudio de factibilidad de las inversiones:

La tecnología reportada (Mesa et al., 2010) y empleada aquí como referencia para este estudio incluye las siguientes etapas tecnológicas: a) Pretratamiento ácido; b) Pretratamiento básico; c) Hidrólisis y fermentación; d) Concentración de etanol;

Como se comprende en una destilería instalada, en la cual se suplemente la fuente tradicional de obtención de etanol por un sistema de obtención a partir de bagazo, son aprovechables las capacidades instaladas en la etapa de concentración del etanol, por lo que las inversiones del nuevo sistema se reducirán a las tres primeras etapas.

Los costos inversionistas dependerán de las capacidades de pretratamiento y sacarificación y fermentación simultánea que se requiera instalar en cada destilería de etanol. Los costos de equipamiento se estimaron de ofertas de equipos y equipos instalados industrialmente, los valores se extrapolaron para el 2012, utilizando la idea, ya empleada en un importante estudio (Aden et al., 2002), de pronosticar el índice de costo anual para ese año, mediante la ecuación obtenida del ajuste de los datos anuales desde el 1975, que se representa en la Figura 3.8.

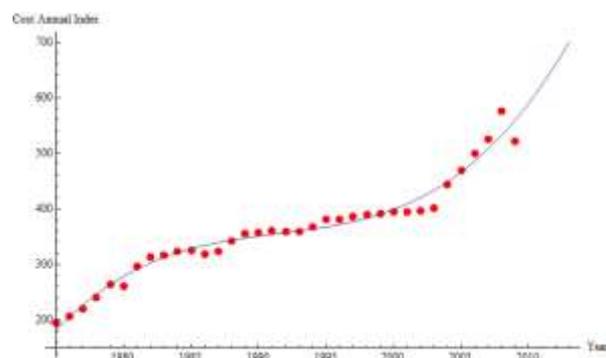


Figura 3.8. Gráfico de la evolución del Chemical Engineering Cost Annual Index.1975-2015.

Partiendo del costo del equipamiento se estiman los costos directos, indirectos y el Capital Fijo Invertido para capacidad instalada (Peters y Timmerhaus, 1991).

Para realizar el estudio de factibilidad de las inversiones, se determinaron los costos de producción asociados a la producción de etanol utilizando el bagazo como materia prima, considerando para ello los insumos materiales, energéticos y de depreciación de la nueva inversión, aspectos estos no asociados con las producciones de etanol utilizando sustratos tradicionales.

Los costos de producción se determinaron utilizando como guía la propuesta, para ello, en la literatura científica especializada (Peters y Timmerhaus, 1991) y con apoyo de los balances de materiales y energía realizados con ese propósito. En las estimaciones se minimizaron los gastos asociados a la supervisión directa, gastos operativos, supervisión directa, suministros operativos, gastos de laboratorio, todos estos incluidos en los costos de fabricación, así como los impuestos locales, y seguros, vinculados a los Cargos Fijos, y finalmente los costos administrativos de venta y financiero que determina los gastos generales, por considerar que la nueva inversión es más que nada una ampliación de la instalación existente, lo que permite una reducción de gastos en estos acápites.

En la determinación de los gastos de las materias primas se consideró los avances existentes sobre las posibilidades de recirculación de las enzimas reportados por varios autores (Gregg et al., 1998; Maobing et al., 2009) y que ha permitido avizorar las posibilidades de reciclar hasta cuatro veces las enzimas (Maobing et al., 2007) con la consecuente disminución de costos de producción.

#### **Estudio de mezcla de sustratos azucarados para la producción de etanol.**

La tabla 3.5., muestra la caracterización realizada a cada una de las materias primas utilizadas en el proceso.

Tabla 3.5. Resultados de la caracterización de los sustratos utilizados en la fermentación

Parámetro	Miel Final	Jugo de los filtros	Jugo Secundario
Azúcares reductores (g/L)	452,34	125,17	83,10
pH	5,76	5,80	5,63
°Brix (° Bx)	81,80	15,13	11,10
Pol (%)	-	11,69	9,98

La tabla 3.6. muestra los resultados obtenidos en cada experimento. Como se puede apreciar en la tabla 2 los mejores resultados son las experiencias con aportes de 33,3% ART Miel+33,3% ART Jugo Secundario+33,3% ART Jugo Filtro, estableciendo así el criterio que la corriente de jugos secundarios puede ser usada como complemento del proceso fermentativo.

Los resultados también demuestran que el jugo de los filtros es una corriente adecuada para el proceso fermentativo.

Se desarrollaron los modelos de la mezcla ternaria para el análisis del % alcohólico, el rendimiento y la eficiencia en la fermentación como parámetros respuestas. Como variables independientes se tomaron los porcentajes de ART que aportaban los sustratos: jugo de los filtros, secundario, miel y los azúcares reductores iniciales. Los modelos obtenidos fueron:

$$\% \text{ Alcohólico} = 0.5 * \text{Miel} + 0.3 * \text{JS} + 0.7 * \text{JF} - 1.6 * \text{Miel} * \text{JS} - 2.4 * \text{Miel} * \text{JF} - 0.4 * \text{JS} * \text{JF} - 0.3 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF} \quad \text{Ec. 3.48}$$

$$\text{Rendimiento} = 46.64 * \text{Miel} + 46.25 * \text{JS} + 46.41 * \text{JF} - 1.1 * \text{Miel} * \text{JS} + 17.3 * \text{Miel} * \text{JF} - 6.88 * \text{JS} * \text{JF} + 103.98 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF} \quad \text{Ec. 3.49}$$

$$\text{Eficiencia} = 72.43 * \text{Miel} + 71.84 * \text{JS} + 72.05 * \text{JF} - 1.78 * \text{Miel} * \text{JS} + 26.84 * \text{Miel} * \text{JF} - 10.7 * \text{JS} * \text{JF} + 161.94 * \text{Miel} * \text{JS} * \text{JF} \quad \text{Ec. 3.50}$$

Donde:

JS =Fracción de jugo secundario,

JF = Fracción de jugo de los filtros,

Miel = Fracción de miel final

Tabla 3.6. Resultados de cada muestra

Corrida	ART Inicial (g/L)	Alcohol (%)	Rendimiento (%)	Eficiencia (%)
JS	120,00	5,02	46,25	71,84
JS+ M	120,00	5,34	46,17	71,69
JF+JS	120,00	5,16	44,61	69,27
JF + M	120,00	5,72	50,85	78,95
J F	120,00	5,16	46,41	72,05
M	120,00	5,15	46,64	72,43
M+JS+JF	120,00	5,85	51,32	79,70

Los modelos muestran según los coeficientes de las variables independientes que la procedencia de los jugos contribuye favorablemente a las respuestas analizadas, obteniéndose mejores resultados en las formulaciones que contienen jugo de los filtros. Se aprecia además que se favorece el proceso con el uso de una mezcla de jugo secundario, jugo de los filtros y miel, como se ha analizado anteriormente. Estos resultados permiten la toma de decisiones para evaluar otras alternativas de mayor capacidad de producción de etanol con la disponibilidad de los jugos de los filtros y secundarios de la fábrica de azúcar. Estos modelos también demuestran la importancia del jugo de los filtros en la fermentación y confirman las posibilidades de emplear jugos diluidos en la fermentación alcohólica y con ello ahorrar el proceso de concentración de estas corrientes e incluso los gastos de agua en su posterior dilución, lo que indudablemente permite un impacto económico positivo.

#### **Evaluación del efecto de las extracciones de corrientes secundarias en los balances de materiales y energía de la fábrica de azúcar.**

En la Figura 3.9, muestra los valores correspondientes al efecto de la extracción del jugo de los filtros en las principales corrientes fluidas del proceso en las estaciones de alcalización y clarificación, para un ingenio que tenga una molida diaria de caña de 7 440 toneladas de caña.

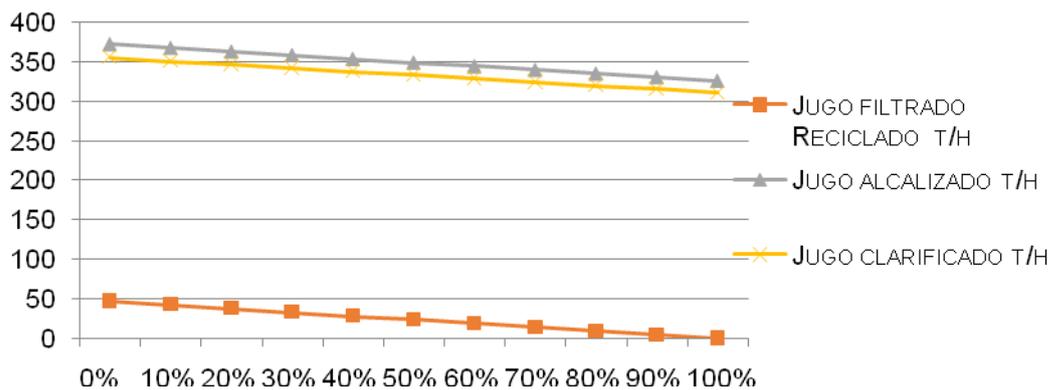


Figura 3.9. Efecto del por ciento de extracción del jugo de los filtros en las principales corrientes del proceso de fabricación de azúcar.

Se observa que a medida que aumenta el % de extracción del Jugo de los Filtros, disminuye la disponibilidad de los jugos alcalizado y clarificado.

Igualmente, de los balances de materiales y energía se pueden determinar los resultados de producción de azúcar no producida, azúcar producida y miel de acuerdo con las diferentes variantes de extracción del jugo de los filtros, Figura 3.10, en la que se observa que el azúcar producido se reduce con una total extracción del jugo de los filtros en 5,3% y las mieles producidas en 70 %. Es evidente el efecto negativo de la extracción de los Jugos de los Filtros en las cantidades de azúcar crudo y miel final a obtener. No obstante, eso puede compensarse tanto por el ahorro energético como por la posibilidad de utilizar los jugos pobres con otros destinos.

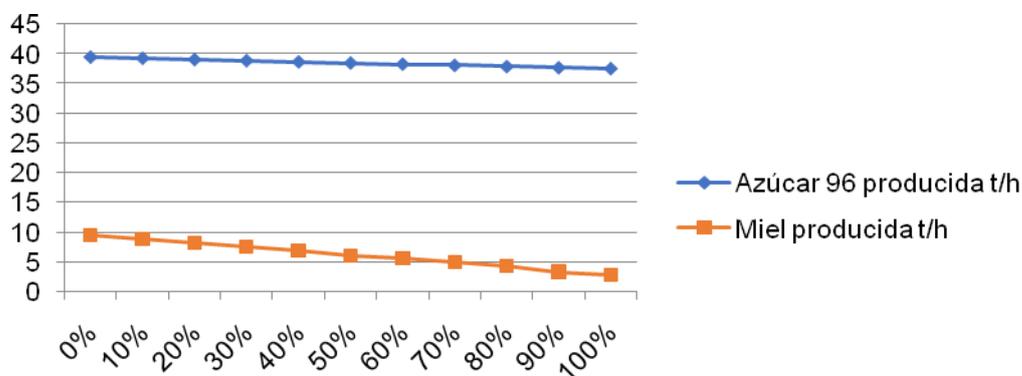


Figura 3.10. Efecto de la extracción del jugo de los filtros en la producción de azúcar y miel.

La evolución de los principales indicadores del balance energético del sistema se presenta en la Figura 3.11, de donde se deduce que la extracción de los Jugos de los Filtros aumenta la disponibilidad de bagazo para otros usos, desde 9,02 t/h hasta 13,09 t/h lo que representa un incremento del bagazo disponible de 4,07 t/h lo que es un 45,12 %, lo es debido a un sustancial ahorro de vapor, que se reduce de 173,5 t/h hasta 159,54 t/h.

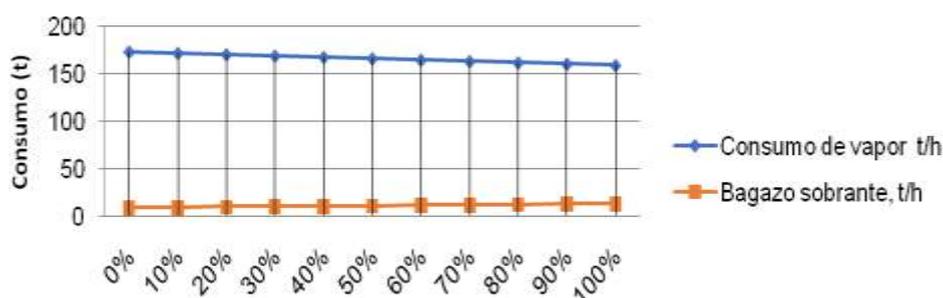


Figura 3.11. Efecto de la extracción de los jugos de los filtros en los consumos de vapor y cantidad de bagazo residual

Un análisis sobre la extracción del jugo de los filtros y el jugo diluido del último molino, en las condiciones de operación extremas, se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Condiciones de operación extremas de la fábrica de azúcar

Indicadores/alternativas (t/h)	Condiciones normales	Extracción 100 % de J. Filtros	Extracción del J. del último molino	Extracción del 100% J.F y J.U.M
Jugo Alcalizado	372,98	326,42	355,49	309,71
Jugo Clarificado	355,62	311,22	338,86	296,08
Extracción Jugo Filtros	0,00	47,42	0,00	47,42
Extracción Jugo Molino	0,00	0,00	17,49	17,49
Azúcar Producida	39,52	37,49	37,59	35,55
Miel Final	9,48	2,85	9,13	2,83
Consumo de Vapor	173,75	159,44	168,70	154,74
Bagazo Sobrante	9,02	13,09	10,58	14,43

La extracción del jugo del último molino al igual que la del jugo de los filtros, provoca una disminución del azúcar crudo de 5,14 y 4,88 % respectivamente, siendo el efecto combinado de ambos de una reducción del azúcar de 8,99 % y la miel a producir se reduce en un 70,14%, lo que debe ser considerado en el balance de mieles totales para la vinculación de las fuentes de mieles con el consumo.

Por otro lado, con estos niveles de extracción se puede incrementar la disponibilidad del bagazo sobrante en una relación de 1,60, lo que debe tener un significativo impacto no solo en la eficiencia energética de un complejo industrial que también produzca etanol, sino que abre la perspectiva de asimilar la tecnología de producción de bagazo de caña de azúcar.

#### **Análisis de la disponibilidad de sustratos azucarados al extraer jugo de los filtros y el jugo del último molino para su uso en la producción de etanol.**

A partir de los resultados anteriores se puede establecer el nivel de producción máxima que se puede alcanzar para una destilería adjunta a fábricas de azúcar de las molidas diarias de caña de azúcar empleando la extracción de los jugos de los filtros y del último molino, así como ajustando el jarabe (resultado de la mezcla de Jugo de los filtros y del último molino) para la fermentación a 120 ART sobre la base de realizar el ajuste con mieles finales.

Aquí el proceso de asimilación de la tecnología de producción de etanol con mezclas de sustratos ha tenido que adaptarse a las condiciones específicas de cada instalación industrial, debido al desbalance existente entre las capacidades de producción de las fábricas de azúcar y las destilerías de etanol anexas a cada una de ellas.

Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 6 583 t de caña por día.

La capacidad instalada de 2500 hL/d, que requieren 4 167 m<sup>3</sup> al día en la batición con 120 g/L de azúcares totales (ARD), en la destilería hace imposible satisfacer la demanda de sustratos azucarados para la fermentación en la formulación óptima que se puede determinar con ayuda de las ecuaciones 1, 2 y 3.

La alternativa será aprovechar al máximo las extracciones de los jugos de los filtros y del último molino y completar el volumen de batición requerido con mieles finales.

Así las cosas, de acuerdo con las disponibilidades se tendrán 1 336,64 m<sup>3</sup> provenientes de las extracciones y otros 2 830,24 m<sup>3</sup>, deberán lograrse con mieles finales y un insumo de agua para la dilución. Las mieles totales requeridas, para esta etapa de trabajo, 708,30 t/d, es decir 84 996 toneladas solo en tiempo de zafra, tendrán que ser completadas mediante su transportación de otras fábricas de azúcar, es decir de este total 6 932,05 toneladas serán suministradas por el propio ingenio y 78 063,95 toneladas deberán ser transportadas de otros ingenios solo para la zafra. Por tener planificada operación para todo el año se requerirán mieles totales a transportar de otras unidades de fabricación de azúcar.

**a) Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 7 750 t de caña por día.**

En este caso la capacidad de molida diaria de la fábrica de azúcar permite asimilar los volúmenes de la batición diaria con una pequeña adición de mieles, que representa para el total demandado de 12613,20 toneladas en zafra que 8 160,93 t son del propio ingenio y 4 452,27 t deben ser transportadas de otros ingenios en tiempo de zafra.

**b) Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 34 083 t de caña por día.**

En este caso, aunque la capacidad de molida diaria de la fábrica de azúcar es alta y permite asimilar los volúmenes de la batición diaria de la destilería original, la proyección de un incremento de más de dos veces de la capacidad de producción de etanol requiere altos niveles de suministro diario de mieles a la destilería para garantizar los niveles de ampliación de la capacidad previstos.

Para garantizar las mieles totales requeridas se tendrá que planificar un complejo plan de transportación de otras fábricas de azúcar de 83 889,60 toneladas requeridas para el tiempo de zafra, en el Ingenio solo estarán disponibles 37 337,77 toneladas, por lo que deberán ser transportadas de otras destilerías 46 552,23 toneladas durante el período de zafra.

**c) Caso de la destilería anexa a una fábrica de azúcar de una molida de 39 583 t de caña por día.**

En este caso, la capacidad de molida es grande y no lo es tanto la capacidad de la destilería, por ello se pueden compensar los volúmenes de la batición disminuyendo los volúmenes de extracción del jugo de los filtros, cuyo efecto está bien reportado y que permitiría un incremento en la producción de miel en el propio ingenio evitando transportaciones de otras fábricas, lo que es de interés por lo alejado de ese combinado fábrica de azúcar destilería de otras instalaciones fabriles.

El balance de azúcares reductores totales (ART) y de materiales permite estimar que se logran los resultados requeridos con un 45,33 % de extracción de los jugos de los filtros, lo que

permitiría obtener 826,77 t de mieles durante 120 días de zafra, lo que representaría una producción de mieles de 99212,41 t, superior a los 16 880,40 t que se requieren para la destilería en el tiempo que hay zafra y dejaría un total de 82 332,01 t, a ser empleadas en los días posteriores de la zafra en la destilería.

La alternativa de trabajar con una combinación de sustratos, durante los 120 días de zafra en las destilerías anexas a fábricas de azúcar, implica que siendo los niveles requeridos de miel por día de zafra, de 708,30, 105,11 y 699,08 respectivamente para las destilerías integradas a fábricas de azúcar de 790 000,00, 930 000,00 y 4 090 000,00 t de caña por zafra, son superiores a las 60,15, 70,83, 311,49 t/d, de los que se disponen, respectivamente, con extracción de los jugos de los filtros y los jugos diluidos para estos niveles de molienda; siendo, sin embargo, superior la producción de 826,77 t/d en la fábrica de azúcar de 4 750 000,00 t de caña por zafra, a las 140,67 t/d que se requieren en la destilería anexa (Tabla 3.8).

Lo anterior significa un consumo de miel durante la zafra de 198 380,40 t, de ellas, 70 191,60 t que se obtienen en las mismas fábricas y 128 188,80 t que deben transportarse desde otras fábricas, incluso durante los días de las zafras, para garantizar la producción de etanol en las destilerías cuya disponibilidad de mieles no son suficientes para los 120 días de zafra.

En la Tabla 3.8 se resume la disponibilidad y demanda de mieles por fábrica de azúcar y destilería, incluyendo la destilería independiente.

Tabla 3.8. Disponibilidad y demandas de mieles antes y después de las extracciones (B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>)

Nº	Ingenio	Disponibilidad de Miel Final		Destilería	Demanda Miel Final	
		Antes	Después		Antes	Después
1	A	144 281,25	99 212,41	A	158 626,41	63 146,43
2	B	124 233,75	37 378,80	B	317 252,80	155 568,75
	B <sub>1</sub>			B <sub>1</sub>	79 313,14	38892,19
	B <sub>2</sub>			B <sub>2</sub>	237 939,66	116676,56
3	D	78 367,50	78 367,50	-	0,00	0,00
4	E	77 152,50	77 152,50	-	0,00	0,00
5	F	46 170,00	46 170,00	-	0,00	0,00
6	G	39 791,25	39 791,25	-	0,00	0,00
7	H	28 248,75	84 99,60	H	63 450,57	27 279,42
8	I	23 996,25	72 18,00	I	255 848,97	238791,38
9	J	19 136,25	19 136,25	-	-	0,00
10	K	15 187,50	15 187,50	-	-	0,00
11	L	17 472,80	17 472,77			
12	M			Otra	122 807,56	122 807,56
	Total	614 037,80	454 947,80		917 986,31	598 992,90

En adición, para trabajar, solo con mieles otros 35 días, las tres destilerías anexas a fábricas de azúcar que planifican 155 días de producción, se requieren 121 784,16 t de miel, además otras 155 452,61 t para garantizar que la cuarta destilería planificada para trabajar 300 días al año, lo haga con una producción de 2 500 hL/d.

Para la destilería Servicios Manufactureros se requieren otras 124 362,07 t al año de miel, lo que eleva la demanda ahora requerida hasta 448 579,81 t.

En la Tabla 3.8 se exponen las disponibilidades y demandas de mieles por fábrica de azúcar y destilería sin realizar extracciones de los jugos pobres y realizando las extracciones, resalta que la diferencia, entre disponibilidad y demanda, antes de realizar las extracciones era de 303 948,51 t y se reduce el déficit a 144 045;10 t, lo que implica una reducción del desaprovechamiento de la capacidad instalada de 468 743,32 hL/año, lo que representa la producción durante 300 días de una destilería de 1 562,47 hL/d.

**d) Vinculación de las mieles entre fábricas de azúcar y destilerías.**

El problema de trasportación de las materias primas (Mieles) desde sus orígenes hasta las destilerías es causa de gastos elevados de trasportación debido a los volúmenes a manejar.

La extracción y vinculación de los jugos pobres a las destilerías brinda una ventaja adicional al tener que mover una cantidad inferior de miel desde sus orígenes hasta sus destinos, Tabla 3.8, con un gran total de reducción de 110 145.31 t por año y el consiguiente ahorro de trasportación.

Aquí, debido, por un lado, la carencia de mieles para satisfacer la demanda y por otro lado, la inversiones ya realizadas para incrementar la capacidad instalada en B, dos situaciones son factibles de estudiar, a saber: a) La vinculación de las mieles hacia toda la capacidad instalada actualmente y b) La vinculación de las mieles solo hacia la capacidad inicial de B.

Aquí son varios los problemas específicos con la misma formulación matemática, a saber:

**a) La vinculación de las mieles, con vínculo de los jugos, solo hacia la capacidad inicial de B<sub>1</sub>.**

En este caso los resultados que se alcanzan se resumen en la Tabla 3.9, en la que se observa una diferente distribución de la vinculación de las mieles y como es lógico una menor insuficiencia de mieles a trabajar con menores capacidades de producción.

Tabla 3.9. Resultados de la vinculación óptima de las mieles con extracción de jugos pobres

Ingenio/ Destilería	Magda	Pantaleón A	Servicio de Mantenimien to	Palo Gordo	Tulula	Destilación Artificial
Magdalena A	52 699,26					46 513,15
Pantaleón B			114 139,32			
Santa-Ana D					78 367,50	
La-Unión E					77 152,50	
MadreTierra F		16 783,57	8 668,24		20 718,19	
Concepción G				26 940,74	12 850,51	
Palo-Gordo H					8 160,93	
Tulula I					6 932,05	
Trinidad J					19 136,25	
San-Diego K					15 187,50	
Tierra-Buena L					17 918,65	21 325,85
CAI-Artificial						

Es significativo que aquí los costos de trasportación se hayan elevado hasta 5 221 556,04 (4 653 047,89) USD al año, lo que significa un cargo a los costos de producción de etanol de 0,025 USD/litro de etanol, de manera un incremento en los costos altamente significativo se produce como resultado del necesario traslado hasta I de mieles bien distantes.

Como se comprende, la misma formulación del problema de optimización, se puede utilizar para resolver al caso del movimiento de las sin extraer y vinculando los jugos secundarios, son dos

problemas con diferentes datos, pero la misma formulación. En los valores de los costos de transportación de las mieles son dos factores decisivos en un caso como el otro, el valor del equipamiento automotor y del combustible, por lo que una alternativa de interés es producir el combustible para la transportación de las mieles en la propia fábrica de azúcar.

**b) La vinculación de las mieles, con vínculo de los jugos, hacia toda la capacidad instalada actualmente.**

Los resultados de las condiciones óptimas de transportación para este caso se resumen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Resultados de la vinculación óptima de las mieles con extracción de jugos pobres.

Ingenio/ Destilería	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	Servicio Mantenimiento	H	I
A	52 699,26			46 513,15		
B				37 337,77		
D						78 367,50
E				30 970,93		46 181,57
F			38 184,29	7 985,71		
G			21 011,44		18 779,81	
H					8 160,93	
I						6 932,05
J						19 136,25
K			15 187,50			
L		28 406,91	10 837,59			
CAI-Artificial						87 888,06

Aquí los costos de transportación en condiciones de óptima vinculación ascienden a 4 254 337,42 USD/ anuales, lo que representa aproximadamente un cargo a los costos de producción de 0,022828 USD/litro de etanol, como se observa la solución que se alcanza contempla un déficit por carencia de mieles para aprovechar plenamente las capacidades instaladas con tiempos de operación de 155 al año de las destilerías asociadas a fábricas de azúcar y 300 días la destilería independiente de 87888.06 t/a que es inferior al que se presentaba antes del vínculo de los jugos, por con un sensible incremento en los costos de transportación.

**Evaluación de la posible asimilación de una tecnología de producción de etanol de bagazo de caña de azúcar que permita aprovechar las capacidades ociosas de producción de etanol.**

En la literatura científica en los últimos años se han reportado investigaciones sobre la obtención de etanol de residuo lignocelulósico, incluyendo la comparación de alternativas tecnológicas (Piccolo y Bezzo, 2009) también de tipo de material lignocelulósico (Sassner et al., 2008) y de tamaño de la instalación (Huang et al., 2009) que como se sabe influye en el peso relativos de los gastos inversionistas en los costos de producción e incluso a utilizar las evaluaciones económicas como una vía para direccionar la investigación y la evaluación de alternativas de desarrollo (Wooley et al., 1999) ya desde finales del pasado siglo. Estudios todos que, indudablemente, han tenido una importante expresión en (Aden et al., 2002) que reporta un trabajo integral de diseño y desarrollo de una tecnología, así como investigaciones sobre la integración de proceso en la producción de etanol de residuo lignocelulósico para encontrar su rentabilidad (Ojeda et al., 2011) por lo que al existir un déficit en la disponibilidad de sustratos azucarados para la fabricación de etanol y ser la industria de la caña de azúcar productora de un residuo sólido

como es el bagazo, fue un interés evaluar las posibilidades de los sustratos azucarados que mediante el procesamiento del bagazo se pueden obtener, para completa los déficit de sustratos azucarados que restan en el territorio estudiado aun después de la vinculación de los Jugos pobres y el Jugo de los filtros a la producción de etanol. Así en específico se consideraron los resultados reportados de obtención de un litro de etanol por cada 6,65 kg de bagazo de caña de azúcar (Mesa et al., 2010).

#### **Vinculación óptima del bagazo disponible.**

Considerando además de los consumos de bagazo para el proceso transformativo en azúcares fermentables, los insumos energéticos asociados a una producción adicional de etanol, los índices de consumo de bagazo por litro de etanol se estiman en 8,08 kg/litro, información que permite abordar la solución de dos problemas específicos, según sean la demanda y disponibilidad del bagazo.

En la Tabla 3.11 se resumen las disponibilidades y demandas de bagazo para suplir los déficits de sustratos azucarados en las fábricas de azúcar y destilerías del territorio en estudio. En las que se presentan dos situaciones, primero la necesidad de satisfacer la demanda de sustratos azucarados para la capacidad planifica total con 155 días de producción en un grupo de destilerías de etanol, lo que asciende a la necesidad de vincular 75 305,99 toneladas de bagazo a la destilería más distante del núcleo de fábricas de azúcar y un segundo caso, que es la alternativa de aprovechar la capacidad instalada durante 300 días del año, lo que requiere vincular 1 270 337,60 toneladas de bagazo a cuatro destilerías en al año.

Tabla 3.11. Disponibilidad y demandas de bagazo para etanol en las diferentes alternativas considerando las extracciones de los jugos pobres, por fábrica de azúcar y cada destilería

Nº	Ingenio	Disponibilidad	Destilería	Demanda Plan (a y b)	Demanda Cap.Instalac. (a y b)
1	Magdalena A	595 451,60	A	0,00	351 479,96
2	B	597 914,80	B	0,00	702 959,94
	B <sub>1</sub>		B <sub>1</sub>	0,00	0,00
	B <sub>2</sub>		B <sub>2</sub>	0,00	0,00
3	D	215 784,40	-	0,00	0,00
4	E	216 250,00	-	0,00	0,00
5	F	133 444,90	-	0,00	0,00
6	G	122 976,00	-	0,00	0,00
7	H	122 514,90	H	0,00	140 591,98
8	I	82 117,16	I	75305,99	75 305,99
9	J	40 921,90	-	0,00	0,00
10	K	32 315,46	-	0,00	0,00
11	L	113 428,20		0,00	0,00
12		0,00	Serv.Mant.	0,00	0,00
	Total	2 273 119,00		75305,99	1 270 337,60

#### **a) Vinculación de bagazo con Planificación de la producción con Pantaleón(a y b), con vinculación de jugos.**

Aquí la solución es muy sencilla pues la demanda de bagazo es mínima y se concentra en una sola destilería, que por otro lado tiene como disponibilidad propia el bagazo que necesita. Se aprecia entonces que combinando la vinculación de los jugos y la oferta de bagazo se puede

cubrir con facilidad la demanda de sustratos para garantizar la producción planificada, incluso que la demanda de bagazo es relativamente poca y con gastos mínimos de traslado hasta sus destinos.

En estas condiciones y considerando los resultados reportados de la investigaciones sobre la obtención de etanol de bagazo (Mesa et al., 2010) y los consumos de bagazo como soporte energético de las propias producciones de etanol que a se resumen para ambos propósitos en un insumo de 8,08 kg de bagazo por cada litro de etanol producido, se requiere la inversión en una instalación capaz de pre tratar, sacarificar y fermentar el bagazo requerido para una producción de 310,67 hL de etanol por día. Una inversión de estas características requiere la adquisición de equipamiento por un valor de 638 874,30 USD, lo que eleva el Capital Fijo Invertido hasta 1 954 398,78 USD con Costos de Producción Unitarios de 48,07 USD/hL, lo presenta los siguientes indicadores económicos dinámicos: VAN = 3 474 098,55 USD; TIR= 36 %; PRD = 3 años.

Estos indicadores demuestran la rápida recuperación de la inversión en el sistema de tratamiento de bagazo para obtener sustratos azucarados que permiten aprovechar toda la capacidad instalada durante los días planificados de operación.

**b) Vinculación de bagazo con Capacidad Instalada de la producción con Pantaleón (a y b), con vinculación de jugos.**

La potencialidad del bagazo disponible para ser utilizado tanto como materia prima de obtención de azúcares fermentables como para soportar los gastos energéticos requeridos en la operación de las destilerías en otros 145 días durante el año aconsejan realizar el estudio de transportación óptima hasta los ingenios.

Los resultados de la vinculación óptima se ofrecen en la Tabla 3.12, donde los gastos de transportación se reducen al movimiento desde una fuente de bagazo hasta una destilería de etano como destino y de dos diferentes fuentes diferentes hasta un solo destino. El resto de las necesidades de bagazo son de abastecimiento de fábricas de azúcar aledañas a destilerías, lo que no requiere gastos de transportación.

Aquí la solución para lograr el aprovechamiento total de las capacidades instaladas inversionista requiere de tres acciones inversionistas con características diferentes que deben tener cada una su evaluación independiente, a saber:

- a) Una inversión para el tratamiento de 75305,99 toneladas de bagazo en Tulula que ya fue evaluada demostrando indicadores económicos dinámicos favorables.
- b) Una segunda inversión para el tratamiento de 351 479,96 toneladas de bagazo en Magdalena, para 1450 hL de etanol diarios, con Cargos Fijos a Invertir por 4 925 546,16 que al ser evaluada demuestra indicadores económicos dinámicos favorecidos por la carencia de gastos de transportación de un VAN de 35 12 926,63 USD, TIR de 303 % y un PRD de 1 año.
- c) La inversión de una segunda planta de tratamiento, en la destilería de Pantaleón, para procesar 702 959,94 toneladas de bagazo en el año, lo que significa una instalación para 2 900 hL de etanol por día, con un 85,06 % del bagazo de la fábrica de azúcar aledaña a la destilería, lo que significa que un costo ponderado de transportación del bagazo hasta la destilería se reduciría a 0,00036 USD/kg de bagazo transportado, lo que incrementa los costos de las materias primas y se estiman los indicadores de : VAN: 45 472 069,64 US; TIR = 392 % y PRD = 1% lo que sin duda está determinado por los altos volúmenes de

producción que genera esta inversión con mínimos gastos de traslado de la materia prima.

Tabla 3.12. Resultados de la vinculación óptima de bagazo, para la capacidad instalada, utilizando extracción de jugos pobres. Pantaleón (a y b)

Ingenio/ Destilería	A	B	Serv. Mant.	H	I
A	351479,96				
B		597 914,80			
D					
E					
F		105 045,14			
G				11 265,91	
H				122 514,90	
I				6 811,17	75 305,99
J					
K					
L					
Total		702 959,94		140 591,98	75 305,99

- d) La inversión de una tercera planta de tratamiento, en la destilería de Palo Gordo, para procesar 140 591,98 toneladas de bagazo en el año, lo que significa una instalación para 580 hL de etanol por día, con Cargo Fijos Inversionistas de 2 842 433.991 USD, con un 87,14 % del bagazo de la fábrica de azúcar aledaña a la destilería, lo que significa que un costo ponderado de transportación del bagazo hasta la destilería se reduciría a 0,0013 USD/kg de bagazo transportado, lo que incrementa los costos de las materias primas y se estiman los indicadores dinámicos de VAN= 14 433 615,90 USD, TIR=129 % y PRD= 2 años.

### Conclusiones.

La disponibilidad limitada de caña de azúcar, en la región estudiada, en relación a las capacidades instaladas de destilerías utilizando sustratos azucarados tradiciones impide un aprovechamiento eficaz de estas inversiones, por lo que se requiere encontrar una o varias soluciones alternativas para ello.

La extracción de los jugos pobres de la producción de azúcar de caña, aunque limitan la fabricación de azúcar, permiten a través de una tecnología adecuadamente asimilada de mezcla de sustratos minimizar los déficit de mieles anuales en relación con la producción planificada e incrementar el aprovechamiento y volumen por instalación de producción de etanol, disminuyendo también los gastos de transportación de mieles y los costos energéticos con un incremento de la disponibilidad del bagazo sobrante por ingenio.

La asimilación de la tecnología de obtención de etanol de bagazo de caña de azúcar permitiría un balance material y energético muy favorable en el territorio analizado para la producción de etanol e incluso por la cantidad del mismo disponible para el desarrollo en condiciones energéticamente sustentables de la producción de etanol y un eficiente y un proceso inversionista de rápida recuperación en todos los caso en los que se combina el uso de jugos pobres del proceso de fabricación de azúcar con los sistemas de tratamiento de bagazo para etanol.

### 3.4.9. Estudio para la conversión paulatina de una fábrica de azúcar en bio refinería.

El estudio se enmarca en una empresa azucarera, que estableció colaboración, con el Departamento de Ingeniería Química de la UCLV, partiendo de las necesidades de reanimación y reconversión de dos plantas de derivados, furfural y tableros de fibras, con el objetivo de lograr una sostenibilidad en el mercado y una recuperación financiera de la empresa, a partir del aprovechamiento de las capacidades y las instalaciones existentes en las mismas, acorde con un procedimiento elaborado para la reconversión de instalaciones de la industria de la caña de azúcar en bio refinerías (Morales-Zamora et al., 2013; Morales Zamora et al., 2009) y con el adecuado aporte de herramientas matemáticas (González-Herrera et al., 2016).

Acorde con los propósitos de este trabajo se realizó una caracterización de todas las posibilidades de fraccionamiento del bagazo a partir de las experiencias y conocimientos obtenidos en investigaciones del laboratorio de investigaciones del referido centro de generación de conocimientos con los siguientes resultados:

Se evaluó el pretratamiento en 2 etapas, la primera (ácida) para separar la fracción xilano del bagazo y obtener pentosas para etanol u otros usos; la segunda (Organosolv) para separar la lignina (buena calidad) e incrementar la eficiencia de la hidrólisis enzimática (HE). Los principales resultados obtenidos resumen que:

Para una etapa: Concentración de glucosa en el hidrolizado por la HE del sólido insoluble en agua (C(gluc)=13,68 g/L), y el rendimiento de glucosa (g de glucosa /100 g de bagazo inicial) de 16,48.

Para dos etapas: Glucano=78,2%, xilano = 3,83%, lignina= 20,90%, recuperación =51,45%, para un rendimiento de glucosa en HE de 54,92, y rendimiento de glucosa (g de glucosa /100 g de bagazo inicial) de 22,30.

- El uso del  $H_2SO_4$  presenta resultados mejores, en la región experimental analizada, sobre los parámetros respuestas estudiadas.

- El uso de dos etapas significa un incremento en todos los resultados, así como, un incremento en el número de equipos y del valor de la inversión, por lo que se impone un análisis de alternativas técnico-económicas.

- De acuerdo con los fines que se quieran utilizar las pentosas, por ejemplo: en la producción de furfural, xilitol, etanol, se requieren cambios en las conducciones de operación del pretratamiento ácido. Para el caso de obtención de furfural: Temperatura 175-185 ° C; Relación sólido - líquido 1/1.

- Se requiere profundizar en la utilización de la lignina recuperada y en los desechos sólidos de la HE.

Partiendo de los resultados anteriores y la identificación de las posibilidades de materias primas, de las tecnologías existentes en la instalación industrial y las demandas del mercado se definieron las tareas de la investigación vienen dadas por dos estudios de análisis de proceso, de manera que permitan lograr un análisis integral, como el descrito a continuación:

**Caso 1.** Analizar las posibilidades técnico-económicas de reanimar la planta de furfural, a partir de los mejores resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento ácido de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos.

**Caso 2.** Analizar las posibilidades técnico-económicas de reanimación y reconversión de la planta de tableros de fibras, para su posterior inclusión con los residuales fibrosos de la producción de furfural y/o etanol de bagazo.

Para la ejecución del trabajo experimental tanto en el centro de generación de conocimientos, como en instalaciones pilotos construidos de forma aledaña a la instalación industrial y en la cual

se utilizaron fuentes de energía (electricidad; aire, agua, vapor) y materias primas provenientes de la propia instalación industria, así como para la recopilación de datos del proceso industrial se formaron equipos de trabajo integrados por investigadores y docentes del Centro de Análisis de Proceso y profesionales de la empresa que se superan en un sistema de postgrado académico que ofrecen los docentes del centro de generación de conocimientos (UCLV). Para ello, se valoran las siguientes condiciones en cada estudio:

**Condiciones Caso 1.**

La etapa de hidrólisis de furfural, coincide con la primera etapa de pretratamiento ácida de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos. Por tanto resulta, factible analizar preliminarmente la hidrólisis ácida del furfural, a partir de los mejores resultados obtenidos de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos (Mesa et al., 2009) (Mesa, 2009) y de variar las condiciones operacionales, con menor tiempo de reacción, que permitan obtener un residual aprovechable, y un condensado de furfural con una composición adecuada.

Al evaluar experimentalmente, los mejores resultados obtenidos a escala piloto, se obtuvo un condensado con un 2% de furfural, y con los siguientes resultados, descritos en la tabla 3.13.

Tabla 3.13. Impacto de las condiciones de la primera etapa de pretratamiento en la xilosa recuperada.  
Base: 100 gramos de bagazo seco.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Ácido (%)	S/L	Tipo Reactor	Xilosa Final	Potencial Recuperación (%)	Real Recuperado (%)
120-130	40	4	4/1	Laborat	6,755	72,89	72,89
120-130	40	4	4/1	Piloto	7,626	69,50	42,51
175-185	25	1	1/1	Piloto	12,547	49,81	4,52

Analizar las posibilidades técnico- económicas de producción de furfural, a partir de: la defectación de todos los equipos de la planta, y de un análisis de demanda-capacidad de materia prima (bagazo). Para ello, se valoran dos variantes: utilizando los tres digestores instalados y utilizando 2 de los digestores.

**Condiciones Caso 2.**

Analizar la propuesta de eliminar el secadero de túnel continuo (alto consumidor de vapor y demolido actualmente) y utilizar la prensa de vapor (discontinua). Esta propuesta, sin lugar a dudas, obtendrá un tablero de fibra con calidad inferior a los obtenidos en esa planta en producciones anteriores, pero permitirá reconvertir y aprovechar el equipamiento instalado en esta planta de derivados en producciones que aportaran a la matriz económica de la empresa. Esta propuesta requiere un análisis, de la llamada Ingeniería Inversa, en función del ciclo de prensado y de la capacidad que admite la prensa discontinua. El esquema se muestra a continuación en la figura 3.10.

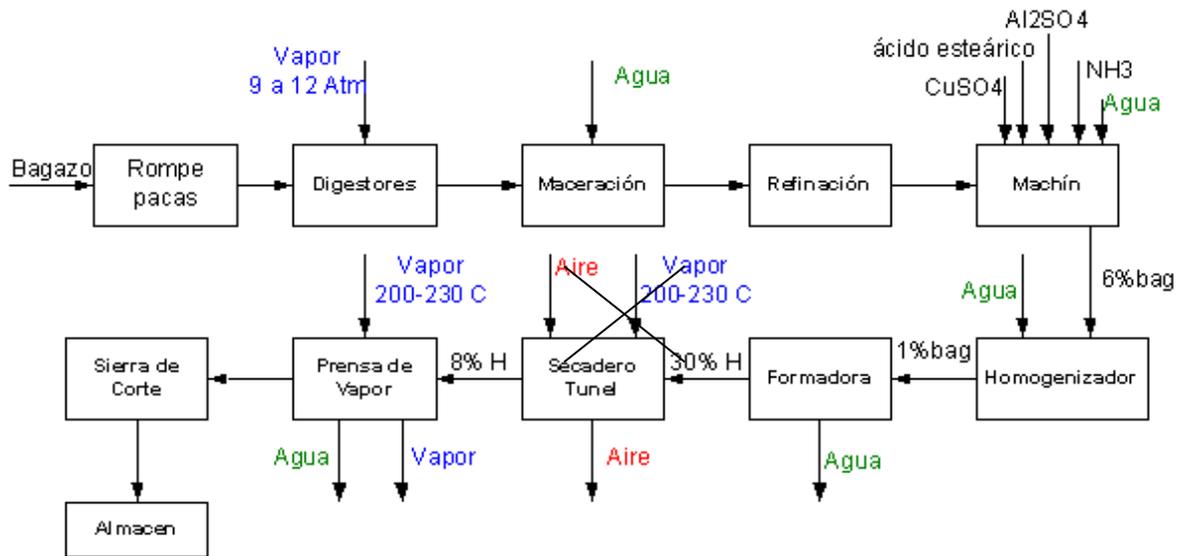


Figura 3.12. Diagrama tecnológico del proceso de producción de tableros de fibras de bagazo en la planta aledaña a la fábrica de azúcar

Se determinó, que considerando un ciclo de prensado total (carga, exprimido, secado, descarga) de 15 min, es posible una producción de 14,6 m<sup>3</sup> de tableros por día, para una producción de 62% con respecto a la capacidad real instalada.

Se realizó la defección de todos los equipos de la planta, y la determinación de los balances de masa y energía en todo el proceso determinando las principales corrientes de proceso, así como el análisis económico de la propuesta.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### Resultados Caso 1.

Se analiza primeramente utilizando la máxima capacidad de producción, donde 1 digestión equivale a la utilización de los 3 digestores. En cada digestor se alimentan, 4 t de bagazo con 50% fibra. Se obtiene, 1 t de furfural por cada 40 toneladas de bagazo, lo que representa, para las condiciones, 144 toneladas de bagazo/día.

En dependencia del esquema energético de un complejo azucarero y su eficiencia, es posible obtener de un 10-15% de bagazo sobrante, que se utiliza como combustible y como fuente de otras producciones. En la empresa estudiada, el esquema energético esta ineficiente, por tanto requiere de un análisis posterior para lograr un aprovechamiento adecuado del bagazo, que permita cumplir con las disponibilidades y suministros a las plantas de derivados.

En dependencia de la disponibilidad de la materia prima, bagazo, a continuación en la tabla 3.14, se obtienen los resultados de los balances e indicadores económicos, analizando la utilización de 3 digestores y 2 digestores en el proceso de producción; de los mismos, se demuestra que aún, disminuyendo la capacidad de producción por baja disponibilidad de la materia prima, se lograron resultados prometedores de los indicadores económicos, lo cual justifica el análisis inversionista para la posible reanimación de la planta.

Consumo de vapor en la destilación = 60,88 kgv/h.

Tabla 3.14. Principales resultados de los balances e indicadores económicos

VARIABLES	Variante 3 digestores	Variante 2 digestores
Consumo de bagazo <sub>(t/día)</sub>	144,00	96,00
Producción de furfural <sub>(t/día)</sub>	3,60	2,40
Consumo de vapor en la hidrólisis <sub>(kg/digestión)</sub>	948,72	632,48
Consumo total de vapor <sub>(t/año)</sub>	3 853,34	2716,23
Costo de inversión <sub>(\$/año)</sub>	460 317,49	460 317,49
Costo total de producción <sub>(\$/año)</sub>	1 080 308,47	749 951,53
VAN <sub>(\$)</sub>	1 209 325,37	475 939,95
TIR (%)	53,00	29,00
PRD <sub>(años)</sub>	2,30	4,20

## Resultados Caso 2.

Como resultado de los balances de masa y energía, a continuación, en la tabla 3.15 se muestran los flujos de las corrientes principales del proceso de producción de tableros.

Tabla 3.15. Principales consumidores en las etapas de proceso.

Flujos de los consumidores	Cantidad
Agua entrada en la cascada (m <sup>3</sup> /d)	1 143,07
Agua entrada en la maceración (m <sup>3</sup> /d)	194,30
Agua entrada machin (m <sup>3</sup> /d)	0,42
Agua entrada total (m <sup>3</sup> /d)	1 338,42
Agua salida formadora (m <sup>3</sup> /d)	1 352,80
Agua salida prensa (m <sup>3</sup> /d)	5,00
Agua salida total (m <sup>3</sup> /d)	1 357,80
Consumo de vapor prensa (t/día)	4,13
Consumo de vapor digestores (t/día)	2,68

Como resultado de los balances de masa y energía en las principales corrientes del proceso de producción, se obtuvo que los mayores consumidores de vapor son (prensa y los digestores) y las etapas mayores consumidoras de agua son la homogenización y maceración.

Como se observa, durante el proceso de fabricación de tableros se consumen y se vierten grandes volúmenes de agua, por lo que resulta importante recircularla, para lograr un aprovechamiento en el proceso. Por otro lado, esta instalación no cuenta con una planta de tratamiento de las aguas residuales, es por ello que se recomienda valorar estos análisis para posteriores estudios.

Del diagnóstico técnico realizado a la planta de tableros de fibras se detectaron que existen los principales equipos de procesos, no siendo así los equipos auxiliares (motores eléctricos y bombas) de todas las etapas. Se realizó la defectación y los costos de todos los equipos.

En la tabla 3.16 se muestran los principales resultados económicos obtenidos en el análisis de la reconversión con la propuesta analizada, para 14,6 m<sup>3</sup> de tableros/día, lo que equivale a 4 382 m<sup>3</sup> de tableros /año.

Tabla 3.16. Costos e indicadores económicos.

Elementos	Costos \$
Costo equipamiento (\$)	175 664,50
Costo total de inversión (\$)	767 082,78
Costo total de producción (\$)	1 286 453,18
VAN (\$)	973 598,76
TIR (%)	33,00
PRD (años)	3,80

### Conclusiones

Existen posibilidades de reanimación y conversión de las plantas de derivados de furfural y tableros en la empresa azucarera estudiada, toda vez que se logren aprovechar y adecuar las capacidades instaladas a las nuevas condiciones tecnológicas, a partir del equipamiento existente en la planta, y de una adecuada disponibilidad de materia primas y los portadores energéticos en el complejo azucarero.

A partir de la conversión en las condiciones de operación de la etapa hidrólisis ácida de la producción de furfural, es posible obtener: un residual fibroso aprovechable para la etapa de hidrólisis enzimática, de la tecnología de etanol de residuos lignocelulósicos y un condensado de furfural con una composición adecuada, para la etapa de etapa de destilación en la tecnología de producción de furfural.

Del análisis técnico–económico en la planta de furfural se obtienen resultados satisfactorios y prometedores de factibilidad económica para las dos variantes analizadas, en función de la disponibilidad de materia prima, brindando mejores resultados la variante de utilizar la capacidad instalada, con un PRD de 2,3 años.

Del análisis técnico–económico en la planta de tableros se obtienen resultados satisfactorios de factibilidad económica, recuperando la inversión en un período de 3,8 años.

### 3.5 Aplicación de métodos matemáticos que desde el diseño de procesos garanticen la calidad en industrias de procesos.

La época que comenzó a partir de la segunda guerra mundial, en función de los descubrimientos científicos fundamentales y sus aplicaciones, se califica de diferentes modos: espacial, atómica, cibernética, genética, electrónica, virtual, etc. Aunque cada una de estas definiciones tiene diversos basamentos, todos ellos apuntan hacia un fenómeno incuestionable: inclusión de la matemática en todas estas disciplinas (Sokol y Rivera, 2006).

Las estructuras formales de la matemática son creaciones ideales de la mente humana, pero, bien aplicadas, pueden ser un modelo real del mundo. Sus fundamentos (axiomas, postulados, reglas, etc.) son convencionales. Al seguir el «modelo axiomático», la matemática pura presenta perfecta coherencia y lógica en sus partes intermedias, pero en cuanto aplicada puede no corresponder con las exigencias de la realidad misma (Wittgenstein, 1967)

En la medida en que un investigador domine más campos del inmenso arsenal matemático, podrá idear, crear y estructurar modelos matemáticos para representar adecuadamente el área o el problema específico de su investigación (Martínez, 2003).

El progreso de la ciencia está disolublemente unido al reforzamiento del papel de la matemática en la elaboración de sus teorías, articulado a las relaciones y dependencias entre las propiedades y los parámetros del proceso. (González et al., 2016)

Sin embargo, el problema principal de la aplicación de la matemática está en su nivel de adecuación al estudio de las realidades sistémicas, es decir, a las realidades dinámicas que tienen gran interacción entre los elementos que las constituyen.

La necesidad de un enfoque adecuado para tratar con los sistemas se ha sentido en todos los campos de la ciencia. Así fueron naciendo todas las técnicas multivariadas de la estadística aplicada a las ciencias sociales –análisis factorial, análisis de regresión múltiple, análisis de vías, análisis de varianza, análisis discriminante, la correlación canónica, el *cluster analysis*, etc.– que se apoyan en un concepto central, el coeficiente de correlación, que es como el corazón del análisis multivariado.

Esto permitió el nacimiento de una serie de enfoques modernos afines como, por ejemplo, la cibernética, la informática, la teoría de conjuntos, la teoría de redes, la teoría de la decisión, la teoría de juegos, los modelos estocásticos y otros, y, en la aplicación práctica, el análisis de sistemas, la ingeniería de sistemas, el estudio de los ecosistemas, la investigación de operaciones, entre otros. (Martínez, 2003).

(Gargallo Bellés, 2017), devela algunos conceptos sobre la terminología a emplear en el ámbito de la modelación. En primer lugar, utiliza la expresión modelo conceptual para referirse a la hipótesis formulada sobre el funcionamiento de un sistema, la cual siempre es una simplificación de la realidad. El concepto modelo matemático es la traducción de este modelo conceptual al lenguaje matemático. Por último, se utiliza la expresión modelo numérico para hacer referencia a la implementación del modelo matemático en un algoritmo numérico, el cual utiliza un software de simulación para encontrar una solución aproximada del modelo.

Este mismo autor presenta una clasificación de los distintos tipos de modelos matemáticos aplicados los que presenta como:

1. Modelos tipo “caja negra”, son modelos empíricos basados en medidas directas realizadas en sistemas reales.

Estos modelos no prestan atención a los procesos internos que tienen lugar en él. Fundamentalmente se basan en relaciones empíricas y por lo tanto sólo son aplicables a sistemas con características similares a aquellos donde se obtuvieron dichas correlaciones y en un rango de concentraciones parecido. La modelación de sistemas tan complejos mediante este tipo de relaciones supone una representación muy simplificada de la realidad. Dentro de los modelos de caja negra se engloban diferentes tipologías, tales como regresiones lineales, ecuaciones de primer orden y redes neuronales artificiales.

Estos modelos obtenidos por redes neuronales establecen relaciones entre las observaciones experimentales realizadas sobre un número determinado de componentes de entrada y salida mediante la asignación de pesos a cada uno de los componentes de entrada. Se trata de modelos deterministas y por tanto existe una solución única para unas condiciones de entrada determinadas.

2. Modelos mecanicistas o basados en procesos, describen el comportamiento de los sistemas representando los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro del sistema y los factores que influyen sobre éstos. Son estos procesos, que habitualmente se representan mediante ecuaciones diferenciales, y sus interacciones los que determinan las características de la corriente de salida.

Por su parte, (Blanco, 2016), propone una agrupación inicial de lo que llama tecnologías blandas, teniendo en cuenta las basadas en:

- Técnicas económico-matemáticas, como la investigación de operaciones

- Técnicas de predicción matemáticas
- Técnicas y métodos estadísticos
- Técnicas de dirección y de organización
- Técnicas informáticas de búsqueda
- Técnicas contables y financieras
- Técnicas y métodos de auditoría
- Técnicas de metodología de investigación
- Técnicas y métodos de psicología industrial
- Técnicas pedagógicas

Además, menciona que todas estas tecnologías disponen de variados softwares que permiten su utilización sencilla, solo proporcionando cierta información sin necesidad de conocer sus intrínsecos matemáticos y proporcionando a los usuarios informaciones de resultados que indican claramente cómo proceder.

(Lyonnet, 1991) menciona que las cadenas de Markov son una técnica matemática que permite calcular la fiabilidad de un conjunto de elementos conectados en serie y/o en paralelo. Estos resultados permiten tomar decisiones racionales sobre la elección de la tecnología, la cantidad de redundancia para construir en el sistema, el número de estaciones de reparación, la cantidad de stock de reemplazo, etc.

Una simulación de un sistema permite estudiar un rango de posibilidades y, por lo tanto, definir una situación óptima. El método llamado Monte Carlo se puede aplicar de esta manera para estudiar la fiabilidad. Con este análisis se tiene en cuenta todas las fallas que pueden resultar del proceso de fabricación, por ende, estas herramientas son útiles para implementar una política de control de calidad total.

### **3.5.1. Calidad desde la etapa de diseño**

Estudios precedentes (Prat Bartés et al., 1998) destacan en primer lugar, que la calidad ha de venir determinada por las necesidades y expectativas del cliente y no por necesidades internas de la propia organización. En segundo lugar, se observa que el mejor momento para asegurar la calidad de los productos o servicios es durante el diseño de los mismos (Figura 3.13).

En este mismo sentido la Conferencia Internacional sobre Armonización de Requerimientos Técnicos (ICH) planteó la guía para el desarrollo farmacéutico Q8(R2), donde se enfatiza que es importante reconocer que la calidad no puede ser controlada en los productos; la calidad debe ser pensada desde el diseño.

Además, define la calidad desde el diseño (QbD) como un procedimiento sistemático para el desarrollo que comienza con objetivos predefinidos y énfasis en el conocimiento del producto y en la comprensión del proceso y el control del mismo (ICH Expert Working Group, 2009)

Para ello es necesario, por un lado, actuar sobre los proveedores para poder mejorar la calidad de los componentes no fabricados en la empresa y, por otro, la utilización de herramientas como el diseño de experimentos (DEX) o el *QualityFunctionDeployment* (QFD) para intentar que las expectativas de los clientes se introduzcan y optimicen desde la etapa de diseño y prototipo. En la etapa de producción se utiliza el control estadístico de Procesos (CEP).

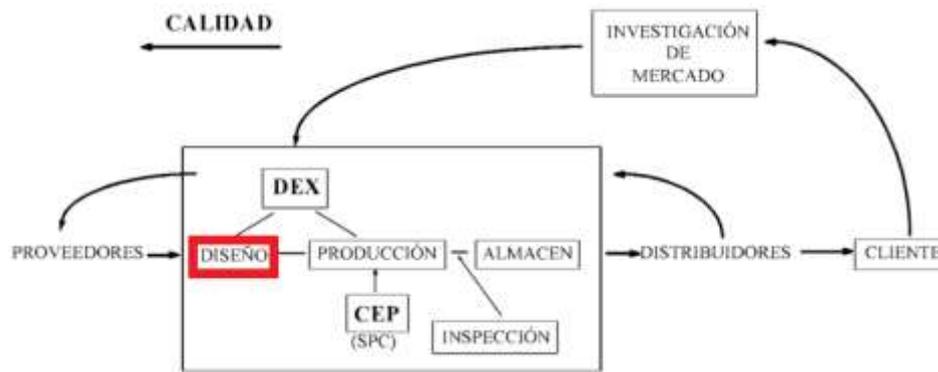


Figura 3.13 Modelo conceptual de la calidad total, Fuente: (Prat Bartés et al., 1998)

Por su parte, (Hadiyanto et al., 2007) mencionan que producir alimentos con alta calidad es un objetivo obvio para el diseño de proceso en la industria alimentaria siendo esta característica el criterio de diseño más importante para este sector. Por lo tanto, la calidad del producto tiene que considerarse como el punto de partida para el diseño de proceso y resulta esencial que los indicadores de calidad sean medibles y previsibles, ya que determinan el valor del producto y la preferencia del consumidor.

En el caso específico de la atención a la calidad desde el diseño en la industria farmacéutica, según García y colaboradores (2015), se resume en los siguientes pasos (Figura 3.14):

1. Etapa de identificación de objetivos.

De acuerdo con la definición de la calidad desde el Diseño dada por la (ICH Expert Working Group, 2009), el primer paso en su implementación es «partir de objetivos predefinidos» teniendo en cuenta las necesidades reales del cliente.

- a. Establecer el perfil del producto objetivo, el cual es construido a partir de las necesidades explícitas del consumidor y de los requerimientos reguladores que debe cumplir el producto.
- b. Definir el perfil de calidad del producto objetivo, que se refiere a los atributos cuantitativos para lograr la eficacia y seguridad deseadas para el alimento.
- c. Recopilar información sobre la materia prima, productos sustitutos o similares y el proceso, es decir, vigilancia tecnológica que relaciona la mayor cantidad de datos preexistentes, estableciendo un punto de partida que oriente la planeación del diseño.

1. Etapa de establecimiento de los requerimientos.

En términos de la calidad desde el diseño, se entiende de la siguiente manera:

- a. Determinar los atributos críticos de calidad definidos como aquellas características que después de un análisis de riesgo resultan ser necesariamente controladas. Estas se refieren usualmente al producto terminado, aunque pueden encontrarse en la materia prima y en los productos intermedios, teniendo como eje de decisión los requerimientos establecidos para los clientes internos y externos del proceso.
- b. Identificar los atributos críticos del material con una evaluación de riesgo, de manera que sobre una base científica, se establezca el impacto de las propiedades de los componentes de la formulación en el cumplimiento de los atributos críticos de calidad.
- c. Identificar los parámetros críticos del proceso y las fuentes de variación.

2. Etapa de construcción del diseño.

Define la estrategia y su optimización. En este sentido, en el diseño de procesos en la industria de alimentos lo que se realiza es:

- a. Diseñar un plan experimental para establecer las correlaciones necesarias entre los atributos críticos de calidad y las fuentes de variación en el desarrollo del producto.
  - b. Seleccionar preliminarmente el proceso tecnológico, detallando sus operaciones unitarias y la articulación entre las entradas y las salidas en cada paso.
  - c. Combinar la información disponible en la definición de los espacios de diseño del proceso por medio del diseño experimental o modelización matemática.
3. Etapa de articulación del proceso.

En términos de Calidad desde el Diseño:

- a. Estandarizar el proceso tecnológico teniendo presente el cumplimiento de los atributos críticos de calidad.
- b. Entender y asimilar la interacción del conocimiento generado para valorar correctamente el impacto de los componentes de la formulación y los parámetros de proceso en la calidad.
- c. Establecer una estrategia de control incluyendo controles a los materiales de entrada, monitorización y control al proceso, creación de un espacio de diseño para una o varias operaciones o realización de pruebas al producto terminado.
- d. Validar el proceso, es decir que el conocimiento generado durante el desarrollo del producto y del proceso sustente por sí mismo los requerimientos de la validación.

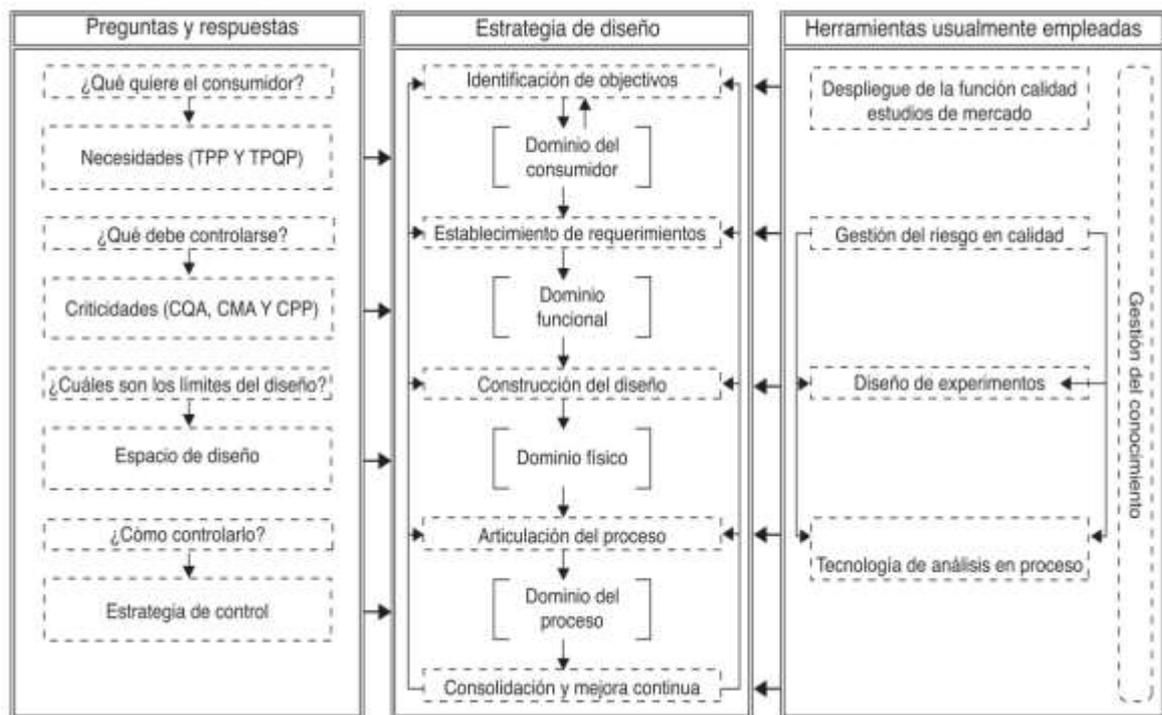


Figura 3.14. Desarrollo de producto y proceso a través de calidad desde el diseño. (García et al., 2015)

(Cerdeja-Mejía et al., 2016), se determinó la influencia de la variabilidad de los parámetros operacionales en los atributos sensoriales de la miel de caña de azúcar a través de la simulación utilizando el método de Monte Carlo de modelos estadísticos reportados por (Quezada Moreno et al., 2016).

### 3.5.2. Aplicación de métodos matemáticos para la determinación de los parámetros de operación desde el diseño de procesos para garantizar la calidad en industrias de procesos

En el caso que se aborda, se emplea una metodología para la determinación de los parámetros de operación para el diseño de procesos que garanticen la calidad desde el diseño para el caso específico de la producción de miel de caña de azúcar. (Figura 3.15) que consta de cuatro etapas:

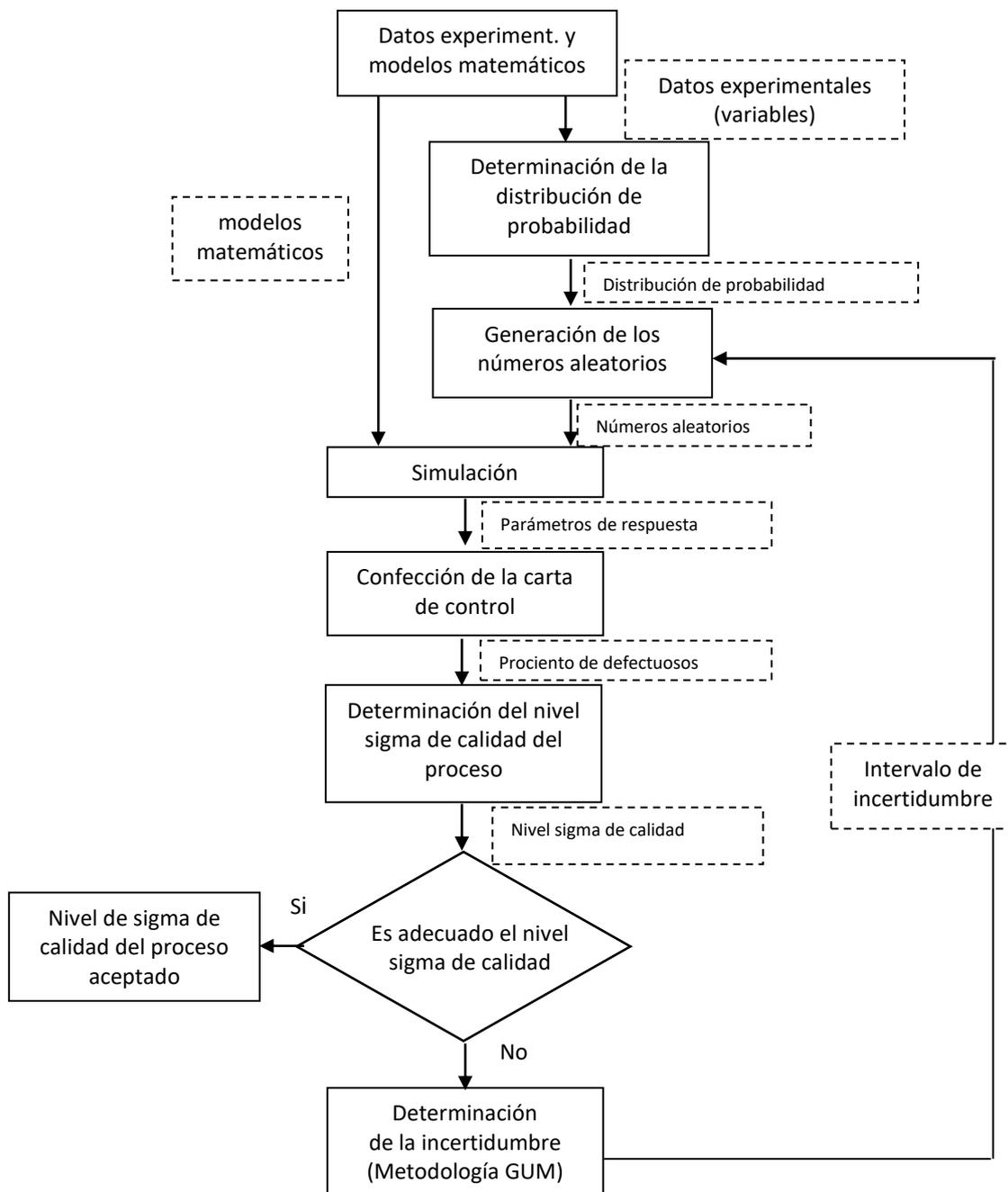


Figura 3.15. Esquema que representa la metodología aplicada

#### 1. Etapa de identificación de objetivos.

Una vez que se identifican los indicadores de calidad del producto, con un diseño experimental adecuado, se correlacionan con los parámetros de operación.

## 2. Etapa de establecimiento de los requerimientos.

Con los modelos estadísticos obtenidos, utilizando la distribución de probabilidad más adecuada, se generan valores aleatorios con el fin de simular a diferentes condiciones de operación los parámetros de respuesta del proceso.

## 3. Etapa de construcción de la carta de control.

Con las especificaciones que debe cumplir el producto, se confeccionan las cartas de control y se determina la varianza del proceso.

## 4. Etapa de articulación del proceso.

Se diseña el proceso para las mejores condiciones de operación.

Actualmente se dispone de varios métodos e instrumentos para evaluar la incertidumbre. Estos nuevos métodos cumplen con los conceptos y recomendaciones de la Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (GUM). Siguiendo la metodología establecida por la GUM (JCGM/WG 1, 2008).

Con el software Arena 7.01 se estableció la distribución de probabilidad de los parámetros operacionales, se obtuvo que los mismos se ajustan mejor a la distribución de probabilidad uniforme, este análisis reveló que los parámetros también se ajustaban a la distribución beta.

El método de Monte Carlo es clasificado como un método de muestreo, porque las cantidades de entradas que se generan aleatoriamente a partir de una distribución de probabilidad con el fin de simular el proceso de toma de muestras de una población real (Parra-Michel y García, 2012). Fue utilizado para la generación de valores aleatorios de los parámetros operacionales con las dos distribuciones de probabilidades mencionadas anteriormente.

Según Hernández (2005), la prueba de escalar de control en los paneles de evaluación sensorial establece una valoración de 6 para “Me gusta muy poco”, y 10 para “Me gusta muchísimo”, con ello se estableció los límites superior e inferior de la carta de control.

### **Resultados**

Se tomó como referencia la publicación de Quezada Moreno et al. (2016), quienes correlacionaron los parámetros operacionales °Brix y pH (valores codificados) con los parámetros de respuesta viscosidad, sabor y presencia de cristales en la miel hidrolizada de caña de azúcar.

Los experimentos fueron ejecutados con la ayuda del diseño experimental factorial 32, tomando como parámetros operacionales el pH y concentración de azúcares, en el que se obtuvieron 3 modelos matemáticos para los parámetros de respuesta como viscosidad, sabor y presencia de cristales que fueron medidos mediante análisis sensorial.

Estos modelos podían ser aplicados únicamente utilizando la codificación establecida por el autor. Con los datos experimentales reportados se recurrió al uso de la herramienta estadística RSM (*Response Surface Methodology*). Con el programa STATISTICA 8.0 y con esta técnica estadística se obtuvieron tres modelos estadísticos (Tabla 3.17) para cada uno de los parámetros de respuesta anteriormente mencionados.

Se aplicó la distribución de probabilidad beta y uniforme en el método de Monte Carlo para generar combinaciones de pH y °Brix dentro de los intervalos 3.5 a 4.5 y 76 a 78 según lo propuesto por Quezada Moreno et al. (2016). Con este procedimiento se predijo el comportamiento de las variables respuesta viscosidad, sabor y presencia de cristales beta, se cuantificó el porcentaje de defectuosos y se obtuvo un 30% 48 % y 30 % respectivamente en los valores generados con distribución de probabilidad beta.

Tabla 3.17. Modelos estadísticos de los parámetros de respuesta

Parámetros de respuesta	Modelos estadísticos
Viscosidad	$-10806.86 - 37.56 * X_1 + 0.33 * X_1^2 + 287.14 * X_2 - 1.90 * X_2^2 + 0.45 * X_1 * X_2$
Sabor	$144.68 + 115.69 * X_1 - 13.13 * X_1^2 - 9.98 * X_2 + 0.06 * X_2^2 - 0.04 * X_1 * X_2$
Presencia de cristales	$-4092.39 + 22.46 * X_1 - 3.79 * X_1^2 + 108.38 * X_2 - 0.72 * X_2^2 + 0.07 * X_1 * X_2$

Con la distribución de probabilidad uniforme el porcentaje de defectuosos en los parámetros de respuesta, viscosidad, sabor y presencia de cristales que se obtuvo fue 34%, 26% y 36% respectivamente.

se determinó los límites de incertidumbre para los parámetros operacionales simulados con distribución beta, se obtuvo en el pH los límites de la incertidumbre van desde 3.6 a 4.4, y para los °Brix de 74,6 a 77,4. Los límites obtenidos reducen los límites experimentales propuestos por (Quezada Moreno et al., 2016). Al aplicar el protocolo anteriormente mencionado se obtuvo una disminución del porcentaje de defectuosos en los parámetros de control sabor y presencia de cristales de 26% y 21%. Siguiendo la metodología anteriormente mencionada se determinó los límites de incertidumbre para los parámetros operacionales simulados con distribución uniforme, se obtuvo en el pH los límites de la incertidumbre van desde 3.7 a 4.3, y para los °Brix de 74,9 a 77,1.

Los límites obtenidos al igual que con la distribución beta reducen los límites experimentales propuestos por Quezada Moreno et al. (2016). Al realizar el procedimiento mencionado anteriormente se obtuvo una disminución pronunciada del porcentaje de defectuosos, ya que para el parámetro de respuesta de la viscosidad de 34% inicialmente calculado se redujo al 7%. En el caso del sabor de 26% se redujo al 15% y la presencia de cristales de 36% al 7%.

### Conclusiones

Se fundamenta que, aunque los métodos matemáticos contribuyen a perfeccionar el conocimiento para el desarrollo y diseño de procesos industriales aún resulta insuficiente la aplicación de estos métodos para contribuir al perfeccionamiento de estos procesos, como es el caso de la búsqueda de la calidad desde el inicio del diseño.

En el presente estudio se aplica una metodología para el análisis de los indicadores de calidad que desde el diseño de procesos garanticen la calidad en industrias de procesos y como herramienta para la toma de decisiones bajo criterios múltiples, aplicado al caso específico de la producción de miel de caña.

Se determinó durante la aplicación de la metodología descrita que los atributos críticos de calidad para la miel hidrolizada de caña de azúcar corresponden al pH y °Brix durante el proceso de evaporación.

Se determinó la correlación de los atributos críticos de calidad con las fuentes de variación del proceso a través de la simulación utilizando el método de Monte Carlo.

Se definió que el espacio de diseño del proceso corresponde a la combinación multidimensional e interactiva de las variables pH y °Brix y los parámetros de proceso tiempo y temperatura, garantizando el cumplimiento de las especificaciones establecidas para los consumidores respecto a la viscosidad, sabor y presencia de cristales.

### 3.6 Referencias Bibliográficas

- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Montague, L., Slayton, A., Lukas, J., 2002. Lignocellulosic biomass to ethanol process design y economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis y enzymatic hydrolysis for corn stover. National renewable energy lab golden co.
- Ahnazarova, S.L., Kafarov, V. V, Rep'ev, A.P., 1982. Experiment optimization in chemistry y chemical engineering. Mir Publishers.
- Blanco, L., 2016. Innovación y subdesarrollo : la paradoja de las tecnologías " blandas " en dirección. Cofin Habana 10, 1–12.
- Borrero, M.A. V, Pereira, J.T. V, Miranda, E.E., 2003. An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil. Biomass y Bioenergy 25, 287–299.
- Cardoso Romero, G., 1993. Contribución a la modelación estadística de procesos de la industria química. UCLV, Santa Clara, Cuba.
- Cerda-Mejía, V., Moreno-Quezada, F.W., Pérez-Martínez, A., Oquendo-Ferrer, H., Torres, V., Cerda-Mejía, L., González-Suárez, E., 2016. Influence of the uncertainty of the operational parameters in obtaining cane syrup in sensorial attributes, in: MOL2NET, International Conference on Multidisciplinary Sciences. pp. 1–7. doi:10.3390/mol2net-02-03897
- Cruz, R., González, E., 1999. Alternativas para la combinación de substratos en la fermentación alcohólica en la destilería anexa al CAI 'Melanio Hernández.' Rev. ICIDCA 33, 8–17.
- Fabelo Falcón, J., Rodríguez Martin, A., Martínez Mederos, L., 1999. Estudio del comportamiento de las mieles finales en la fermentación alcohólica. Cent. Azúcar 1, 34–38.
- Gálvez, L.O., 2000. Diversified production of the sugarcane agro-industry, in: O., G.L. (Ed.), Handbook of SugarCane Derivatives. ICIDCA, Havana, Cuba., pp. 3–17.
- García-Prado, R., Pérez-Martínez, A., Diéguez-Santana, K., Mesa-Garriga, L., González-Herrera, I., González-Cortés, M., González-Suarez, E., 2015. Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia 75, 130–142.
- García, O., Allejo, B., Mora, C., 2015. La calidad desde el diseño: principios y oportunidades para la industria farmacéutica. Estud. Gerenciales 31, 68–78. doi:10.1016/j.estger.2014.09.005
- Gargallo Bellés, S., 2017. Modelación de la calidad de las aguas en los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS). Aplicación a los HAFS del Tancat de la Pipa en l'Albufera de València. Tesis Dr. doi:10.4995/Thesis/10251/78215
- González-Herrera, I.Y., Rabasa-Olazábal, G., Pérez-Martínez, A., González-Suarez, E., Castro-Galiano, E., 2016. Herramienta para apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de biorrefinerías. Rev. Mex. Ing. Química 15, 943–951.
- González Rodríguez, V., 1978. Introducción a la modelación matemática de procesos de la industria química. Editorial universitaria, UCLV.
- González Suárez, E., 1982. Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartón para ondular. UCLV, Santa Clara, Cuba.
- González Suárez, E., Cardoso Pardo, G., 1994. Posibilidades de la Modelación Matemática en la estimación del efecto de las diferentes variedades de caña en el proceso tecnológico. Cent. Azúcar Año 21, 76–84.
- González Suárez, E., Cata, Y., Pedraza, J., 2006. Análisis de las variantes de integración material y energética de un combinado para la producción de aditivos oxigenados anexo a una fábrica de azúcar. Rev. Univ. EAFIT 42, 103–109.
- Goza León, O., Pérez de Alejo Victoria, H., 2003. Simulación y Análisis de los Sistemas Termo-energéticos azucareros, in: 6to Congreso Interamericano de Computación Aplicada a La Industria de Procesos, CAIP 2003. México.
- Gozá León, O., Pérez De Alejo Victoria, H., Rijckaert, M., 2002. Use of Simulation y Expert Systems to increase the energy efficiency in cane sugar factories. Dev. Chem. Eng. Miner. Process. 10, 165–179.
- Gregg, D.J., Boussaid, A., Saddler, J.N., 1998. Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields y enzyme recycle. Bioresour. Technol. 63, 7–12.
- Hadiyanto, Asselman, A., van Straten, G., Boom, R.M., Esveld, D.C., van Boxtel, A.J.B., 2007. Quality prediction of bakery products in the initial phase of process design. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 8, 285–298. doi:10.1016/j.ifset.2007.01.006
- Herrera, F., 1982. Análisis de la modelación del proceso de cocción para su control. Cent. Azúcar año 19,

- Huang, H.J., Ramaswamy, S., Al-Dajani, W., Tschirner, U., Cairncross, R.A., 2009. Effect of biomass species y plant size on cellulosic ethanol: a comparative process y economic analysis. *Biomass y Bioenergy* 33, 234–246.
- ICH Expert Working Group, 2009. ICH HARMONISED TRIPARTITE GUIDELINE PHARMACEUTICAL DEVELOPMENT Q8(R2). European Union, Japan y USA.
- JCGM/WG 1, 2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM. doi:10.1373/clinchem.2003.030528
- Kafarov, V., 1976. *Fundamentals of Mass Transfer*. Central Books Ltd.
- Lauchy, A., Llanes, L., González-Suarez, E., 2003. La incertidumbre económica en las inversiones de las plantas químicas a partir de biomasa. *Cent. Azúcar* 57.
- Lyonnet, P., 1991. *Tools of Total Quality*. Springer. doi:10.1007/978-94-011-3140-7
- Maobing, T.U., Chandra, R.P., Saddler, J.N., 2007. Recycling cellulases during the hydrolysis of steam exploded y ethanol pretreated lodgepole pine. *Biotechnol. Prog.* doi:10.1021/bp070129d
- Maobing, T.U., Xuejun, P.A.N., Saddler, J.N., 2009. Adsorption of cellulase on cellulosic enzyme lignin from lodgepole pine. *J. Agric. Food Chem.* doi:10.1021/jf901031m
- Martínez, M., 2003. Naturaleza y aplicabilidad de los modelos matemáticos. *Cuad. CENDES* 52, 177–190.
- Mesa, L., González, E., Albernas, Y., González, M., Díaz, M., Castro, E., 2009. Economic Evaluation of pretreatment alternatives for ethanol production from sugar cane bagasse, in: 17th European Biomass Conference y Exhibition from Research to Industry y Markets. Hamburg, Germany.
- Mesa, L., González, E., Cara, C., Ruiz, E., Castro, E., Mussatto, S.I., 2010. An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugarcane bagasse based on organosolv pretreatment. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* doi:10.1002/jctb.2404
- Morales-Zamora, M., González-Suárez, E., Mesa- Garriga, L., Castro, E., 2013. Estrategia de reconversión de la industria diversificada de la caña de azúcar para la producción conjunta de bioetanol y coproductos. *Rev.fac.ing.univ. Antioquia*.
- Morales Pérez, M., 1994. Determinación de las condiciones óptimas de operación y propuesta de alternativas de desarrollo del combinado de Papeles Blancos de Jatibónico. UCLV, Santa Clara, Cuba.
- Morales Zamora, M., González Suárez, E., Cata Salgado, Y., Pedraza Garciga, J., Kafarov, V., 2009. Metodología para la reconversión en las instalaciones en la industria de procesos considerando la incorporación de la producción de biocombustibles. *Tecnol. Química Edición Es*.
- Ojeda, K., Ávila, O., Suárez, J., Kafarov, V., 2011. Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production—Part 1. *Chem. Eng. Res. Des.* 89, 270–279.
- Oquendo, H., 2002. 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. Universidad de Camagüey.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., 1991. *Plant Design y Economics for Chemical Engineers, Plant Design y Economics for Chemical Engineers*.
- Piccolo, C., Bezzo, F., 2009. A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass y Bioenergy*. doi:10.1016/j.biombioe.2008.08.008
- Prat Bartés, A., Tort-Martorell, X., Grima, P., Pozueta, L., 1998. Control y mejora de la calidad. Edicions UPC.
- Quezada Moreno, W., González-Suárez, E., Quezada Torres, W., Mera, M., 2016. Cane Honey : Process , Quality y Harmlessness. *Int. J. Eng. Res.* 5, 589–593.
- Rudd, D.F., Watson, C.C., 1968. *Strategy of process engineering*. Wiley.
- Santos Herrero, R., Domínguez, E.R., Pedraza Garciga, J., González Suárez, E., 2003. Impacto de las mezclas de sustratos azucarados en la agresividad de los residuales durante la producción de etanol y levadura torula. *Cent. Azúcar* 30, 62–65.
- Sassner, P., Galbe, M., Zacchi, G., 2008. Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass y Bioenergy*. doi:10.1016/j.biombioe.2007.10.014
- Saura, G., Otero, M.A., Martínez-Valdivielso, J.A., 2005. Esquema integrado azúcar, alcohol y levadura forrajera a partir de la caña de azúcar. *ICIDCA. Sobre los Deriv. la Caña Azúcar* 39, 35–40.
- Scheffe, H., 1958. Experiment wick mixture. *J. R. Stat. Soc.* 20, 311–360.
- Sokol, N., Rivera, Z., 2006. Ciencia de la Información: un saber de relevante presencia matemática. *Acimed* 14, 1–9.
- Wittgenstein, L., 1967. *Philosophical investigations*. Basil Blackwell, Oxford.

- Wolsey, L.A., 2000. Integer programming, IIE Transactions. John Wiley y Sons.
- Wooley, R., Ruth, M., Glassner, D., Sheehan, J., 1999. Process design y costing of bioethanol technology: a tool for determining the status y direction of research y development. *Biotechnol. Prog.* 15, 794–803.
- Wright, M.A., 1971. US Energy Crisis y What Can Be Done About It. Ocean Industry.

**Nuestro pequeño aporte está en el contenido de este libro:**

La Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química y fermentativa. Planificación experimental en la investigación científica para la industria de procesos químicos y fermentativos en la gestión de conocimientos. Modelación y optimización de procesos agroindustriales en la gestión de conocimientos.



Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba  
Facultad de Química y Farmacia  
Dpto. de Ingeniería Química

